編者的話

鋼鐵是現代社會使用量最多，應用範圍也最廣的金屬材料。鋼鐵甚早就有歷史記載且有許多古文物保存至今，例如中國劍出現於數千年前，由青銅劍演變至鐵劍、鋼劍。在中華文字的“鐵” 字，明白顯示鋼鐵是金屬之王－強度最佳，乃人類文明進化史之一大發明與進步。鋼鐵因現代社會普及使用，造成一般人士有傳統產業之偏見，殊不知鋼鐵材料也隨著奈米科技發展而日新月異，如節能減碳的奈米汽車用鋼板、高強度高韌性的奈米防彈鋼板等新科技鋼材。

為使鋼鐵科技知識普及推廣於中學生及社會一般人士，國立台灣大學先進鋼鐵組織控制工程中心研究員乃精心構思，將複雜之鋼鐵學理寫成平易的科普簡冊，搭配溫馨的提示插圖以亨讀者，內容由鋼鐵與生活出發，再談鋼鐵科學知識 - 鋼鐵產品 - 鋼鐵未來展望，期望本書對鋼鐵科技知識的科普教育有些許貢獻，可以啓發年青學子對鋼鐵科技之興趣，從而投入鋼鐵科技之研究與開發應用，對台灣的經濟與國際地位有所助益。

國立台灣大學 教授
兼台灣顯微鏡學會理事長

楊哲人

發行人的話

鐵是數千年來人類不可或缺的材料，人類一路從石器時代、青銅器時代演進至鐵器時代，即可發現鐵材料在人類歷史扮演的關鍵地位，從鐵器時代初期，人類常使用的工具如刀、鐵鏟、犁等器具，到後來發展以鋼製成各種武器如刀劍，甚至後來的船隻及槍炮等。

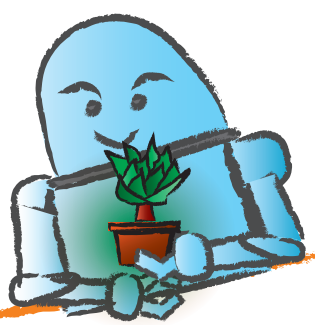
人類進入工業化時代之後，鋼鐵材料已在我們生活中扮演舉足輕重的角色，舉凡食、衣、住、行、育、樂，均可看到鋼鐵的影子，例如我們從騎馬變成了搭乘汽車，或是居住的磚瓦房變成鋼構建築等，這一切都告訴我們，鋼鐵和生活是息息相關且密不可分的，但一般民眾對於鋼鐵的認知仍相當有限，經查坊間在此方面之圖書都屬教科用書，且偏向理論為主，用詞艱深，有感於此，遂有編輯此書的理念。

本書深入淺出，從鐵的科學和演進歷史、揉合人類使用工具等多面向的介紹鋼鐵知識，並逐漸導入鋼鐵工業的各項產品及其在生活中的發展和應用，同時介紹先進材料在人類生活中的重要地位。經由豐富可愛的圖片及生動的文字，讓一般社會大眾及學生能夠一窺鋼鐵知識之堂奧，不再顯得陌生，為國內少有融合鋼鐵產業及材料科學之科普書籍。

最後，要感謝擔任總編輯的台大材料系楊哲人老師，除長年協助鋼鐵產業發展外，更在鋼鐵科普的推廣上盡心盡力;另外，也要感謝中鋼研發處已退休之陳組長煌淙博士、基金會同仁以及退休志工，他們協助編審並經 3 年左右的蒐集相關資料，才能讓此書臻於完善。

中鋼集團教育基金會
董事長

鄒若齊



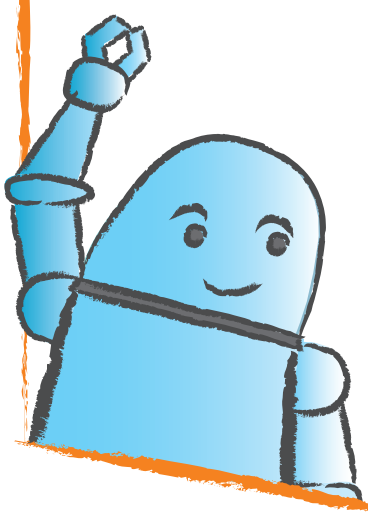
目錄

第一章-簡介

1-1 鋼鐵與生活 4
1-2 鋼鐵的歷史 26
1-3 鐵的科學 36
1-4 鋼的科學 48
1-5 顯微結構觀察與性能檢測 72

第二章-厚板

2-1 厚板產品的應用 98
2-2 厚板產品的製程 108
2-3 厚板的先端科技 116



第三章-薄板

3-1 薄板產品的應用 124
3-2 薄板產品的製程 132
3-3 薄板的尖端科技 141

第四章-條線

4-1 條線產品的應用 152
4-2 條線產品的製程 164
4-3 條線產品新進展 170

第五章-不鏽鋼

5-1 鋼鐵防鏽 176
5-2 不鏽鋼的原理 178
5-3 不鏽鋼的種類特性 182

第六章-展望

6-1 鋼鐵的未來 190
6-2 節能科技 192
6-3 環境的保育 200
6-4 鋁合金和鈦合金 208

鋼鐵與生活

Steel and You

第一章
鋼鐵的簡介

章節概要

在本章，我們在 1-1 鋼鐵與生活 中簡單介紹鋼鐵在生活中的應用、在現代生活中的地位。接著在 1-2 鋼鐵的歷史 中，了解人類的漫長歷史中，鋼鐵是如何變成人類最重要的材料之一。

1-3 鐵的科學 中，我們會簡單的了解從鐵原子到鐵金屬的科學。 1-4 鋼的科學 則說明，現代科學為了瞭解鋼鐵與其性質，所發展的各種科學。

最後 1-5 顯微組織結構觀察與性能檢測 ，我們將了解科學分析的原理、技術。

1-1 鋼鐵與生活

Steels and Life

鋼鐵於生活

古代我們住在洞穴、磚瓦屋子和木房子裡頭；現代生活的都市人則大多生活在**鋼筋**水泥或者**鋼構**樓房裡頭。

換而言之，我們住在鋼鐵裡頭。

▲ 在捷克布拉格，可見保留完整之磚瓦建築。

▲ 現代台北的一隅。大多數都市人居住的房子，不是以鋼筋水泥所建成，就是鋼構築成的大樓。

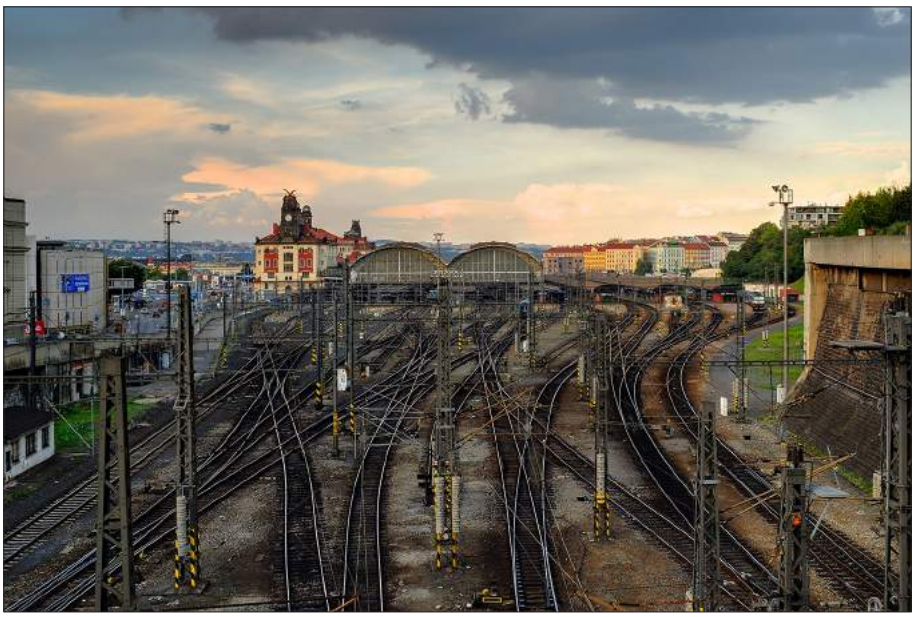
人們要旅行，原本只能靠著雙腳行走、或者是騎乘馬匹；而現代人則仰賴各式的交通工具：腳踏車、機車、汽車、公車和火車等等。此外，大型橋梁和隧道的建造也讓我們能夠克服地形阻礙。

可以說，我們是因爲鋼鐵才能迅速便利地移動。

▲ 台鐵蘇澳站，正在切換軌道的列車

▲ 日本北海道的公車

▲ 賓士轎車



▲ 捷克布拉格的 Praha hlavní nádraží 火車站

▲ 連接雙北的中正橋夜景車軌。現代人之所以能迅速地在各處旅行移動，是多虧了各種鋼鐵製成的交通工具，以及各種大型運輸建築。

不管是大型建築、橋梁或其他公共設施等等，鋼鐵豐富的可塑性也讓更多藝術家的想像成爲眞正的藝術品。

可以說，鋼鐵讓我們的世界變得更美麗。

▲ 跨年時的英國倫敦眼　　提供 / 簡良芸

▲ 淡水漁人碼頭夜景

▲ 法國龐畢度中心大量運用了鋼鐵，成爲著名景觀　　攝影 / 顏妤庭

▲ 東京天空樹　　攝影 / 謝亦傑

▲ 七堵車站。鋼鐵的可塑性也讓各種大型公共建築成爲生活周遭美麗的藝術品。

鋼鐵也藏在不爲人知的地方，默默地擔任運輸人類生活必需品的工作。因爲有貨櫃，才有現代的海運及全球化世界；因爲有大型輸水管、電塔、天然氣槽和大型變壓器，才能支撐得起現代的生活所需。

總言之，有了鋼鐵才有了生活。接下來，就讓我們來一起了解鋼鐵吧！

▲ 變電所

▲ 台北汐止的自來水處理場

▲ 鋼鐵也幫助我們運輸各種如貨物、飲用水、石油、天然氣、電力等等生活必需品。

▲ 蘇澳儲油區的運油管線

▲ 位於台北市的瓦斯儲存槽

▲ 台北八里的台北港

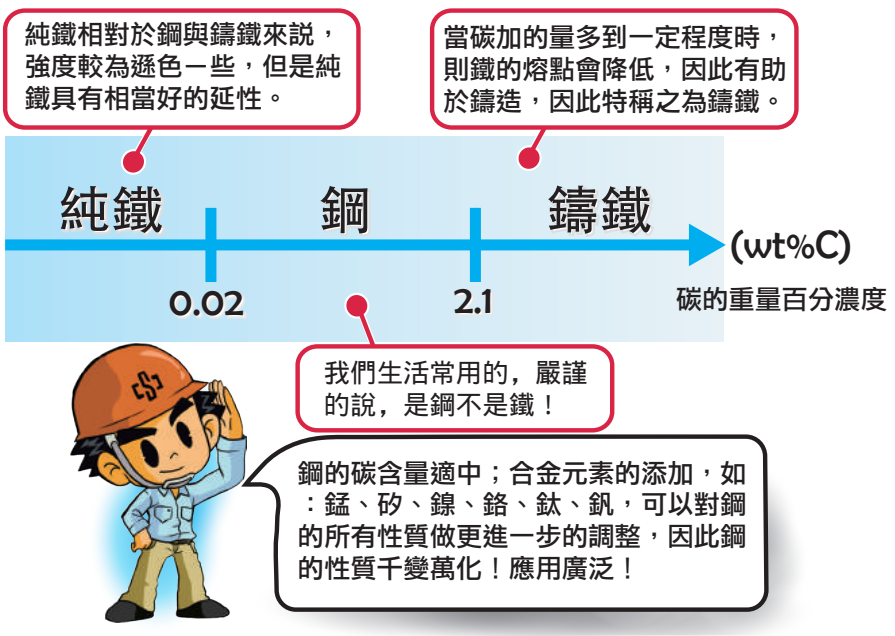
鐵與鋼鐵

俗話說：「恨鐵不成鋼」。

鐵 (iron) 和鋼 (steel) 的差別是什麼呢？

在鋼鐵科學上，鋼和鐵的差別是在於碳含量。鐵，如同水溶了鹽、糖等等一樣，也可以溶解許多合金元素，形成鐵的混合物。

而科學家發現：碳，是影響鐵的物理性質當中，最重要的合金元素。因此，爲了工程上辨別的需要，科學上嚴謹的定義了不同濃度之鐵碳混合物的名稱。



「純鐵」或者「鐵」(iron)，指的是不刻意添加任何合金元素，含碳量小於 0.02 重量百分濃度 (wt%) 的鐵合金，而「鋼」(steel) 則是指碳含量介於 0.02 和 2.1 wt% 之間的鐵合金，此外，若碳濃度高於 2.1 wt%，則稱之爲「鑄鐵」(cast iron)。

由於鋼具優異的性能，鋼的使用是所有類別的鐵碳混合物中最廣泛的！

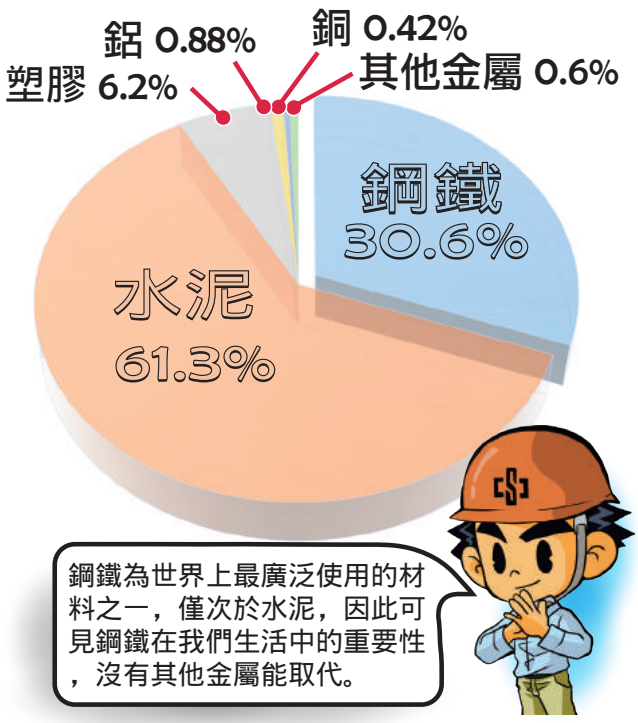
一般人常常將鐵、鋼混用。但事實上，鐵與鋼的性質有極大的差異。純鐵很軟，一般運用較爲困難。而鋼的機械性質則十分容易隨著不同的需求調整，例如高強度、高延性或高韌性等等進行調整。

事實上，我們常接觸的材料，其實是「鋼」而非「鐵」。然而，鐵元素是鋼中最主要的合金元素，因此本書一律統稱爲「鋼鐵」。

鋼鐵與其它工程材料

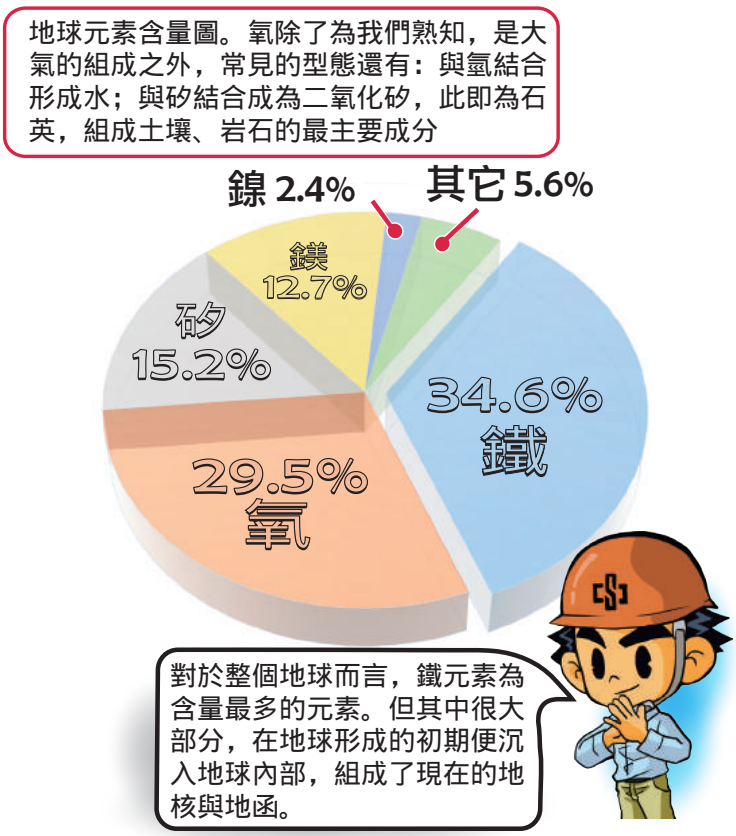
如果將世界上（2009 年），所有工程材料一年的使用量統計出來，那麼我們可以發現，世界上消耗最多的材料是水泥，其次才是鋼鐵、再來則是工程塑膠，其他材料的使用量則相對很少。

此外，我們仔細觀察可以發現鋼鐵的使用量爲鋁（下一個消耗量最大的金屬）的 35 倍！由此可見，鋼鐵在工程使用上的重要性是無可取代的。



鐵在地球裡的分布

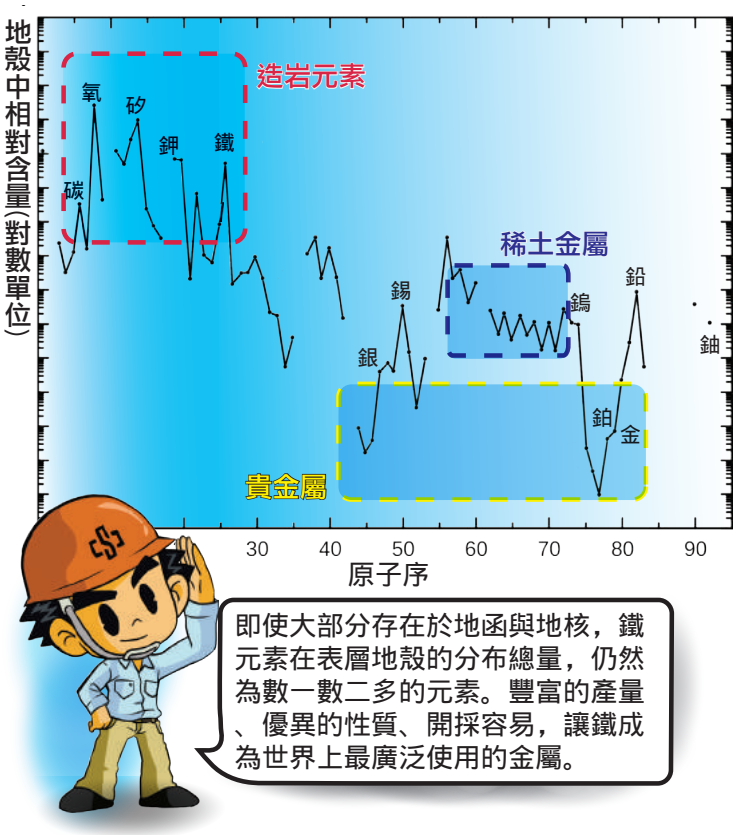
爲什麼在生活中最廣泛使用到的是鋼鐵呢？除了優異的性質外，鋼鐵可100% 回收利用、較符合環保和永續經營的目標。更重要的理由則是：鋼鐵當中最主要的合金元素是鐵，且整體地球而言，鐵是含量最豐富的元素。從圖表中我們可以看出：鐵元素占了地球整體質量的 34.6%，和其它元素相比，高出許多。



鐵在地殼中的分布

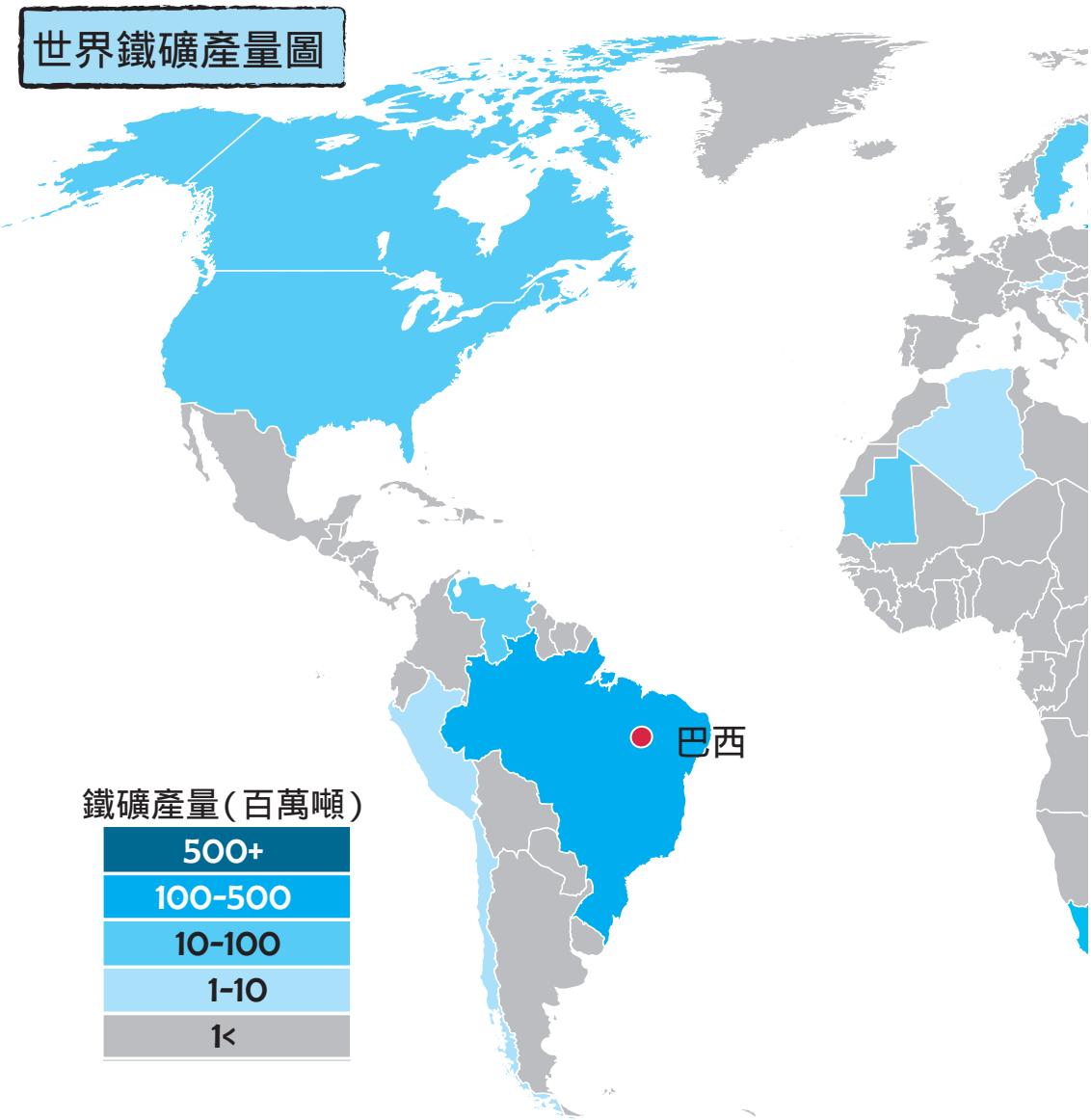
地球由內而外可以分爲地核、地函和地殼。由於地核和地函中的鐵含量甚高，尤其地核約有 80% 以上是由鐵組成，因此相對而言，在地殼當中，鐵並非含量最多的元素。

表層地殼中各個元素的相對含量如下面圖表所示。雖然鐵在地殼中的含量排名，在所有元素中並不是最多的，但和其他工業中常用金屬相比，例如鋁、鈦、鎳、銅等等，鐵在表層地殼中的含量仍具有數一數二的地位。由於鐵礦豐富、開採相對來說較爲便宜，促使鐵在我們生活中能被廣泛地使用。



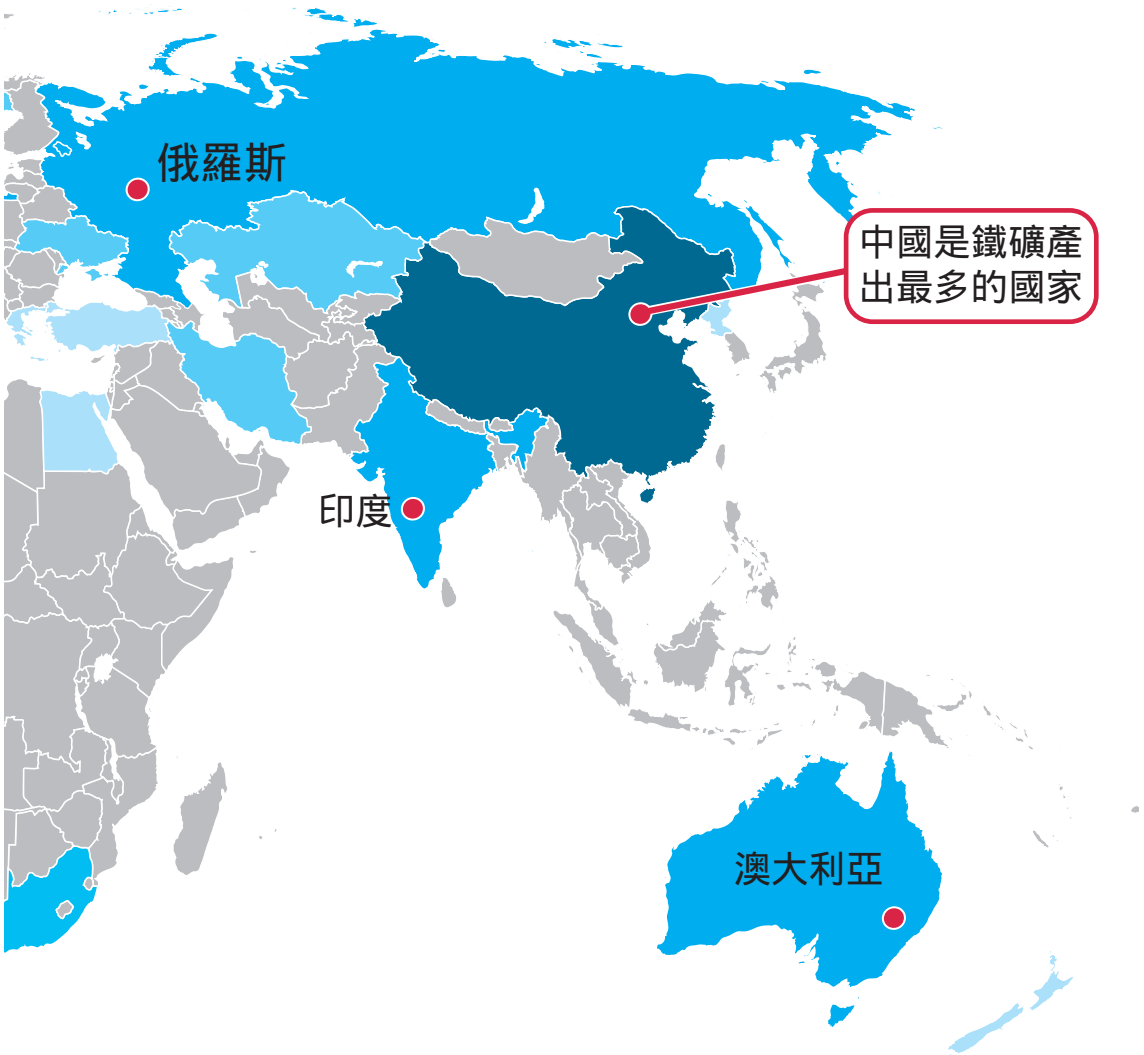
採鐵礦的國家們 - 鐵礦石的產地

雖然鐵在地殼當中十分常見、容易開採。但並不代表到處都能夠採鐵礦。若要符合開採的經濟效益，必須考量距離市場的遠近、運輸建設的成本等等的經濟因素，所以鐵礦的開採地通常是在鋼鐵需求強勁、礦脈集中和開採成本便宜的地區。大部分的先進國家，如西歐地區、東北亞的日本、韓國或者台灣，開採鐵礦幾乎不符合經濟效益。



全球鐵礦的年產量約爲 180 億噸（2011 年）。產量最大的是中國，每年產量高達 58 億噸，幾乎占了全球三分之一的產量。第二名是巴西，每年鐵礦產量約爲 30 億噸，緊接著是澳洲、印度和俄羅斯。

配合前述的數據，我們不難發現：目前正值經濟快速發展期的金磚四國：巴西、俄羅斯、印度和中國都躋身鐵礦產量前五大國。鐵礦除了能供應自身的工業發展需求，出口賺取外匯也促進了資本累積和經濟成長。



▲ 世界鐵礦產量圖。

其它原料：石灰石、煤礦、廢鋼

除了鐵礦石之外，冶煉鐵礦的時候，還需要其他的原料：其中最重要的就是石灰石（limestone）以及煤礦（coal）。石灰石的目的是要「造渣」，而煤礦最主要是提供碳，讓氧化鐵進行還原反應。此反應也可以提供熔煉所需要的大量熱源。

▲ 中鋼公司的原料碼頭。

▲ 回收再利用的 H 型鋼。

廢鋼也是煉鐵常用的原料之一。

通常鐵礦石、石灰石、煤礦等原料用於高爐 (Blast Furnace)，廢鋼則是電弧爐 (Electric Arc Furnace) 的主要原料。

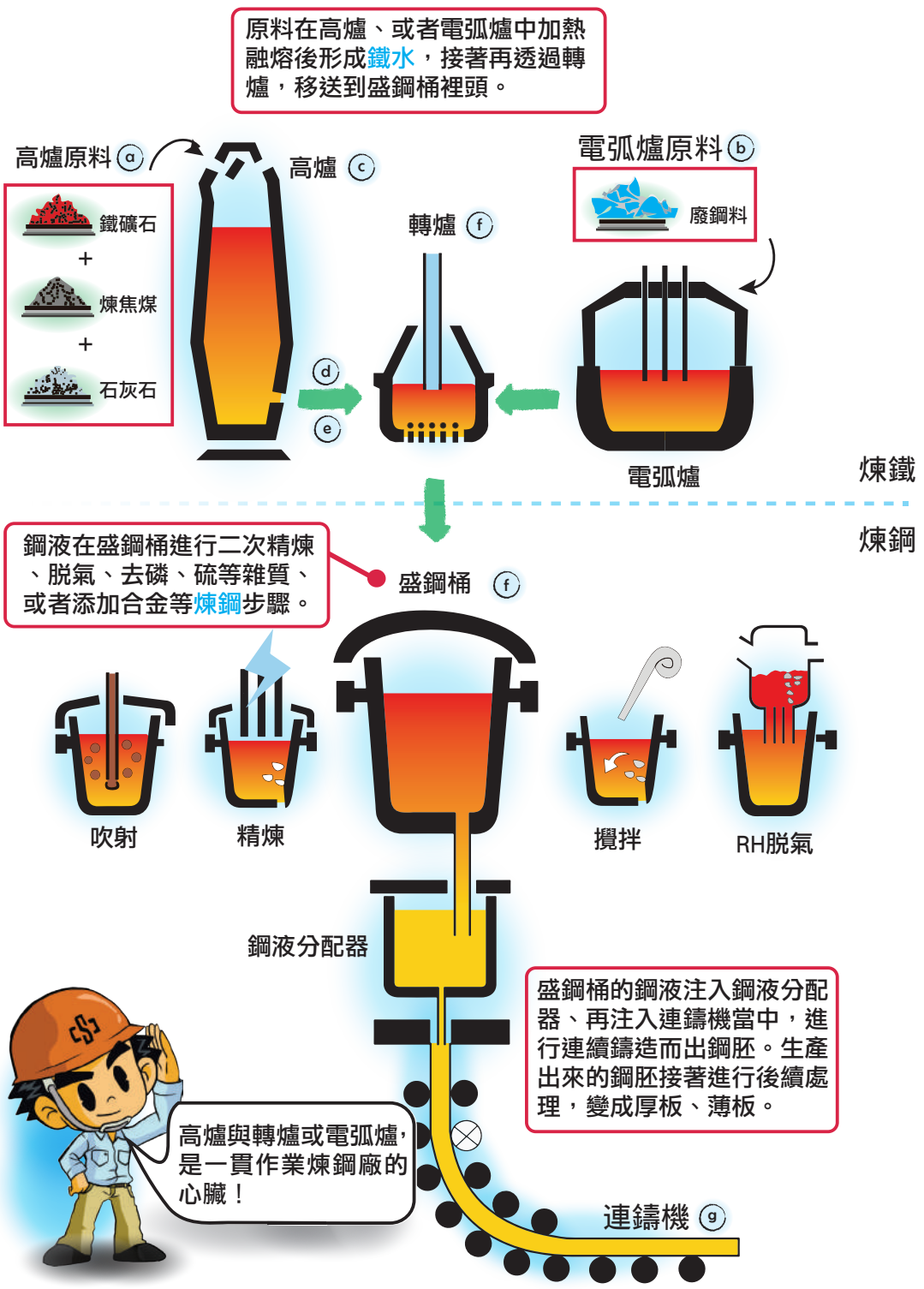
煉鐵與煉鋼

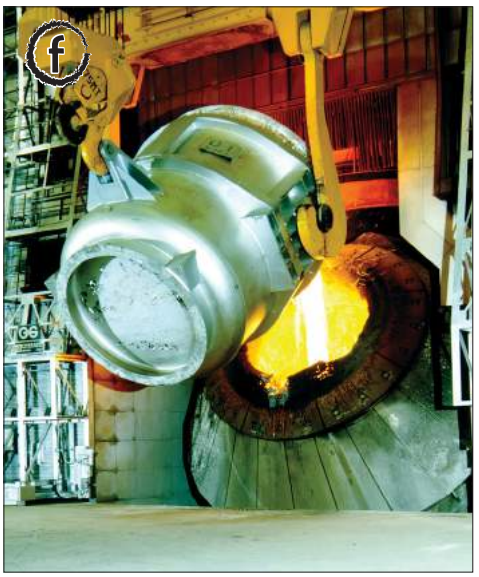
富含氧化鐵的鐵礦砂，必須經過「高爐煉鐵」的冶煉程序之後，還原成爲鐵水，才能夠進行後續的生產程序；而「電弧爐」的原料是廢鋼，是將廢鋼原料加熱至溶點，產出鐵水來。鐵水則透過轉爐後再進入盛鋼桶，進行後續「煉鋼」的動作。

▲ 圖爲中鋼公司四號高爐。中間高高的便是高爐。由左邊斜上的坡道即爲原料輸送帶。高爐煉鐵出的鐵水則透過 ◀ 魚雷車負責承接、並運送至轉爐。

▲ 圖爲高爐還原出的鐵水。溫度很高，因此工人需身著太空衣避免熱輻射傷害。

煉鐵煉鋼一起來 - 一貫化作業鋼廠





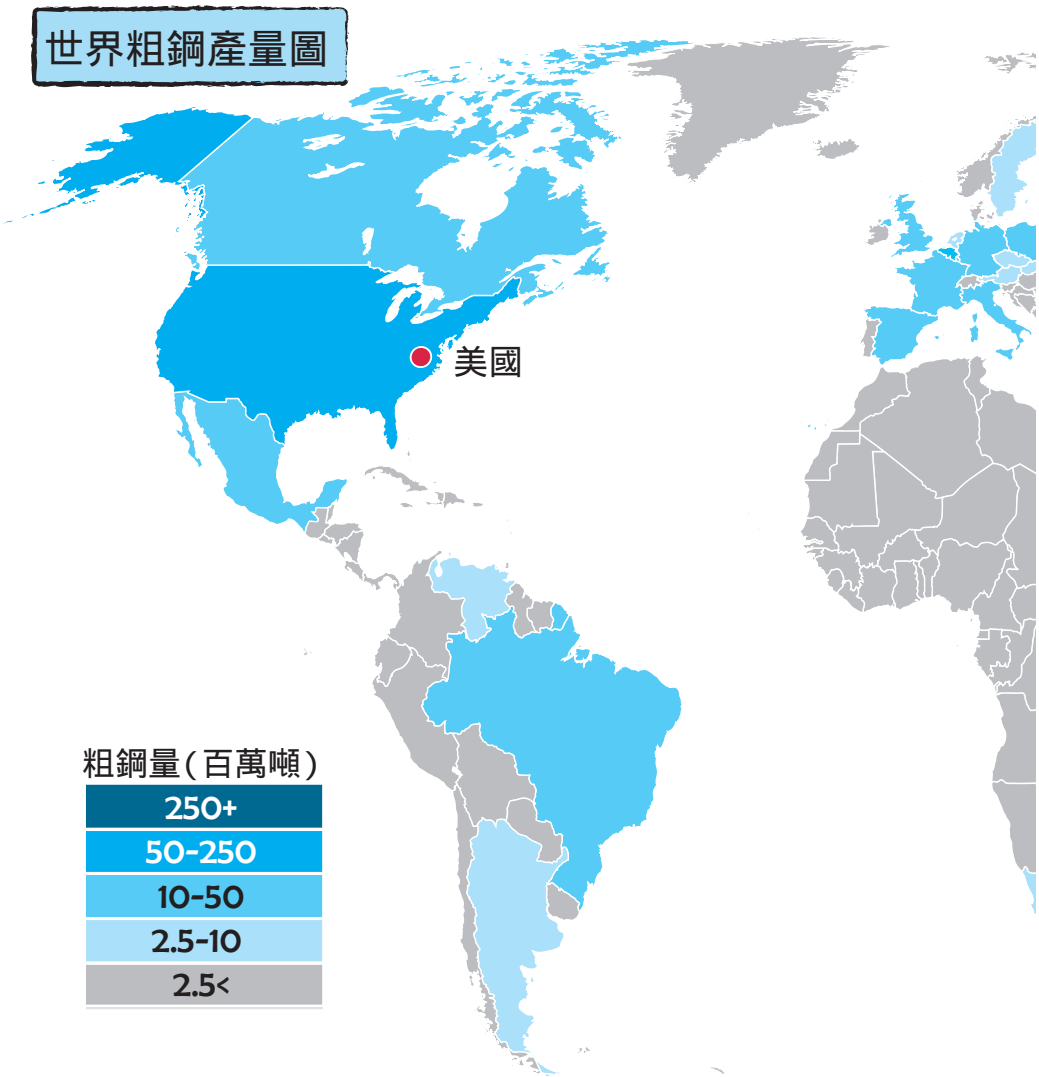
▲ 轉爐將鐵水送至盛鋼桶

▲ 火紅的鋼胚由連續鑄造機（中上方）產出

煉鋼的國家們

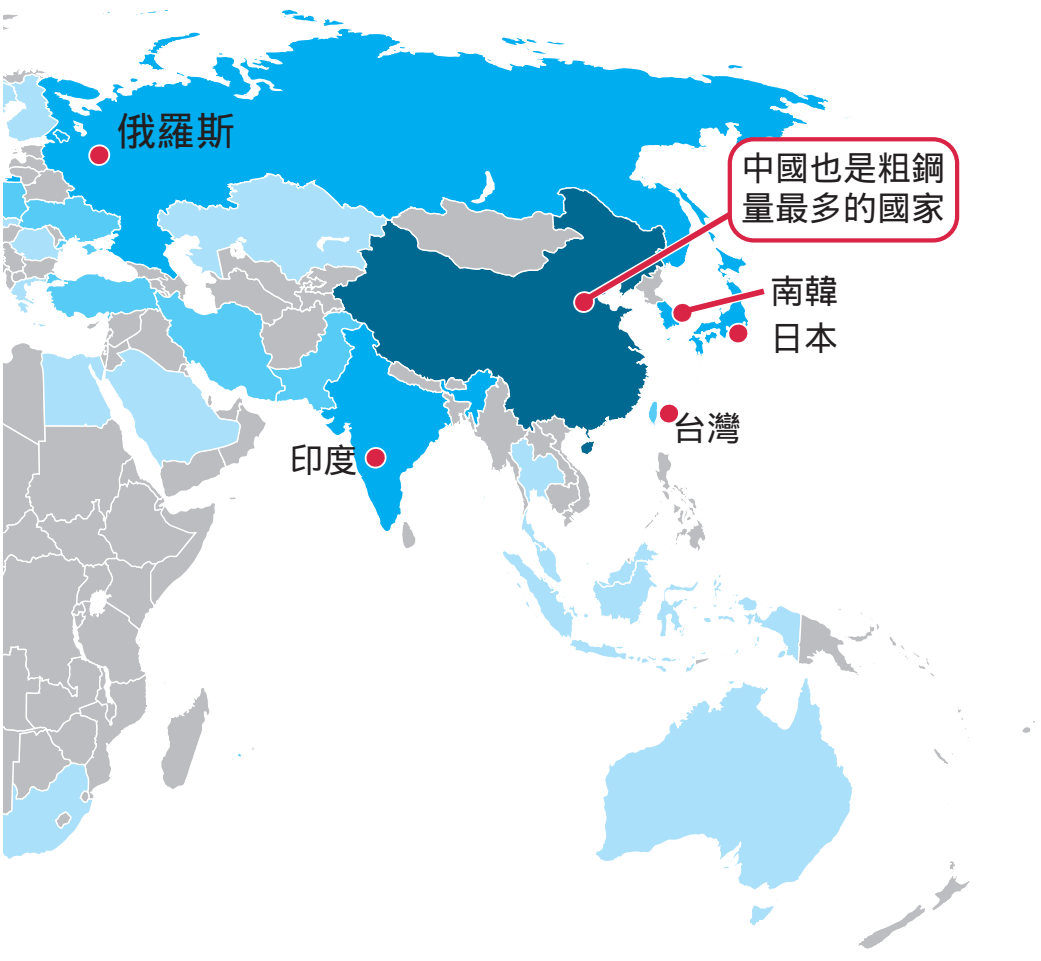
鋼鐵產業必須要大量的原料作源頭；開採較少或者不開採鐵礦的國家，如台灣、日本和韓國等等，都必須仰賴外國進口原料。因此單以鐵礦的產出，並不足以表達國家的鋼鐵工業和經濟實力。

下圖是全球**粗鋼量**年產量圖。由於鋼鐵的生產是邁入先進國家的必要條件，因此我們可見，工業發達的先進國家，如歐洲、美國以及南韓、日本等，鋼鐵的粗鋼量都較高；而發展中的金磚四國，鋼鐵產量大，主



要提供自身基礎建設用。

台灣目前的（2011 年）粗鋼量約爲 2000 萬噸，排名爲世界第十二名。而自鋼鐵廠產出的鋼鐵，往往是台灣許多中小型加工業的原料來源。據估計，台灣鋼鐵相關產品總產值超過一兆台幣，由此可知台灣社會對於鋼鐵產業的依賴之深。



▲世界粗鋼產量圖。

欸～我要買哪個鋼鐵？

實際上，我們市場上所能找到的都已經是鋼鐵經再加工製造後的成品了。買鋼板、條鋼都是加工廠的事。

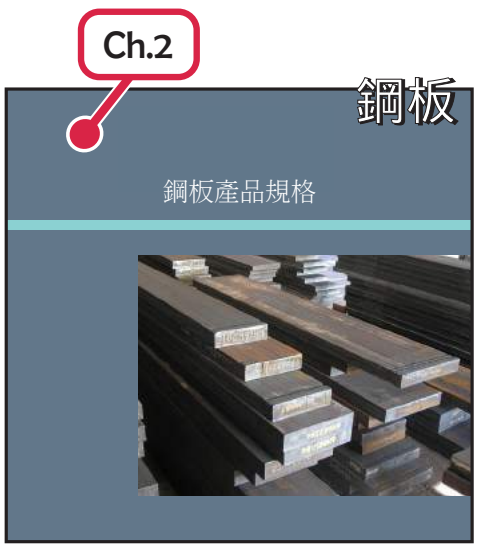
而爲了更加了解鋼鐵，我們可以從這些廠商拿到的規格表出發：

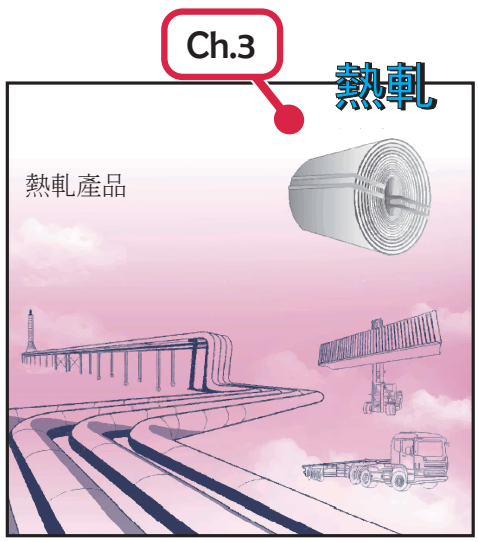
規格表中一定會附有鋼鐵內部的**化學成分**，顯示了化學成分是影響鋼鐵應用的重要指標。此外，大部分的規格還附有**機械性質**，代表絕大多數的鋼鐵都是應用其力學性質。我們將在第一章介紹鋼鐵的科學以及機械性質的原理。

Ch.1

取自中鋼公司、
ABS(2012)普通強度級船用鋼板－Grade B

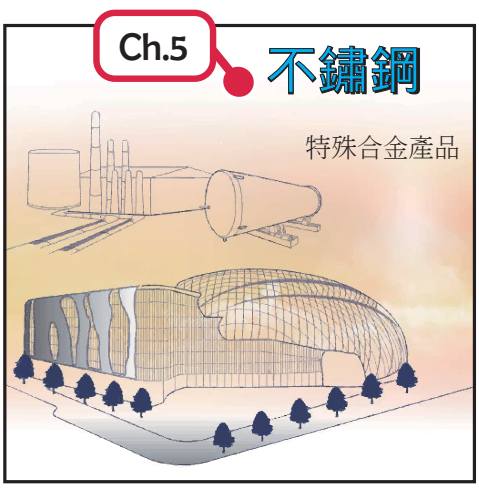
化學成分(wt%)					機械性質:拉伸試驗			機械性質:衝擊試驗	
C	Si	Mn	P	S	降伏強度(MPa)	拉抗強度(MPa)	伸長率(%)	試驗溫度	吸收能平均值(J)
<0.21	<0.35	>0.80	<0.035	<0.035	>235	400~520	>22	0	27

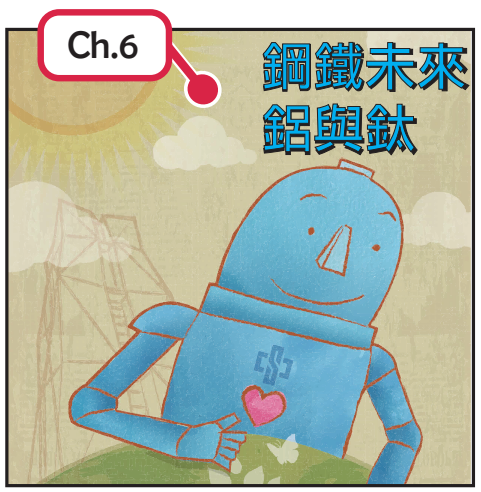




由於最終產品形狀的不同，規格書常常是以鋼鐵的**形狀**區分，如鋼板、熱軋、冷軋板和條鋼；另外一種則是以**成分**區分，如碳鋼及不鏽鋼。我們依此來分章節和介紹這些鋼鐵。

最後，第六章讓我們來了解鋼鐵的未來趨勢，及其替代材料。





1-2 鋼鐵的歷史

History of Steel

人類的歷史

在了解鋼鐵的科學之前，我們先學習發現鋼鐵、應用鋼鐵的歷史。

人類的歷史和人類使用的工具與材料息息相關。因此歷史學家依據人類所使用的工具，將古代人類分成：舊石器時代、新石器時代、青銅器時代和鐵器時代。

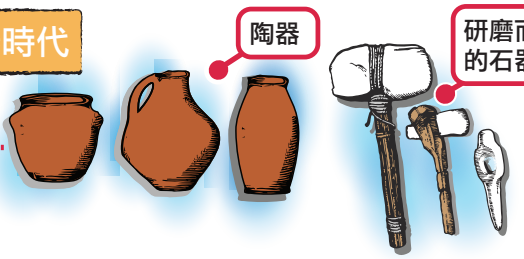
200萬年前

舊石器時代

人類在此時以狩獵和採集維生、取身邊的石塊或裂石作為工具。屬於「採食經濟」。此外，人類通常是居無定所。

12,000 年前

新石器時代



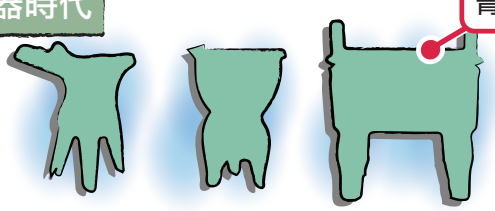
開始農耕與豢養動物的「產食經濟」。開始定居。把天然石頭打磨成更適用工具。把粘土經加熱燒製改變其成份結構、製成陶器。開始利用大自然存在的天然銅。然紅銅較軟，只能做小型工具。

7,000 年前

銅石並用

4,000 年前

青銅器時代



長期的高溫製陶技術為冶金打下基礎、開始大量開採銅礦、鑄青銅。青銅的強度較紅銅優異、更能廣泛運用在生活各個層面。其中的典型即為中國殷商時期。

3,000 年前

鐵器時代

P.30-35

人類的元素使用與時間關係圖。

舊石器時代 | 新石器時代 | 青銅器時代 | 鐵器時代

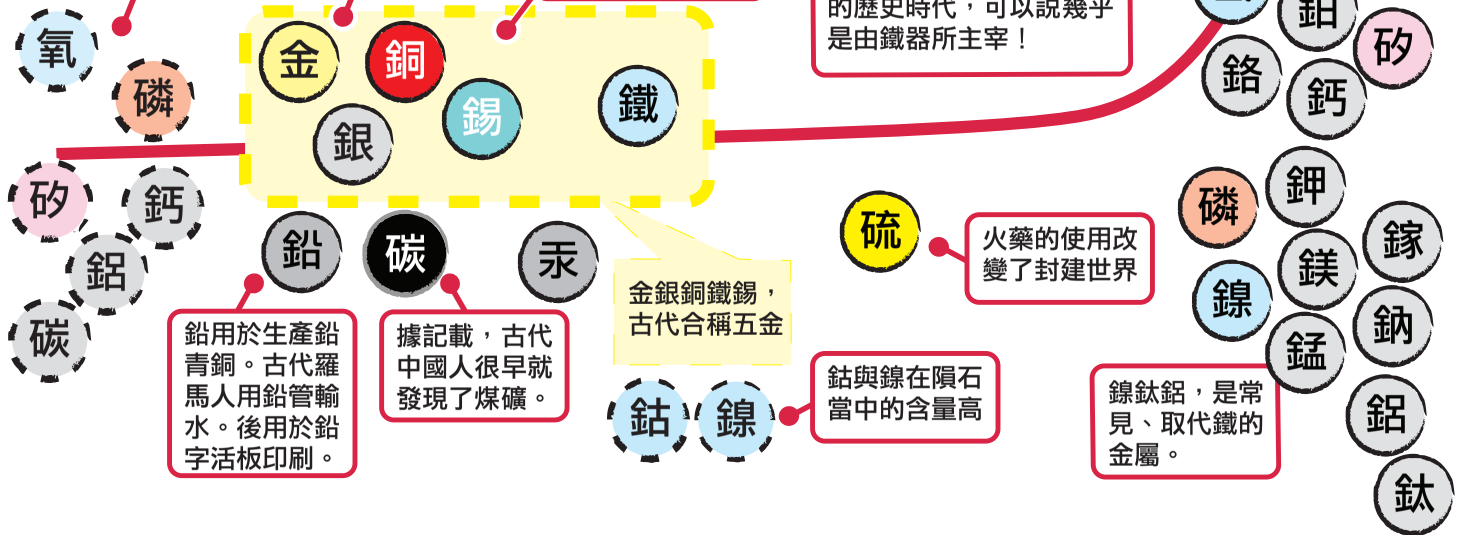
這些為石器、骨頭、陶器等最主要之組成元素。然而人類僅取現成物、而非對該元素有所認識而使用。

能以純金屬存在的元素、能較早發現。

青銅器的使用、是人類冶煉技術的開端、也是人類第一次、金屬開始廣泛使用在生活中的。

除了鐵以外、其它金屬提煉困難、或難以被發現而應用。因此，在人類已知的歷史時代，可以說幾乎是由鐵器所主宰！

從16世紀自然科學興起、人類才繼續認識新的元素、也因此人類的科技突飛猛進。



鉛用於生產鉛青銅。古代羅馬人用鉛管輸水。後用於鉛字活板印刷。

據記載，古代中國人很早就發現了煤礦。

金銀銅鐵錫，古代合稱五金

火藥的使用改變了封建世界

鈷與鎳在隕石當中的含量高

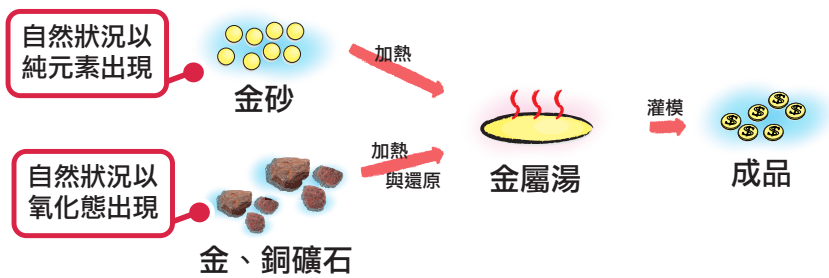
鎳鈦鋁，是常見、取代鐵的金屬。

金屬的熔煉

還未認知元素時的學生只會知道石頭就是石頭，而不知其中含有氧與矽元素。同樣地，沒有元素概念的古早人類，發現金屬的先後，便是以純元素爲優先。因此，人類較早發現金、銀、銅 - 即使鐵的存在，遠較其他金屬豐富。此外，鐵的熔點（攝氏 1539 度）也較銅（攝氏 1083 度）高上許多。即使人類原始的技術能夠達到金與銅的熔點，從而熔煉金與銅，鑄造成工具或飾品，鐵礦石丟進去後卻還是一塊塊的，尚無法熔煉出鐵來。

熔煉

對金、銀而言，要將金屬從礦石，轉變成我們所要的形狀，一個方式是將它加熱熔化。熔化後的液體灌入模具後，待凝固即可。如挑選金砂加熱熔化、成為金幣。



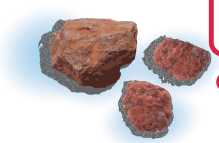
然而，銅礦、鐵礦大部分都是金屬氧化狀態的礦石，如氧化銅、硫化銅、氧化鐵等等。因此，必須先將礦石還原成為金屬、金屬熔化為金屬湯、再提煉出來！

鐵的發現

一般認爲人類最初開始認識鐵，是從隕石中發現的少量殞鐵或是熔煉銅所剩的副產品，當時鐵仍是種帶有神祕色彩且珍貴的金屬。考古結果顯示，古人將隕鐵用於刀刃的刃部。

約莫在西元前 4000 年人類對於鐵已經有極少量的使用，但一直要到西元前 1400 年，於小亞細亞的西臺帝國，人類才開始掌握了煉鐵的技術而能夠大量生產鐵並投入應用，而後，世界各地也在技術傳播或是當地技術革新的影響下，於不同的時間點進入了鐵器時代。大自然中豐富鐵礦來源與鐵較優異的物理特性，使得鐵相對於青銅，成本較低且應用層面更加廣大，人類對於鐵這種金屬的需求，也就很快的超過了銅。從鐵能夠爲人類所用開始，它就一直影響著人類歷史的發展，鐵器技術提昇的農耕技術以及增加武器使用的選擇，使得煉鐵的技術是人類歷史發展一個極大指標。

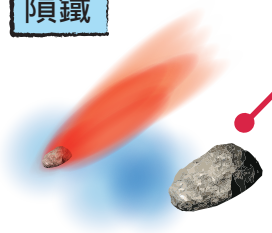
赤鐵礦



氧化鐵在地球上分布廣泛。

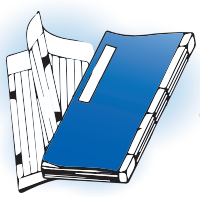
上古時代的山頂洞人雖然不知道鐵、但是卻利用了赤鐵礦的紅色留下了岩石壁畫。

隕鐵



隕石成分以鐵鈷鎳為主、性質優異、然而存量稀少。

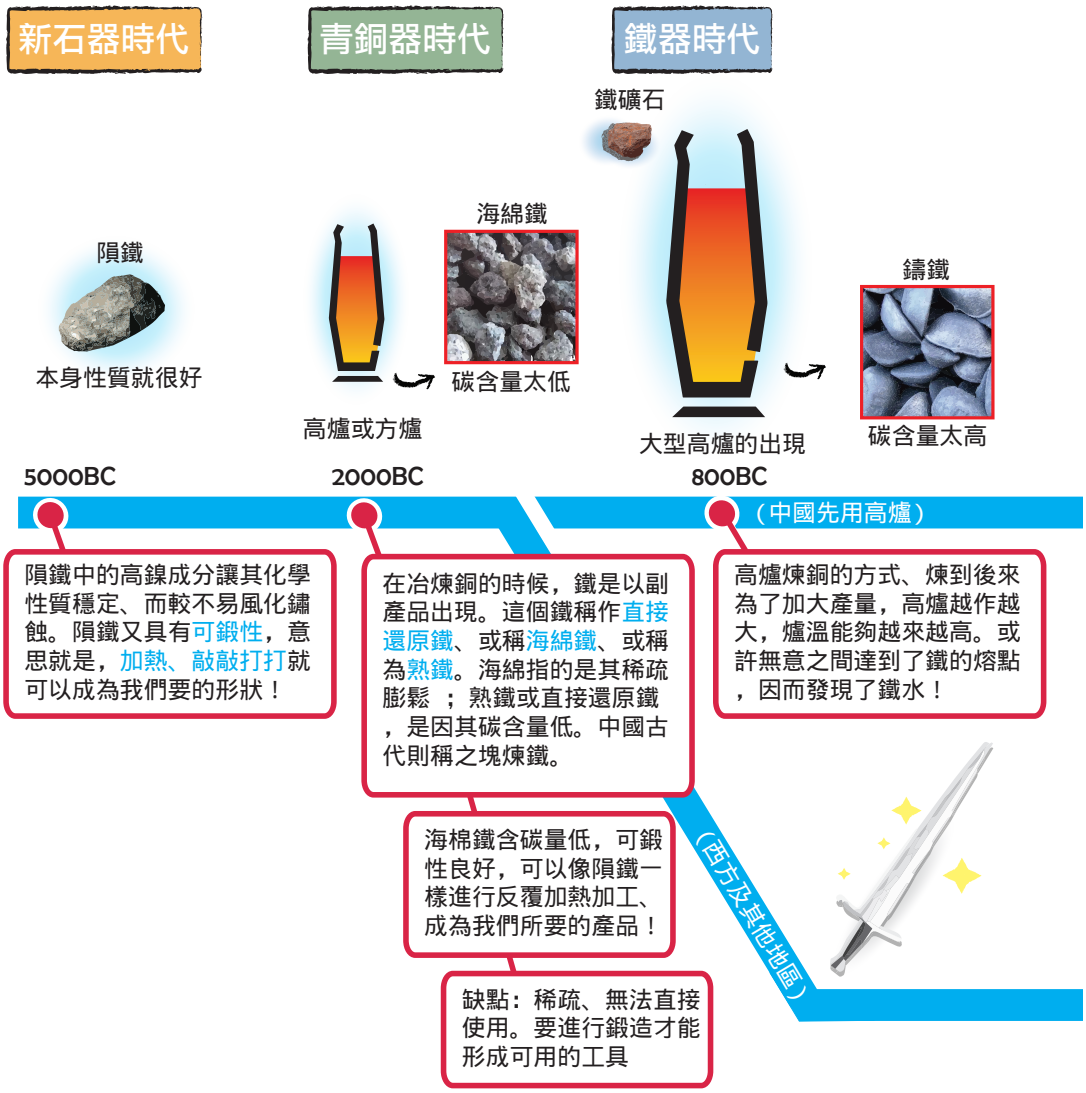
各個歷史遺跡當中，都顯示人類最早使用的鐵是隕鐵。



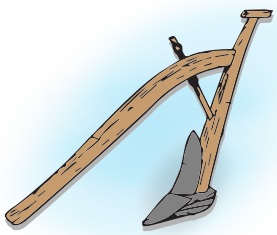
《管子·地數篇》記載：『出銅之山四百六十七山，出鐵之山三千六百九山…山，上有赭者，其下有鐵』。這代表：古人不僅知道如何找礦、而且也指出鐵含量較為豐富！

是鐵或者鋼？古代煉鐵煉鋼的發展

至於人類當時到底生產的，究竟是鐵還是鋼，其實是非常難以說明的，因爲鐵和鋼的分別是在其碳含量，但在古代的冶煉技術發展對於碳含量的掌控技術較不純熟，甚至不了解的情況下，冶煉的產物相對不穩定，造成很難清楚界定是煉鐵還是煉鋼，或許應該這樣說，人類在鐵礦冶煉生鐵的形式稍稍



固定之後，花了很大的心力在研究如何提升生鐵的性質，而這樣的過程中可能使人類開始意識到鋼的存在，人類嘗試去調控生鐵內部的組成和組織，例如在春秋時代，就已有利用將生鐵打碎再對其加熱氧化，去除內部一定比例的碳元素，或是將鐵塊以煤炭加熱來增加滲碳效果的工法，也發現當木炭或是煤，在某種程度下就會產出不那麼脆、卻仍保有強度的鐵，這就是鋼。



犁

高爐的鐵水產出後直接注入模具、而形成工具！由於鑄鐵強度遠較青銅高，因此可直接帶動農業進步！

大型鑄件：如滄州鐵獅子；武后的天樞。

用煤取代木材以煉鐵可提高火力、避免鐵礦附近山林都被砍光，因而童山濯濯、無木材可用，而至礦坑報廢。

不用煤，改用焦炭煉鐵，不僅雜質降低，焦炭強度高、不像煤易碎、因而堵塞高爐造成冶煉不順

石灰石助熔劑

螢石助熔劑

200AD

1000AD

1300AD

1600AD

高爐煉鐵進展

鑄鐵碳含量太高、加工性質較差。炒鋼技術(攪拌爐煉鋼)，是將生鐵加熱到熔化後加以攪拌。在攪拌過程氧氣把生鐵中的高量碳氧化，降低鑄鐵的碳含量，最後經反覆鍛打，得到組織較為均勻的鋼材。

西方開始使用高爐、生產鑄鐵以鑄造大砲等等。

天工開物記載了許多古代的技藝

干將莫邪鑄劍以斷髮剪爪投入爐中，以現代觀點看是在海綿鐵當中加入一些碳，含碳量增多成鋼！

大馬士革刀：傳說能將空中飄落的絲綢斬成兩半。特點在於刀刃邊緣有軟硬兩種不同材質的鐵混合而成。然製造技術已失傳

在現代，海綿鐵多用於電弧爐重熔煉鋼，而非直接鍛造成產品使用。

海綿鐵使用進展

~200AD

淬火技術的運用

900AD

近代煉鐵煉鋼技術的發展

儘管人類很早就認識了鋼，且鐵水的生產上也因爲類似高爐的裝置出現、在效率上有很大的提升，但對於如何去除鐵水中雜質，仍是煉鋼無法大規模生產的瓶頸。一直到十九世紀英國冶金學家亨利·貝塞麥爵士提出「對融熔鐵水噴射壓縮氧氣」的方式後才被解決，貝塞麥的方法不僅能夠在短時間去除鐵水的雜質，氣流更可幫助鐵水流動使反應更加完全，而這種作法幾經

近代煉鐵進展

- 1777AD：蒸汽機的發明幫助鼓風
- 1820AD：遇熱空氣鼓風提高效率
- 1879AD：密閉式爐頂加料設備

近代煉鋼進展

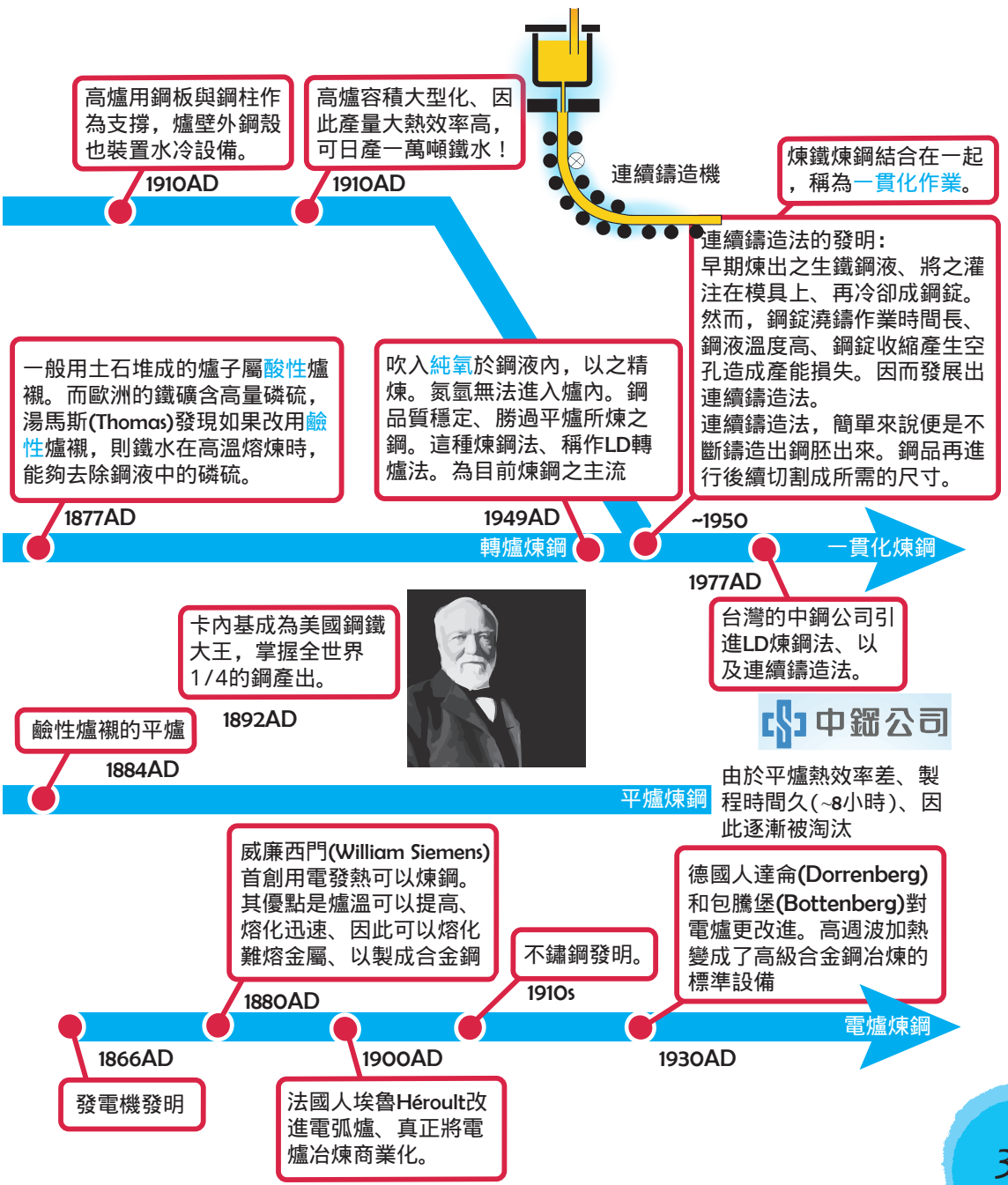
- 前人以鍛造煉鋼、攪拌爐煉鋼為主，以此方式煉鋼效率很差。
- 1722AD：法國人魯慕(Reaumur)對生鐵鐵水進行吹氣，開啟近代煉鋼的大門。
- 1734AD：瑞典崔登堡(Swedenberg)詳細繪圖、說明吹氣煉鐵成鋼的可能情形。煉鋼爐是以木炭為燃料，可傾動拆卸，爐缸上有風管吹氣，礦料由爐口加入。
- 1856AD：貝塞麥爵士找到吹氣入爐內的訣竅、提出貝塞麥轉爐煉鋼法。真正利用吹氣法煉出鋼來。一舉改善煉鋼製程！只要20分鐘，就能達到過去使用攪拌煉鋼爐24小時的產量！
- 1867AD：然而、貝塞麥的轉爐煉鋼品質不穩定，西門子(Siemens)把生鐵、廢鋼和鐵礦石一起熔化。並回收廢熱、將冷空氣加熱再灌入爐中。如此保持爐溫、慢慢煉鋼的作法，稱作平爐(open hearth)法

吹射空氣，其中之氧氣，可與生鐵鐵水中的碳反應。因此幫助脫碳！讓生鐵降低碳含量。

轉爐吹射

改良後，成爲目前於生鐵冶煉最常見的轉爐法，當然除了這個方法之外，也有發展其他的煉鋼方法，例如由西門子公司研發的平爐法。透過這些煉鋼技術的成熟，鋼鐵得以大量有效率的生產，也因爲如此，鋼鐵才能夠普及於我們的生活中。

至於現今人類對於煉鋼技術的發展，確實還保留如同祖先那般的興趣和熱忱，且持續不懈著。



台灣的鋼鐵史

在約 2000 年前，全台灣各地的原住民就開始掌握了煉鐵的技術。著名的如北部的十三行文化、南部的蔦松文化、東部的靜浦文化。眞正鋼鐵工業的濫觴，則是到了清領時代末期，清朝開始積極建設台灣，除了完成了台北到基隆的鐵路建設、並開始有兵器、貨幣製造、船舶修理的能力。爾後日治時期，台灣一開始僅被當作殖民地、而 1930 年代過後，開始因應戰爭的需要，日本因此開始積極發展台灣的鋼鐵工業、爲台灣鋼鐵發展打下重要基礎。

國民政府遷台後，配合進口替代、出口擴張的政策，大大小小鋼鐵廠開始成立。然而品質良莠不齊。民國六十年代，政府推出十大建設 - 先後與奧地利、美國合作，興建了中鋼的第一號高爐。台灣也因此有了當時最先進的一貫作業化鋼鐵廠。漸漸的，台灣鋼鐵上下游產業體系慢慢成熟。

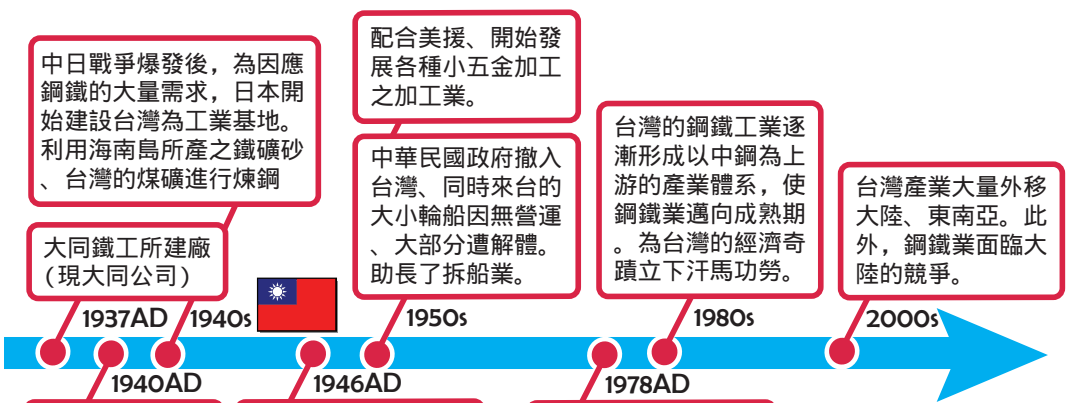
目前，台灣的鋼鐵產業在各個層面，面臨大陸的競爭。要使鋼鐵產品在國際市場上更具競爭力、可說是現在最重要的課題！

中鋼煉焦爐之第一塊耐火磚砌成

中鋼建廠之雷蒙基樁工程完成紀念

中鋼公司第一枚服務證、
為總經理趙耀東先生

高爐點火儀式

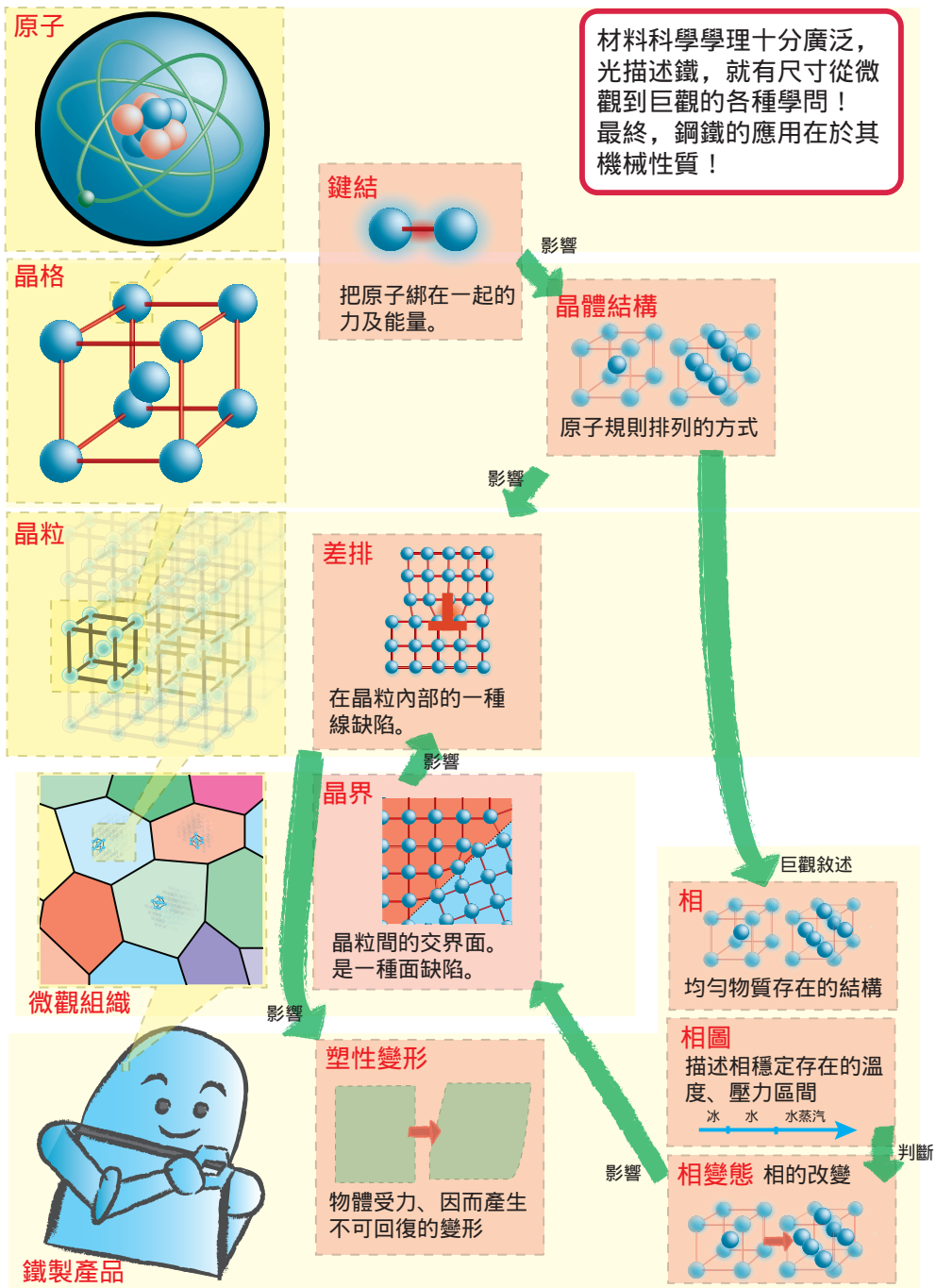


十大建設之紀念郵票

1-3 鐵的科學

The Science of iron

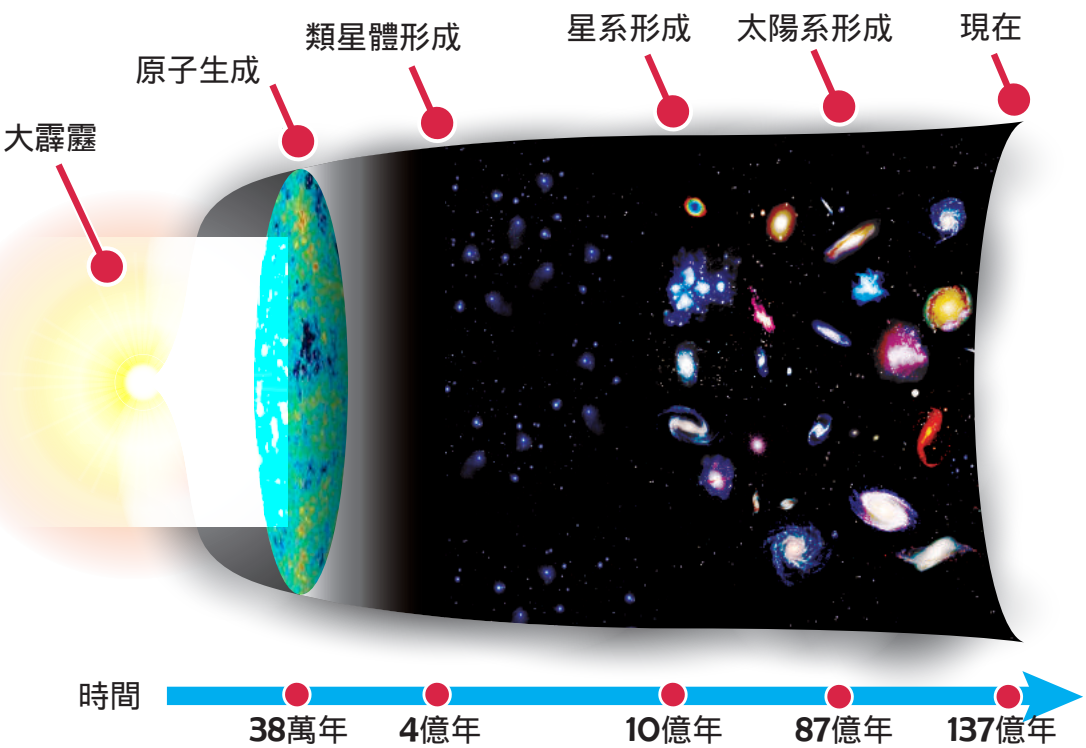
章節簡介



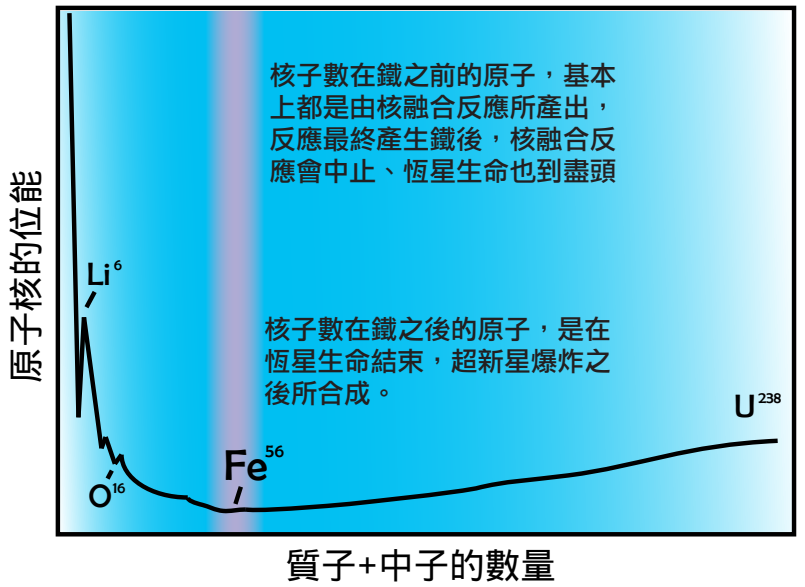
鐵的原子

宇宙在大霹靂過後呈現電漿狀態。直到 38 萬年後，由於溫度降低，質子與中子在強作用力之下，結合成爲原子核。其中的質子是帶正電的。而原子核接著靠電磁力，捕捉帶負電的電子。最初的原子因而生成。質子的數量就代表著元素的種類。

原子核將質子、中子結合綁一起的能量，稱之爲「原子核束縛能」。原子核束縛能越大，代表該原子核越穩定，而原子也處在位能較低的狀態。蘋果由樹上掉到頭上，也是一種由高重力位能落到低重力位能的狀態。而由下頁的圖，我們可以發現：鐵原子是所有原子中，原子位能最低的，這顯示鐵原子核是所有元素中最穩定的。



▲ 宇宙的大霹靂模型圖



▲ 質子 + 中子數量與原子核位能的關係。越低代表原子越穩定。

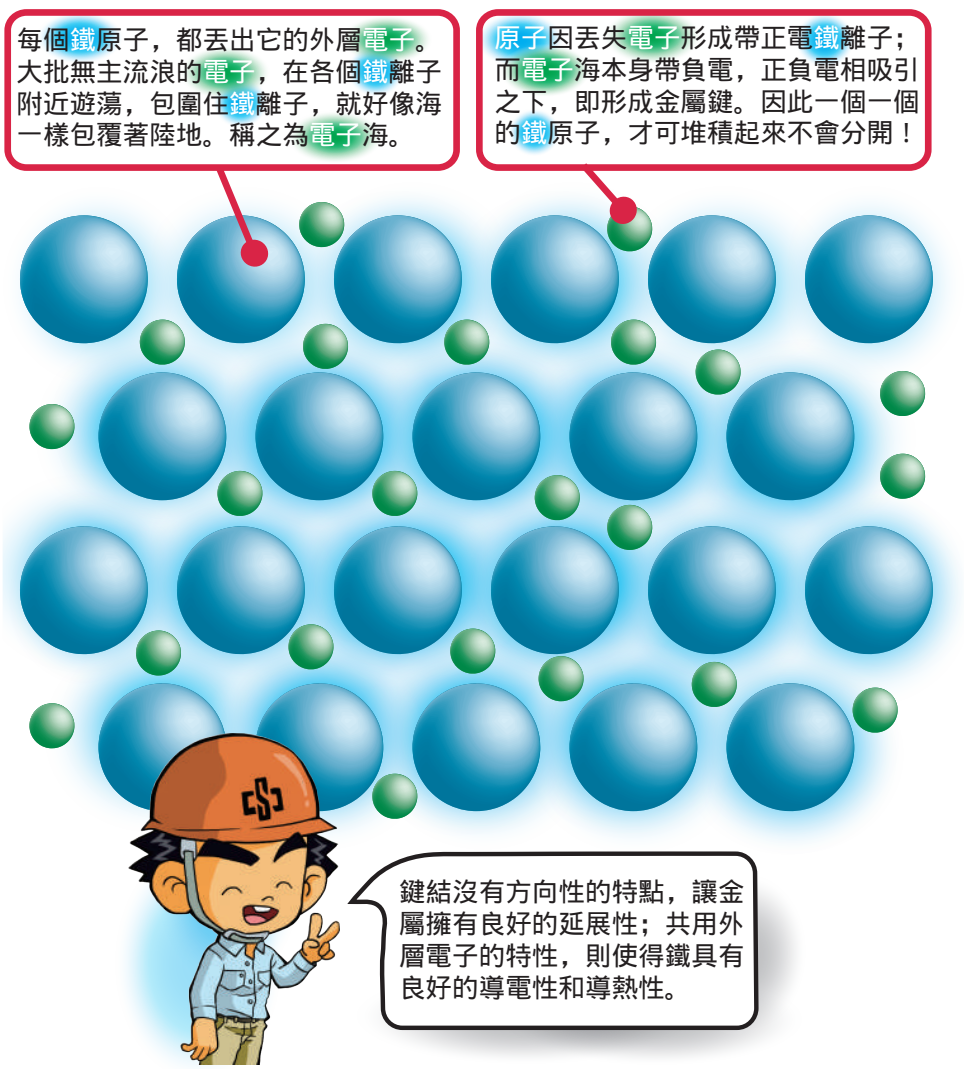
任何反應，都會趨向於最穩定、位能最低的產物，因此恆星中的**核融合**反應從氫結合成氦開始，逐漸依著原子量由小而大合成各元素。當合成到了鐵原子時，原子位能最低，也就是代表反應已經出現了最穩定的產物，所以核融合反應到此便告一段落。

核融合反應最終產物是鐵原子，也因此鐵原子在大自然中含量豐富。

從原子到晶格：金屬鍵 (metallic bonding)

鐵原子和鐵原子間是以**金屬鍵**相互鍵結。

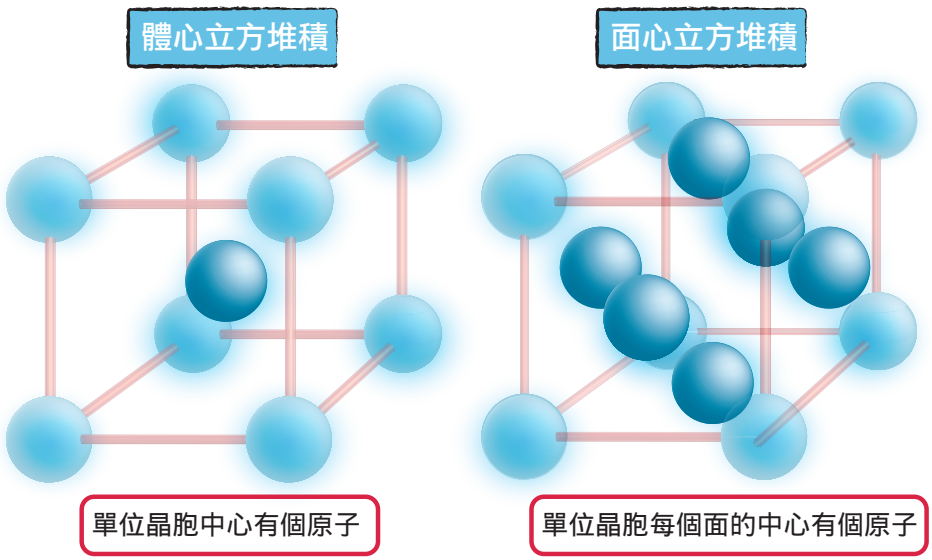
金屬鍵鍵結的原子群，是以**共享外層電子**的方式相互吸引。這個情況可以想像成：金屬離子被**電子海**包圍。金屬離子是指失去外層電子的金屬原子，而共用的電子可以自由移動在原子間，因此像液體一般包圍其中的金屬離子。原子爲電中性，失去電子的離子帶正電，而電子則是帶有負電，所以電子海將帶有正電而互相排斥的金屬離子牽引在一起，此牽引的力量稱作金屬鍵。由於金屬鍵的鍵結和原子角度沒有關係，因此金屬鍵**不具有方向性**。



從原子到晶格：晶體結構 (crystal structure)

金屬鍵沒有方向性，因此似乎暗示金屬原子可以用任何角度、位置排列。其實這個情況我們會稱作非晶或者玻璃態 (glass)。然而，這並不是能量最低的狀態。

事實上，在固定的溫度以及壓力之下，固體當中的原子以及分子，可能會有特定的、規律的、最穩定的排列方式。我們將此週期性的排列方式特稱之爲「晶體結構」。



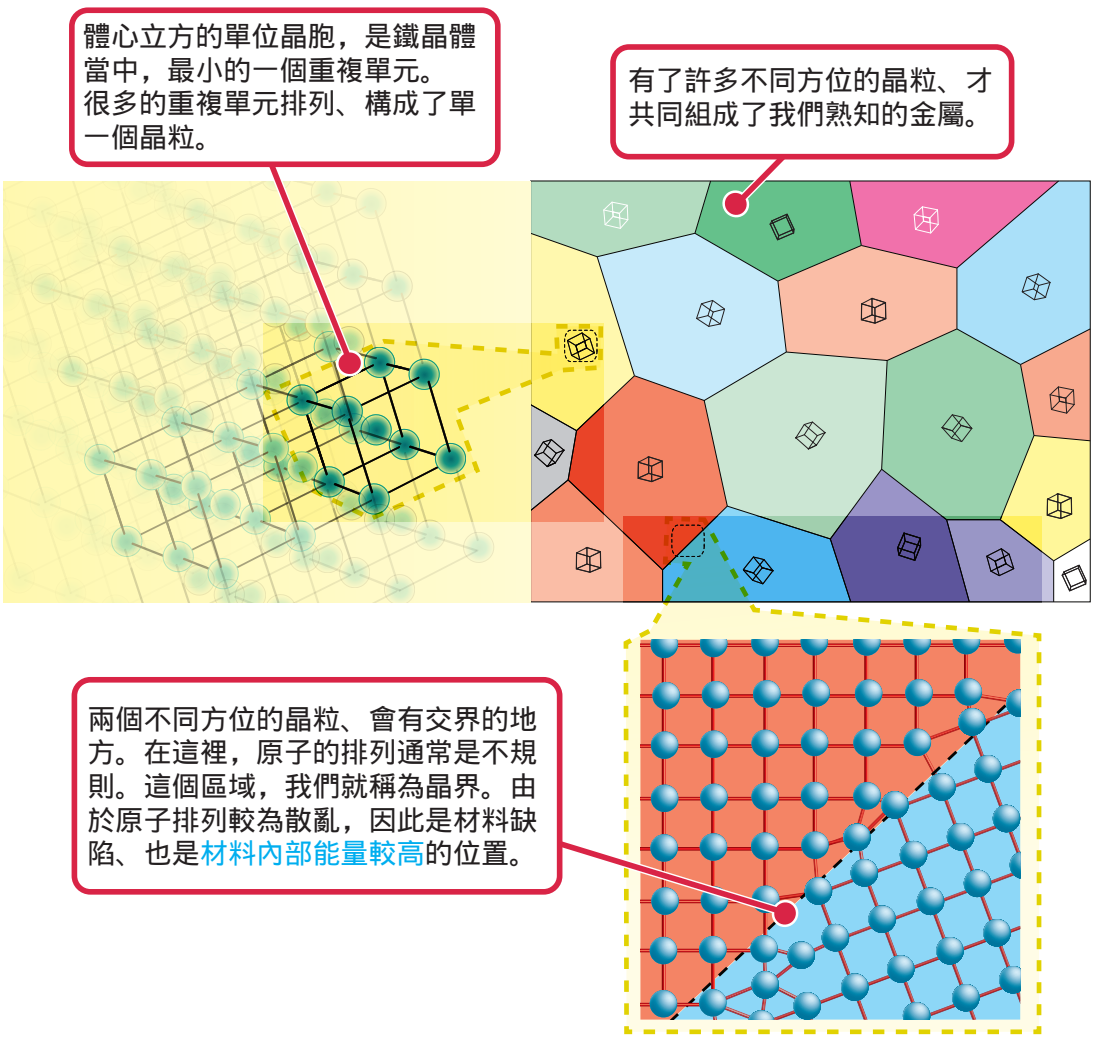
鐵在室溫、常壓下的晶體結構是體心立方 (body centered cubic, BCC)，體心立方指得是在一個立方體中，八個頂點和立方體中心的位置皆被原子占據的堆積方式，此立方體稱作單位晶胞 (unit cell)。單位晶胞可直接代表體心立方這個晶體結構的特性。

在體心立方的單位晶胞當中，八個頂點的原子與周遭的單位晶胞分享，體心的原子則爲此單位晶胞獨享，因此一個單位晶胞中的原子數是：1/8×8+1=2。

另一種常見的鐵晶體結構爲面心立方 (face centered cubic, FCC)，面心立方是指一個立方體中，八個頂點和六個面的中心點皆被原子占據的堆積方式，單位晶胞中則含有 4 個原子。

從晶格到金屬：晶粒 (grain)

我們了解到每兩個鐵原子堆積成體心立方、或者每四個鐵原子形成面心立方，這是鐵的最基本單元。這些基本單元構成一個晶粒；晶粒指的是由相同方位的無數多個晶胞所構成的小晶體。許多的晶粒再組成金屬。單晶反而是非常少見的。



在同一晶粒內，晶體結構是同一個方位；但在兩個晶粒的交界處，原子沒有整齊的堆積，而是呈現由上一個晶粒中的排列方向、到下一個晶粒中的排列方向的過渡區域，如圖中黑色虛線附近一般，這個交界處我們稱之爲晶界 (grain boundary)。

怎麼知道穩定結構？看相圖 (phase diagram)

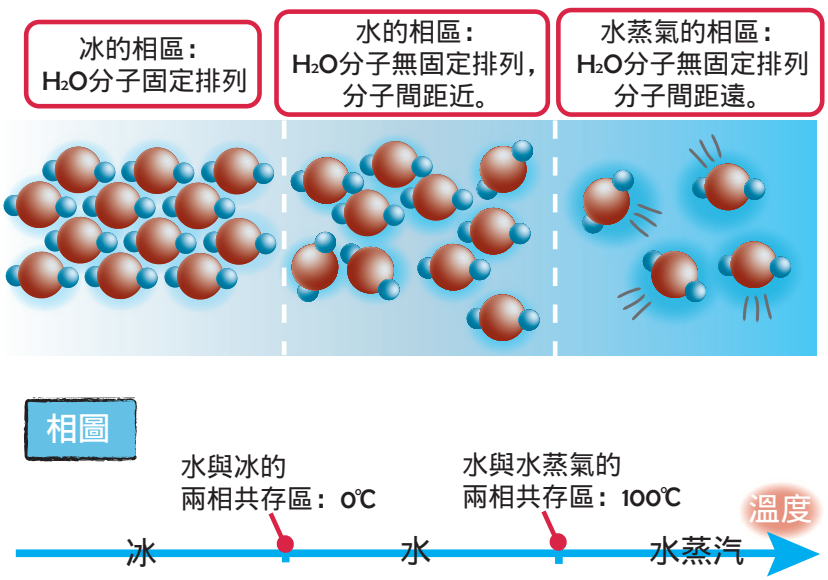
由於許多物質在不同的溫度、壓力下會有特定的結構，我們將均勻組成、並擁有同樣晶體結構的狀態歸類爲同一個「相」(phase)。

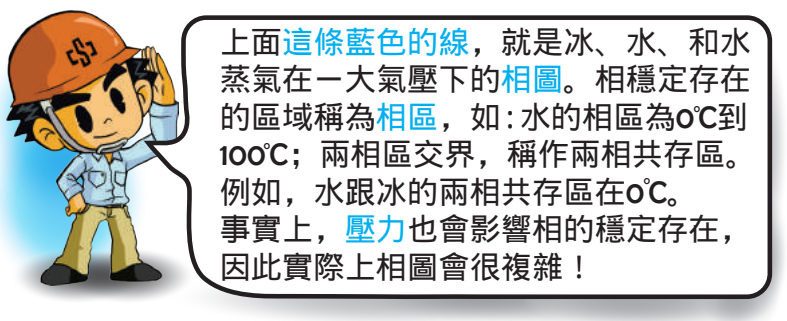
同樣的組成物質可能是不同的相。例如：

H_2O 分子在 0°C 至 100°C 時，分子無固定排列，但分子間距離很近，此時爲 H_2O 的液相，這個相的名字就是水。

H_2O 分子在 100°C 以上時，分子無固定排列、且分子間距離遙遠，此爲 H_2O 的氣相，這個相的名字就是水蒸氣。

相圖是利用圖表的方式，將此相穩定存在的區域給標示出來。

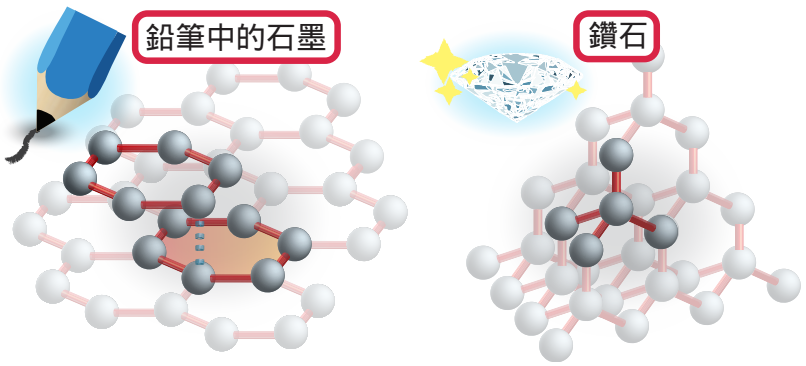




固體中的相

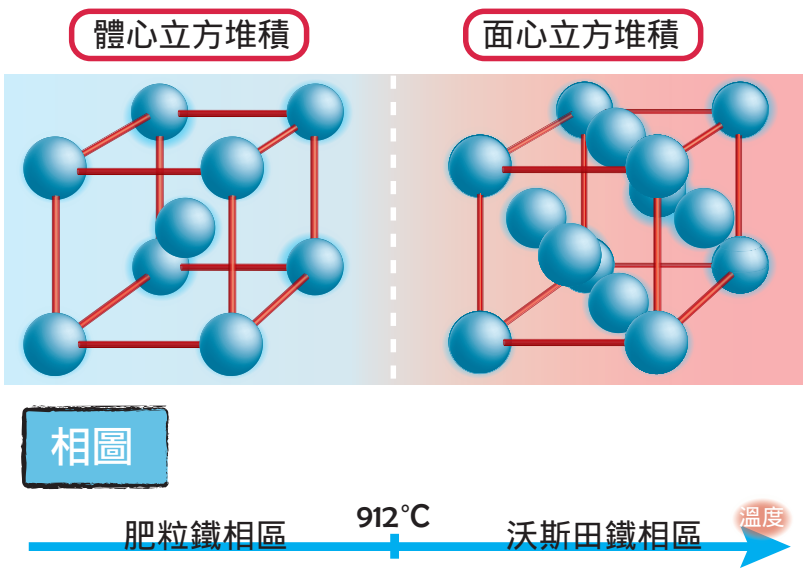
相除了我們熟知的氣相、固相和液相之外，在固體當中可能由於結構的不同，又細分爲許多相。例如：

碳 (carbon) 在常溫穩定存在稱作石墨 (graphite)，若經過高溫高壓環境時可能形成鑽石 (diamond)。因爲結構的不同，讓碳的性質完全不一樣！



在鋼鐵當中，若鐵原子的排列結構爲體心立方堆積，我們將這個相命名爲肥粒鐵 (ferrite)；若鐵原子的排列結構爲面心立方堆積，則稱此相爲沃斯田鐵 (austenite)。

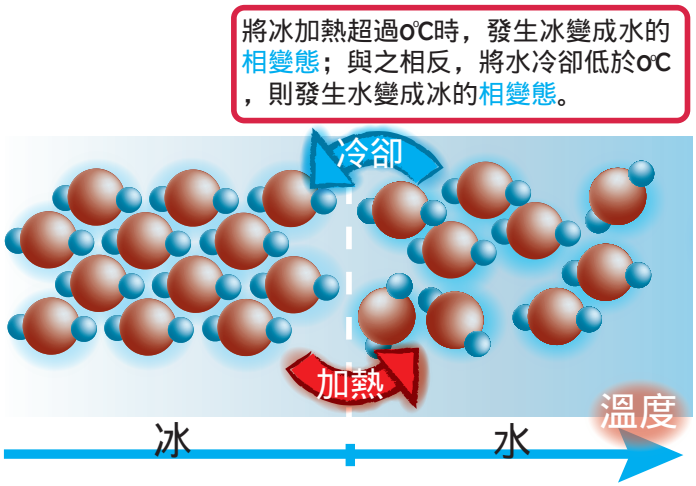
純鐵在 912°C 以上，穩定相爲沃斯田鐵，以下則會形成肥粒鐵。



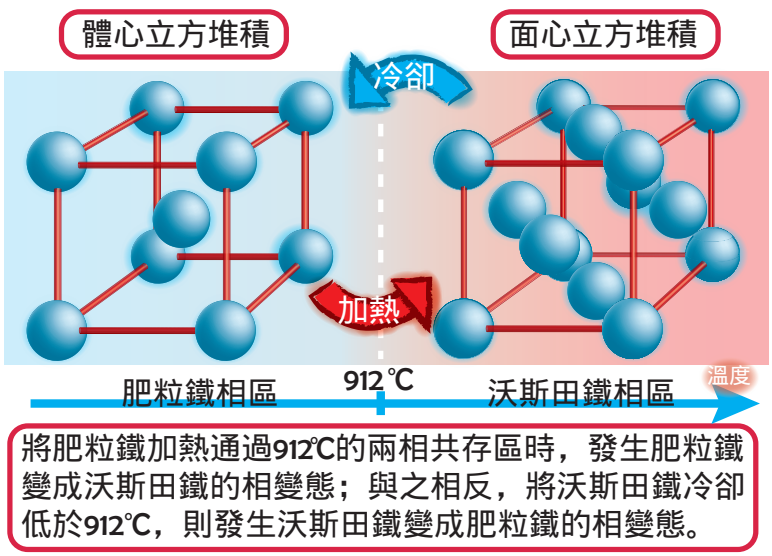
在912℃以下是肥粒鐵相區、以上則是沃斯田鐵相區。912℃為兩相共存區。

相變態 (phase transformation)

若我們加熱冰，使它漸漸融化變成水，此時 H_2O 分子，由冰這個固態的「相」，轉變成水這個液態「相」，這過程我們稱爲「相變態」。相變態指的便是物體由一個相，轉變爲另一個相。水在 0°C 會凝固變成冰，因此 H_2O 分子由液相轉變成固相的相變態發生在 0°C。

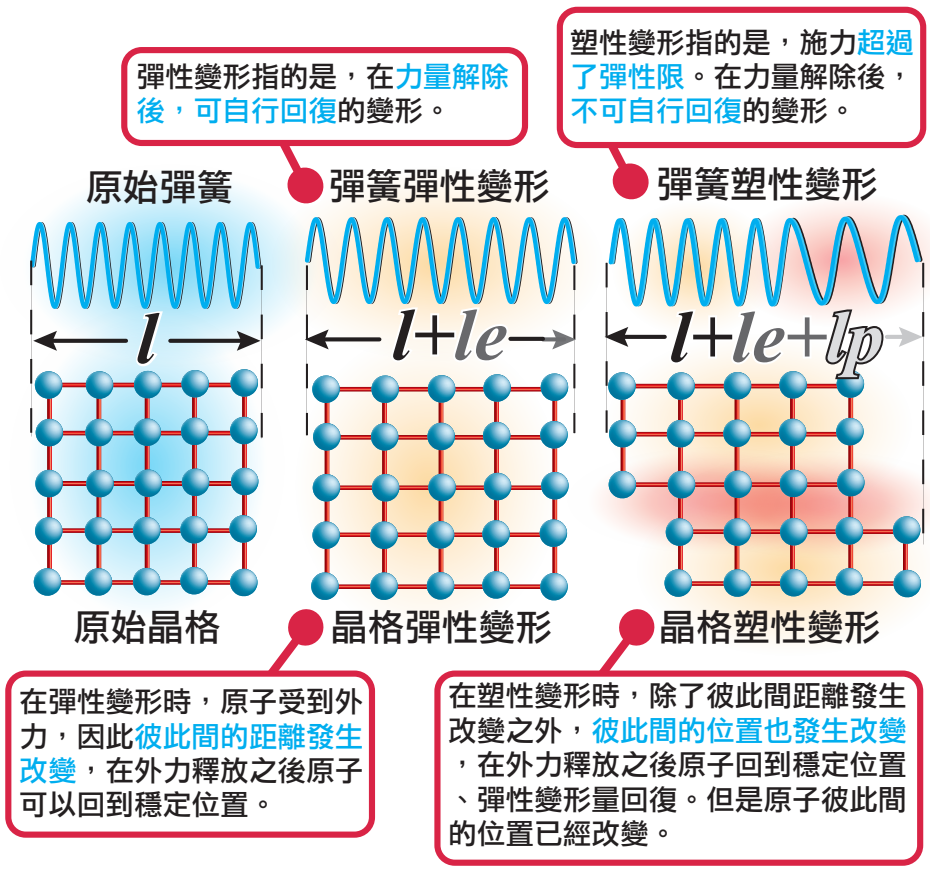


純鐵在常溫下穩定結構爲體心立方，但是若鐵被加熱到 912°C 以上時，穩定的結構則爲面心立方。因此純鐵在 912°C 時，會有相變態的發生，只是這個相變態，是由其中一個固相，轉變成另一種固相，稱作固相相變態。由於有此固相相變態，使得鋼鐵的性質複雜而多變。



鋼鐵的機械性質：變形的機理

要深入了解如何改善鋼鐵的機械性質，例如強度、韌性等，我們必須了解鋼鐵變形 (deformation) 的機理。變形分爲兩種，一種是彈性變形 (elastic)，另一種是塑性變形 (plastic)。



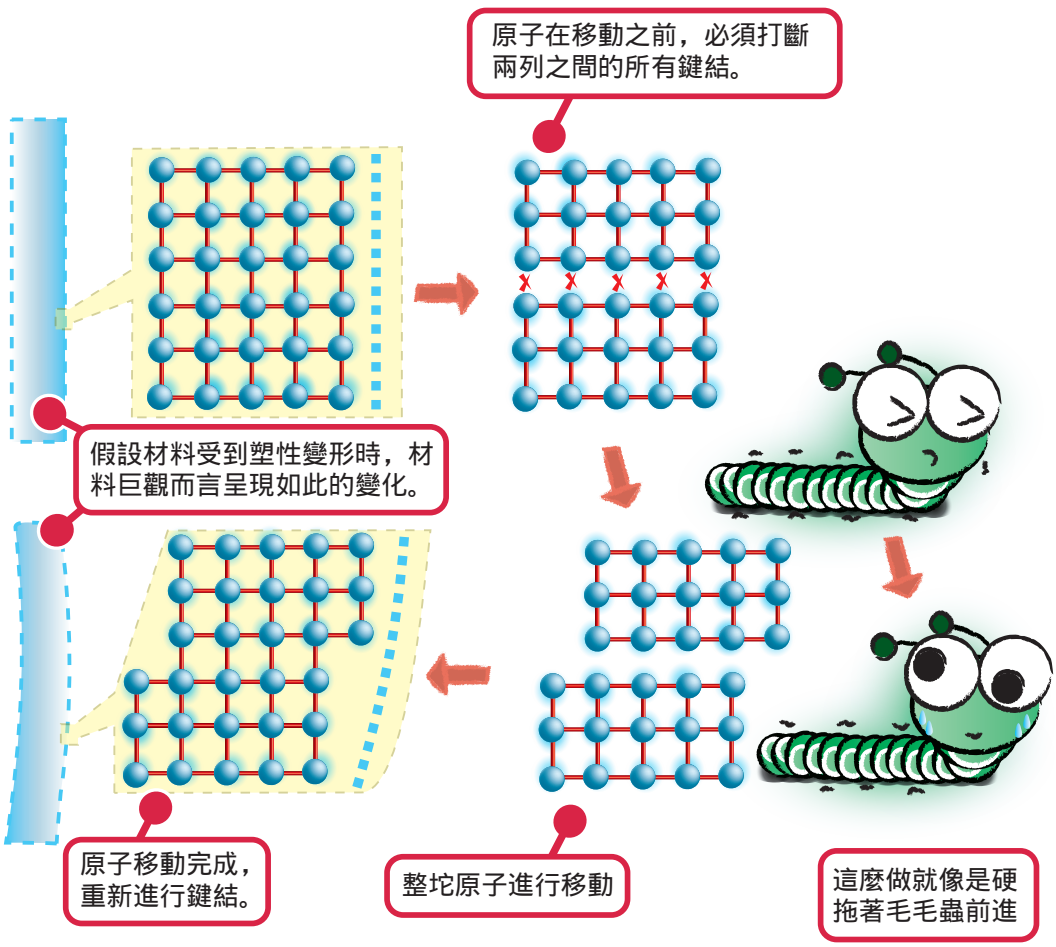
l: 原始長度 *le*: 彈性變形量 *lp*: 塑性變形量

從巨觀角度我們看到材料在施力後變形，那麼從微觀角度出發，原子必定發生了某些變化。從前面章節，我們已經知道：鋼鐵中的鐵原子是以特定晶體結構堆積。那麼所謂變形，顯然代表的是這些原子的排列發生了變化。彈性變形指得是原子彼此間的距離發生改變，塑性變形則是原子之間的相對位置發生改變。

塑性變形的原理

塑性變形是讓原子之間的相對位置改變。而原子間位置發生改變，最直接的想法，是晶體結構的排列會由下圖中左邊，直接變成下邊的情形。

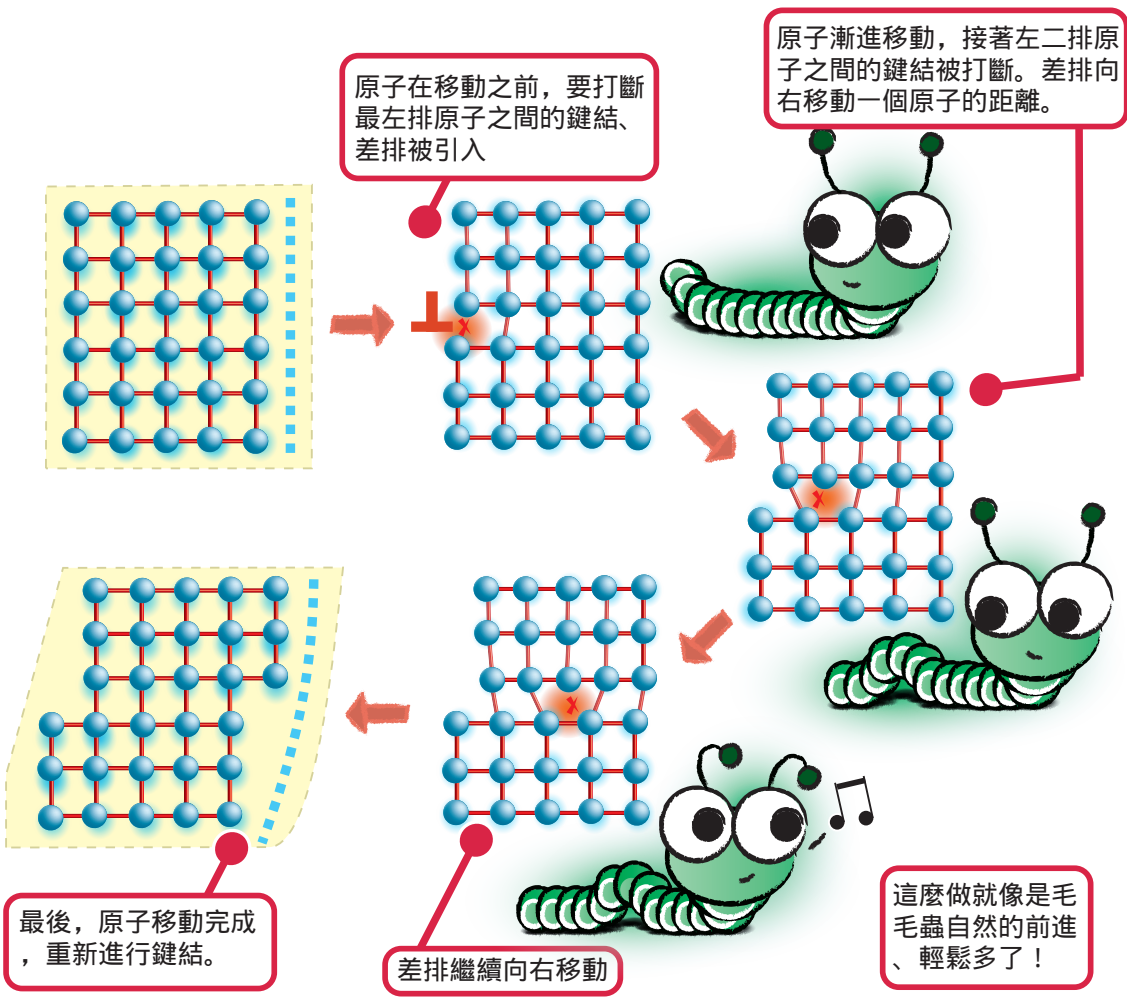
但是，在這樣的機制下，外力需要同時破壞第三列原子與第四列的原子之間的所有金屬鍵後，再重新接合全部的金屬鍵，計算結果顯示，打斷這一排金屬鍵的力量相當巨大，與實驗所得的結果差異非常遠，因此這種理論並無法解釋材料塑性變形機制。



塑性變形的原理－差排理論

差排理論，則認爲材料的變形是漸近的。如下圖。在開始變形之時，第三列的其中一個原子的鍵結被打斷，但同時另一個原子的鍵結接上；而不斷重複此情形，最後完成材料的塑形變形。在這當中，未充分鍵結的部分原子，爲材料晶格缺陷部位，我們特命名爲差排 (dislocation)。因此材料的變形即是代表差排的移動。由於差排的移動，整體原子需破壞一個鍵結，所需的力量也較小。

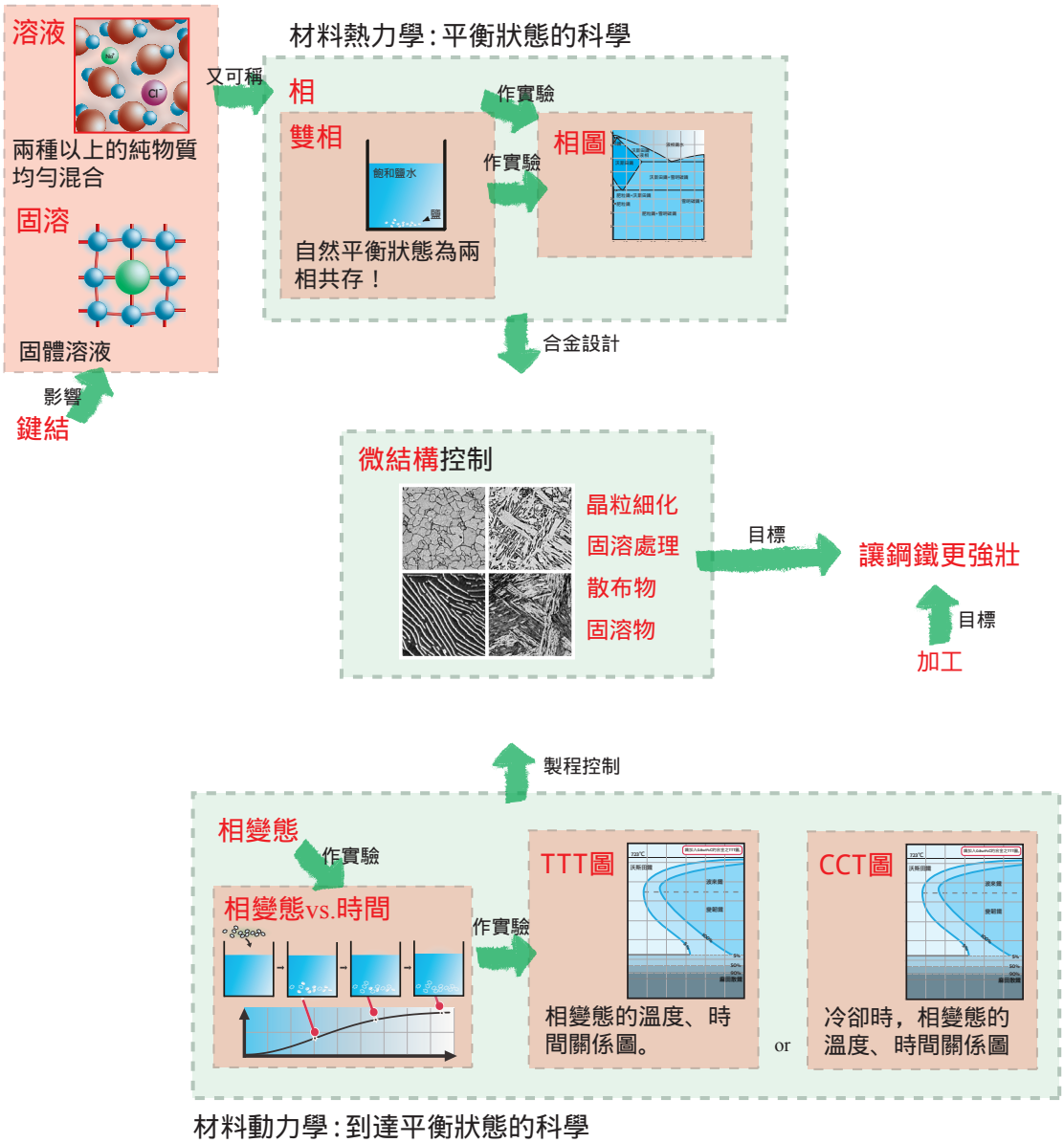
目前，已經有許多實驗證明差排的存在。爲了更簡便表示差排，我們使用 "⊥" 這個符號。



1-4 鋼的科學

The Science of Steel

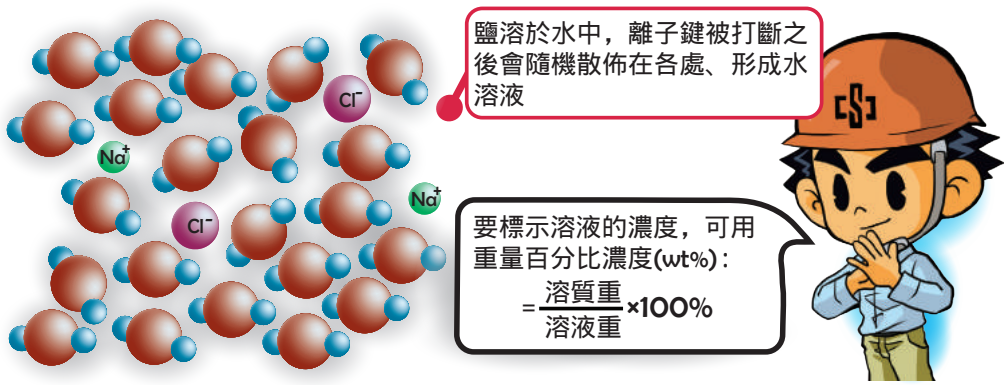
鋼的科學名詞關係



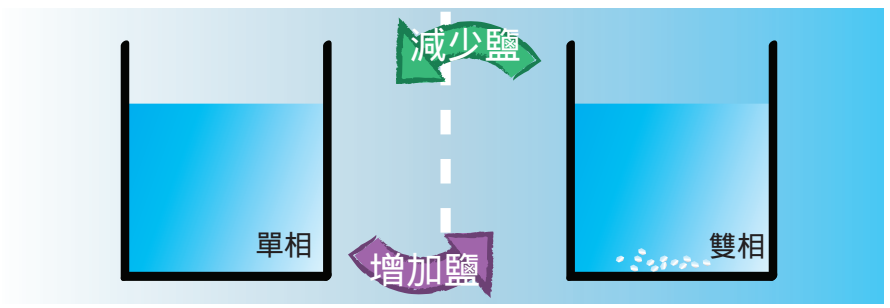
溶液 (solution) 也是均勻的相

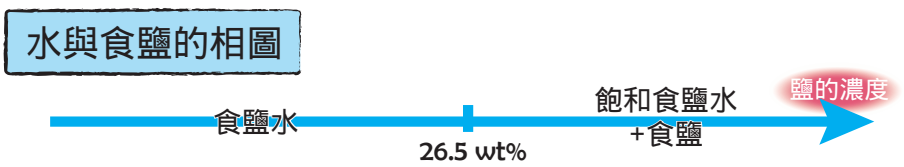
前面我們不斷提到：鋼是種鐵碳混合物。要說明鐵碳混合物，我們必須先了解溶液的概念。如果我們把鹽（氯化鈉,NaCl）分子加到水中，可以均勻溶解，形成鹽水，這是一種液體溶液 (liquid solution) 的混合物。此時的鹽稱爲溶質 (solute)，水是溶媒 (solvent)。

均勻的鹽水，內部結構相同、性質相同，因此也是一種相。



如果我們在鹽水溶液當中不斷的加入鹽，最終溶液所能溶解的鹽是有限的。100 克的水在室溫下僅能溶入 36 克的鹽，因此，在鹽水的飽和濃度 26.5 wt% (=36/136×100%) 下，新加入的鹽不會溶解，反而沉澱下來。此時整杯食鹽水形成雙相，其中一相是液相：飽和食鹽水、另一相則是固相：沉澱下來的鹽。



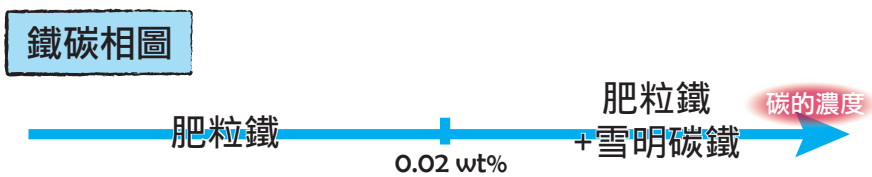


固溶液 (solid solution)

與鹽水的概念相同，碳會以固溶的方式溶解在鐵當中，這是一種固體溶液的概念。雖然鹽 - 水是液體，而鐵 - 碳是屬於固體，但兩者皆能夠形成均勻的混合物、所以兩者皆符合溶液的特性，因此，都能形成均勻的相。

事實上純鐵是很難存在的。通常鐵不可避免，幾乎都固溶少量的碳元素、以及其他的合金元素 (alloying element)。

跟鹽水一樣，碳固溶在鐵中，也會達到飽和。肥粒鐵這個相，最多能溶解 0.02 wt% 的碳，太多會過飽和析出 (precipitation)；但沃斯田鐵相，最多則可以溶解 2.1 wt% 的碳。晶體結構的不同造成這個巨大的差異。



食鹽加入太多會過飽和析出。與之相同的是，肥粒鐵當中如果加入太多的碳，會過飽和析出雪明碳鐵，這是一種極其堅硬的組織。

科學家定義，含0.02wt%以下碳含量的鐵稱作純鐵；0.02wt%以上才是我們常用的鋼。換言之：生活中到處都是由肥粒鐵與雪明碳鐵組成的鋼鐵！

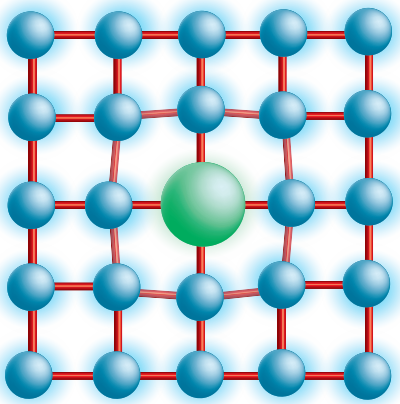
如何形成固溶液

在葡萄糖水溶液當中，由於水分子可以任意流動，因此想像上溶液會比較直接。但是對固體來說，鐵具有晶體結構，碳、及其他合金元素要怎麼溶進去鐵裡頭呢？

研究顯示，要形成固溶液一般有兩種方式。如果溶質原子相對溶媒原子的大小來說很小，如碳、氮原子，這些原子會插入到鐵原子之間排列的空隙當中，我們稱之爲插入型原子 (interstitial)。

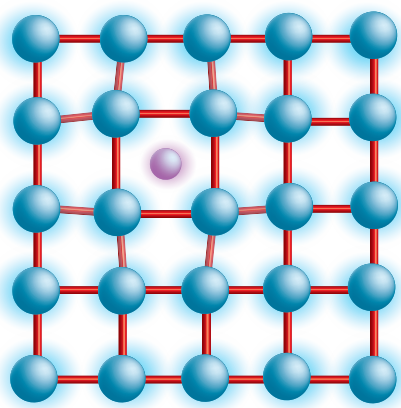
如果溶質原子跟溶媒原子差不多，如錳、鉻等，則溶質直接取代了正常鐵原子的位置，稱之爲置換型原子 (substitutional)。

置換形溶質



溶質的與溶媒的原子半徑差不多時，固溶的原子會形成置換型原子。如錳、矽、鋁等等。

插入形溶質



溶質的原子半徑比溶媒的小很多時，固溶的原子會形成插入型原子。如碳、氮、硼等原子。

事實上，固溶液在生活中十分普遍，例如：水晶爲 SiO_2 固體，是透明無色的。如果在水晶當中，固溶了鐵離子雜質，那麼，則會形成紅色的水晶。

插入形原子

少數插入型原子溶於鋼鐵當中時，
對鋼鐵的機械性質影響非常巨大！

H

氫在電鍍、或者焊接時，副反應可能使水被還原為氫原子、因此進入鋼鐵中。極少量的氫(~10ppm)、就會讓鋼鐵的機械性質變得很差！

C

碳是鋼鐵中最重要的合金元素之一！
鐵碳合金、因為碳含量的不同、分為純鐵、鋼、鑄鐵；此外。

N

一般合金鋼在煉鋼的冶煉過程時、會進行脫氮步驟、刻意降低氮的含量。然而近年來、有高氮不鏽鋼的合金發展。

B

極少量硼(~10ppm)會深深影響到鋼鐵的相變態行為。

置換形原子

添加這些置換型原子，可以對影響鋼鐵的相變態、從而改變機械性質。

Mn

錳是鋼鐵中最重要的合金元素之一！幾乎所有用得到的鋼鐵都含錳；高錳合金是第二代先進高強度鋼。

Si

幾乎所有用得到的鋼鐵都含矽。可調整鋼鐵的相變態、並可抑制雪明碳鐵析出、矽可提高鋼鐵電阻、應用於電磁鋼片

Al

調整鋼鐵的相變態、並可抑制雪明碳鐵析出、此外鋁可以降低鋼鐵的密度具有輕量化的作用。

Cr

可以形成緻密氧化膜、因此是不鏽鋼的重要合金元素。

Ni

鎳可以穩定化沃斯田鐵。此外，鎳可以提高鋼鐵的韌性、是低溫用合金不可或缺的元素。

其他元素

這些元素較少固溶在鋼鐵當中，不是形成碳化物、就是形成特殊化合物。

Zn **Sn**

生活中常見的薄板，如汽車、家用電器等，都鍍有鋅以防蝕。鍍錫鋼板為馬口鐵，常用於食品的盛裝器皿。

Ti **V**
Nb **Mo**

這些元素對於碳的親和力很好，通常會容易與碳結合，成為碳化物。這些碳化析出物可以用於提高鋼鐵的強度、也可以拖住晶界、影響相變態行為、使晶粒較不易粗大化。

W **Co**

鎢與鈷形成的碳化物特別硬，因此特別用於高速鋼(切削的刀具)特殊用途。

其他元素

P **S**

磷硫是困擾人類最久的雜質。這些雜質的存在會讓鋼鐵變得很脆！因此其含量通常越低越好。高品級鋼種會特別要求脫磷、脫硫製程。

Mg **Ce**

添加後可以讓鑄鐵中的石墨球化

Cu

添加入鋼鐵中時、具有輕微抗腐蝕效果。特稱作耐候鋼。

Ag

近年來新發展之不鏽鋼，加入銀後特別具有優秀的抗菌效果。

Ca

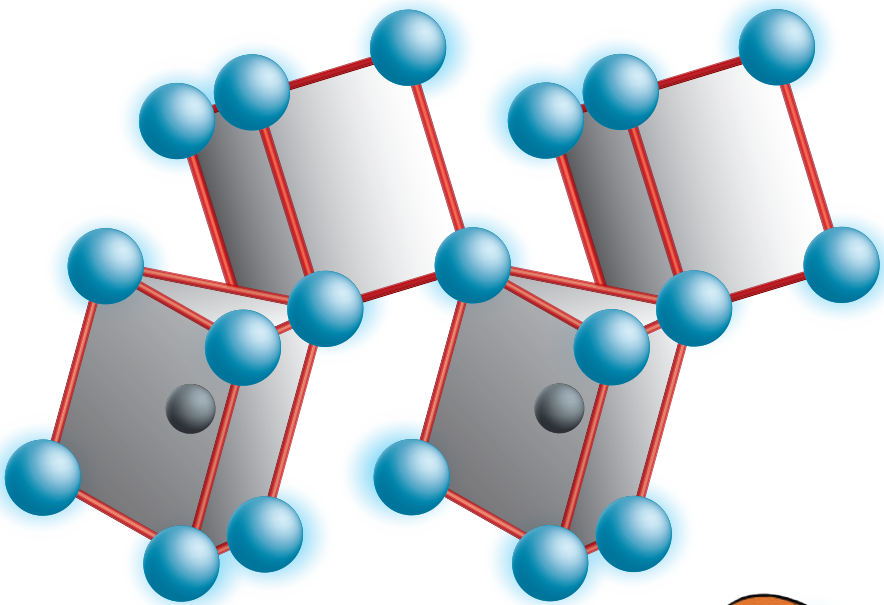
鋼鐵中添加鈣、可讓鋼鐵變得容易切削。

雪明碳鐵

碳除了會在鐵的晶格當中，形成插入型原子的固溶體之外，碳與鐵原子，有可能會形成化合物。這些化合物在鋼鐵當中，最常出現的相是雪明碳鐵 (cementite)

雪明碳鐵的化學組成爲 Fe_3C。雪明碳鐵非常堅硬，但是也非常脆。

雪明碳鐵是種具有共價鍵的化合物，晶體結構十分複雜。比較好理解的方式，是每六個鐵原子建構而成的兩個三角柱當中，其中一個三角柱裡頭會包含一個碳原子。

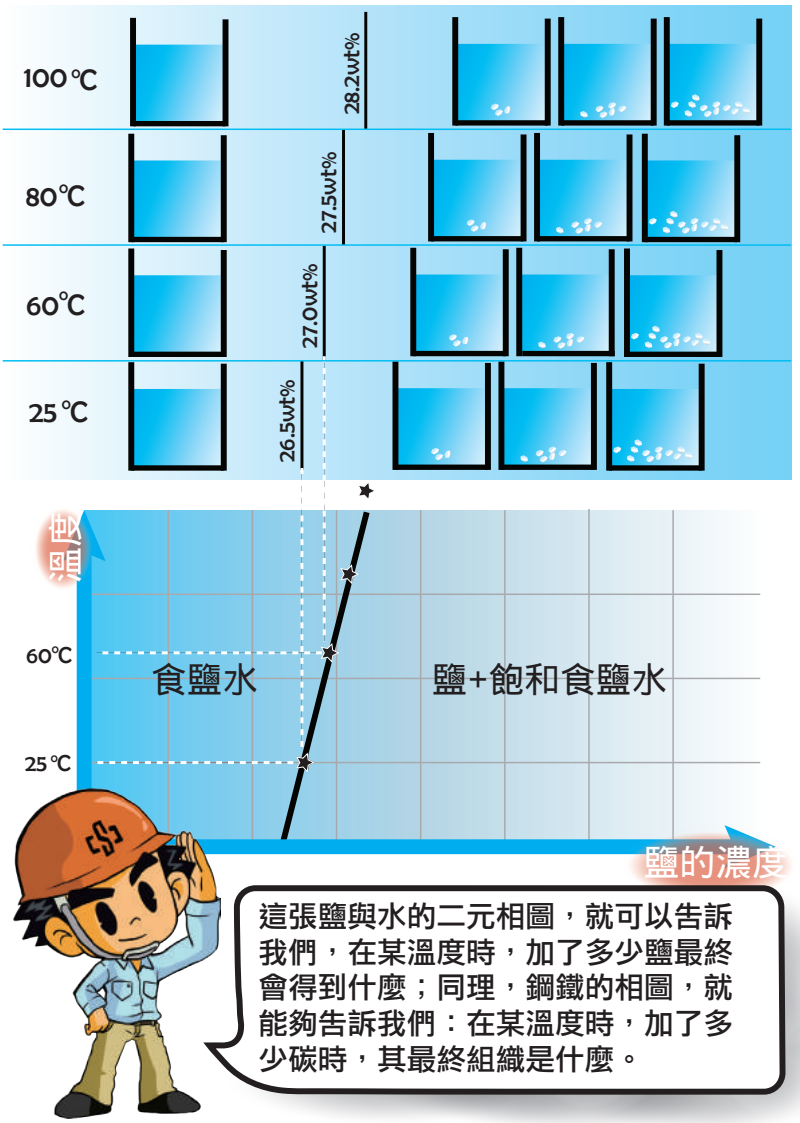


雪明碳鐵是一種複雜結構的合金碳化物。它是鐵碳合金當中最堅硬的相，因此可以十分有效的提升鋼鐵內部的強度！

相圖 (phase diagram)

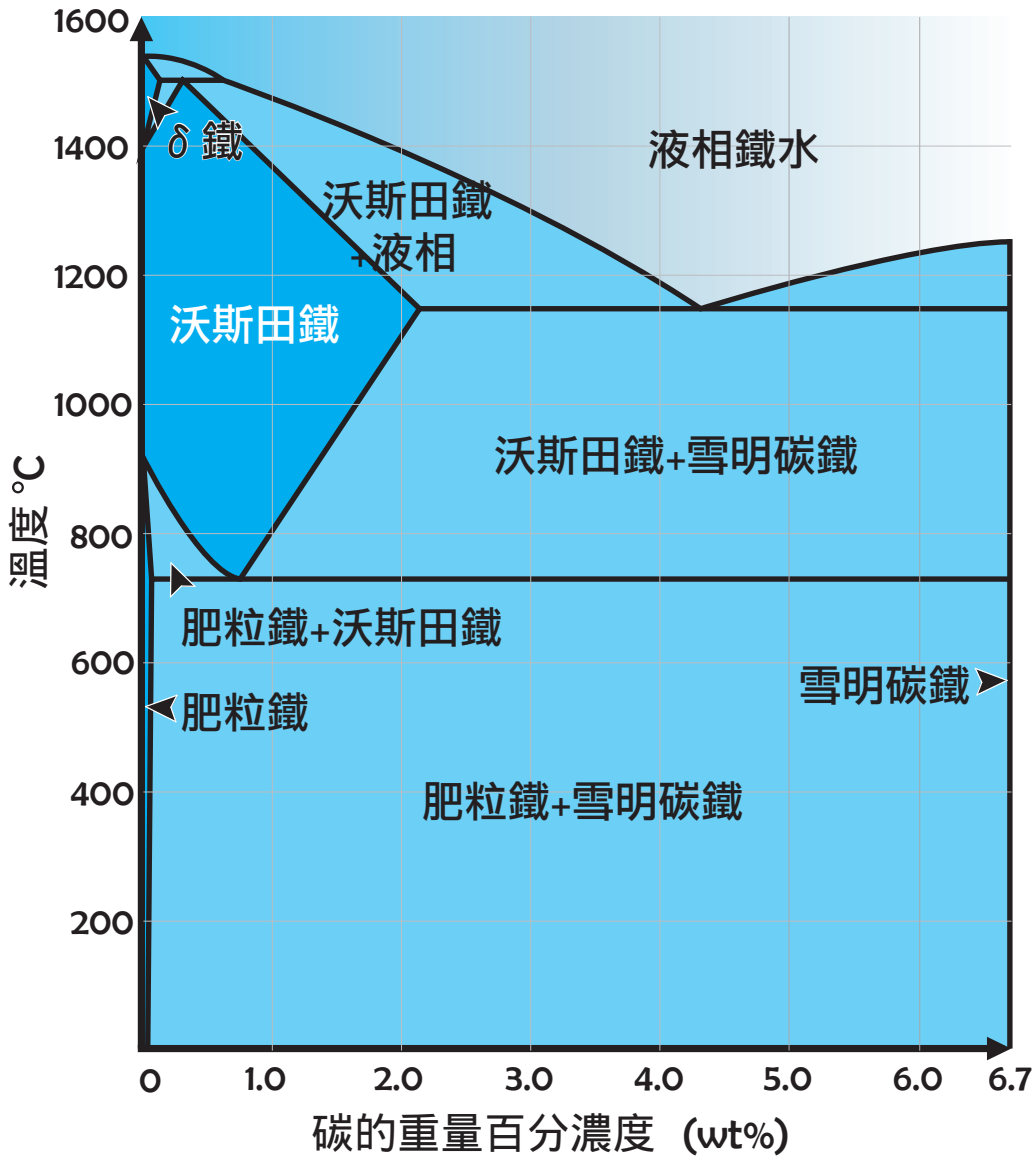
前面所提到的相圖都比較簡單，都只有一個變數 (variable)，如溫度 (p.42-44)、或者溶質量 (p.49,50)。現在我們要來考慮兩個同時改變的情形。

在室溫下，要溶解超過 36 克 (26.5 wt%) 的鹽，是不可能的。除非我們作了升溫的動作。如果我們把溶液加熱到攝氏 60 度，那麼鹽的飽和溶解量提高爲 37 克 (27.0 wt%)；80 度可溶解 38 克 (27.5 wt%)、100 度則可溶解 39.2 克 (28.2 wt%)。使用這些量測得到的數據，我們便可以製作出一張鹽與水的二元相圖。



鐵碳二元相圖 (binary phase diagram)

鋼鐵常用的則是**鐵碳二元相圖**，如下圖所示。由於鋼鐵有沃斯田鐵變態形成肥粒鐵的現象，因此鐵碳相圖相當複雜。相圖可以用於預測鋼鐵性質、開發新的鋼種。



平衡 (equilibrium)

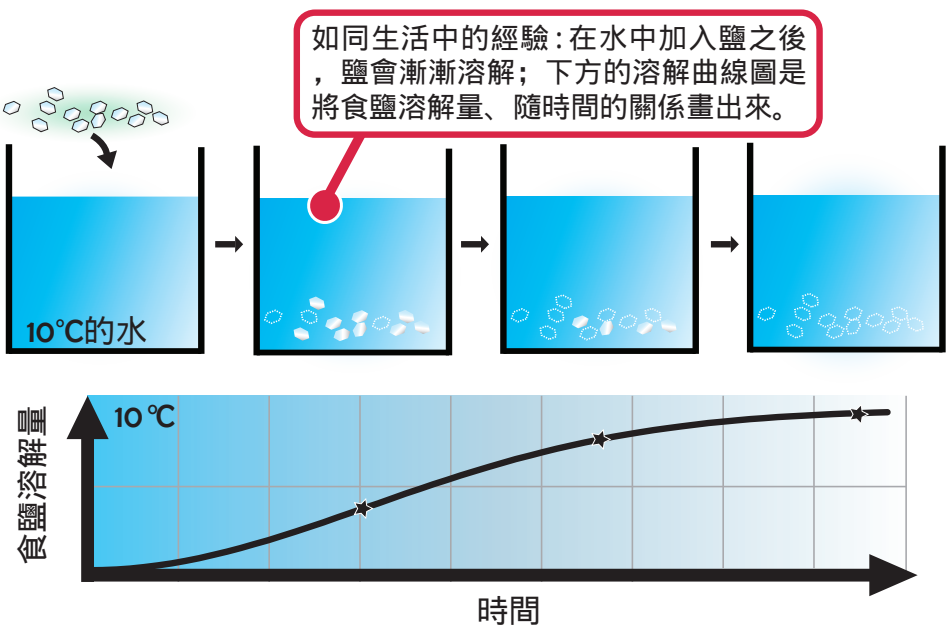
相圖告訴我們的，是一種平衡的概念。

鹽水並不是在水中加入鹽就一瞬間完全溶解，而是需要時間並經過充分攪拌才能達到。這代表到達平衡狀態是需要時間的。在相圖中表達的，便是最終的平衡狀態。在學術上，討論材料最終平衡狀態的學問，統稱爲「材料熱力學」，相圖是其精華所在；討論材料到達平衡狀態的學問，則稱爲「材料動力學」，TTT 圖則是其中一種應用。

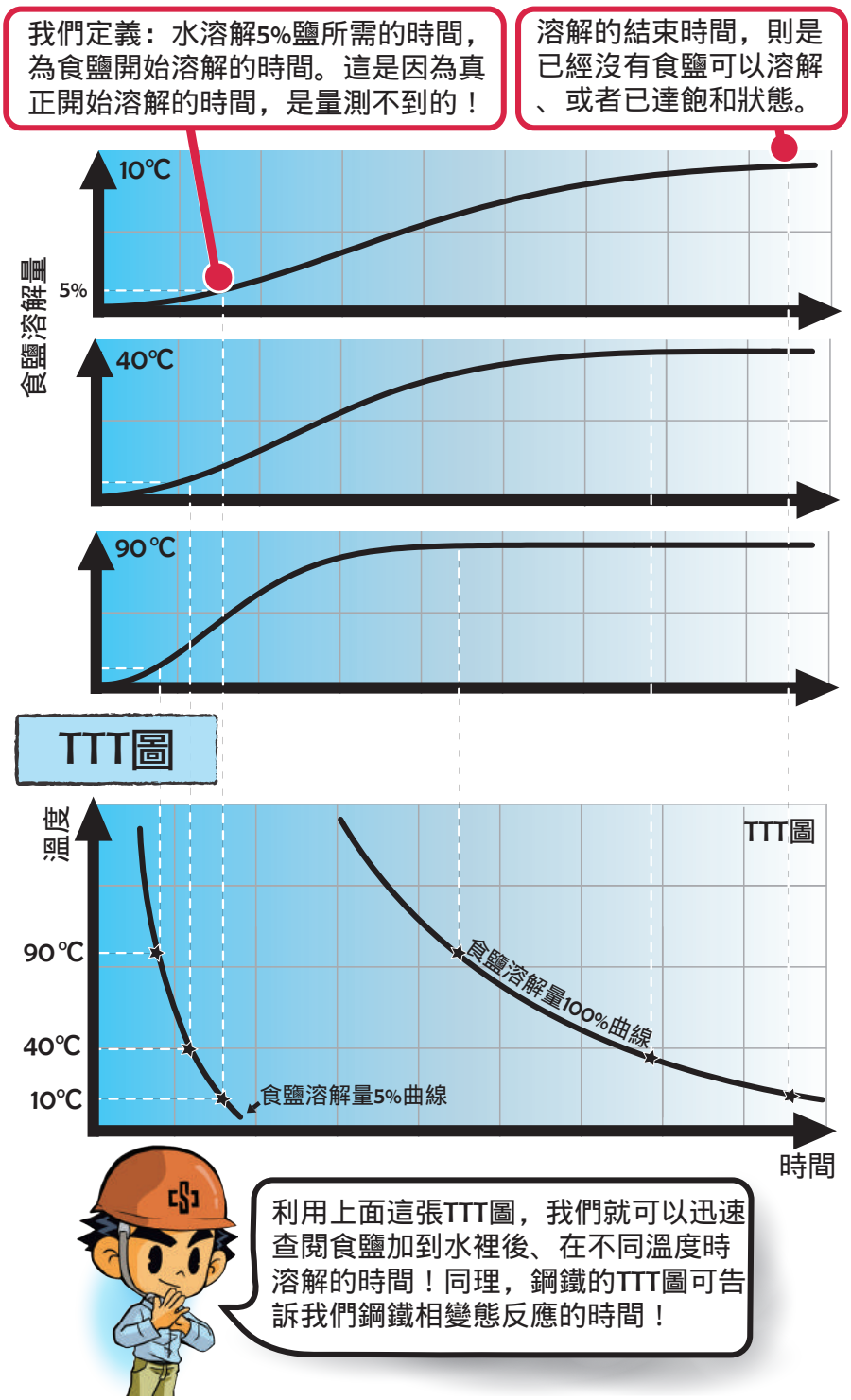
TTT 圖 (TTT diagram)

「TTT」圖的三個英文字母，代表的分別是時間 (Time)、溫度 (Temperature) 以及相變態 (Transformation)。爲了了解 TTT 圖，我們以鹽加入水中的溶解狀況來作舉例。

食鹽在放入 10°C 的水中，在此瞬間，食鹽的溶解量是零；隨著時間經過，食鹽溶解的量越來越多、最後達到完全溶解。如下圖：

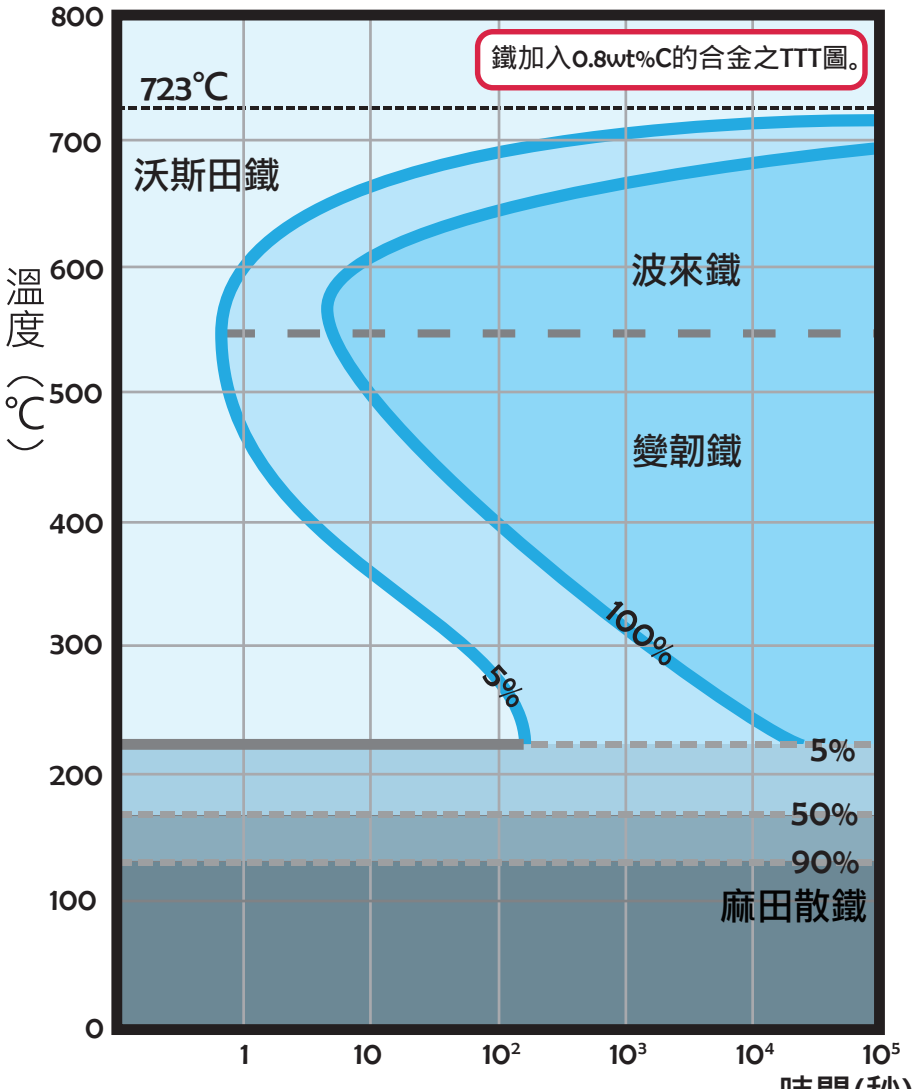


由於溫度高低會影響食鹽溶解的速率，因此收集許多不同的溫度時，溶解曲線的變化，作成最下方的圖表，這就是一張 TTT 圖。此張 TTT 圖表的相變態，指得是食鹽由固相轉變成液相的溶質。



鋼鐵的 TTT 圖

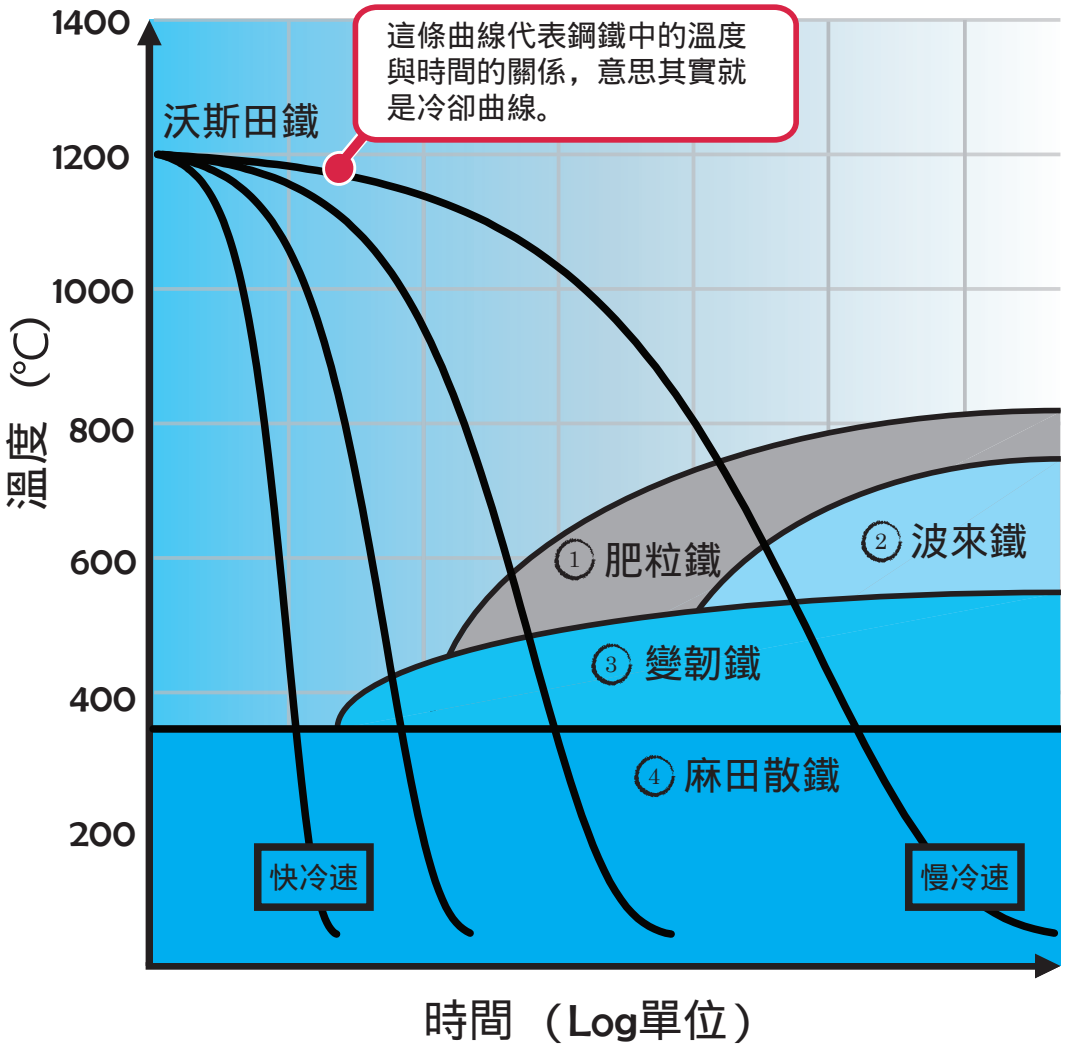
由於鋼鐵伴隨著固態相變態，因此 TTT 圖較上述的例子複雜許多。從此張 TTT 圖我們可以知道，鋼鐵的相變態與食鹽溶解不同，並不是越高溫越快。而 TTT 圖，便是常常拿來作爲學術分析的依據。



波來鐵、變韌鐵、麻田散鐵都由肥粒鐵、雪明碳鐵組成；只是外觀長的樣子不一樣，因此有不同名字。

鋼鐵的 CCT 圖

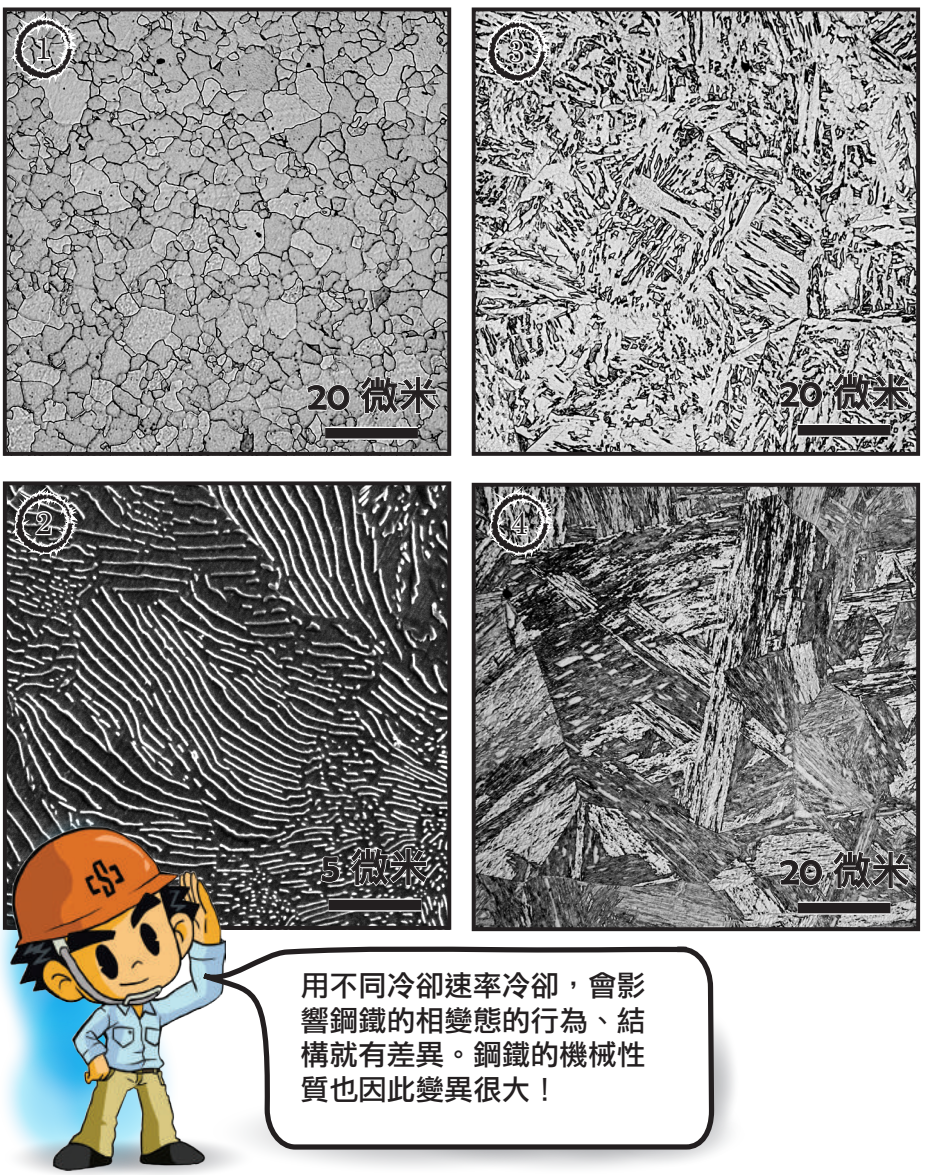
由 TTT 圖我們可以了解鋼鐵的相變態、微組織分布與溫度的關係。TTT 圖是作實驗得到。在實驗室，我們能瞬間控制試片的溫度至實驗溫度。然而在工業生產的時候，我們實際遇到的狀況，則會是隨著製程、產品大小的不同，會遇到慢冷、快冷等不同的冷速。把不同冷速下、相變態的組織關係作出圖來，則稱作 CCT(continous cooling transformation)，連續冷卻圖。



鋼鐵的微結構 (microstructure)

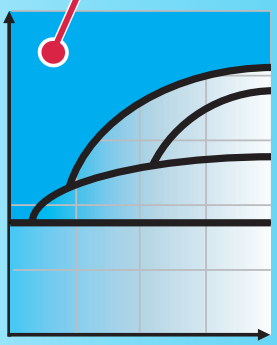
相圖告訴我們高溫時鋼鐵會從沃斯田鐵變成肥粒鐵 + 雪明碳鐵；TTT 圖、CCT 圖則告訴我們沃斯田鐵會變成波來鐵、變韌鐵。

究竟波來鐵和變韌鐵是什麼呢？其實它們都是肥粒鐵 + 雪明碳鐵，差別在於相變態的機制、以及相的分布。更白話的說就是：長的形狀不一樣。下圖顯示了各種鋼鐵的微結構。



沃斯田鐵

沃斯田鐵：
鋼鐵在高溫時，呈面心立方結構的組織。

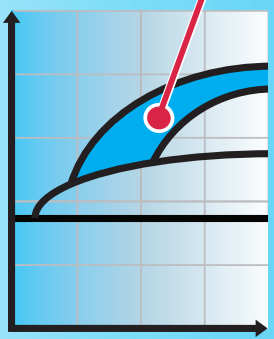


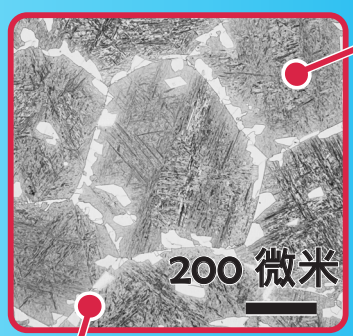
一顆顆的先前沃斯田鐵晶粒。

一般而言沃斯田鐵在低溫時不復存在、然使用特殊方法可讓高溫沃斯田鐵顯現！

肥粒鐵

肥粒鐵：
鋼鐵在較低溫時、呈體心立方結構的組織。





一顆顆的沃斯田鐵晶粒。

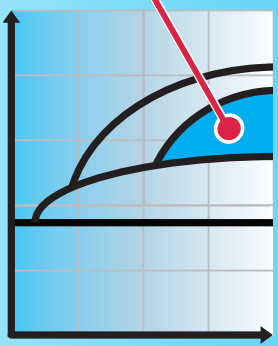
在沃斯田鐵相變態成肥粒鐵的過程中，肥粒鐵會優先從沃斯田鐵晶界生長出來。

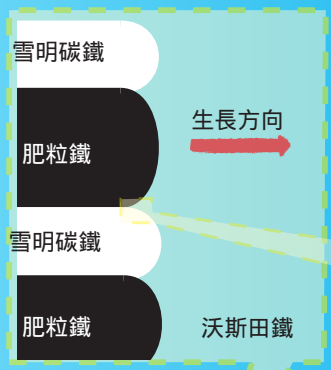
紀彥廷/拍攝

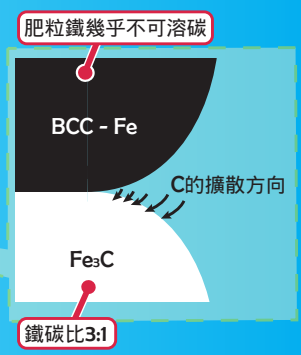
白色相為部分生成之肥粒鐵。

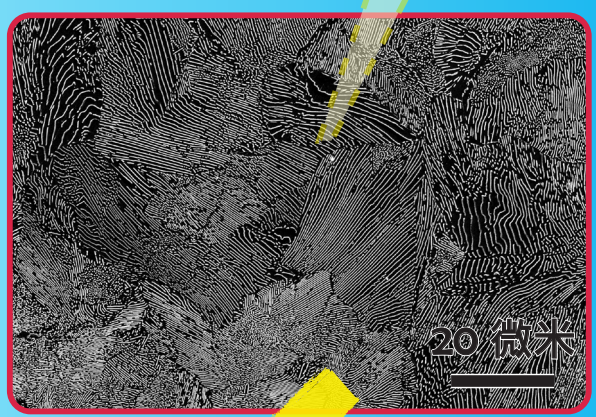
波來鐵

波來鐵：
肥粒鐵、雪明碳鐵呈規則、層狀排列的組織。

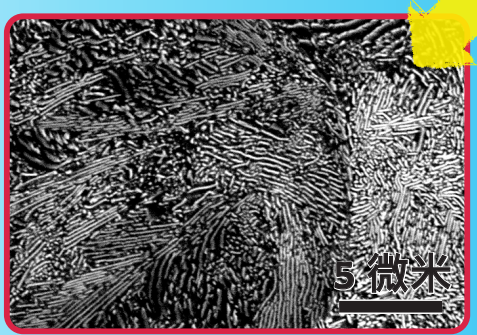








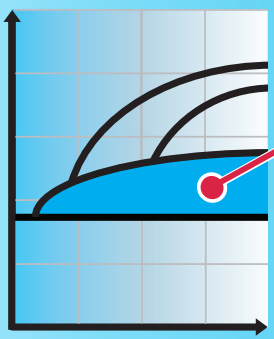
溫度下降



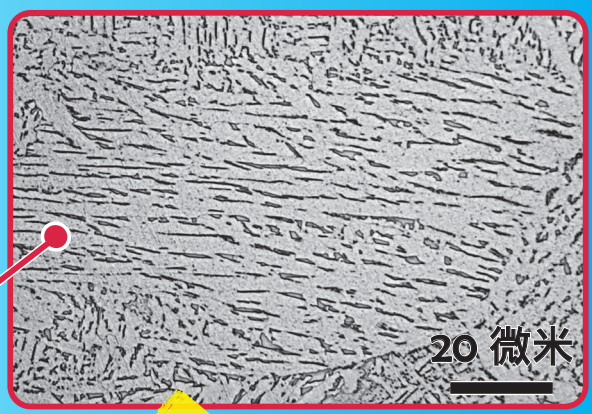
降低相變態的溫度時，因為溫度低、碳擴散越慢，因此波來鐵組織會更細密！

變韌鐵

變韌鐵：
肥粒鐵、雪明碳鐵共同形成產生的束狀組織。



同方向平行組織、組成一束束變韌鐵

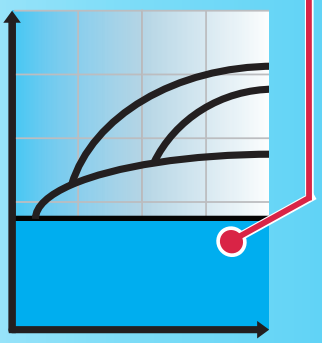


高碳； +Si

降低相變態的溫度、則變韌鐵的組織會變得非常細密。我們只能約略分辨一束束的變韌鐵。

麻田散鐵

麻田散鐵：
由於從高溫冷卻速度過快、碳來不及擴散、產生過飽和的肥粒鐵。

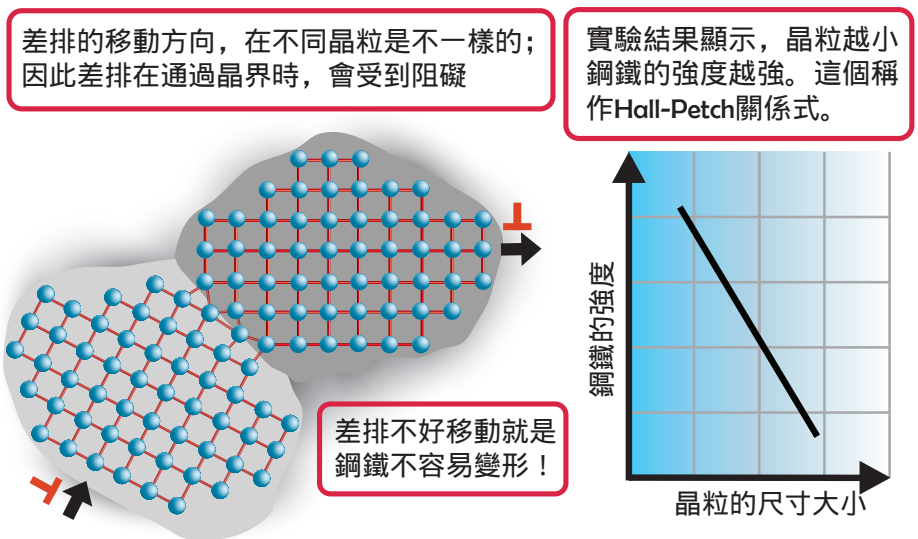


碳含量增加

張雅齡/拍攝

讓鋼鐵更強壯— ①晶粒細化

我們了解到鋼鐵變形是由於差排移動所導致。因此如果我們可以「阻止差排移動」，鋼鐵便不易變形；不易變形表示鋼鐵強度提高了。我們舉的例子，僅僅是差排在完美晶格中的移動。其實鋼鐵是由許多晶粒所組成，當差排移動到晶界附近時，由於會經過排列混亂的晶界且移動到下一個晶粒需要改變方向，造成差排的移動受到阻礙。差排的移動受到阻礙，也就是金屬的變形過程受到阻撓，需要比原本的施力更大的力才能使差排移動，從另一個角度來看，使金屬變形所需要的力量變大，和金屬強度提升是一樣的意思。



既然晶界普遍存在於材料中，爲什麼要將晶界強化特別列在強化機制中呢？雖然大部分的材料中都會有晶界的存在，但透過一些特殊的製造方法，我們可以控制材料中的晶粒大小。當晶粒尺寸縮小時，晶界占整體材料的比例也就上升。當晶界的量增加，差排在移動時受到晶界阻礙的機會也就增加，最終造成材料的強度提升，達到強化的效果。

讓鋼鐵更強壯— ②固溶強化

由鐵和鋼的章節中，我們了解到碳原子可以固溶在鐵原子中，在特定比例下形成鋼。事實上，除了碳原子之外，元素週期表上許多的元素都可以固溶於鐵中，例如：硼、矽、鎳、鉻、鈮等等。如前所述，固溶的方式分爲插入型與置換型。

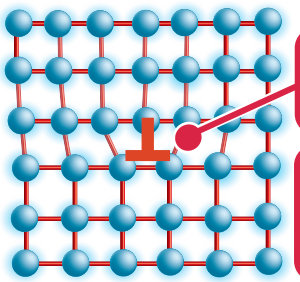
從下面的圖我們可以發現，位於差排下方的原子排列較鬆散、空間較大，因此：

①插入型原子較容易待在 A 位置。

②比鐵原子大的置換型原子容易待在 B 位置。

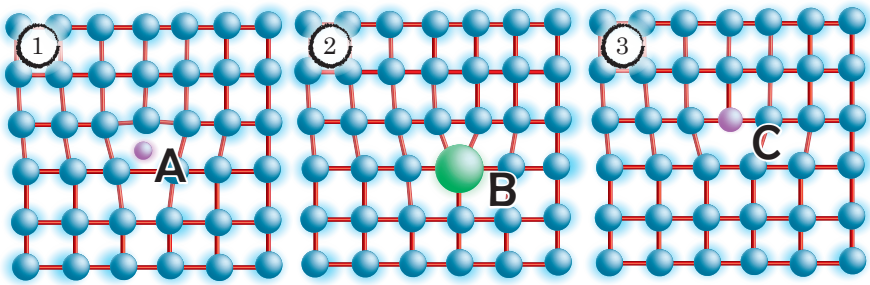
位於差排上方的原子排列較緊密，因此：

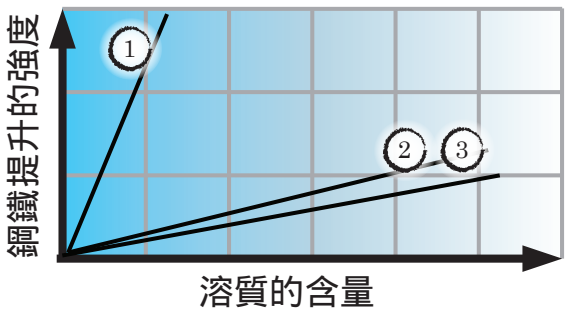
③比鐵原子小的置換型原子較容易待在 C 位置。



差排下方的鐵原子排列較正常晶格鬆散；相反的，差排上方則是較為緊密。

固溶溶質與鐵原子大小不同、會對晶格造成扭曲。因此，對差排會產生如①②③的交互作用，從而抑制差排的移動。



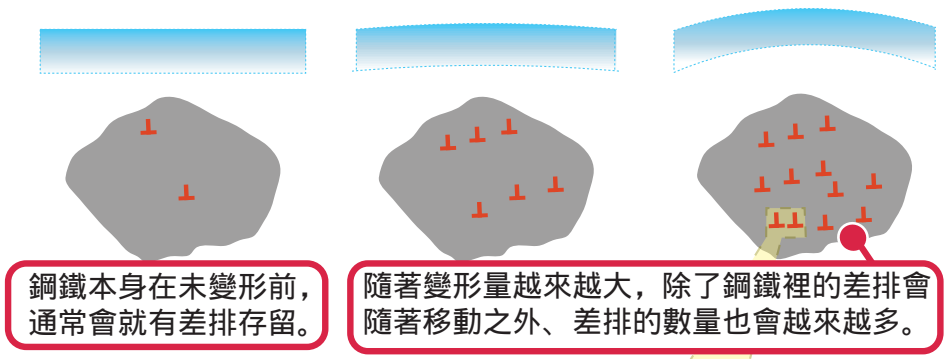


實驗結果顯示，置換形原子通常對鋼鐵的強度，具有提升的效果；而插入型溶質與差排作用強烈，對鋼鐵強度有顯著的提升！

讓鋼鐵更強壯— ③加工硬化

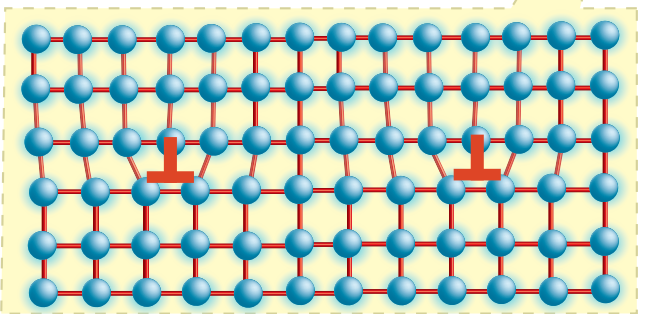
鋼鐵在受到外力時形成差排以產生形變。而持續對鋼鐵進行變形，差排的量也會越來越大，這樣的過程可以稱之爲**加工**。當鋼鐵受到的加工量越大，金屬所產生的形變量也就越大，而內部所相對應產生的差排數也隨之增加。差排越多，會彼此牽制、互相妨礙，就好像交通大塞車、打結。使得差排的移動與產生會越來越困難，最終產生了強化材料的效果。這個效應稱爲**加工硬化 (work hardening)**。

彎折一條鐵線，彎了好幾次後會越來越難彎，就是這個道理。



鋼鐵本身在未變形前，通常會就有差排存留。

隨著變形量越來越大，除了鋼鐵裡的差排會隨著移動之外、差排的數量也會越來越多。



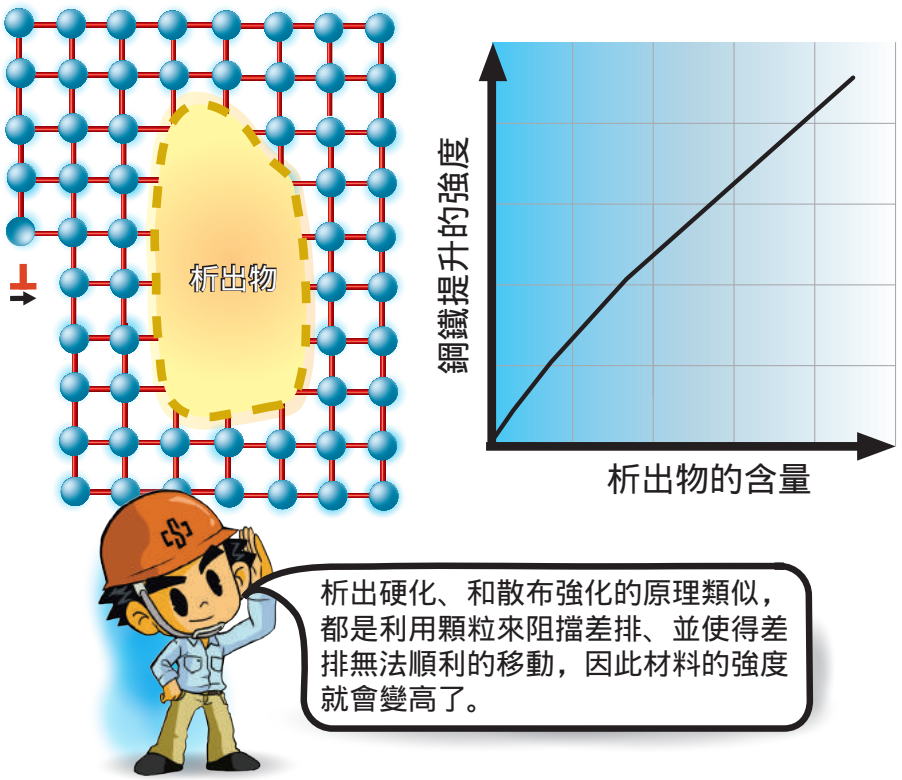
差排之間會互相排斥。差排越來越多的時候，差排之間的距離比較近。因此，差排要移動會更加困難，因此需要更大的力量才能進行差排移動、也就是鋼鐵的變形。此即為加工硬化。

讓鋼鐵更強壯— ④析出硬化與散布強化

析出硬化和散布強化的原理，是利用一些顆粒，使差排的移動困難過，因此達到強化材料的效果，兩種機制的不同點僅在於：在鋼鐵中，這些顆粒形成的方式。

散布強化 (dispersion strengthening)：在鋼鐵仍在高溫液態時，加入一些不會溶解的顆粒，並使其均勻散布。材料冷卻至固態時，這些顆粒就會散布在材料當中，妨礙差排的前進，因而達到強化材料的效果。

析出強化 (precipitation strengthening)：某些合金元素於高溫時，與鋼鐵形成均勻混合物；但是，在較低溫時，發生過飽和析出的特性，與碳發生反應形成細小的碳化物。此析出物能廣泛均勻的分布。

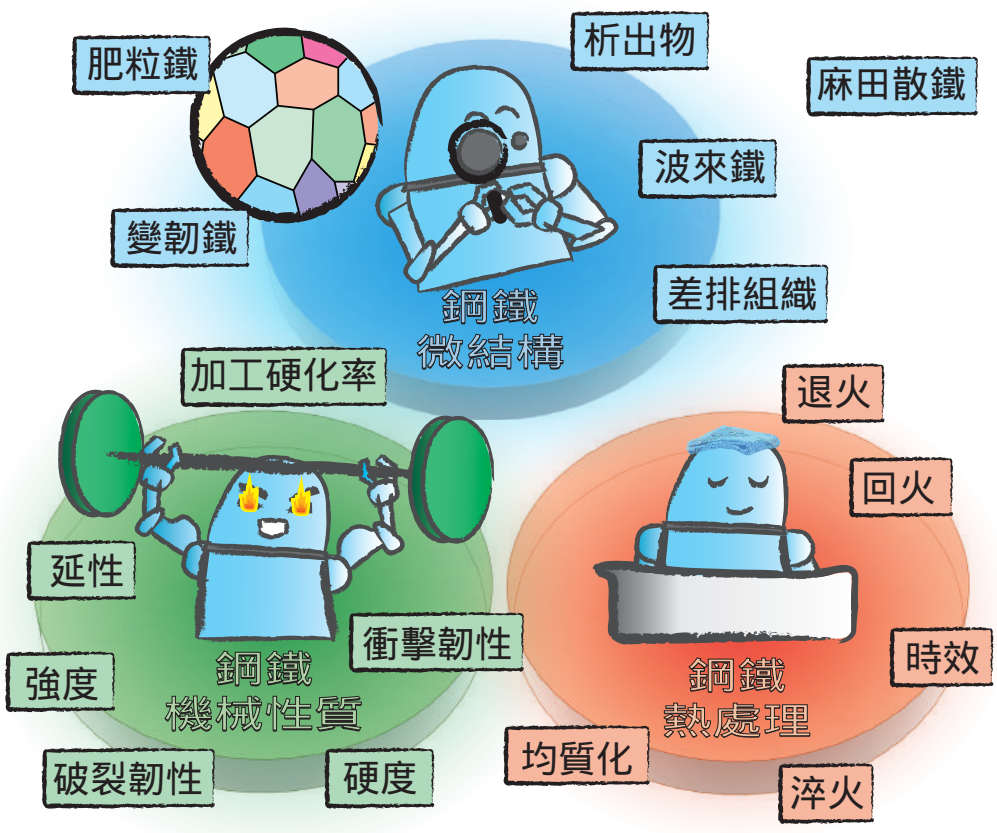


1-5 顯微結構觀察與性能檢測

Microstructure observation and properties evaluation

顯微結構觀察分析技術

從上一節，我們了解到很多關於鋼鐵熱處理、機械性質的基礎知識。同時我們也知道，鋼鐵內部是由含有許多晶粒所組成，這些晶粒的組成、形狀肯定會和機械性質相關；因此要了解鋼鐵的機械性質，顯然就必須了解這個鋼鐵的顯微結構。



觀察

所謂的「觀察」，實際上會經過好幾個步驟。舉例來說，在我們的眼睛看到物體之時，必須：

①光線照射在物體上，接著

②光線被物體反射，再來

③光線透過眼睛被接受到。

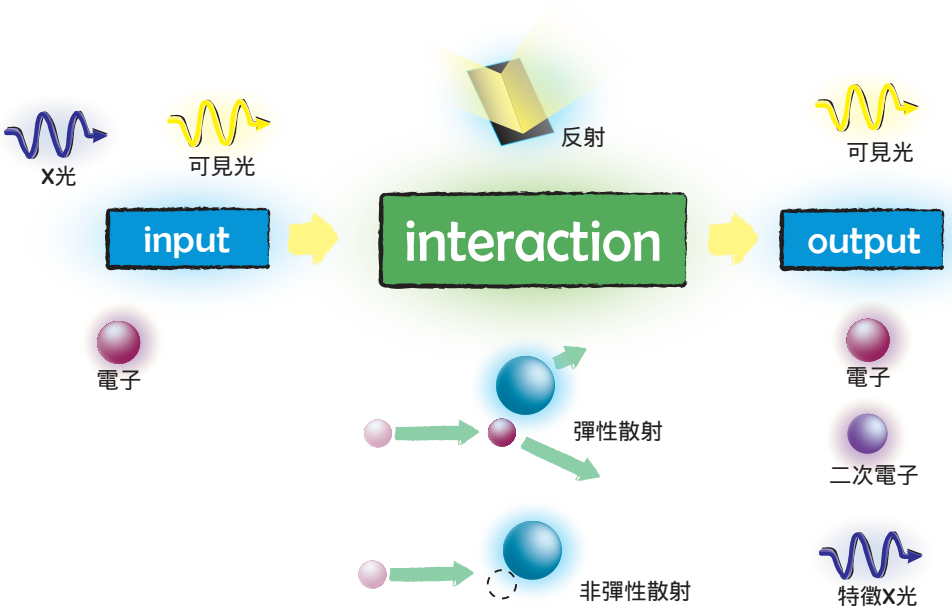
用科學的術語來描述，分別是：

①輸入訊號。(input)

②輸入訊號與材料產生交互作用，產生新訊號。(interaction)

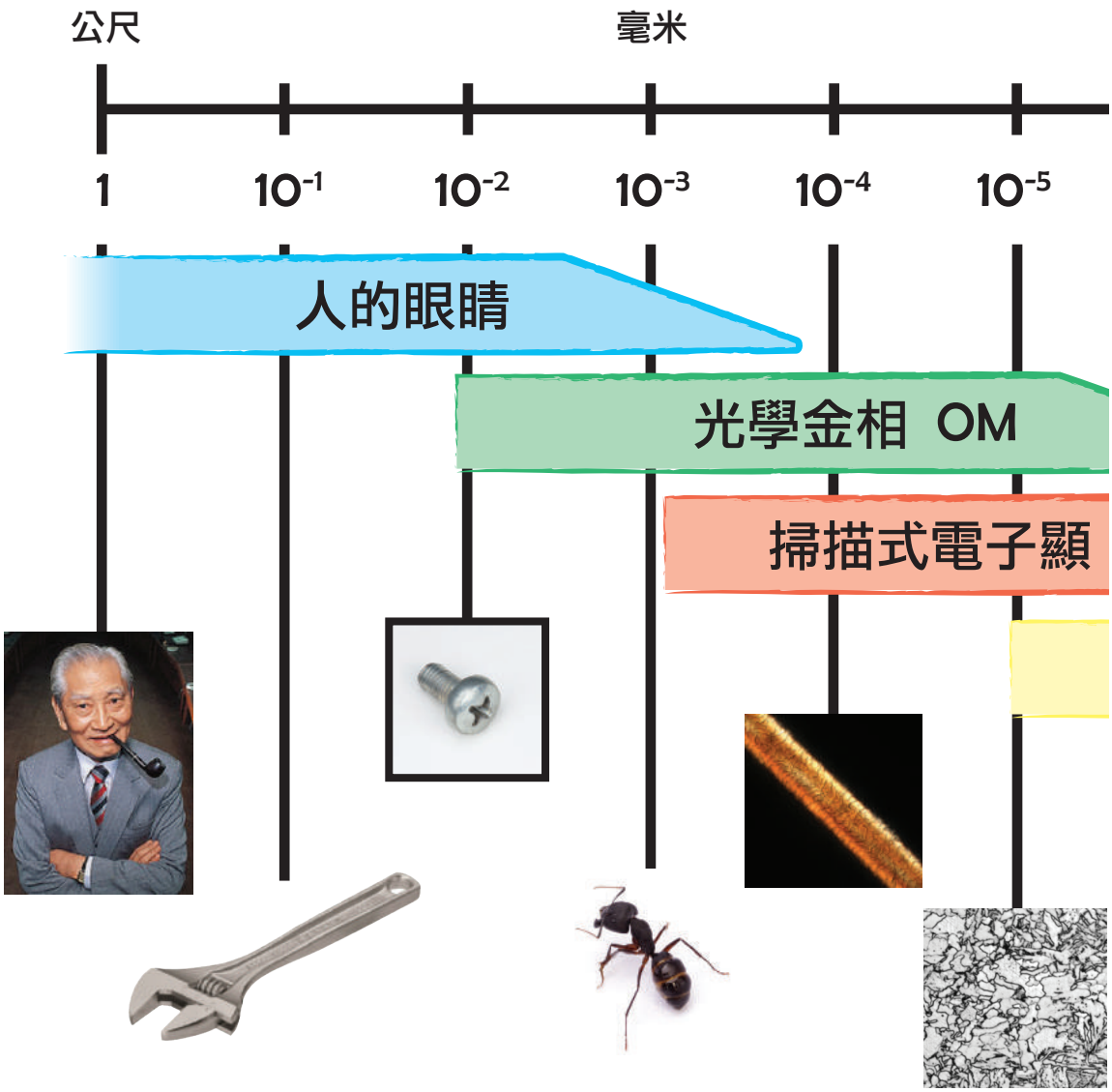
③輸出新訊號。(output)

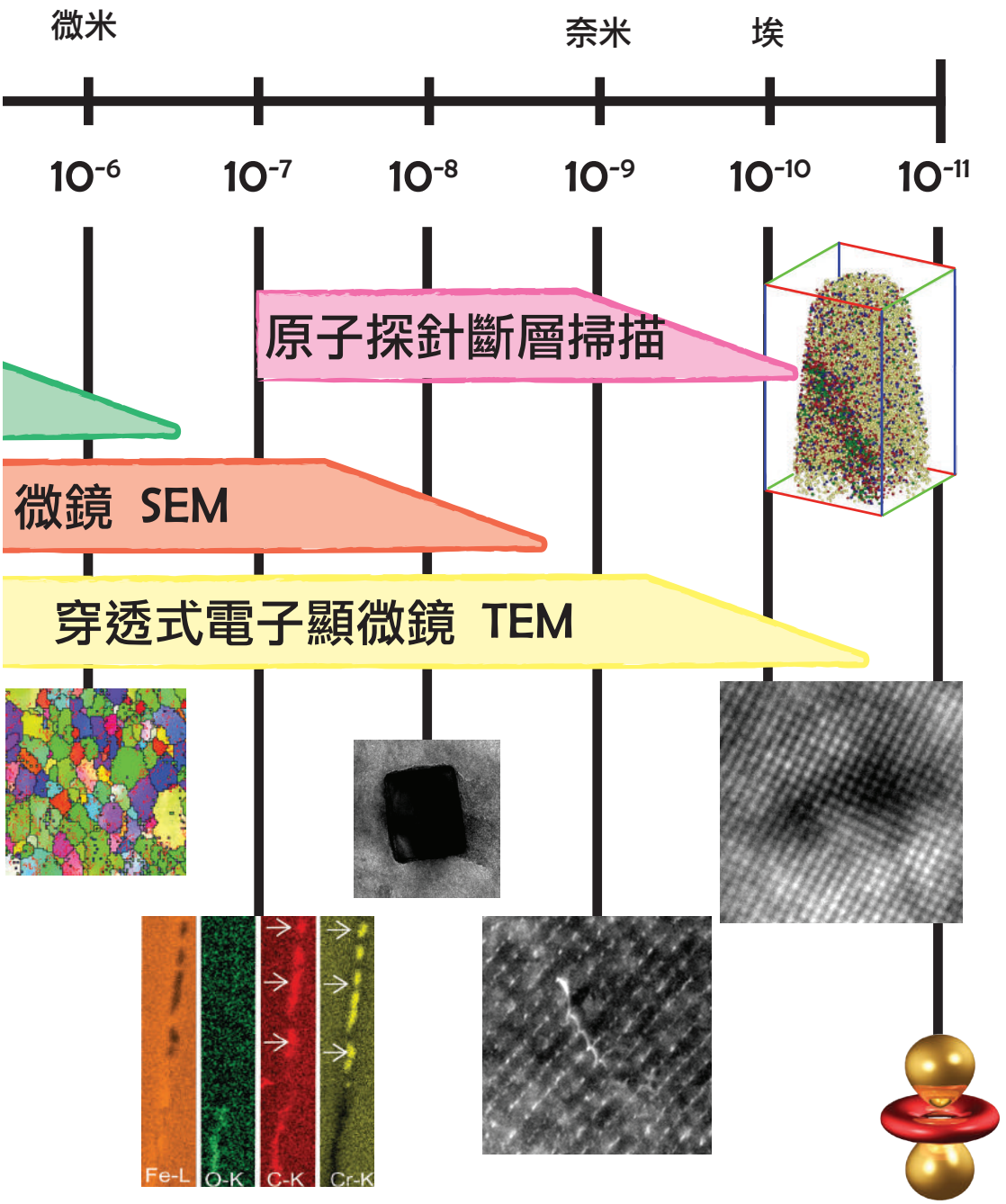
根據輸入訊號（電子、X 光等）、輸出新訊號（穿透電子、二次電子、特徵 X 光等）的不同，科學家們發展了多樣的材料分析方式。每種現有的分析方式，都具有其優點以及顯微結構的觀察缺點。以下幾個小節，分別就常見的顯微分析技術作簡單介紹。



機器的空間解析度

如果不靠著各種機器，人眼只能勉強看到約 0.1mm 之大小。然而許多微結構的尺度都很小。靠著各式各樣的機器，科學家才能對鋼鐵微結構進行分析。




微米
奈米
埃
10-6
10-7
10-8
10-9
10-10
10-11
原子探針斷層掃描
微鏡 SEM
穿透式電子顯微鏡 TEM
Fe-L
O-K
C-K
Cr-K

顏鴻威 / 製作

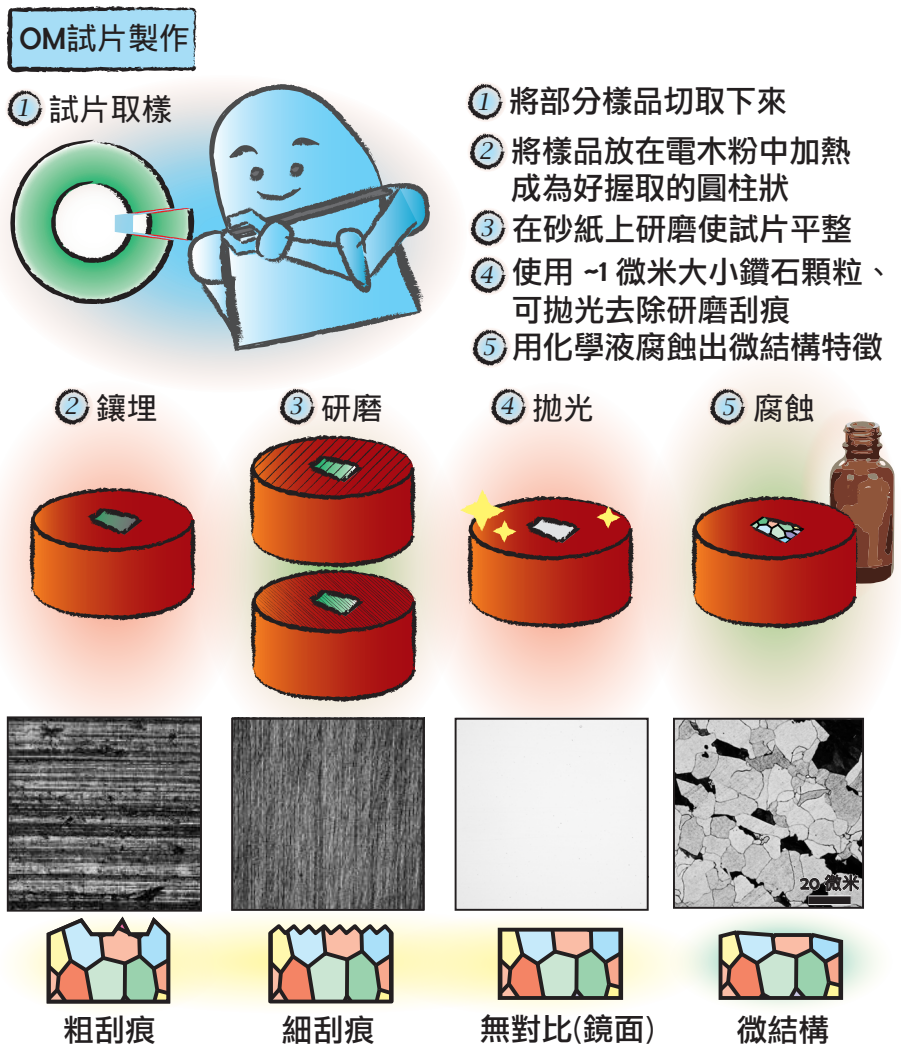
最基礎的顯微結構分析工具 - 光學顯微鏡

光學顯微鏡 (Optical Microscope) 是材料科學家最古老的分析方式儀器，其觀察結果稱爲金相 (Metallography)。虎克將軟木塞放到光學顯微鏡之下，因而發現了一顆一顆的植物細胞壁；與之相似的是，科學家將鋼鐵放在顯微鏡底下，則發現了一顆一顆的晶粒。光學顯微鏡使用可見光，可見光的波長在 0.4 - 0.7 微米，因此光學金相的解析度極限大約在 0.5 微米上下。

生物實驗用的光學顯微鏡為透光式；金相用的則是如上圖的反射光式顯微鏡。而光學金相主要的原理，其實跟衛星的空照圖很類似：都是從正上方來看。我們可以從衛星空照圖分辨出地形面貌，同樣的道理，從鋼鐵「空照圖」我們可以分辨鋼鐵微結構。

光學金相的製備

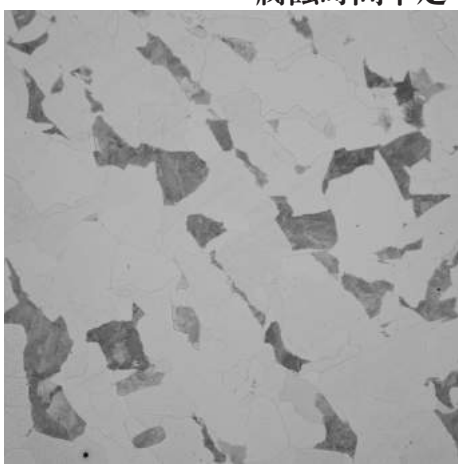
金相的觀察，是利用試片表面的凹凸不平，造成的顏色不同的對比。在此之前，試片表面的凹凸不平必須要先能夠「製造出來」。而製備金相的標準步驟，是先將試片研磨、拋光之後，消除原先試片的不平整。接著利用化學腐蝕液進行試片表面的腐蝕。在腐蝕的過程中，由於晶粒的方向性、相的差異、以及晶界，會造成腐蝕的速率差異。因此最終造成表面高高低低起伏的試片。因此就可以用光學顯微鏡進行觀察。



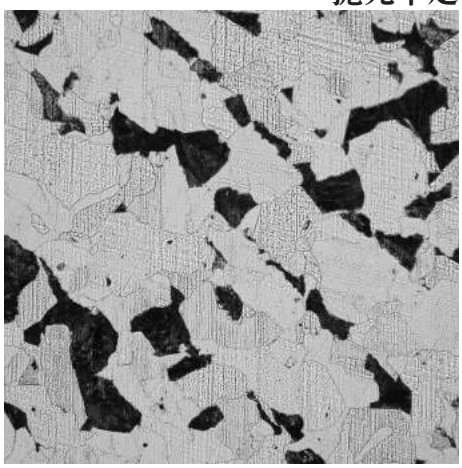
金相製備的藝術

金相照片的製作，每一個步驟都必須仔細。並仰賴操作者的經驗。

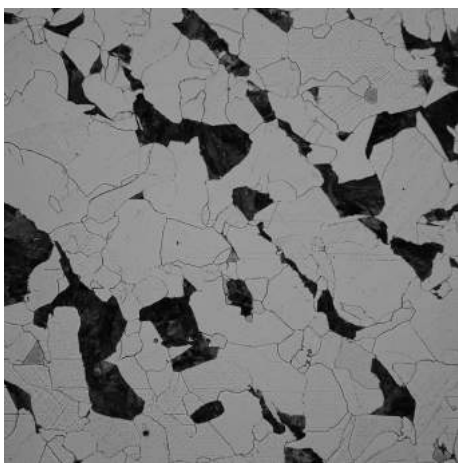
腐蝕時間不足

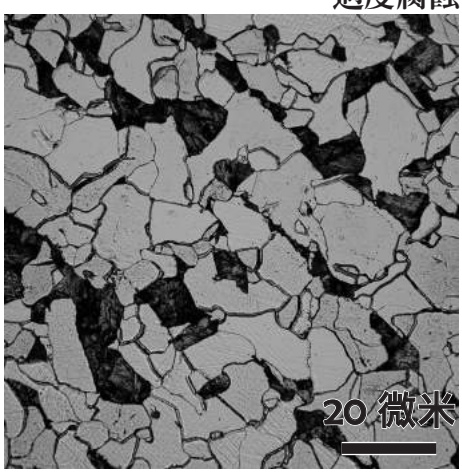


拋光不足



過度腐蝕





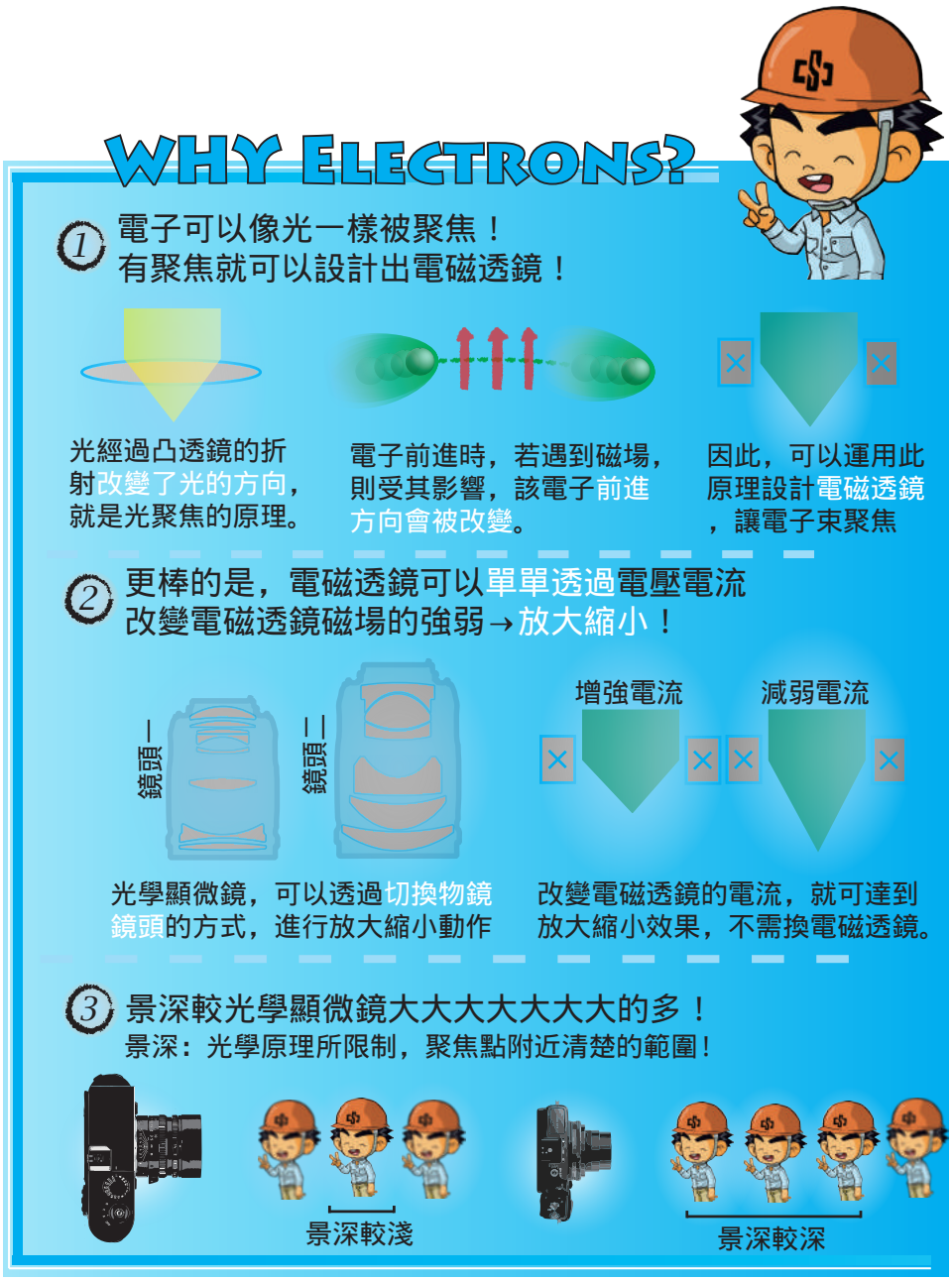
▲ 上圖的四張圖其實是同一個區域！可以說試片的準備其實非常重要！會影響到眞實結構的判讀。

KEY POINT!

仔細的磨平、拋光試片、
適當的腐蝕液及腐蝕時間。

進一步的結構分析 - 利用電子

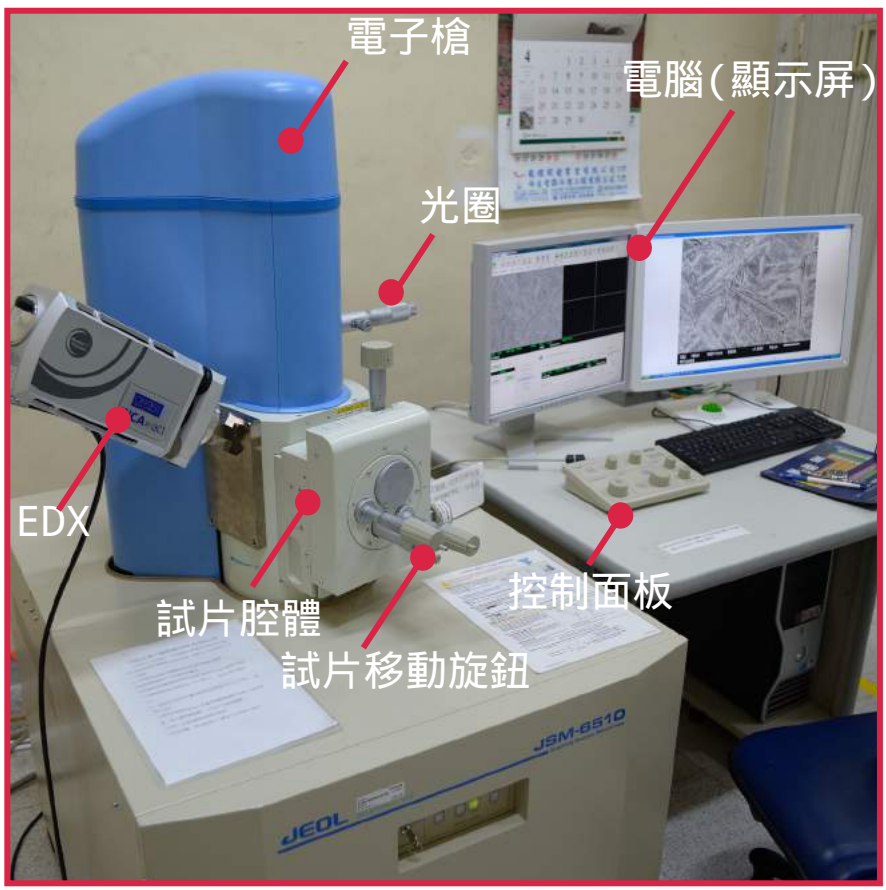
由於光學顯微鏡有其解析度的極限；此外，光學顯微鏡有「景深過淺」的問題，因此使用上會有所限制。由於電子帶有負電，因此可以利用電磁透鏡對這些電子進行聚焦、放大的動作，
因此可代替燈泡成爲顯微鏡的光源，我們將這種機器統稱爲電子顯微鏡。



掃描式電子顯微鏡 (SEM)

掃描式電子顯微鏡 (Scanning Electron Microscopy, SEM) 使用電子作爲光源，除了可以對光學金相試片作進一步放大之外，還可以利用掃描式電子顯微鏡觀察材料的破斷表面。

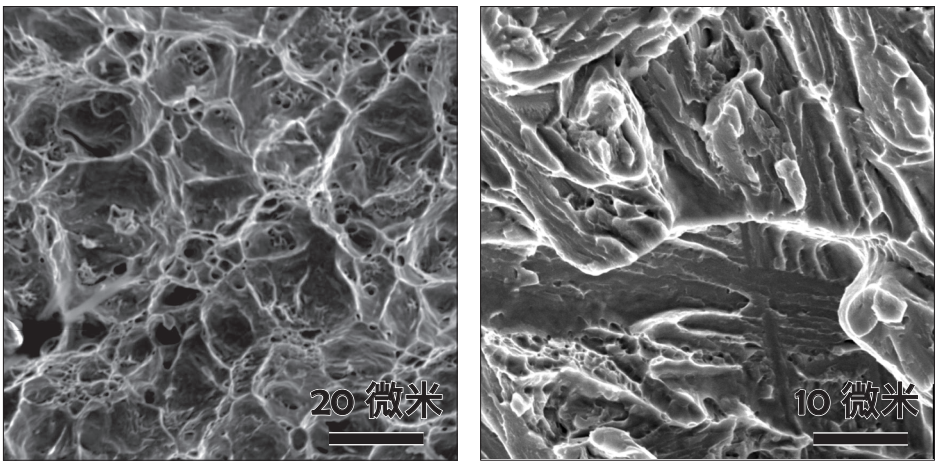
除了作試片的組織觀察之外，掃描式電子顯微鏡通常可配備有能量散射光譜儀或者波長散射光譜儀（後述），因此可用來作成分分析。



▲ SEM 的設備照片

掃描式電子顯微鏡的新進展

近來掃描式電子顯微鏡會選配裝有背向式電子散射繞射 (Electron Back-Scattering diffraction, EBSD) 之偵測器。此偵測器能夠偵測背向電子散射所產生的繞射菊池圖 (Kikuchi pattern)，利用菊池圖樣可以用來鑑定試片表面的晶體結構、晶體方位等等。爲 SEM 的應用作了更進一步的突破。



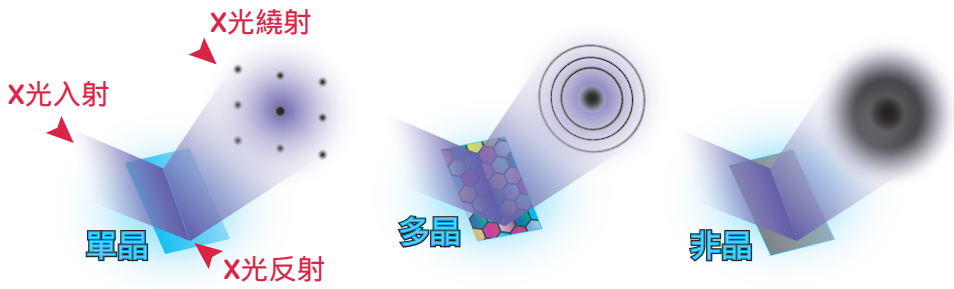
▲ 由於光學顯微鏡景深小，因此不適宜作破斷表面的觀察。SEM 則因爲景深大，因此破斷表面能夠被清楚的觀察到。

▲ EBSD 是利用菊池繞射圖（左圖），能夠辨別結構（中圖）中，每一顆晶粒的晶體方位；不同的方位用不同的顏色表示（右圖）

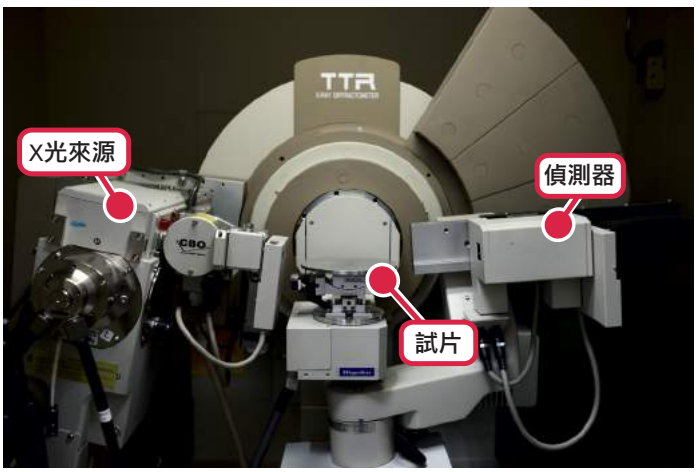
X 光繞射分析儀

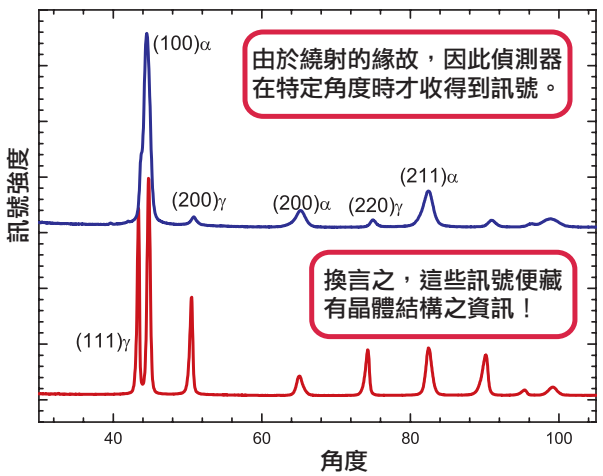
X 光繞射分析儀 (X-Ray Diffractometer, XRD) 是利用入射 X 光，與試片的晶體結構發生布拉格 (Bragg) 繞射。繞射讓我們在某些特定角度時，才能偵測到 X 光的訊號。

由於繞射來自於晶體結構的資訊，因此可以用來進行相鑑定 - 了解材料的結構、以及各自結構的數量多寡。



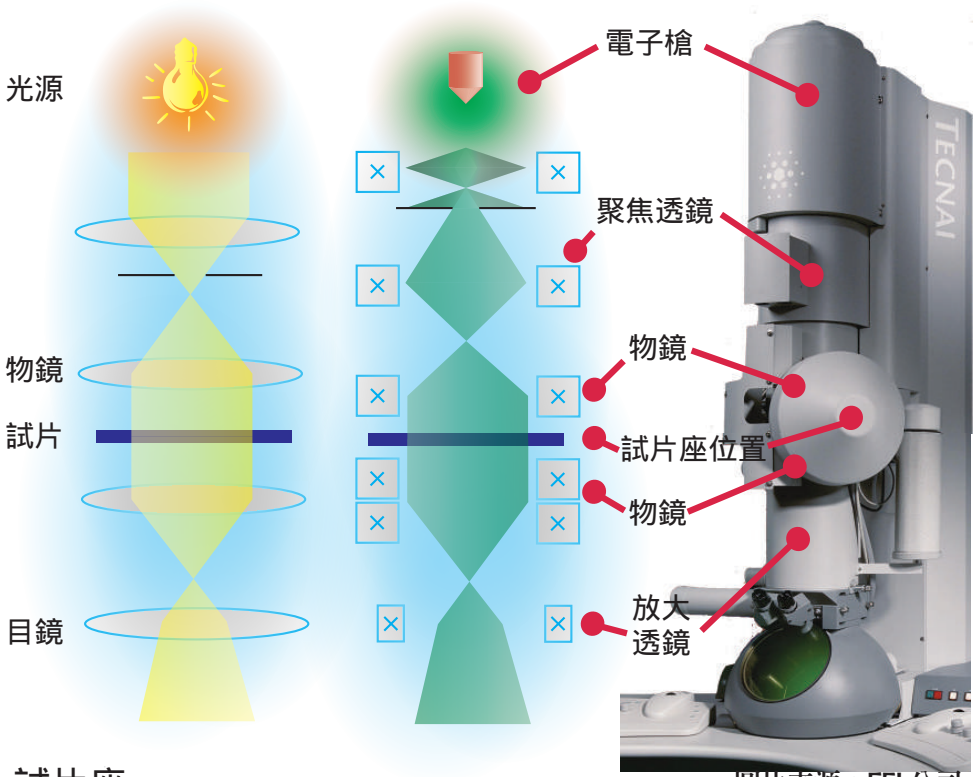
繞射的結果為這些繞射點、繞射環。其位置與間距，與該晶體的晶體結構、方向有關。因此，X光繞射可以用來鑑定這些微結構的資訊。



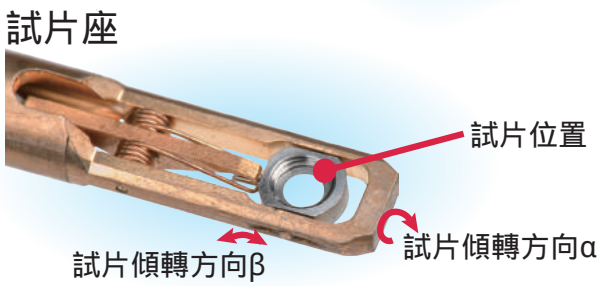


穿透式電子顯微鏡 (TEM)

穿透式電子顯微鏡 (Transmission Electron Microscope, TEM) 的原理，跟生物用的穿透式光學顯微鏡非常類似，只是入射的光源改成電子束。其主要的光路圖爲：電子經由電子槍發射後，經後續透鏡聚焦在試片上，穿透試片後，再進行後續的放大作業。最後電子投射到螢光屏、或者是感光元件 (CCD 或底片) 上爲我們所看到。



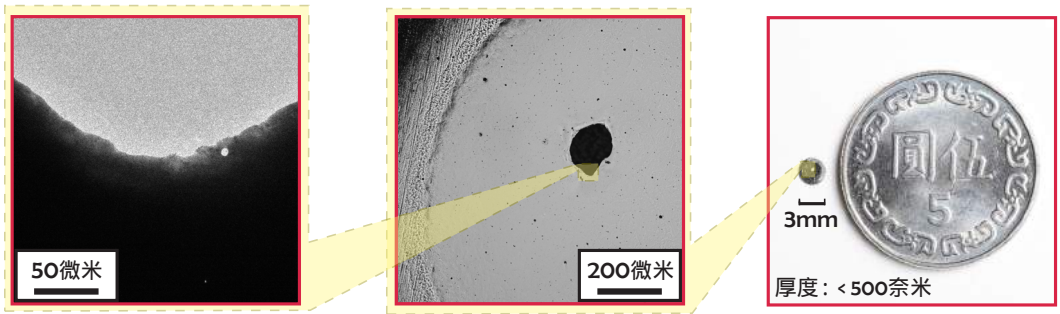
圖片來源：FEI 公司



由於TEM可以進行晶體結構、方位相關的鑑定，因此試片的角度控制是TEM非常重要的一環。

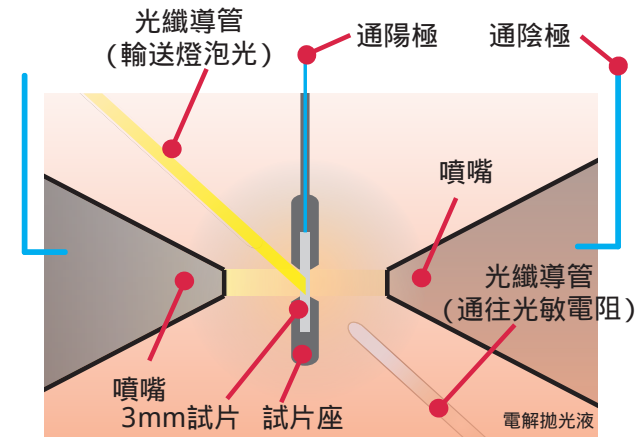
穿透式電子顯微鏡的試片

由於電子的穿透性很差，因此試片必須很薄，才有機會讓大部分穿透過試片。這裡的薄，指的是約 200nm 上下。約是頭髮半徑的 100 分之一。那麼要怎麼獲得製備如此薄的試片呢？金屬 TEM 試片的製備，最方便的方法爲雙噴電解拋光。



▲ TEM 的試片，國際公定爲 3mm 大小。然而實際上，電子能夠穿透的部分，只有中間小洞的周遭部分。在這麼小的範圍的觀察、卻能夠提供豐富的微結構、方位、元素分布等資訊，可說是見微知著的最佳典範。

TEM試片製作

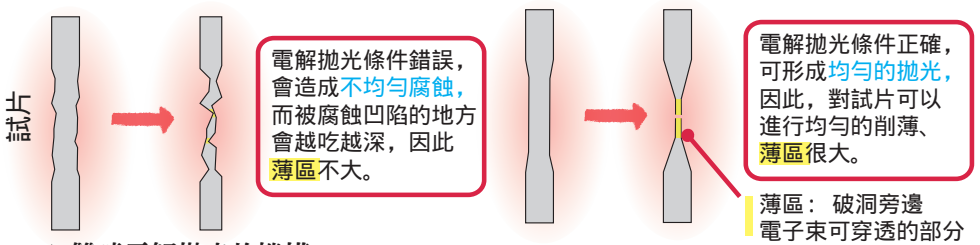


試片：
用研磨方式削薄到60微米左右厚度。

電解拋光液：
特殊的化學酸性液，搭配適當電壓電流可具有拋光減薄效果。

噴嘴：
對試片、進行持續的拋光液沖洗。以維持穩定的酸性溶液濃度。

光纖導管：
其一為輸送燈泡光，另一為感測燈泡光。光線透過瞬間，光敏電阻感應到光線，代表試片有破洞，因而停止機器運轉。



▲ 雙噴電解拋光的機構

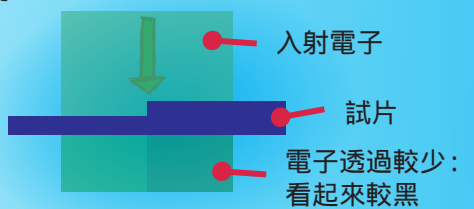
在穿透式電子顯微鏡當中，影像的解析不像光學顯微鏡及掃描式電子顯微鏡直接。在穿透式電子顯微鏡當中，影像的對比，最主要是來自於**試片的厚度**、以及**試片的繞射效應**。

穿透式電子顯微鏡可以帶給我們的資訊相當豐富。**極微觀的影像解析**，例如：微小的析出物、碳化物；晶界、晶粒大小、雙晶結構分析之外、差排分布等等，亦可以作**晶體結構的分析**、**結晶方位的分析**、**差排的分析**等等。

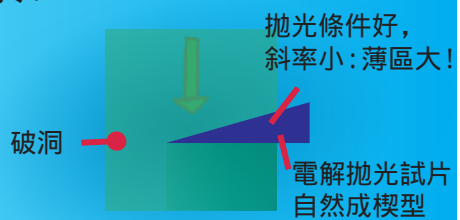
穿透式電子顯微鏡亦常附加**能量散射光譜儀**，或者**能量損失光譜儀**，如此一來更可以對顯微結構的成分（後述）作清楚鑑定。

TEM IMAGE

① 厚度對比：厚度差異可能來自於：

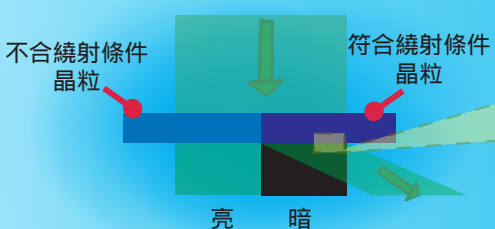


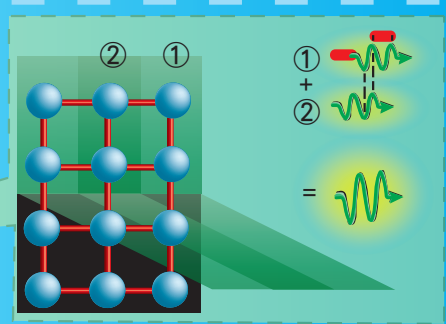
在雙噴電解拋光時，因為相的不同、會造成拋光速率不同，試片會有厚度差異。



在雙噴電解拋光時，因距破洞遠近的不同，試片有厚度差異。然而，試片厚度均勻、較好。

② 繞射對比：



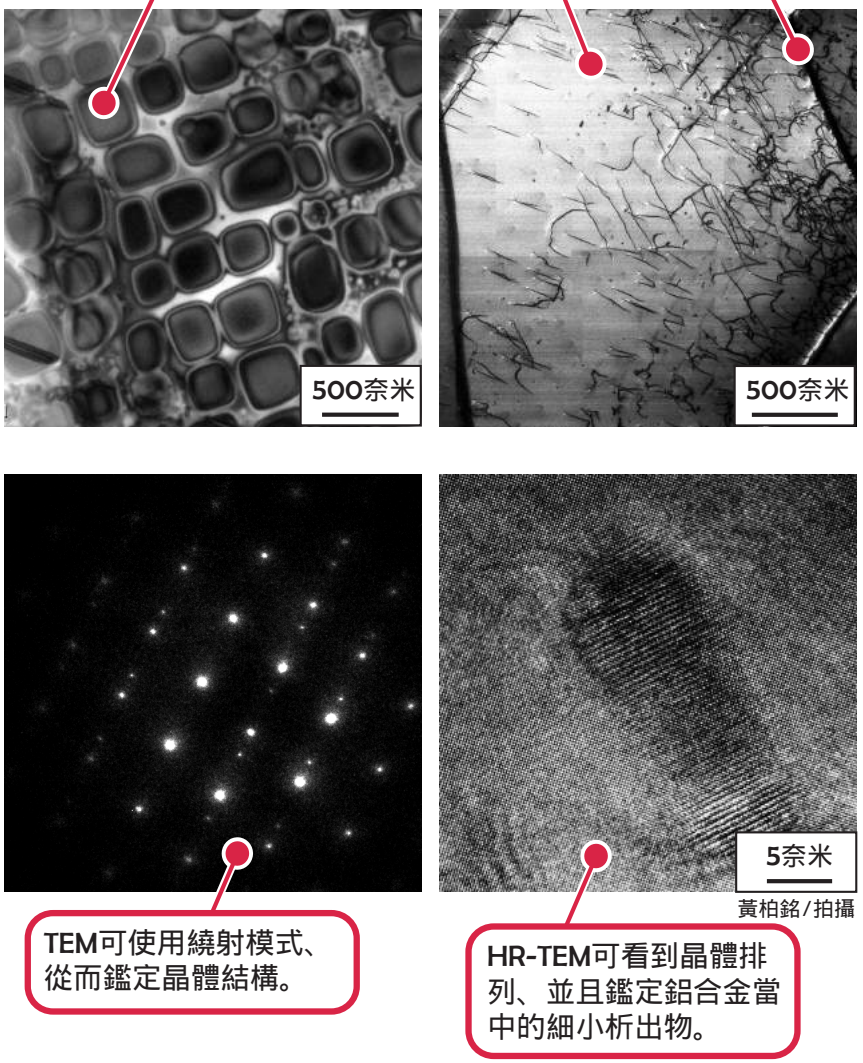


晶體發生繞射時，會讓TEM下的微結構影像、呈現深黑色！

晶體方位符合繞射條件時，會使繞射電子量遠大於穿透電子的量！

穿透式電子顯微鏡 (TEM)

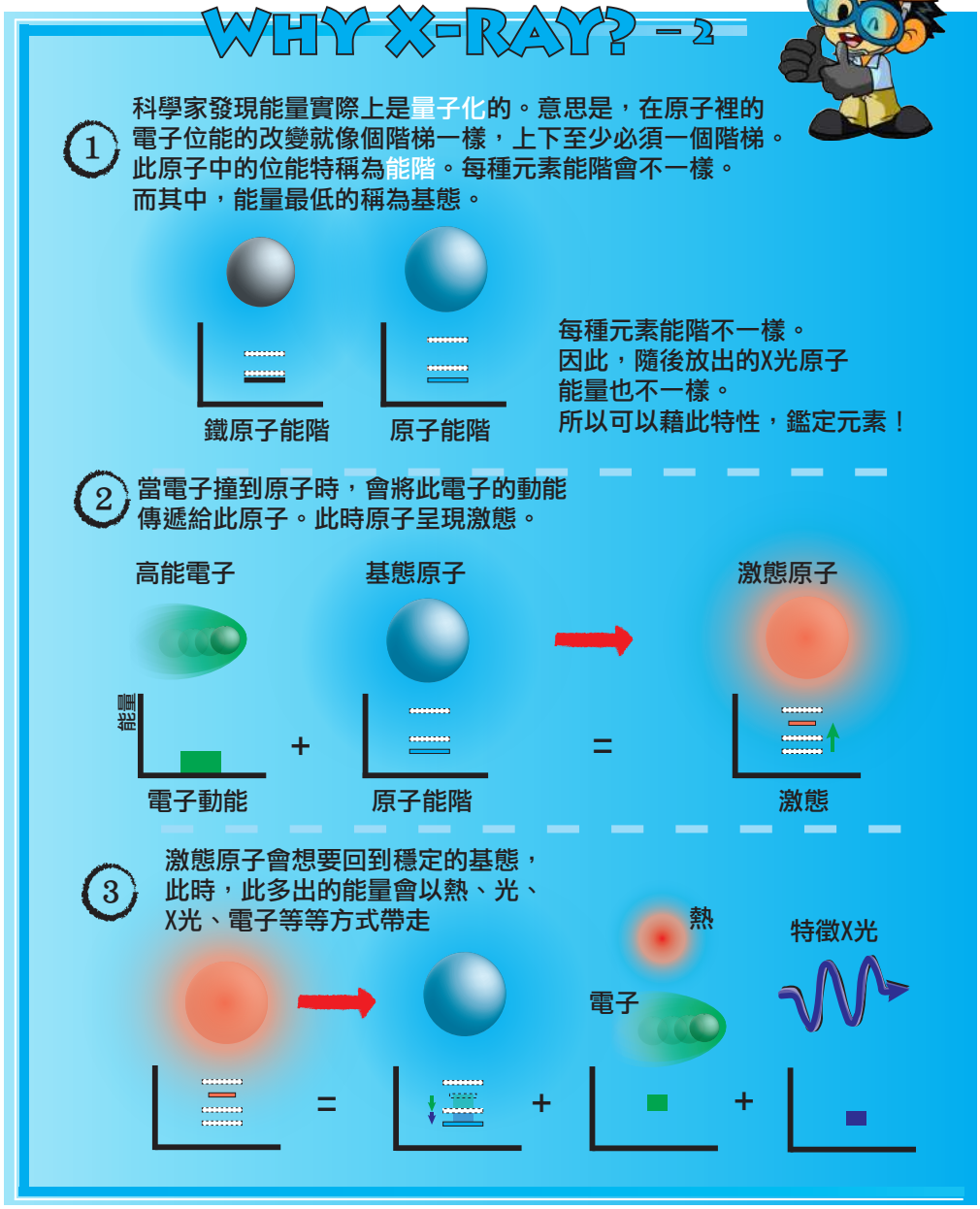
那麼，在 TEM 當中所看到的材料細微的微結構到底長什麼樣子呢？

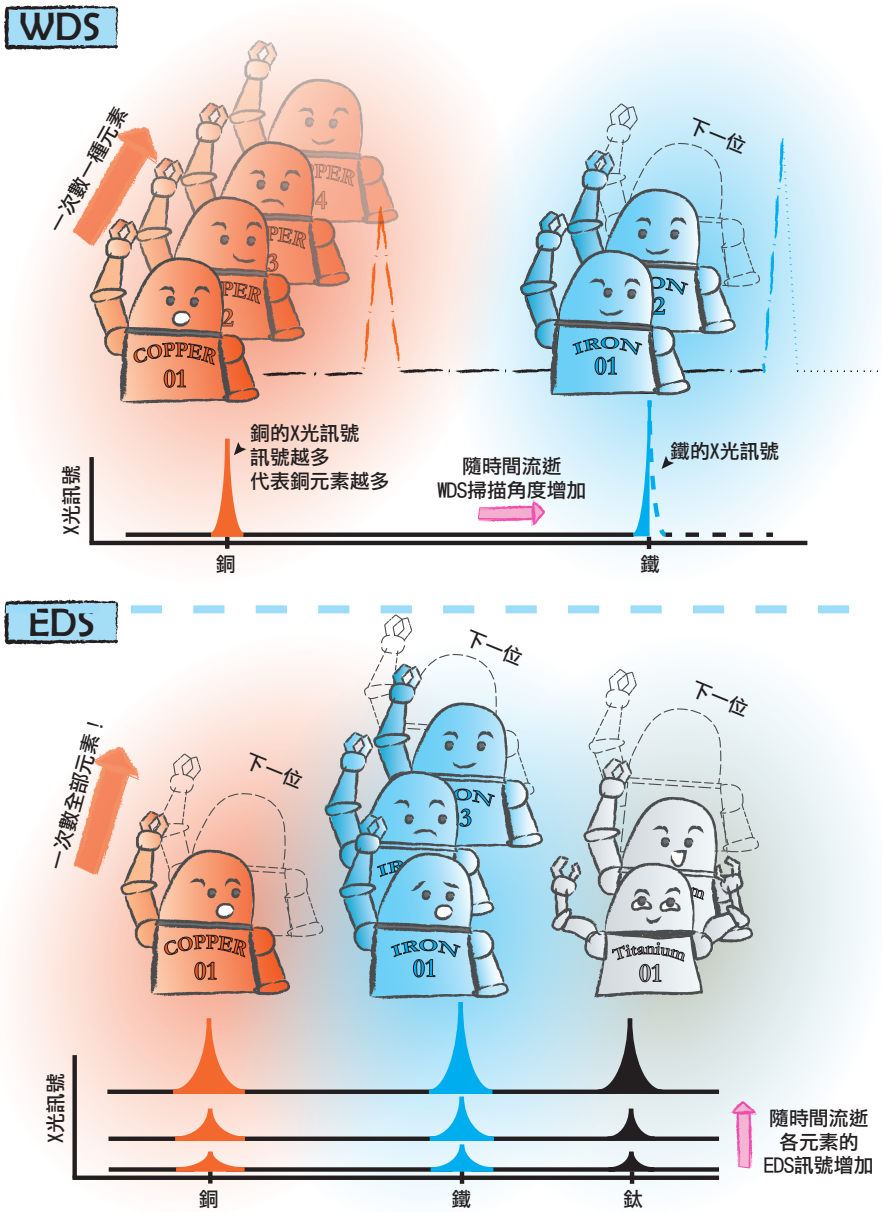


黃柏銘/拍攝

元素解析 -EDS、WDS

能量散射光譜儀 (Energy Dispersive Spectroscopy,EDS)、波長散射光譜儀 (Wavelength Dispersive Spectroscopy,WDS)，爲非常常見、會附加在電子顯微鏡中的元素分析裝備，如此一來在微結構觀察的時候，也能夠進行成分的相關研究。





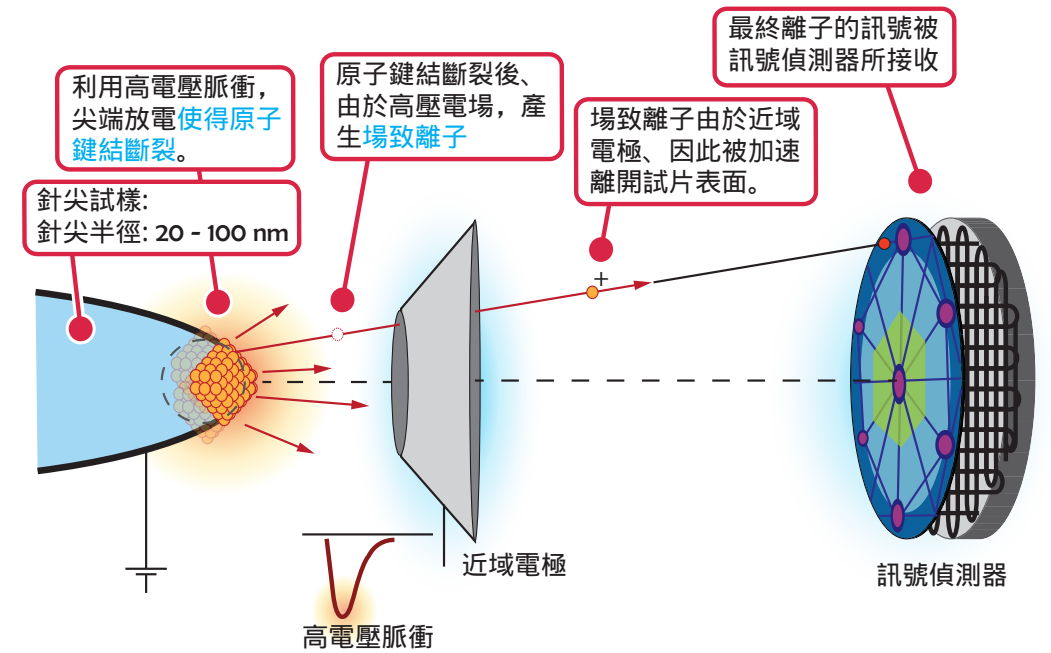
利用電子束，打出特徵 X 光後，進入 WDS 與 EDS 的接受器，這兩者差別在於接受解析的方式不同。EDS 是全光譜接收，因此一次可獲得所有元素的訊號。就好像一次數所有隊伍的人頭一樣，快但是易有些許差錯；反之，WDS 就像是依序點名。會比較慢但是數得正確。WDS 因此能量解析度高、鑑定元素、定量分析較爲準確。

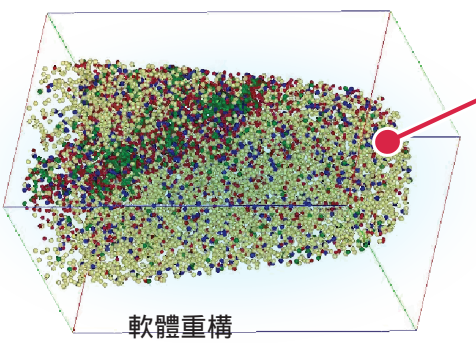
原子在哪裡？原子探針斷層掃描儀 (APT)

原子探針斷層掃描儀 (Atom Probe Tomography, APT) 能夠提供原子等級的 3D 影像及化學成分的技術。它能夠告訴我們原子究竟在哪個區域。

ATP 的原理是利用一個極細的試片、經過高壓電場後，試片最表層的原子被抽離出來、形成離子。我們便可利用荷質比推測這個原子，並利用其在偵測器的位置對應原子的位置。

APT 的原理





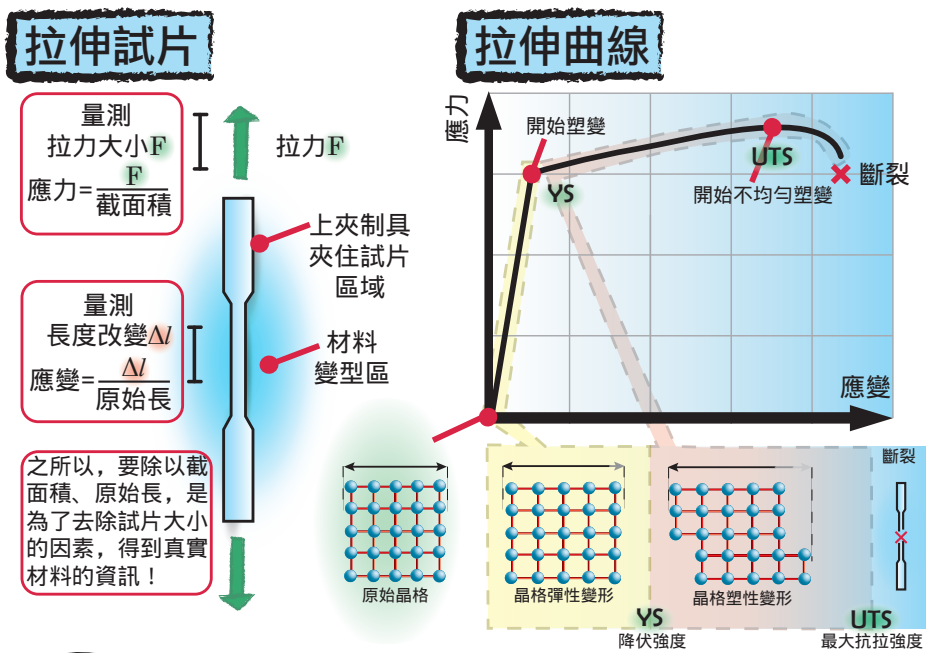
最後利用軟體、將每個原子的種類、位置進行重構、從而得到元素分布的資訊！

機械性質測試

微結構是鋼鐵科學的其中的重要部分；另一部分，我們需要鋼鐵在實際運用時的參數 - 亦即機械性質。常見的機械性質測試有拉伸試驗、硬度測試、破裂韌性和衝擊試驗等。

拉伸試驗

前面所提到的都是之前我們提到鋼鐵強度的提升機制；那麼，鋼鐵的強度要如何測量呢？便是拉伸測試。拉伸試驗是一種單軸拉伸的測試，只討論材料在單一方向的變形。



STRESS

氣象上常聽到氣壓單位： 百帕(hPa)。一大氣壓=1013百帕。事實上，應力跟氣壓都指的是壓力，單位是一樣的，只是常用百萬帕(MPa)

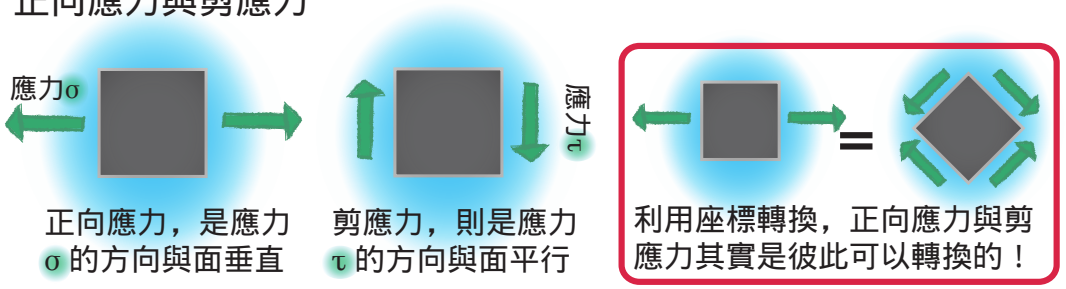
4t

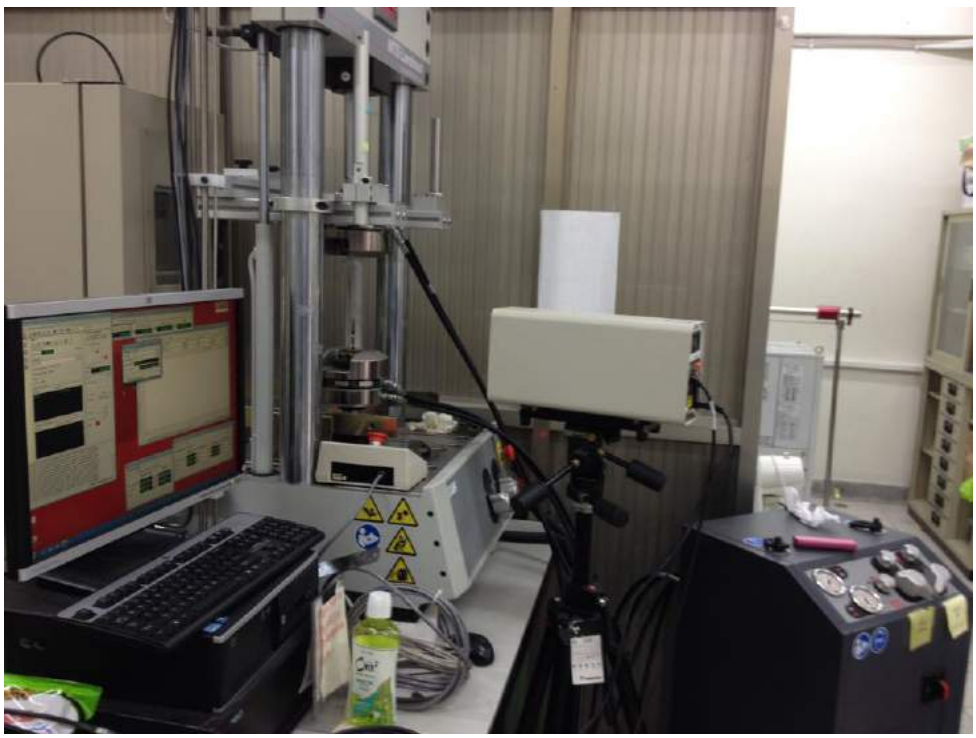
普通鋼鐵強度以 400MPa 算的話，相當於在 1 平方公分裡承受了4噸的重量。（約2台小客車重量！）

拉伸試驗

雖然拉伸實驗是一種單軸的拉應力 (tensile stress)。實際上此正向力 (normal stress) 與剪應力 (shear stress) 是可以互換的。而剪應力的作用，則是能夠讓差排移動。

正向應力與剪應力



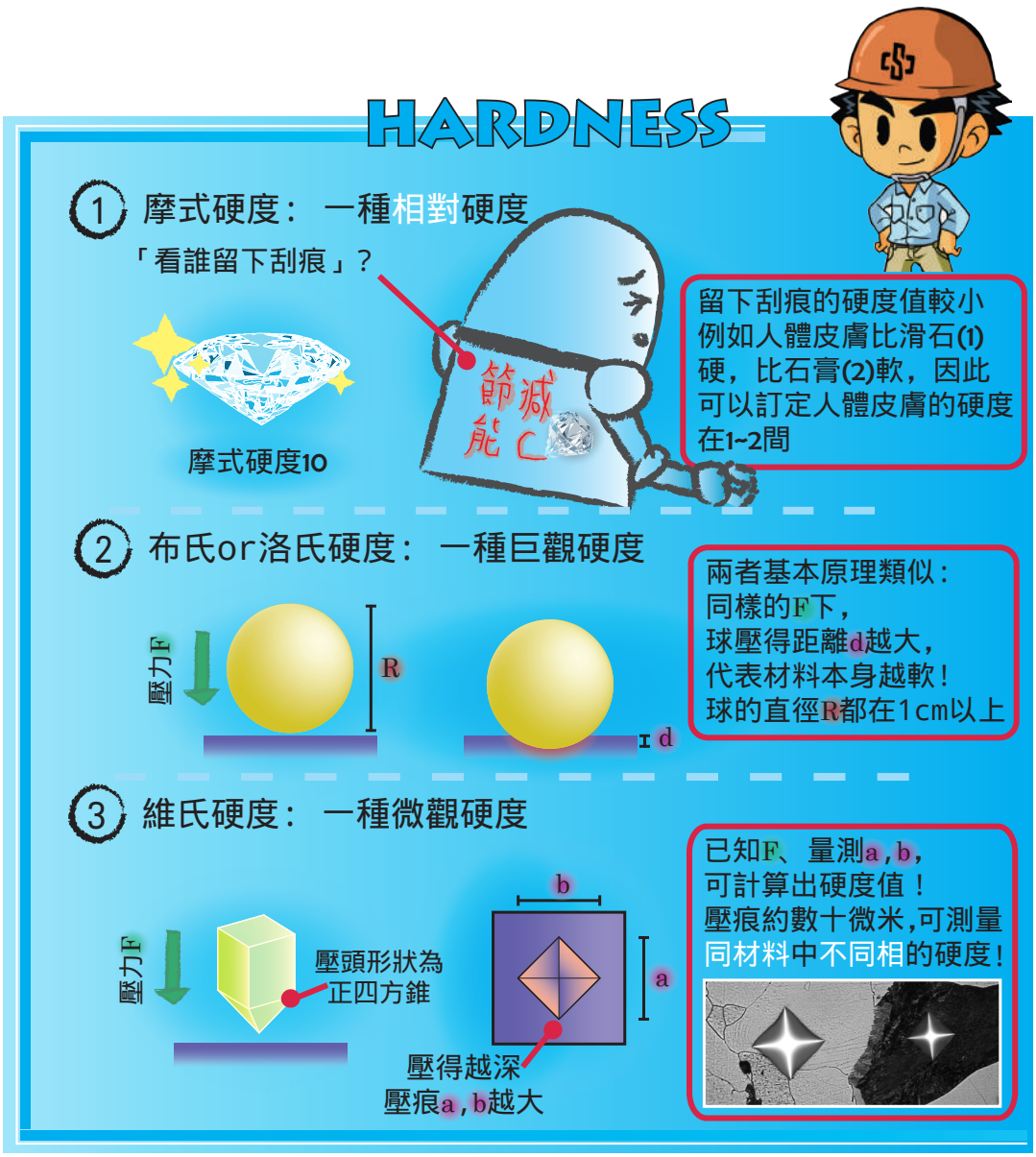


拉伸試驗機圖

拉伸試驗

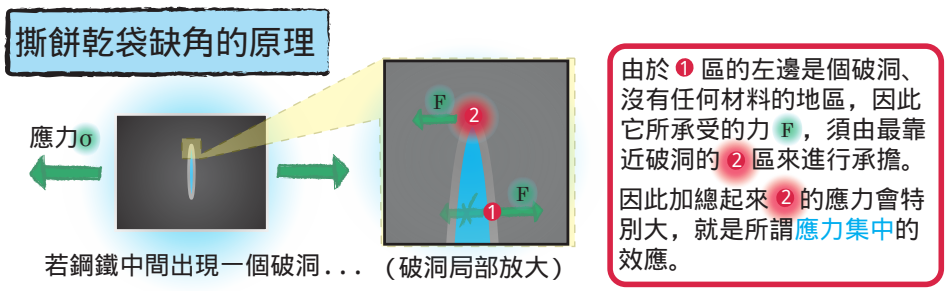
拉伸測試，雖然可以讓我們比較不同鋼鐵之間的強度，但爲了讓測試結果可靠、可以比較，美國材料測試協會 (ASTM) 對試片的製作，例如取樣位置、方向等等，訂定非常嚴謹的規範。因此它可靠但不方便，拉伸試片的製備需要時間、機器的標準要求也較嚴格。

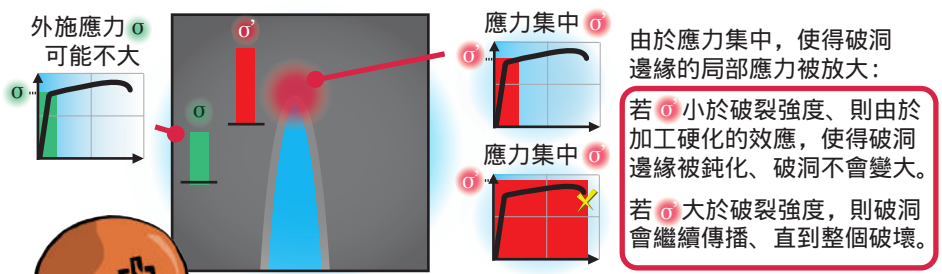
由於硬度與強度有接近正相關的關係，科學家發展可量測出絕對硬度數值的各種硬度試驗，用來快速得到強度值。因此，硬度測試也用來產品生產時的品質檢測。

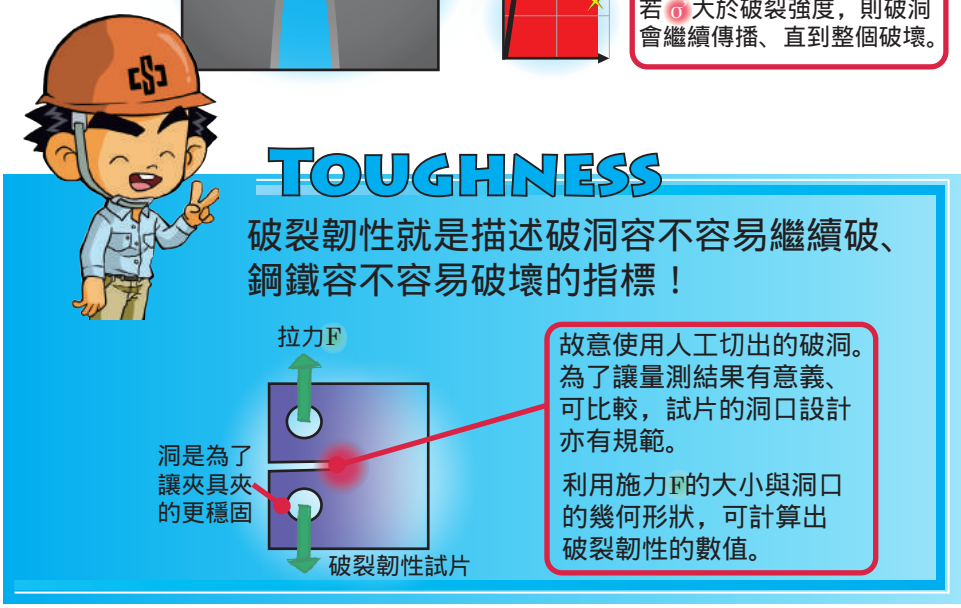


破裂韌性 (fracture toughness) 測試

拉伸試驗能夠讓人了解，這塊鋼鐵它本身的強度和延性。萬一我們實際運用的工件，中間有個小洞呢？應力遇到洞，會有**應力集中**的效應，因此它會**幫助原有的破洞繼續長大**；撕餅乾袋缺角會比較輕鬆，就是這個道理。而長大的微觀小洞就是巨觀所看到的「破裂」了。而「韌性」的意義，指的就是鋼鐵當中的破洞容不容易繼續出現和長大。科學家定義，用來測定鋼鐵容不容易破壞的指標，便是「破裂韌性」測試。





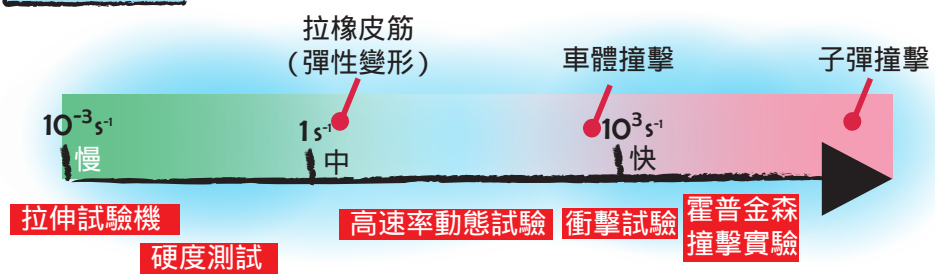


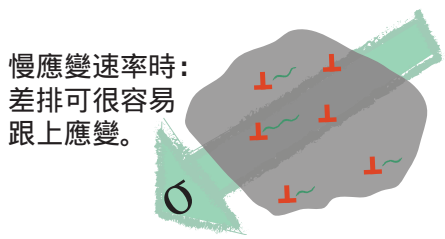
衝擊試驗

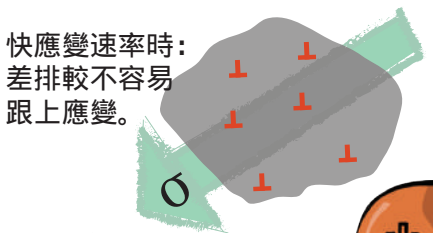
在前面的章節中機性測試的**應變速率 (strain rate)**，都是比較慢的。鋼鐵在遇到非常快的應變速率，或稱遇到**衝擊 (impact)** 時，材料機械性質表現是不一樣的。典型衝擊例子，如車禍瞬間、子彈撞擊。描述在瞬間受衝擊、鋼鐵容不容易破壞的指標，稱爲衝擊韌性。

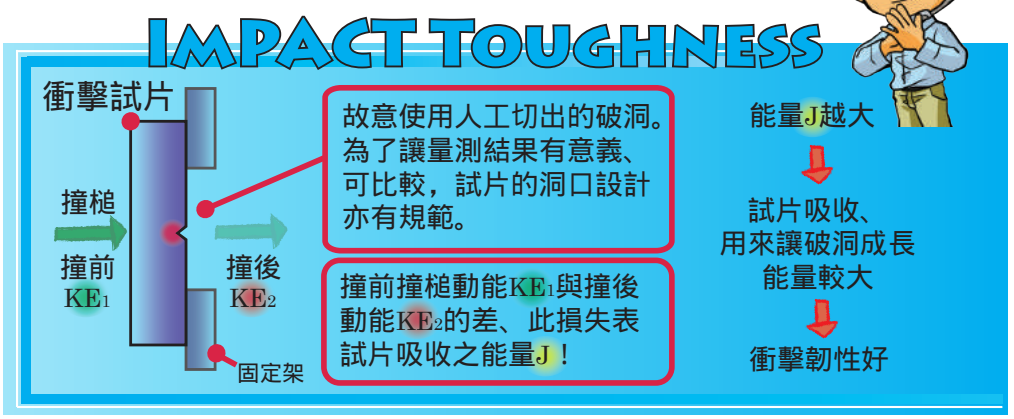
衝擊試驗利用一撞槌瞬間將試片撞破，從而了解鋼鐵在高應變時，破洞是否容易繼續傳播、鋼鐵是否容易破壞！

應變速率：每秒鐘應變的速率！









鋼鐵與生活

Steel and You

第二章
厚板

章節概要

厚板是一種厚度在6mm以上的鋼板產品。因此，它的產品大多是應用在大型的結構物。我們在 2-1 厚板產品的應用 會介紹生活中的厚板產品、及厚板產品的要求及挑戰；接著 2-2 厚板產品的製程 將介紹各種厚板如何製造。

2-3 厚板的先端科技 則介紹近年來厚板的研究發展。

2-1 厚板產品的應用

Application of plate

鋼鐵厚板產品簡介

鋼鐵厚板一般是指厚度在 6mm 以上的鋼板產品，主要應用在**鋼結構建築、造船、橋梁、壓力容器、輸油管線**和海上鑽油平台等大型工程建物的結構本體上。也因爲鋼鐵厚板皆是應用在：

需要承受大負載、

需要克服外在環境的考驗

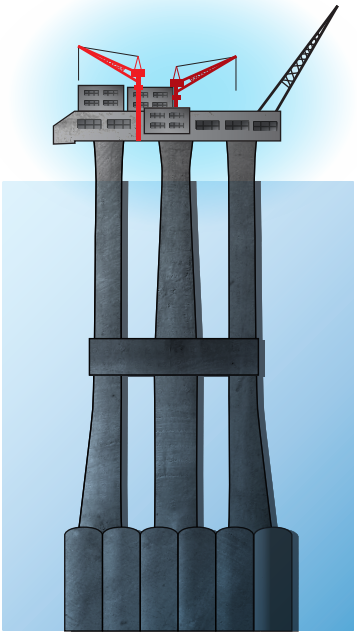
重工業的設備或是運輸工具上，

所以鋼鐵厚板無疑地必須有優秀的機械性質、並且必須隨著不同的應用，而需具備額外的特性。

▲ 跨新店溪之自來水運輸管線橋梁。管徑爲 2.4 公尺，負擔巨大的輸水量、產生極大的水壓，因此鋼鐵厚板才能支撐。

▲ 現代造船採用焊接法將一塊塊厚板焊接和組裝。因此厚板除了高強度、高韌性之機械性質外，亦額外要求焊接性。

▲ 101 大樓的建造是台灣工業實力的展現。攝影 / 陳苡諺

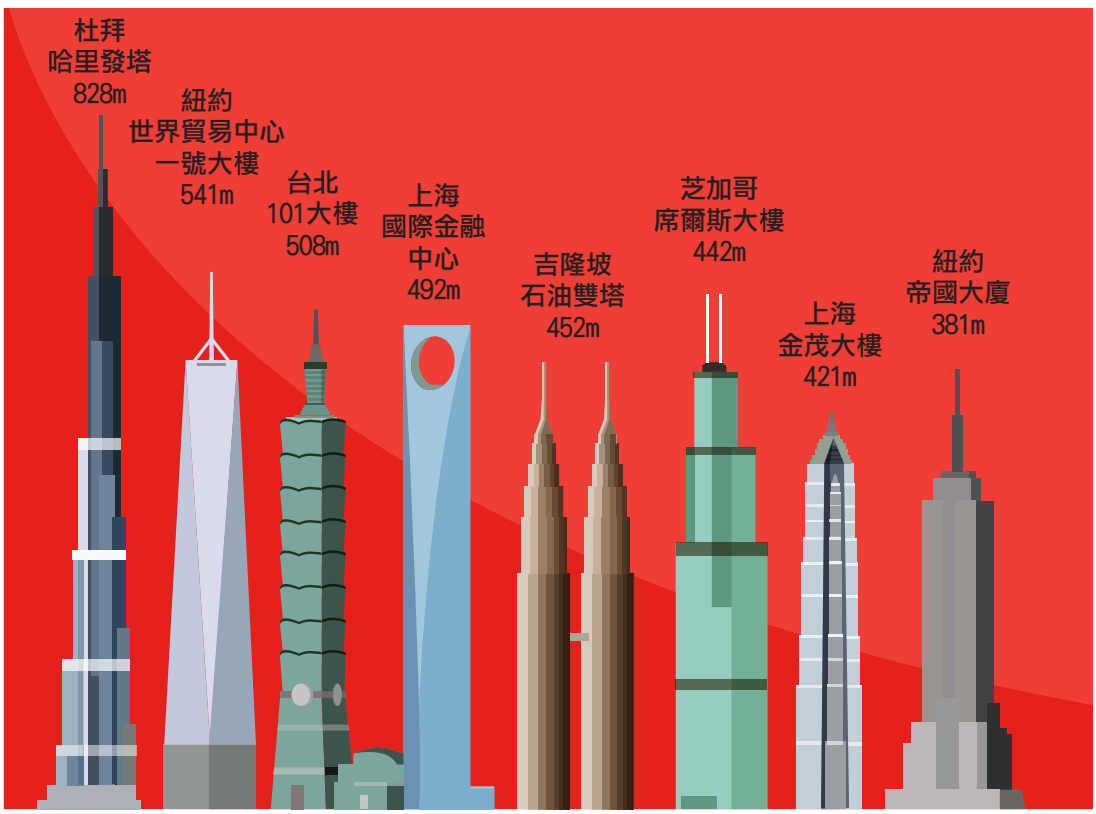


▲ 大型鑽油平台必須承受高荷重。

▲ 中油公司儲存丁烷的貯存槽。大型的壓力容器，必須選用特殊規格的鋼板，以符合焊接的要求；焊接時亦必須嚴格要求，以避免鋼板脆化。此外，若是含化學腐蝕氣體的壓力容器，更是必須額外小心。

天際線的那些高高低低－建築用鋼構

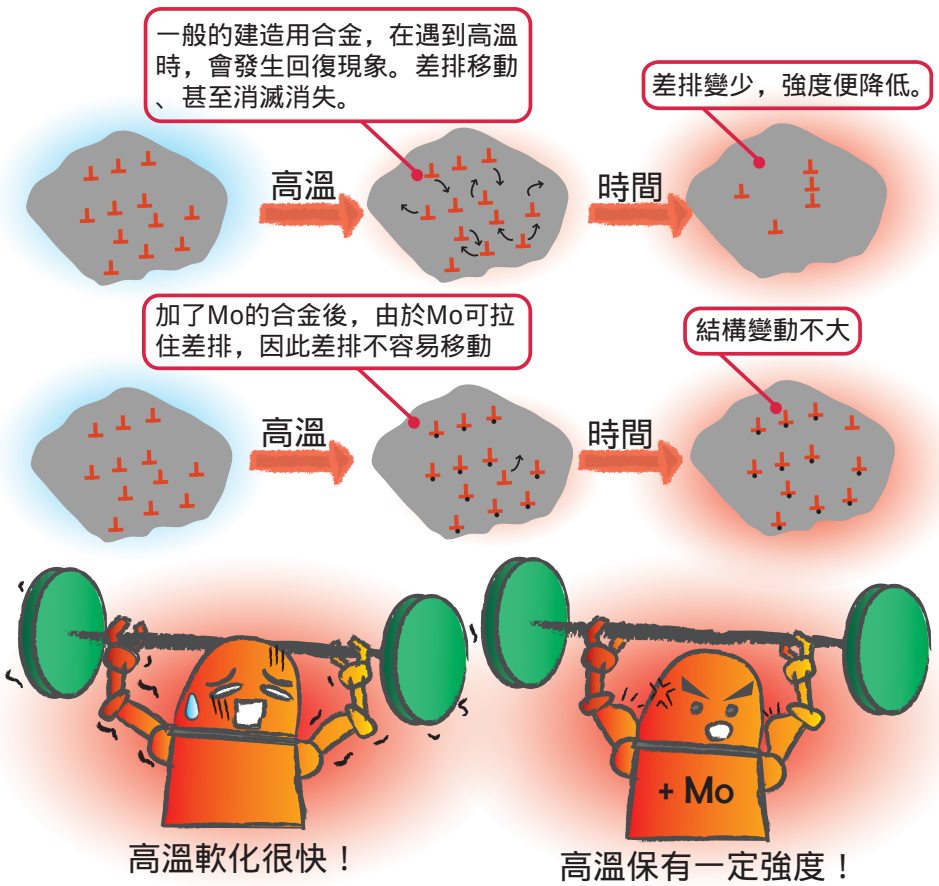
在陸地總是有限的情形下，在過去的一百年裡人類開始把活動空間往上發展，所以我們擁有了高樓和摩天大樓。你一定看過很多高樓大廈，不管是在電影裡或是網路上，事實上我們也擁有世界第三高的台北 101 大樓，但是在建造這樣的大樓你絕對不能以普通的方法。現代的摩天大樓隨著高度的增加，爲了減輕隨之增加的重量，必須以鋼鐵來做爲建築物的結構主體之一，就以台北 101 做爲例子，這棟地上 101 層樓而地下 5 層樓的超高摩天大樓總重 70 萬公噸，其中使用 10 萬 7 千噸的鋼鐵，你大概就可以明白這些鋼鐵板對於每個具有超高大樓的大城市的天際線組成有多大的貢獻了。而隨著人們對於高度的渴望，大樓是越蓋越高越蓋越特殊，如杜拜的哈里發塔高度爲 828 公尺，此外高達 1600 公尺的王國塔的建造也在進行中。



▲ 世界高樓的爭相建造，代表的是人類對夢想的追逐、也是面對大自然的挑戰

但問題是當建築物的高度越高，所需的材料越多，建物本身的重量增加，相對來講每個結構都必須具備更好的支撐能力，而不是藉由增加材料的量來應付多出來的重量，最好的解決方法就是改變鋼鐵厚板的性質，使它能夠比同量的鋼板具有更好機械性質，我們才能用這種鋼板蓋出更高的摩天大樓。

用在建築上的鋼板不只要在強度上加強，更希望它更耐震也更防火，例如**在鋼鐵中添加 Mo 元素**，便可以**使鋼板的耐火溫度從 350°C 提昇至 600°C**，也就是鋼板要到較高的溫度時才會失去它的承載能力，這樣不但能夠減少用在鋼板的防火披覆上的成本，也許還能讓大樓在遇到大火侵襲時多支撐久一點的時間。而這些技術目前都已能用相當精密的技術來控制，也在各鋼鐵廠的努力下繼續精進。

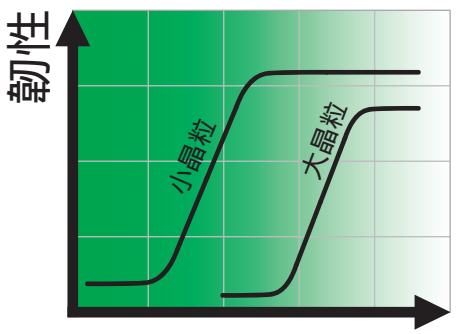


▲ 合金加了鉬就能提升鋼鐵在高溫中的強度。

驚濤駭浪中的龐大巨物－船板及海上鑽油平台

地球上有七成的面積是海洋，所以人們很早就開始造船出海捕魚或是航行，可以說船與海洋和人類的淵源匪淺。而人類造船的技術也有很大的進步，從木頭的材質到鋼板製造的大型船艦，我們似乎都可以這樣推測船舶的發展應該如何蓬勃，直到 20 世紀初鐵達尼號在低溫的海洋中撞上冰山沉沒，而現代科學家取出沉船的殘骸進行分析，發現沉沒的原因有可能是鋼板的機械性質在低溫下變得非常差、也可能是連接鋼板的鉚釘爲了提高強度卻使其易脆。不管如何，對於大型船舶的建造，鋼鐵厚板的本身的機械性質佔有非常重要的影響。

此外，船上的厚板接合除了靠機械性的鉚釘接合，亦必須仰賴焊接，焊接是讓材料局部融化後、重新冷卻、凝固而接合。在二次大戰後，大量美國軍艦鋼板和鋼板的焊接處，由於低溫性質不佳，在低溫的海水中行駛而形成破壞，而現今全世界的貿易頻繁，其中的貨物商品運輸大約有 9 成是仰賴海上運輸，爲了應付更大的運輸需求量，船公司開始向船隻尺寸的大小進行挑戰。這些龐然巨物當然需要好的鋼板焊接技術、以及了解並調控鋼鐵厚板在焊接後的機械性質，才能來製造出這些長幾百公尺的船身、也才能讓這些貨櫃輪，載著數千個貨櫃出海而不會重蹈二戰後那些美軍船艦的覆轍。



◀溫度高低會影響鋼鐵的韌性、同時韌性也跟晶粒大小有關。鋼板若處於延脆轉換溫度之下的低溫，會變成脆性。

◀焊接的過程會將鋼鐵船板加熱到高溫，因此會改變材料的微結構、導致臨近焊接點的晶粒很大並導致在低溫海域時，焊接點附近會變脆。

此外人類和海洋的關係也在很早開始就不僅僅是航行和承載航行了，人類對於海洋蘊含的資源非常的渴望，而在海洋上石油的探勘就顯得非常合理，海上平台並非建造在海洋中，而是一具停泊在某個地點的龐大機器。焊接組合的幾千噸鋼鐵，以支柱在海面上方撐起平台，這也是鋼鐵厚板在人類的海洋活動很重要的應用。

海洋結構用鋼板不論是船隻或是海上鑽油平台，只要是在海上活動的工程物件，都需要克服海水的腐蝕，另外隨著船舶或是平台可能會航行或是建造在低溫海水中，這些結構用的鋼鐵以及焊接部分還必須在低溫維持一定的韌性，不然海上活動的風險也就會因爲材料使用上的問題而提高更多。不過在科學家的努力之下、以及對冶金學、機械性質的充分了解，現今的精密調控已能滿足這些需求。

▲更大、更安全船隻的建造仰賴我們對於鋼鐵微結構的了解！

地球上的黑色動脈－石化管線用鋼

石化原料如石油和天然氣等是組成目前世界上最重要的一次能源之一。但在地球上的分布不均，所以它們的運輸變成爲世界工業活動相當重要的一環，在海上通常利用大型油輪或是天然氣船來乘載和運輸，像台灣因四面環海故本身所需之石油都是由油輪在外海利用海上輸油管將原油導至岸上的儲油槽，而天然氣則是有陸上和海底的運輸管線；以用輸送管線來聯接產地和消費地，也相較其他運輸方式更安全以及有效率。

而這些綿延在陸地上以及海底的管線都是由鋼鐵厚板所製造出來的，由於在管內流動的可能是天然氣、原油或是已經經過提煉的成品油，而這些碳氫化合物可能夾帶著 H_2S 或是本身因爲經提煉具有水氣，會對管線造成破壞，所以一般會設法減少這些鋼板內部的**磷與硫 (P and S)** 的含量，因爲 P、S 容易在鋼鐵中析出又不易靠加熱使之熔回鐵中，容易造成鋼鐵缺陷或是裂痕的來源，所以在這個產品上 P 和 S 的含量會被精密的控制。

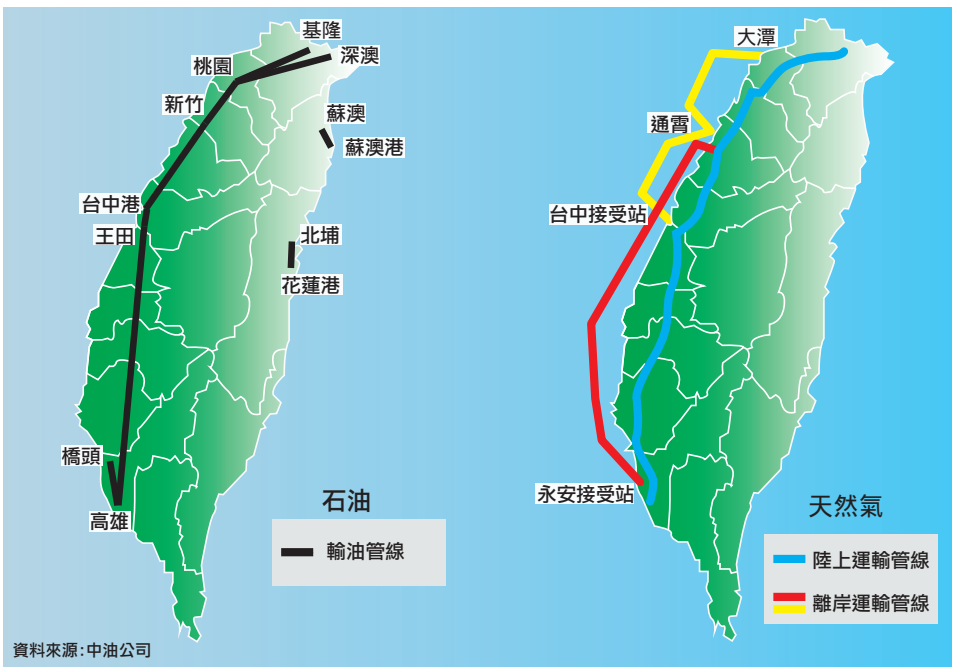
若鋼鐵中含有P、S等雜質，則此鋼鐵容易形成裂痕的起源，因此鋼鐵低溫韌性就不好，因此**受力彎折而變形、就很容易斷裂。**

若能去除這些雜質，
鋼鐵就能在低溫保持高韌性。

此外因爲管線內部大量液態石化原料的快速流動，以及氣壓極高的天然氣，管線管壁必須承受極大的壓力，所以我們所使用的鋼鐵厚板材料也必須能夠具有很好韌性，否則我們可能天天都會在新聞上看到哪裡的石化管線又因破裂對環境造成影響。

這些產地和消費石化能源地之間的距離也許不會很近，所以這些管線通常會綿延數千公里，對於大型的鋼鐵結構，很重要的就是你如何去把它們組合在一起，就像前面所提到的大型船舶，焊接性質必須很好，焊接部分的機械性質不能和其他部分相差甚多，不然長期使用下管線連接處會有很大的危機。

我們了解到好的管線用鋼必須是由強韌性、抗蝕、可焊接性的鋼板來製作，但是隨著石油和天然氣需求量的大增，我們期許能夠製造出運輸效率更高的管線，而這也意味著我們需要高強度、高厚度和大管徑的管線，再加上各國對於極地的石油興趣越發濃烈，能夠在極地或是深海這種將近 -50℃ 的地區運作的鋼鐵製品也需要維持低溫的韌性，而這些都是未來管線用鋼發展的方向。

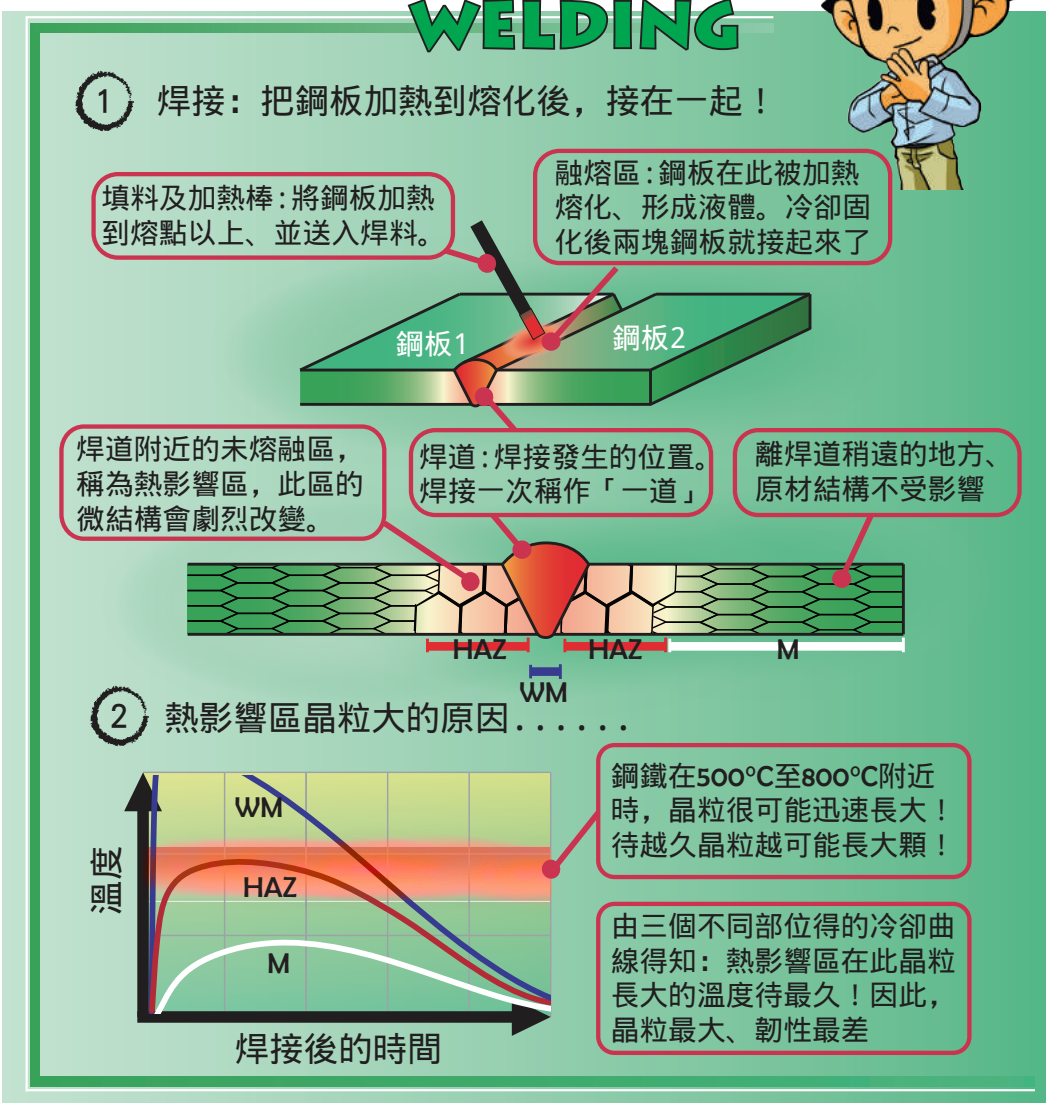


▲石化燃料是現代生活不可或缺的。圖中顯示了台灣天然氣、石油的管線分布圖

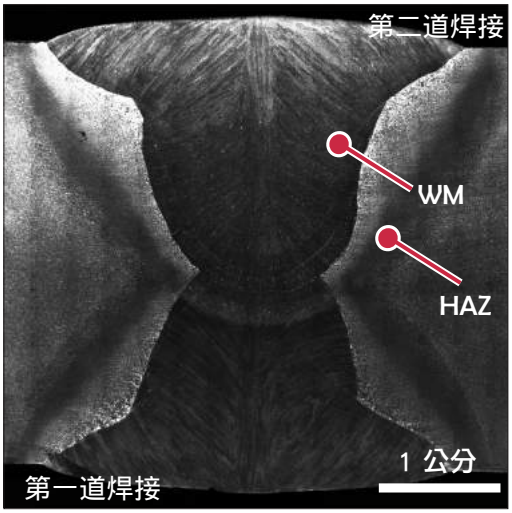
焊接

金屬要怎麼結合在一起呢？事實上我們也許有經驗，經過工地時，常看到工人拿著大大的護具保護著臉，手持著發出火焰的管線、管線尾段會不時蹦出火花。這個動作，便是把金屬結合在一起的焊接。

焊接 (welding)，指的是將兩塊金屬進行加熱，使兩邊材料熔融、接觸。在鋼板冷卻固化後，便會連接起來；也可能在中間添加填料 (filler) 後、加熱再把兩側的鋼板連接。



焊接也是非常常用的接合方式，例如小從腳踏車的車架、汽車體的結構，大到鋼管、鋼構建築等等。幾乎所有前面提到所有鋼板的應用，都不可避免會遇到焊接。



▲ 焊接微觀組織　　王學林 / 提供

▲ 腳踏車車架是一個個零件焊起來的

▲ 這種大型儲油、儲氣槽，內部都是由一片片的鋼板焊接起來，才能夠組合成如此巨大的槽體！

2-2 厚板產品的製程

Processing of plates

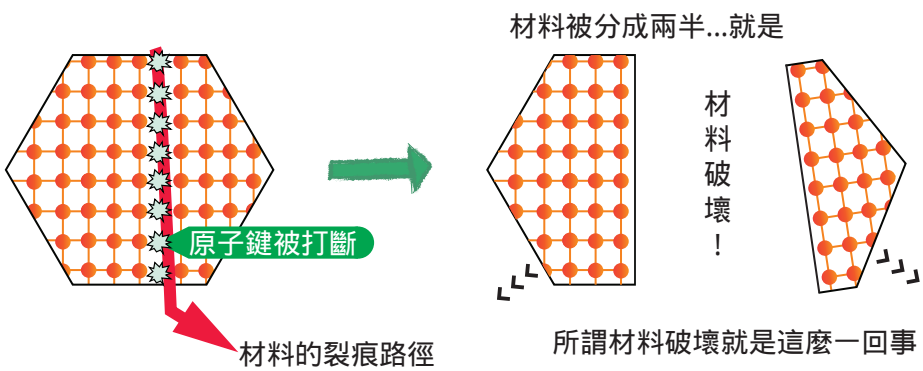
鋼鐵厚板所表現出來的性質，與它的內部顯微組織結構非常有關係，而鋼鐵厚板內部的組織，則是會受生產上製作方式影響，也就是說可以藉由在製程上的調控產出理想的產品。基本上，鋼板在設計以及運用中，我們需要兼具鋼板的強度 (strength) 和韌性 (toughness)，這兩個不同的概念。

強度 (strength) 與韌性 (toughness)

強度描述的是關於**鋼鐵變形的概念**，變形的關鍵則是在於：**鋼鐵內部差排容不容易移動**。

韌性描述的則是關於**鋼鐵破壞的概念**，破壞的關鍵則是在於：**鋼鐵當中的裂痕容不容易長大**。裂痕在往前長大時，必須打破現有裂痕前方的原子鍵結；而這些打破的鍵結就形成新的裂縫。

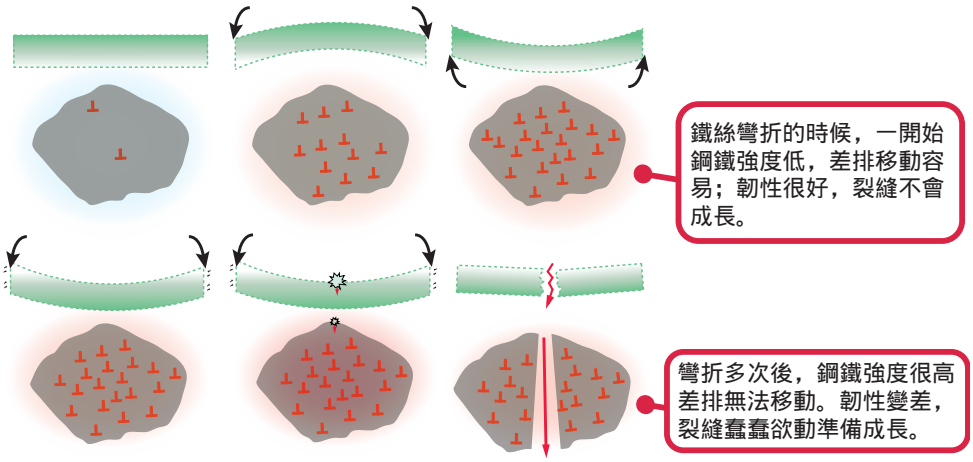
因此強度高的材料，代表的是它不容易變形；韌性高的材料，代表它裂縫不容易長大。



▲ 材料破壞的機理

強度與韌性常常不可兼得！

前一章我們知道許多鋼鐵的強化機制、也提到了破裂韌性。研究上顯示，除了晶粒細化之外，其它所有的強化機制，雖然讓**強度提高，但其韌性會下降！**我們舉加工硬化當例子。如果我們反覆彎折鐵絲，隨著彎折的次數增多，會越來越難彎折（**差排移動困難→強度上升**），直到某個瞬間，鐵絲彎不動了，最後就破裂了（**裂縫迅速成長→韌性下降**）。極端的例子，如磁磚是一種**陶瓷材料**。磁磚強度很高→很難將其變形、一摔就碎，只要裂縫出現就很容易成長。

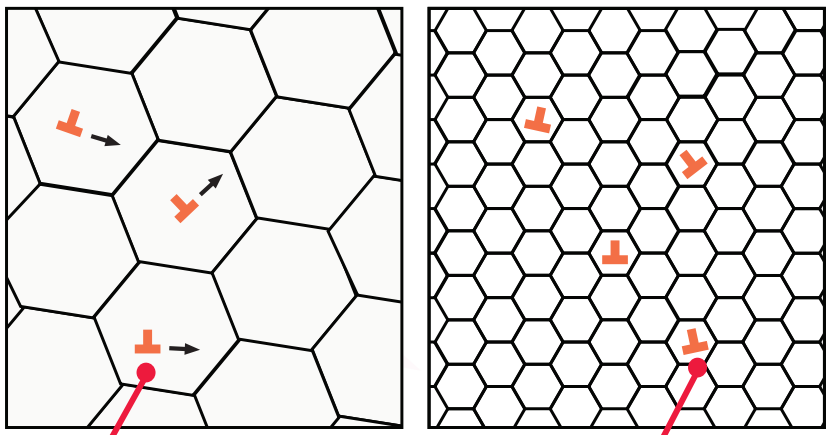


強度與韌性兼得！細化晶粒

微細化的晶粒組織因爲晶粒小所以晶界多，晶粒的排列方式越不同，所以**差排不容易移動，因而造就了高強度**。但是細化的晶粒同時造成裂縫在傳播時，必須轉彎的次數較多，彎來彎去容易被阻擋，因此有了很好的韌性。要形成微細晶粒，可藉由添加特殊的微量合金元素，如**鈮 (Nb)**，或者是不同的熱處理來達成，但是，在熔煉、調配合金的同時，也必須注意雜質等問題，才能避免鋼板從這些地方裂開。

微細化晶粒如何提高強度?

強度高就是差排不容易移動!

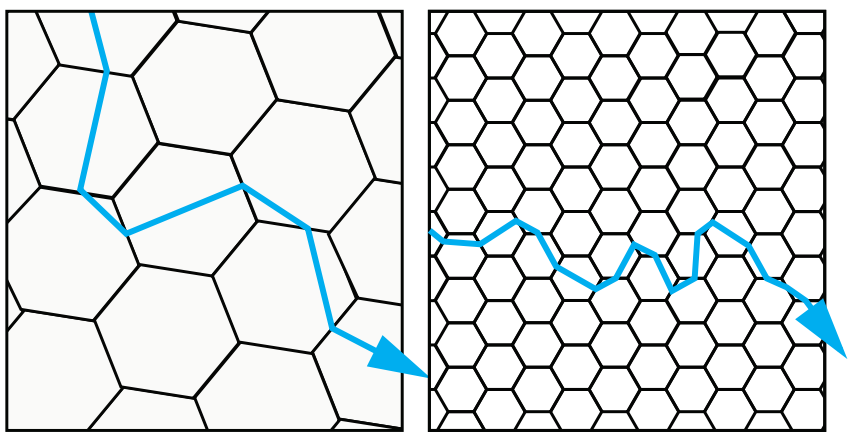


大晶粒當中，晶界數量少，因此差排在產生容易到處移動，不容易遇到晶界、而被晶界所阻擋

小晶粒當中，晶界到處都是，因此差排不易到處移動，差排不易移動就是材料強度提高。

微細化晶粒如何提高韌性?

韌性好就是不要輕易裂開!



不同的晶粒內部的原子排列可能不同，遇到晶界時裂縫必須轉彎。所以微的晶粒會使裂痕走得不那麼順遂，裂痕比較容易停住，造就比較好的韌性。

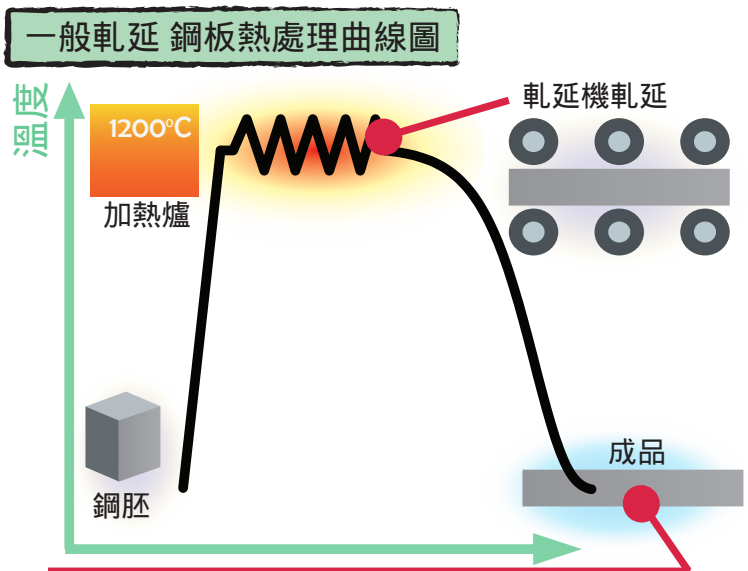
“→” 裂縫傳播路徑

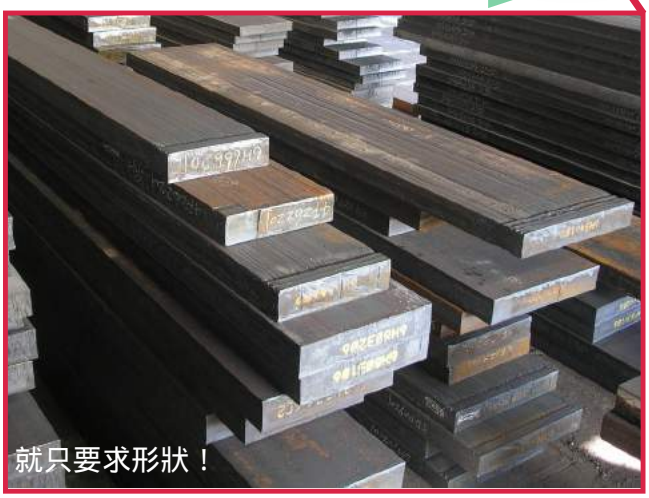
厚板的製程分類

因爲對於鋼板的條件要求越來越嚴苛也越來越廣泛，所以鋼板的生產製程也是不斷更新、以產出性質更佳的產品去投入應用，下面介紹幾種常見鋼板製程，它們的產品會具有不同等級的性質。

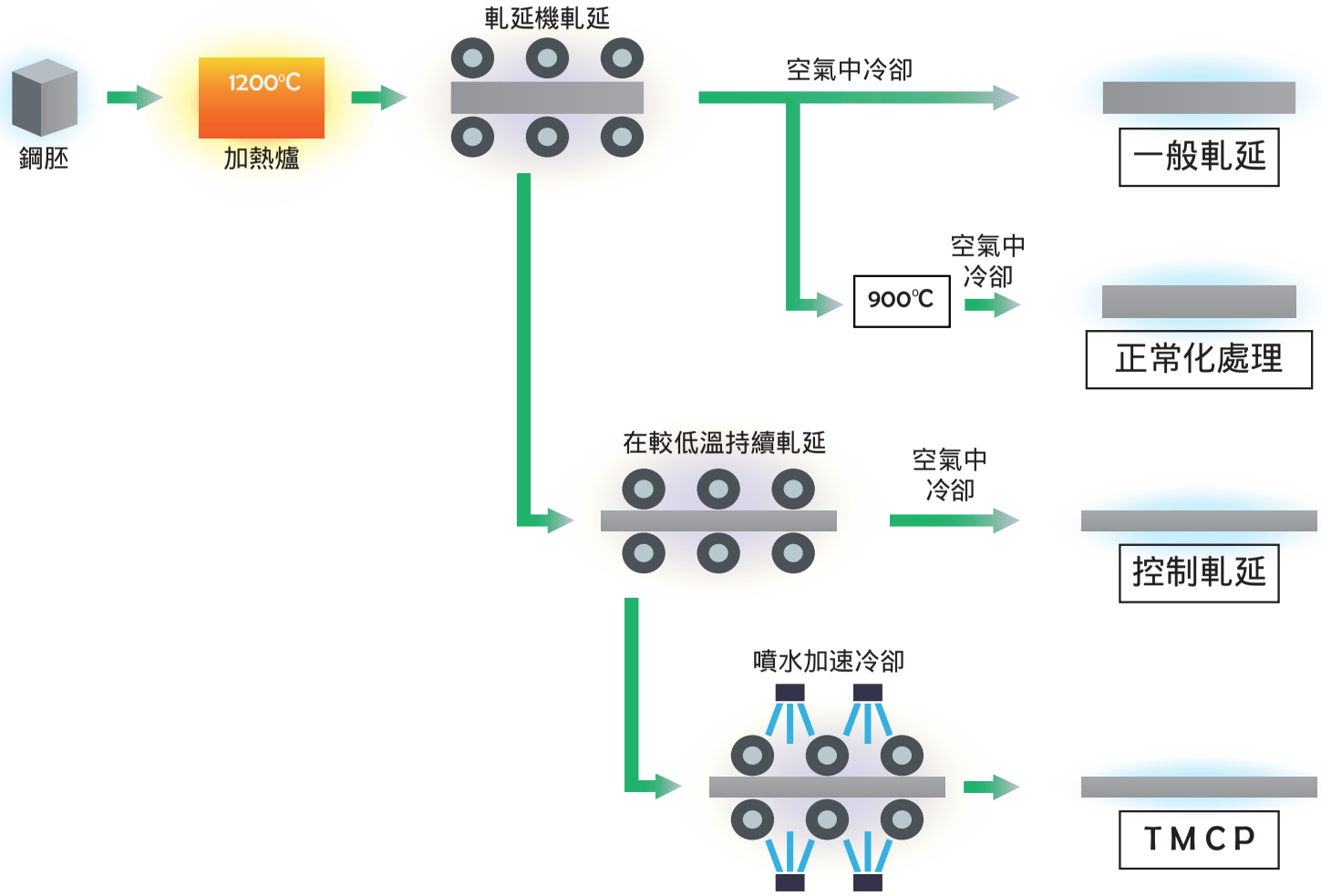
一般軋延

最一般的鋼板生產模式是這樣的，將鍊鋼澆鑄成的鋼胚，經過再次加熱至高溫 1200°C，再經過反覆的軋延然後在空氣中冷卻而成，稱爲”一般軋延”的製程，但因爲這類鋼板在軋延的過程中僅僅只是完成了所需的形狀尺寸，而沒有經過特別處理，所以這類鋼板只能靠著原本內部添加的合金元素來維持性質，故它們的強度基本上都只有在普通品的等級上。



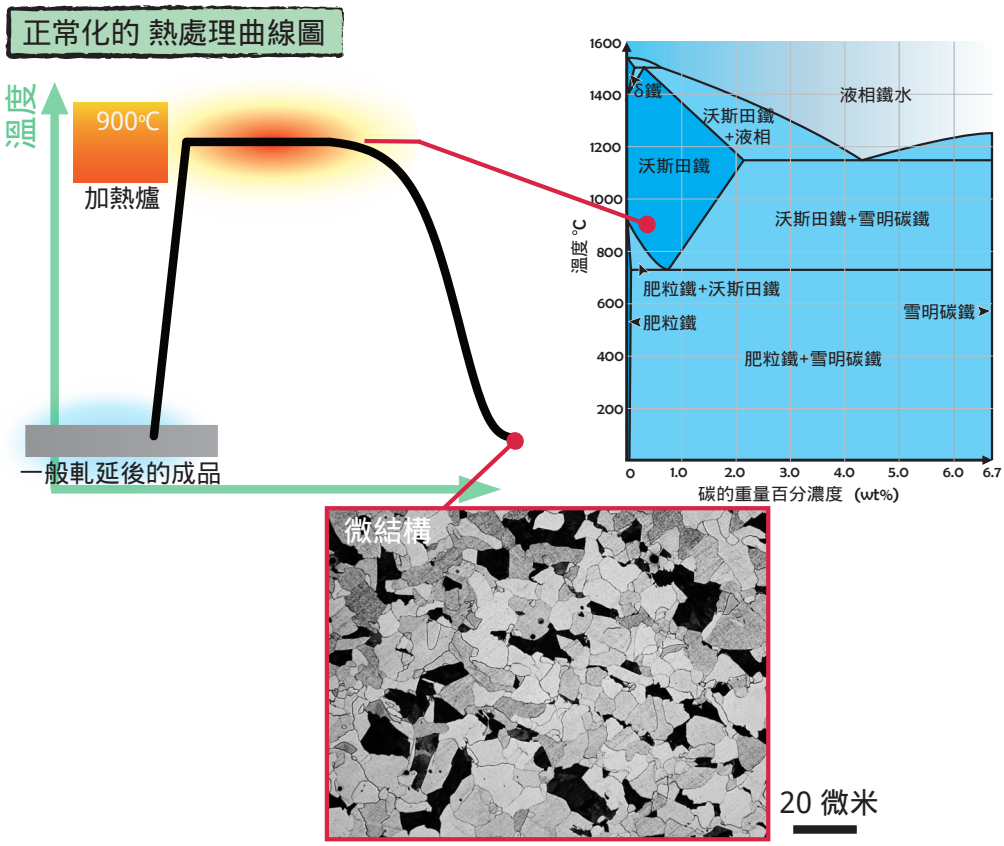


鋼鐵厚板製程及其成果比較圖



正常化處理

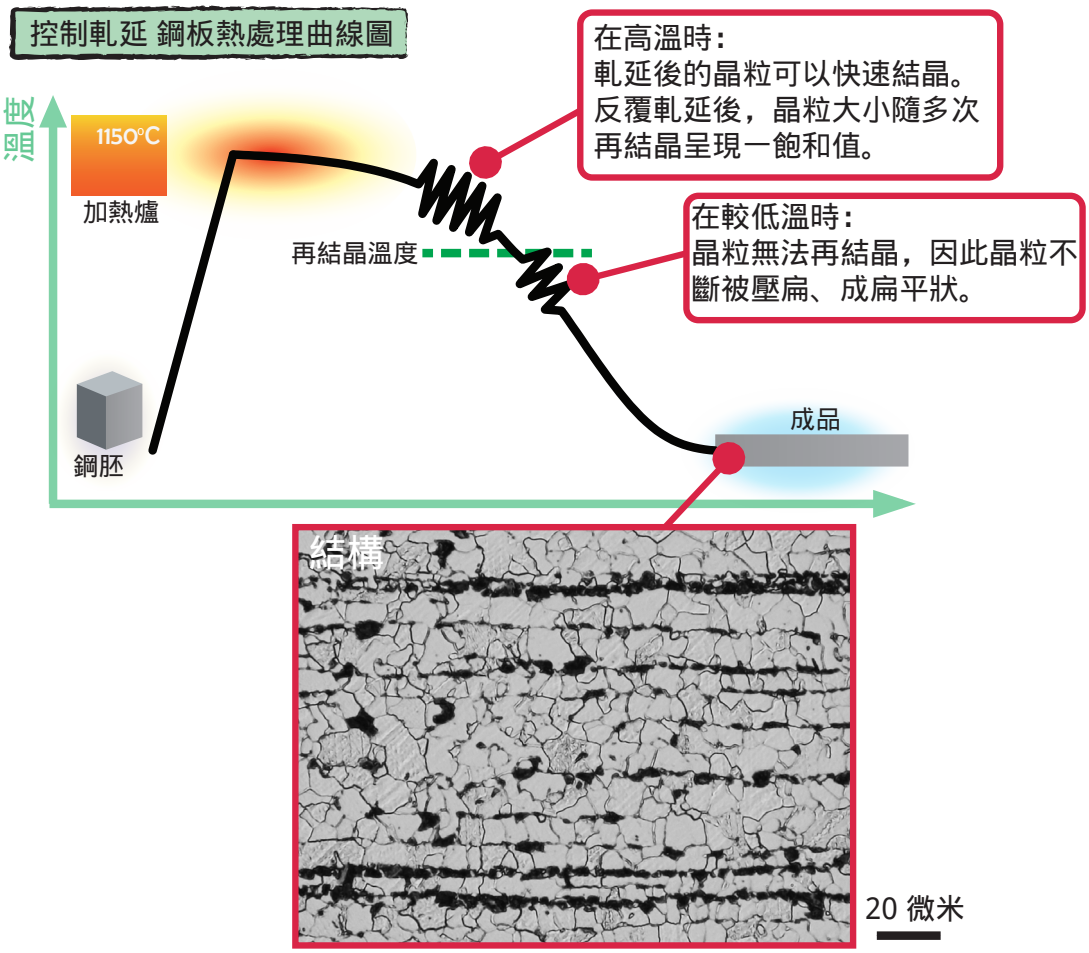
在一般軋延中，因爲沒有考慮到內部添加的合金元素在升溫和降溫的過程中會發生的反應，或是沒有妥善運用到這些合金元素的考慮，所以會對一般軋延製程的鋼板進行正常化處理。所謂正常化處理就是將鋼板再次升溫（約在900°C 左右），在這個溫度保持一段時間、再空冷到室溫，900°C 時原本鋼鐵內部的肥粒鐵和波來鐵會變回沃斯田鐵，又持溫一段時間的情況下，有些在之前偏析出的比較脆的合金化合物或是雜質就有機會熔回去，可以提高韌性，另外的好處就是可以使因受軋延而變成扁平狀的晶粒、可以藉由變回沃斯田鐵時再重新結晶，從而改變晶粒的形貌。扁平狀的組織可能會造成機械性質會因和軋延方向平形或是垂直而有變化，稱之爲異向性 (anisotropy)，這不是我們樂見的。



控制軋延

控制就是對於軋延溫度和軋延量做適當控制的一種製程。

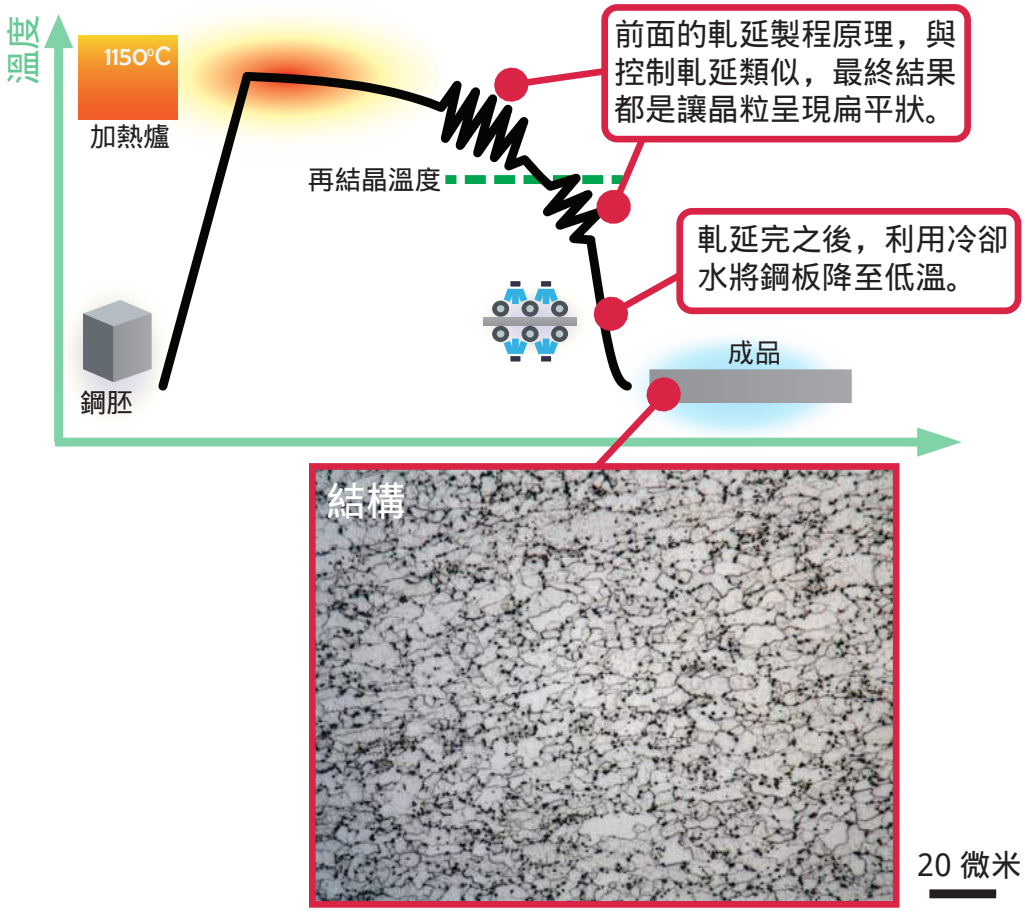
它主要藉由兩個溫度區間下的軋延來微細化晶粒，第一個溫度區間就是在沃斯田鐵再結晶區，在這個溫度進行軋延，變形的沃斯田鐵可以發生再結晶的反應，如此反覆後晶粒能夠變得越來越小。第二個溫度區間是溫度較低的非沃斯田鐵再結晶區，在這個溫度雖然無法造成再結晶，可是這些沃斯田鐵因爲被壓成扁平狀所以彼此之間的接觸面積就會變大，給肥粒鐵很大的空間可以成核，此外因爲軋延殘留在沃斯田鐵裡面的應力，也會誘使肥粒鐵成核，也會有細化晶粒的效果。



TMCP 製程

TMCP 是 Thermal-Mechanical-Control-Process 的英文縮寫，中文可以稱爲熱機處理，即是結合機械軋延和熱處理的製程。其實它就是將前面所提到的控制軋延後的鋼板以噴水的方式將其急速冷卻，因爲快速冷卻下物質擴散速度慢，所以晶粒會變得很小，但這個製程一開始因爲還無法完全使鋼板全部同時冷卻而造成材質不均的狀況，不過在克服問題後已能利用此製程製造出抗拉強度等級在 60 公斤的鋼板。

TMCP 的鋼板熱處理曲線圖



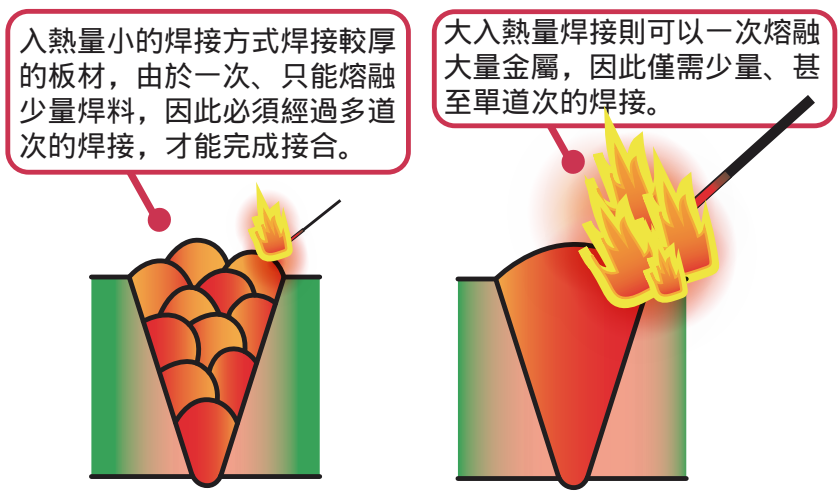
2-3 厚板的先端科技

Advanced development of plates

大入熱量焊接鋼板

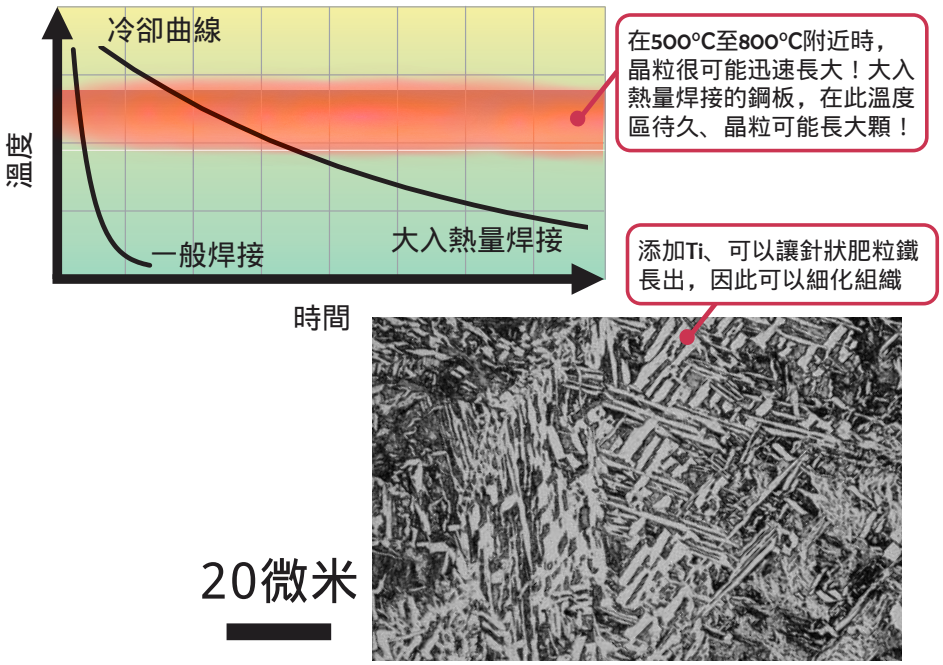
人類在科技進步的過程中，把很多東西的尺寸推到前所未有的極限，像是前面提到的船舶和建築物，但當我們把東西變大的時候，結構物的體積越來越大，要銲的鋼板越來越厚，如果利用傳統的銲接方式，可能兩塊鋼板必須要分十幾道次銲，造成銲料使用量增加，兩側連接材料的開槽面積增大，作業時間增加。在現代工業來說時間就是金錢、增加時間會對獲利產生很大的影響。

所以大入熱量銲接就被開發出來，想法很簡單，如果能夠通入更大量的熱量進去，使銲接可以在少量道數的情況下就完成，成功提昇銲接效率和減低施工成本。



只是大入熱量銲接並非只有好處；它會使得進入鋼材的熱量增加，所以在焊接結束、散熱冷卻的過程中，因入熱量大所以會有**緩慢的冷卻速率**，可能會造成鄰近焊道的地方的鋼鐵組織發生變化，可能會有晶粒重新長大、形成韌性差的組織，那此結構在使用的時候就很容易在銲接的地方發生破壞。因此必須靠改變合金的方式，讓這些粗大晶粒長不出來、或者長不大。

因此，最主要的核心概念則是改變**鋼板合金**、添加部分 Ti 合金和加入**介在物**，使得**相變態**行爲發生改變，讓**針狀肥粒鐵**產生！



KEY DESIGN!

改變合金設計，
讓細密的針狀肥粒鐵組織生成

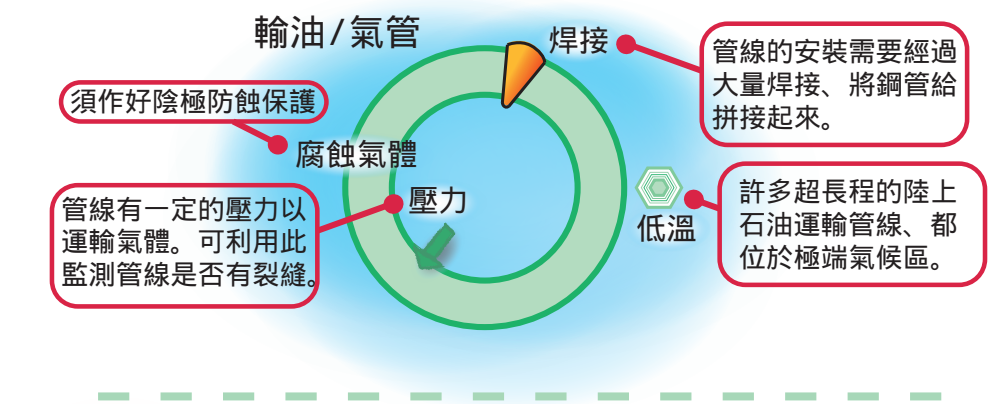
高強度管線用鋼

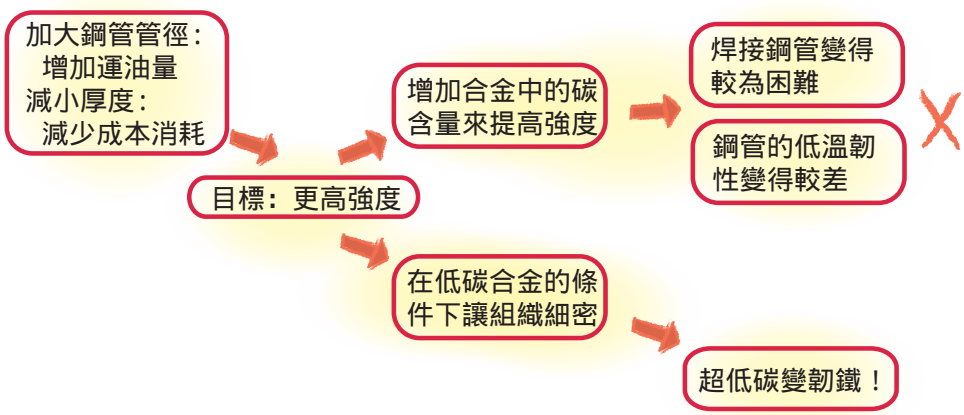
由 p.105 圖我們知道，臺灣的地底下埋著重要的石油、天然氣管線；而根據中油公司資訊，光是在臺灣，石油管線就達到 1600 多公里。

相較於臺灣，靠著海運進口石油、天然氣，因此僅需要在本島鋪設從港口至各個油庫、氣體槽的的管線；在幅員遼闊的歐亞大陸，必須鋪設橫貫歐亞的大型輸油、輸氣管。由此可以想見，世界對於管線用鋼的需求十分巨大。

爲了節省材料的要求，因此需要發展更高強度的管線用鋼；然而除了高強度之外，材料仍須保有一定的低溫韌性，以避免低溫脆化而破裂；很好的焊接性，因此容易在野外施工。

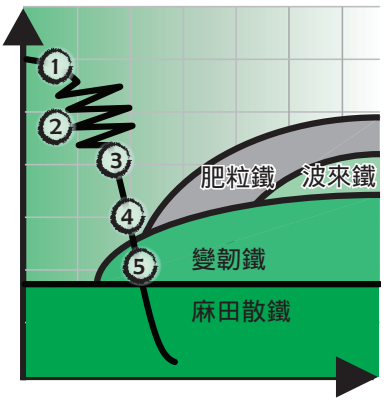
碳元素雖然會讓鋼鐵顯著強化，但是卻會讓焊接後的組織變差，韌性也降低，使得焊接性、低溫韌性無法達到管線用鋼的需求，因此必須選用超低碳的合金。



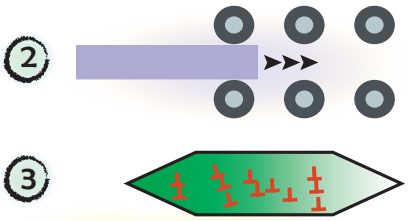


在超低碳合金中，添加微量**鈮 (Niobium) 元素**，可以讓高溫沃斯田鐵細化；並且再利用軋延、溫度的 TMCP 控制，可以讓**細密變韌鐵**組織生成，從而得到**高強度且高韌性**的材料。稱爲超低碳變韌鐵。

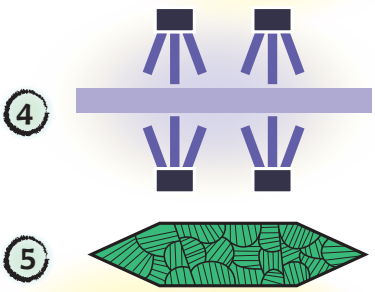
超低碳變韌鐵的TMCP製程



合金中加入鈮，因此可穩定化沃斯田鐵晶界。不易再結晶。



軋延後，沃斯田鐵組織形成扁平狀。



軋延後迅速噴水冷卻，避開肥粒鐵之形成溫度，因此最後得到超低碳變韌鐵之組織。

KEY DESIGN!

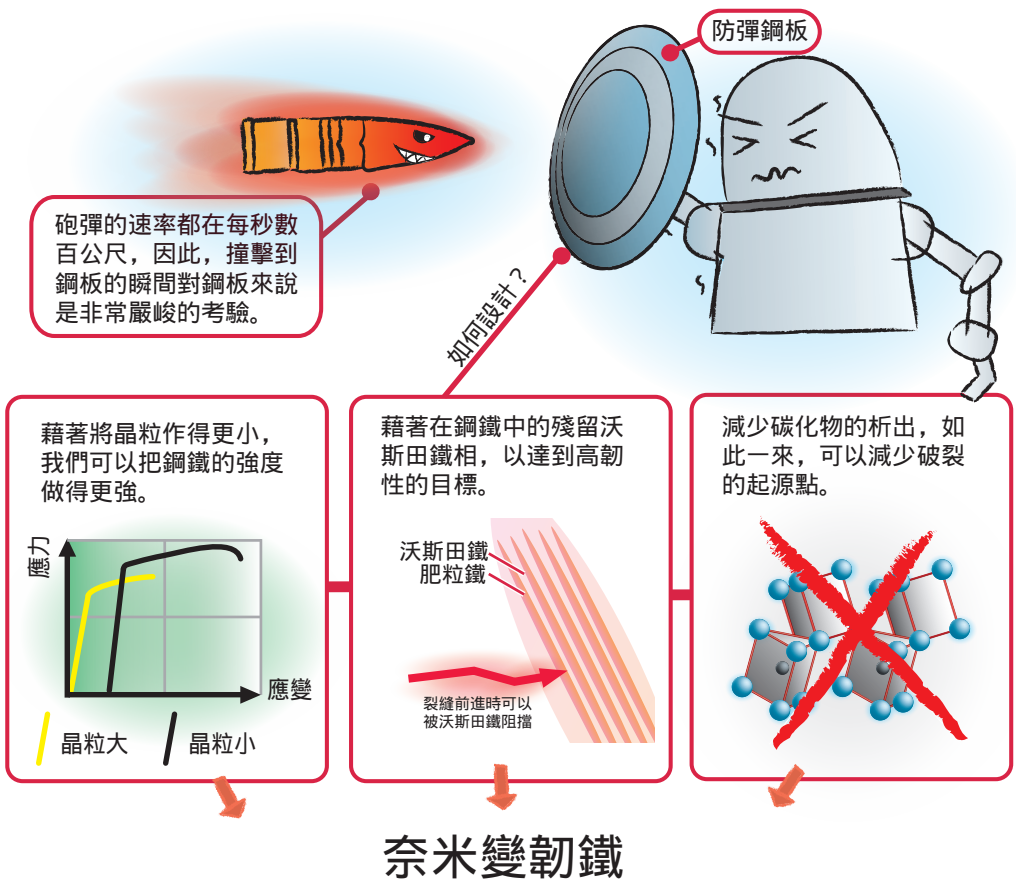
添加 Nb、軋延熱機控制
讓細密變韌鐵組織生成

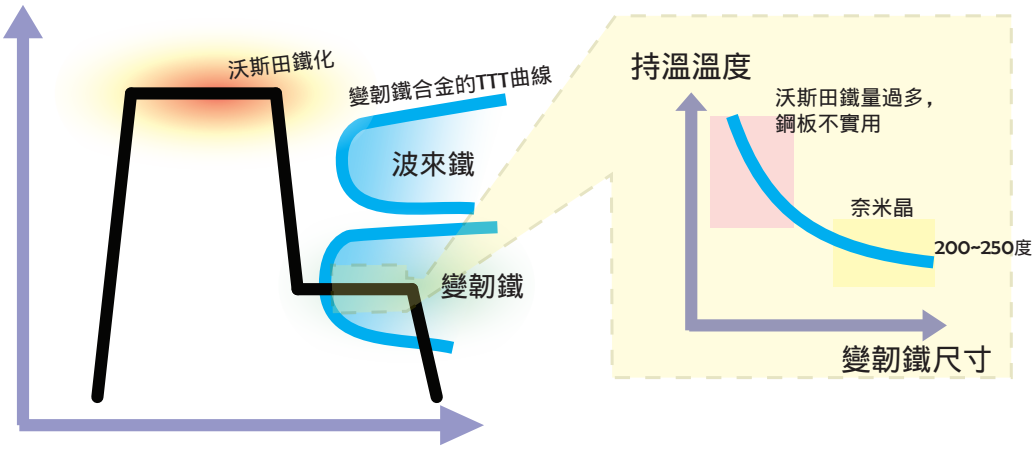
抗彈鋼板：奈米結構變韌鐵

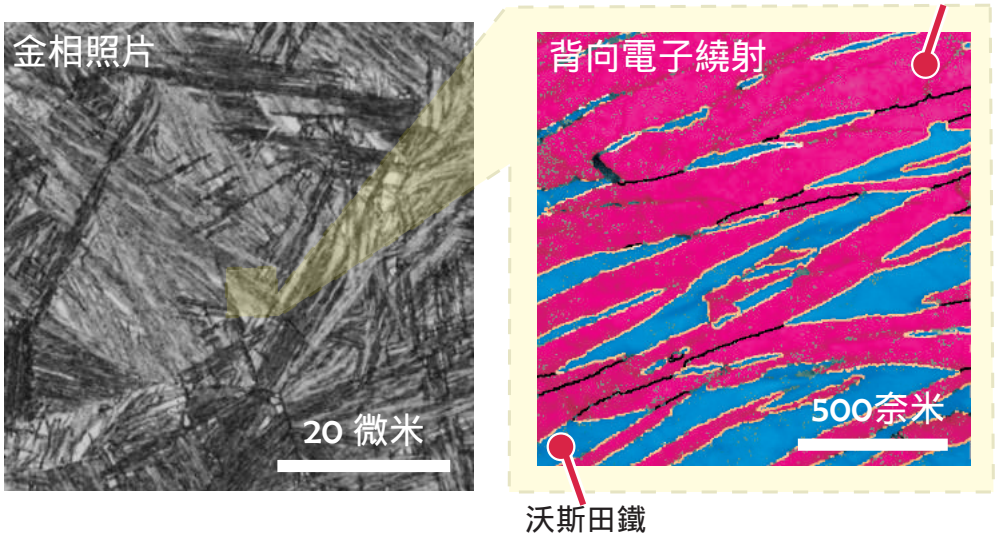
在國防方面，將先進鋼鐵應用於抗彈裝甲上、以保護裝甲車內的操作人員；擁有更強、更好的防禦力，卻能保持較好的機動性、較輕的車體，這一直是科學家研究的主題之一。

子彈撞擊到抗彈鋼板之後，要能夠避免穿甲彈打破裝甲，這便是要求：子彈打不破鋼板，鋼板破裂後、裂縫不易擴大；簡而言之，便是要求鋼板具有高強度、並同時具有高韌性。

我們在 p.110 提到：細化晶粒能同時提升強度、韌性。科學家近來發展「奈米結構變韌鐵」(nano-structured bainite)，便是具奈米尺寸的晶粒的雙相結構。







KEY DESIGN!

高碳使得強度大幅提升
添加矽避免硬脆碳化物生成
低溫熱處理、形成奈米級組織

鋼鐵與生活

Steel and You

第三章
薄板

章節概要

薄板是一種厚度在6mm以下的鋼鐵產品。因此，它的產品大多是應用在生活中板狀零件。我們在 3-1 薄板產品的應用 會介紹生活中的薄板產品、及薄板產品的要求及挑戰；而 3-2 薄板產品的製程 將介紹各種薄板如何製造。

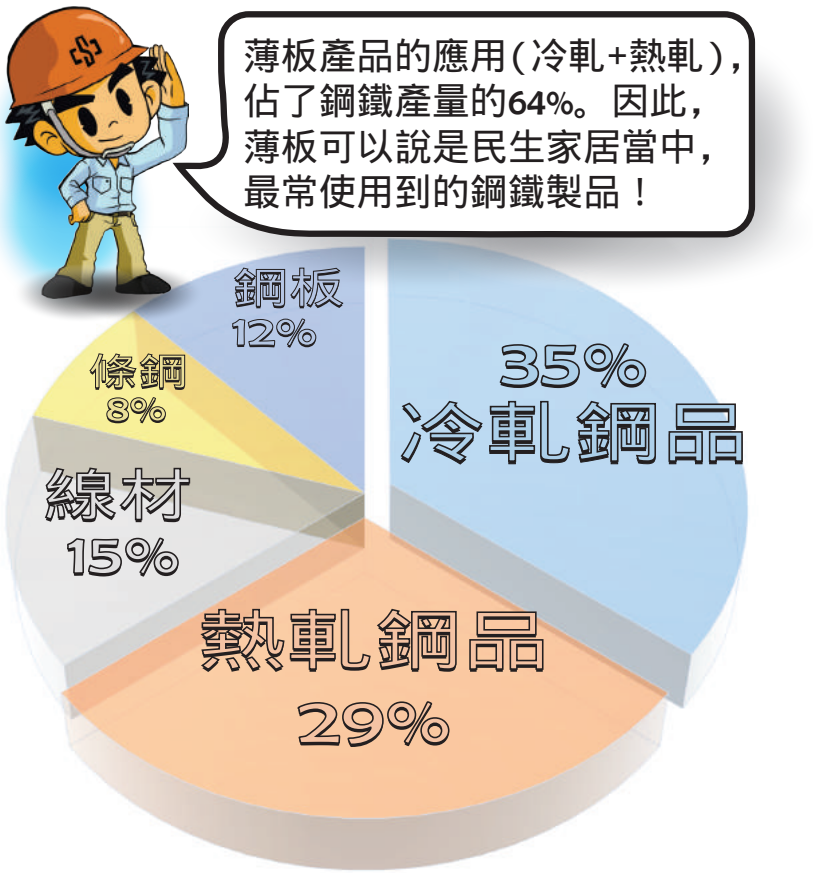
3-3 薄板的先端科技 則介紹近年來薄板的研究發展。

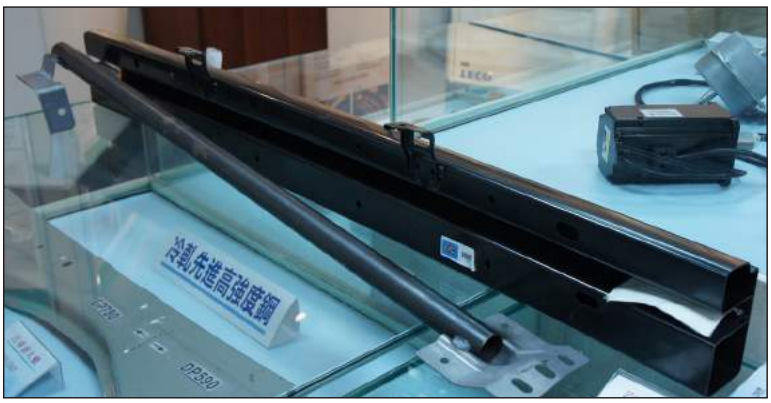
3-1 薄板產品的應用

Applications of sheets & strips

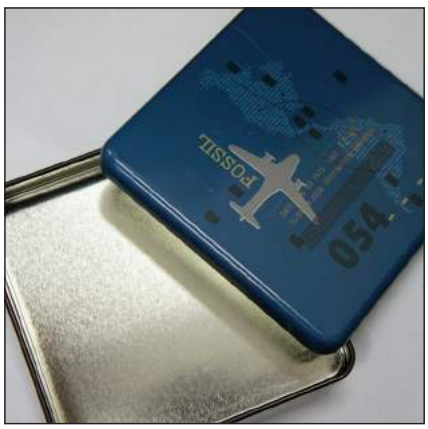
鋼鐵薄板產品簡介

薄板是用途最爲廣泛的鋼鐵產品，台灣平均一年生產 500 多萬噸的薄板產品，佔所有鋼鐵產品中的 64%，薄板依照生產方式可分爲熱軋和冷軋，熱軋產品常用來做結構性零組件，可用在車架、橋樑、壓力容器等處，冷軋產品則常用做外殼，如汽車鈑金、電器產品和家居用品等。本小節將介紹薄板產品在汽車用鋼、電氣鋼片和鍍鋅鋼片上的應用，輔以簡單的原理介紹，進而探討影響這些產品性質的因素。

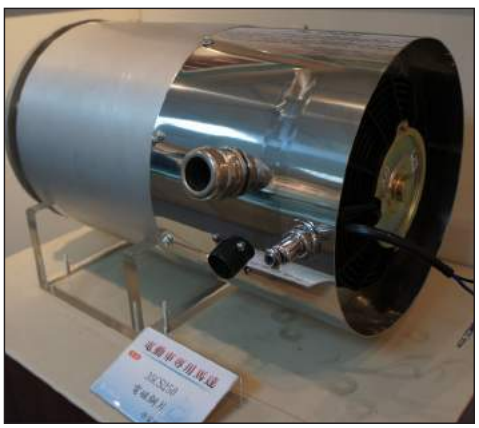




▲ 汽車的零組件很多使用了薄板



▲ 薄板上鍍了錫，便是食品工業上常用的馬口鐵



▲ 馬達、變壓器、發電機等等的鐵芯便是使用了電磁鋼片

▲ 板片狀的手工具也是使用薄板所做成。

汽車用鋼

由於鋼鐵的強度高且生產的成本較低，汽車工業運用非常大量的鋼鐵，目前平均一台車有七成以上的重量來自於鋼鐵，而熱軋鋼片的重量佔了整車的15%，相當於3位成年人的體重，因爲熱軋鋼片的強度較高，通常運用在車樑、車身結構、輪圈、保險桿和側門衝擊桿等處，這些零組件通常需要支撐車體重量或是承受撞擊力。

車子高速行駛的時候，
若突然發生意外事故，
車體損傷會十分嚴重。
為了更保護駕駛人的安全，
車廠傳統的方式，
是利用更為厚重的鋼板。

↓

耗油&排放更多二氧化碳

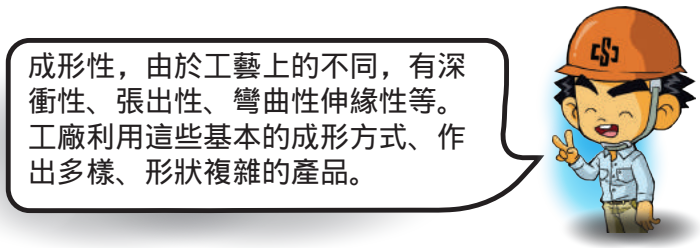
汽車用鋼的議題 - 幫汽車減重

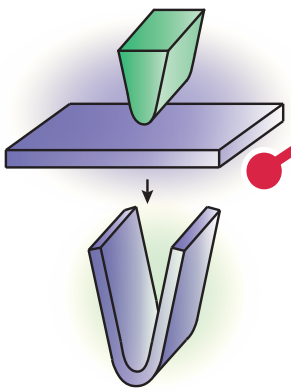
近年來減少能源消耗、減少二氧化碳的排放是一項重大議題。目前預估世界石油蘊藏量只可開採40年。而在台灣平均1.5人擁有一輛汽車。幫汽車減重、便能減少油耗、減少 CO_2 的排放。因此目前各大車廠皆往車身輕量化的方向發展。要將車身減輕，由於鐵密度 (7.8 g/cm^3) 較高，因此亦有車廠開發全鋁 (2.7 g/cm^3) 車身。然而鋁成本高、且無法焊接等缺點，因此，鋼鐵仍是無法取代的。

要將鋼板輕量化，最直覺的作法就是將現有汽車鋼板減薄、從而將汽車減重。因此要將鋼板減薄之後，會有強度不足的問題、就會有行車安全的疑慮。爲了同時獲得輕量、強度兩個互相矛盾的性質，車廠必須開發更高強度的鋼片。

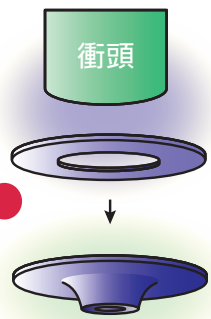
汽車用鋼的議題 - 成形性

除了強度的需求，汽車鋼板還需要有良好的成形性，才能製造出形狀複雜的汽車零組件。**成形性是讓鋼鐵變成我們要求的形狀**，因此鋼板強度**不能太高**，否則鋼板會難以變形。這便是車廠目前面臨的難題：如何讓鋼板**容易成形、又具有高強度**？

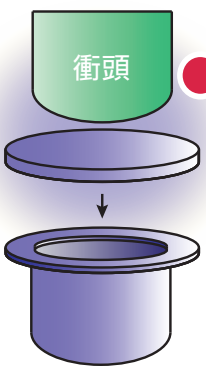




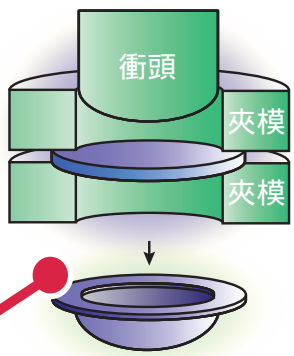
彎曲成形是利用衝床或是折板機等機器、施加力量讓鋼片彎曲



伸緣成形是將開孔的鋼片用類似深衝成形的方法衝壓，成品會長得像火山口



深衝成形是利用衝頭衝撞模穴上的鋼片，進而形成一體成形的圓柱形狀。常見的深衝成形產品，如瓦斯鋼桶等

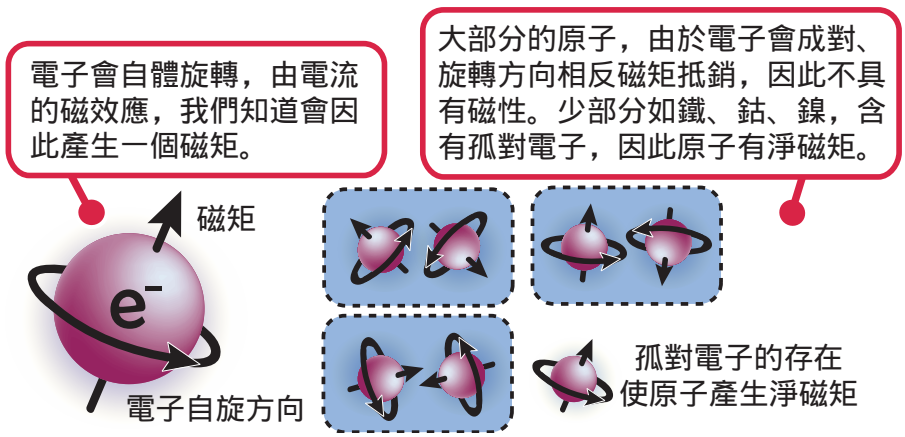


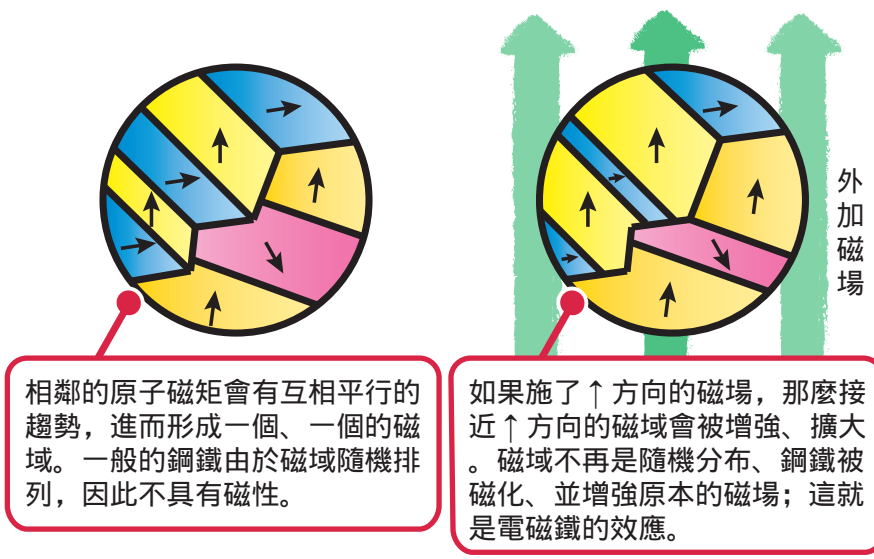
張出成形和深衝成形很類似，不過鋼片因為被固定住，所以不會隨著衝頭流入模穴，反而像氣球膨脹一般改變形狀

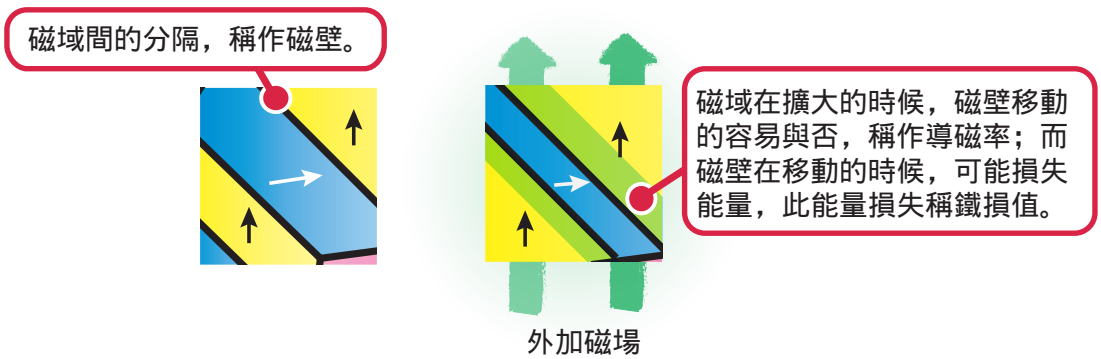
電磁鋼片

電磁鋼片又稱作電氣鋼片、矽鋼片，可用在**變壓器**、**馬達**和**發電機**等電磁機械。電磁鋼片的應用，最主要是利用**鐵在通過電流時會被磁化的性質**。這就是所謂的電磁鐵。電磁鋼片的好壞，由磁化效率決定。

磁化的效率有兩個指標，**導磁率**以及**鐵損值**。簡單來說，導磁率爲電場生成磁場的轉換效率，鐵損值則是電場生成磁場時的能量損耗。導磁率高，鐵損值小，爲好的電磁鋼片。







導磁率、鐵損值是電磁鋼片當中最重要的性質。好的電磁鋼片，既容易磁化，能量損失又少！

▲ 電磁鋼片的成品

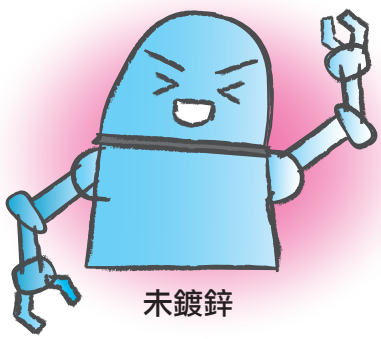
鍍鋅鋼片

鋼鐵雖然有許多的優點和泛用性，但是生鏽的問題一直困擾著人們，所謂的生鏽是指鋼鐵在潮濕的環境下氧化產生鐵鏽，是一種電化學反應。

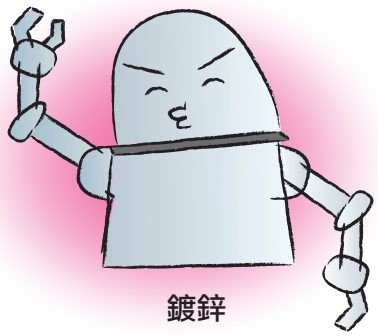
鐵鏽的結構非常鬆散且容易脫落，水和氧氣也容易穿透鐵鏽，繼續使內部氧化，因此鐵鏽可說是破壞鋼鐵的一大兇手，除此之外鐵鏽通常呈現黯淡的紅色，也傷害了鋼鐵的美觀，日本鋼鐵銹蝕造成的損失達國民生產毛額的3.5%，更別說是濕熱的台灣。

▲ 鐵鏽的結構鬆散因此特別易脫落，再次造成內部鏽蝕

爲了防止鋼鐵生鏽，鍍鋅鋼片應運而生，鋅的價格便宜、和鐵的附著性良好。而且當鋅和鐵接觸時，因爲鋅的活性較大，鋅會比鐵更快氧化，此氧化層十分緻密，隔絕氧氣、水氣，因此達到保護內部鋼鐵的效果。鍍鋅除了能夠防蝕外還能達到表面美觀和耐用等優點。

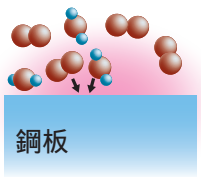


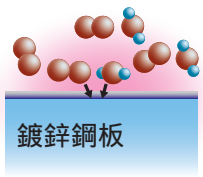
未鍍鋅



鍍鋅

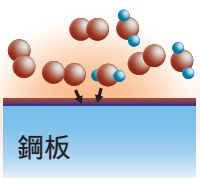
鐵在氧氣、水氣的存在下，會發生生鏽的反應。

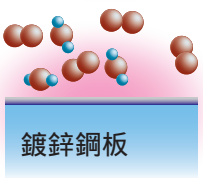




在原有的鋼板表面，鍍上一層鋅鍍膜。

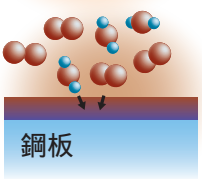
氧化鐵鬆散、容易脫落。因此氧跟水氣能穿透氧化鐵層，讓下面的鐵繼續生鏽

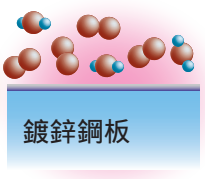




鋅容易氧化、因此在表面形成氧化鋅鍍膜。鋅氧化膜緻密，因此氧、水氣被隔絕、無法穿透。

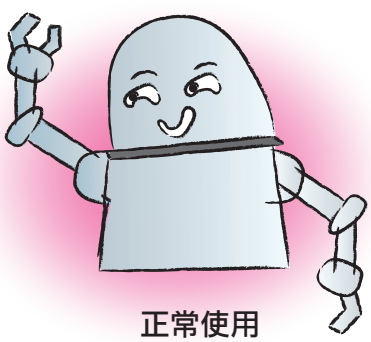
生鏽的氧化反應反覆發生。





因此裡層的鋼板被鋅鍍層保護了

嚴重鏽化



正常使用

3-2 薄板產品的製程

Pocessings of sheets & strips

新鮮的鮮奶可以直接販售，也可以將其經過發酵而製成原味優酪乳販售，原味調味乳還可以再添加香料成爲調味優酪乳販售，它們的原料是一樣的，但是可以連續地製成不同的產品。同樣的，我們前面所提到的熱軋鋼片、冷軋鋼片、電氣鋼片和鍍鋅鋼片等等，其實彼此之間也是類似的關係。

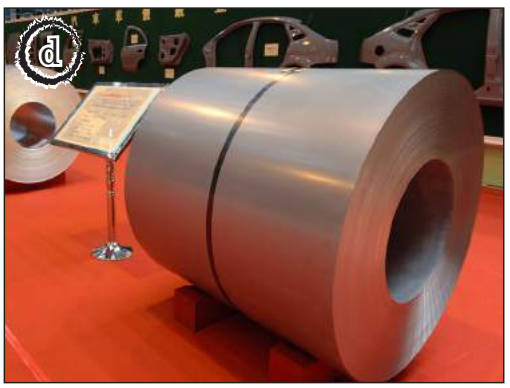
鑄造好的鋼胚經過熱軋製程後成爲熱軋鋼片，將其經過冷軋製程就成爲冷軋鋼片，將冷軋鋼片經過塗鍍製程之後就成了鍍鋅鋼片，由此可知，我們只是在這個生產鏈中依照需求選擇所需要的產品。

原鋼錠

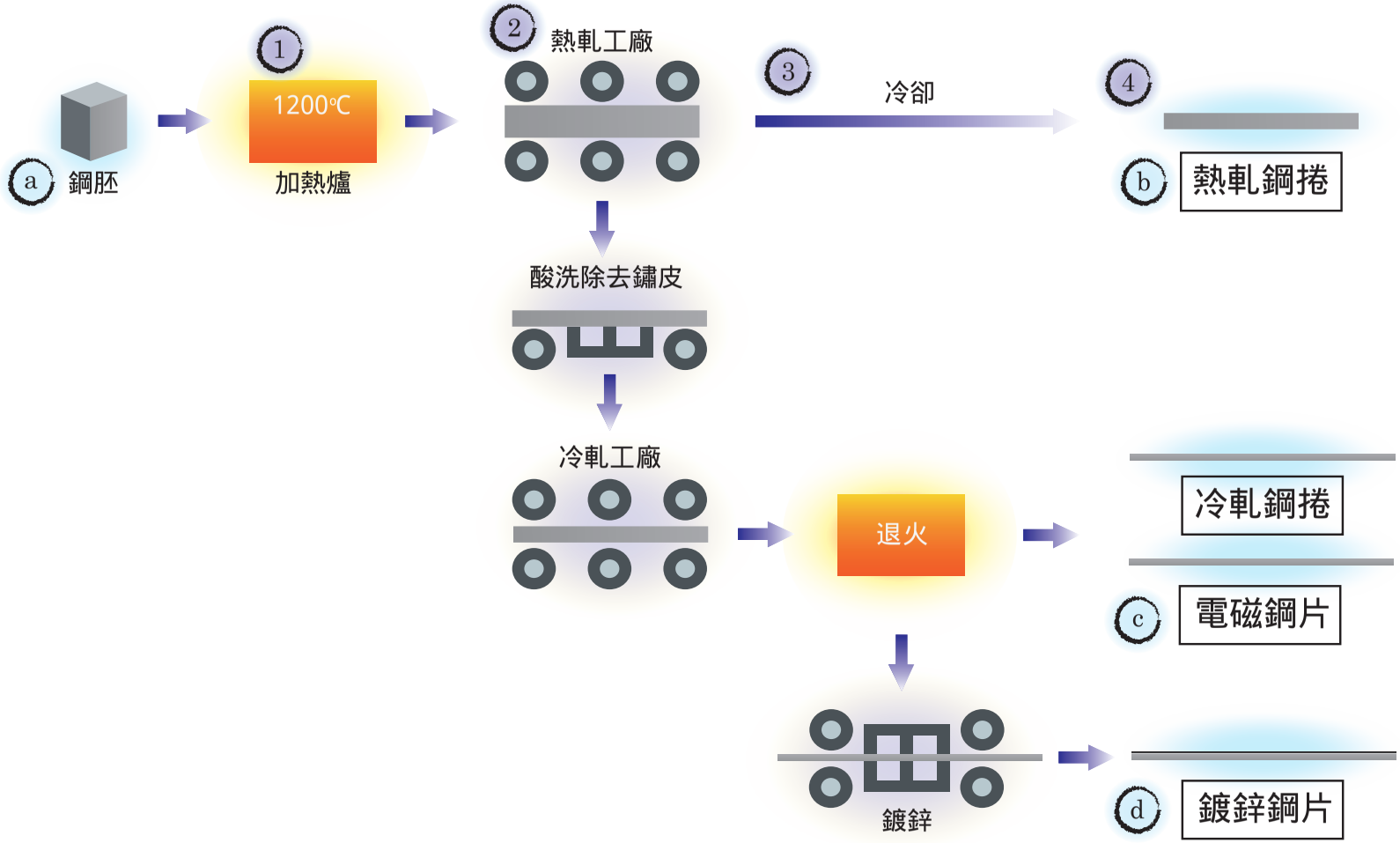
熱軋鋼捲

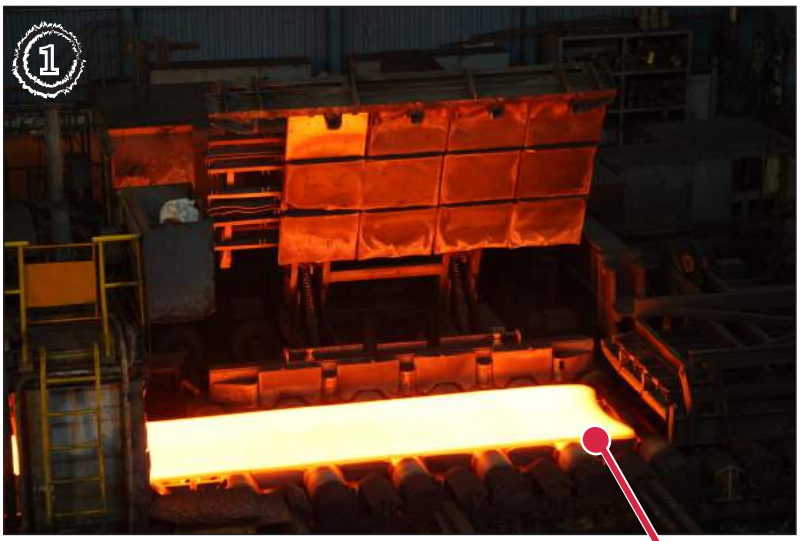
電磁鋼片

鍍鋅鋼片

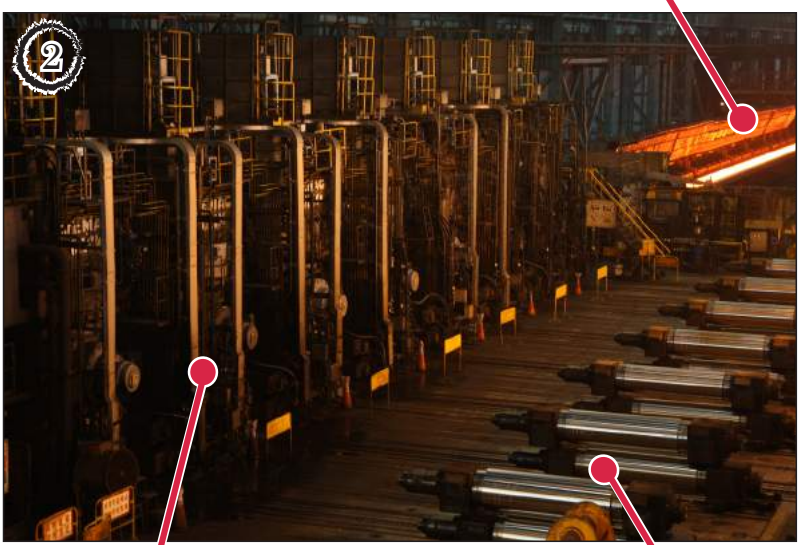


鋼鐵熱軋、冷軋製程比較圖





此發紅的帶狀物，即是被加熱到高溫的鋼板。鋼板由輥輪帶動而移動，準備進入滾軋機進行軋延

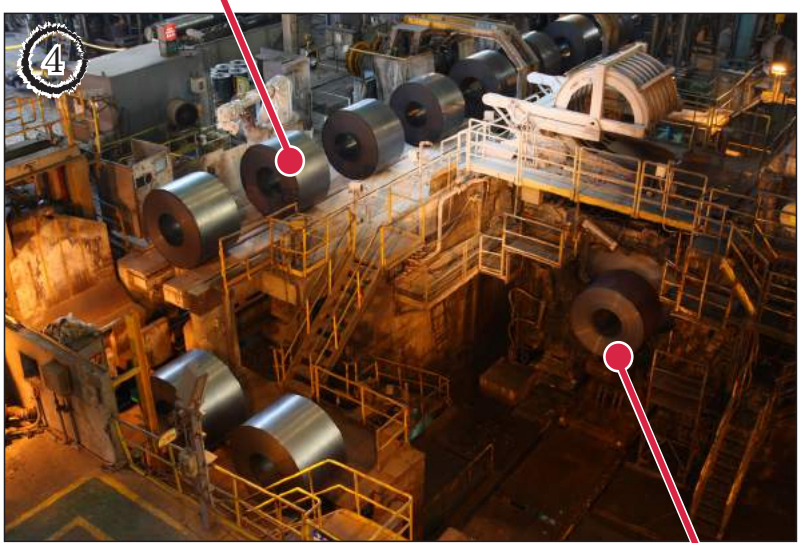


熱軋工廠的巨大的滾軋機，裡頭的鋼輥產生很大力量、將鋼板軋薄。

右下角的鋼輥則為備品，在此堆放的目的，是為了讓鋼輥損壞、或壽命將屆時，能迅速的替換。如此一來能減少因更換鋼輥、而停工的時間。

輥軋完後的熱軋薄板，接著噴灑冷卻水讓其降溫。由此照片可以發現到鋼板軋到薄板的時候長度會拉非常長。

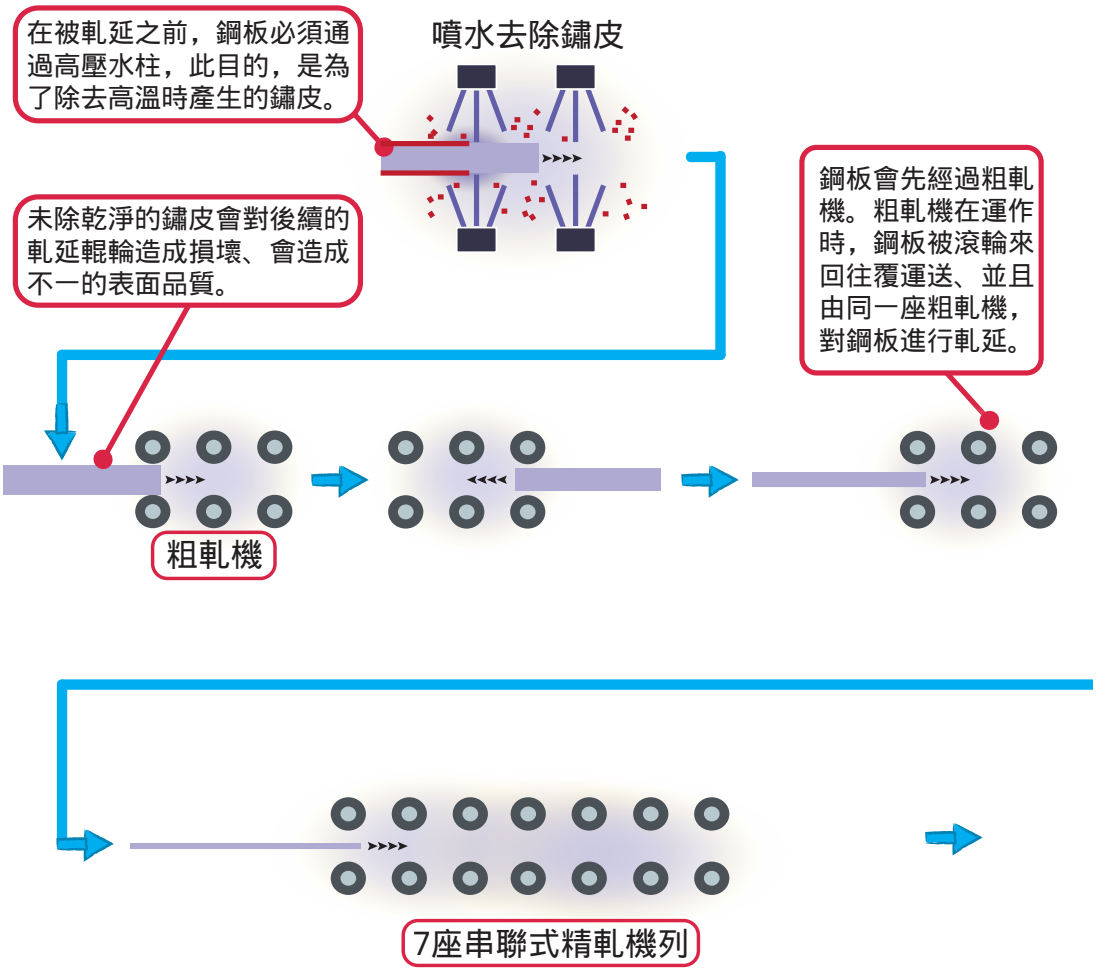
最後將盤捲完的鋼捲送至倉庫，等待下一步製程；或者直接出售！



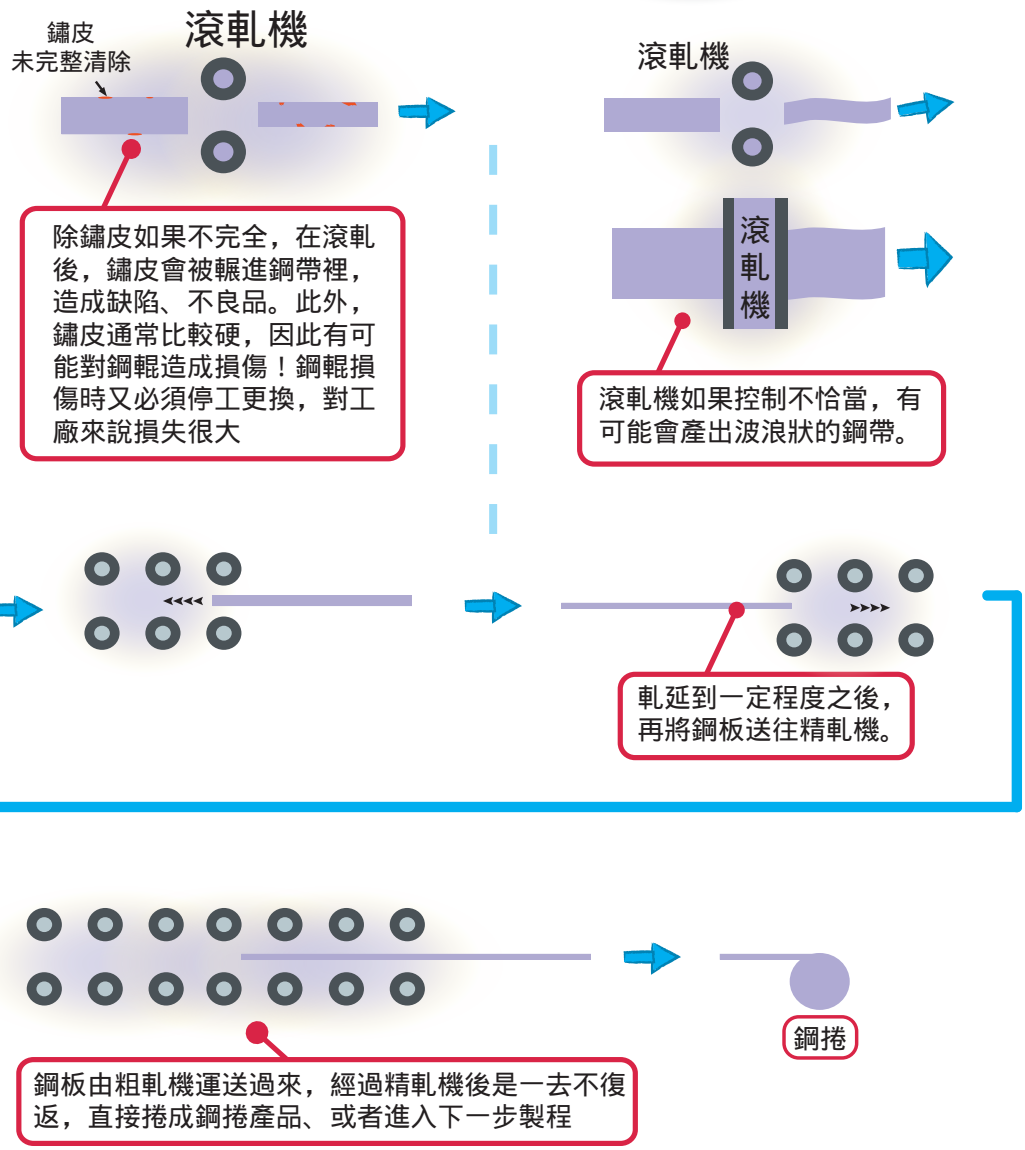
降溫到一定程度，才可以進行盤捲；盤捲的過程同樣進行冷卻。否則盤捲後，有可能產生沾黏問題。

熱軋製程 (hot rolling)

熱軋製程是先將連續鑄造好的鋼胚在加熱爐中加熱，經過預熱、加熱和均熱到 1150~1300°C，高溫下鋼料有較優良的延展性，之後到除銹箱用高壓水柱清除之前累積的銹皮，再用粗軋機軋到 25~46mm 的厚度。往復式的粗軋機會使鋼片在滾輪上來回移動，連續式的粗軋機則是經過後不再回頭，之後再送進精軋機軋到所需尺寸，分兩個階段是避免一次軋到所需尺寸會使鋼片來不及延展而破裂，最後在鋼片輸送台上，使用層流冷卻將鋼片降至室溫。如果將冷卻後的鋼片盤捲起來，得到的產品稱爲熱軋粗鋼捲。



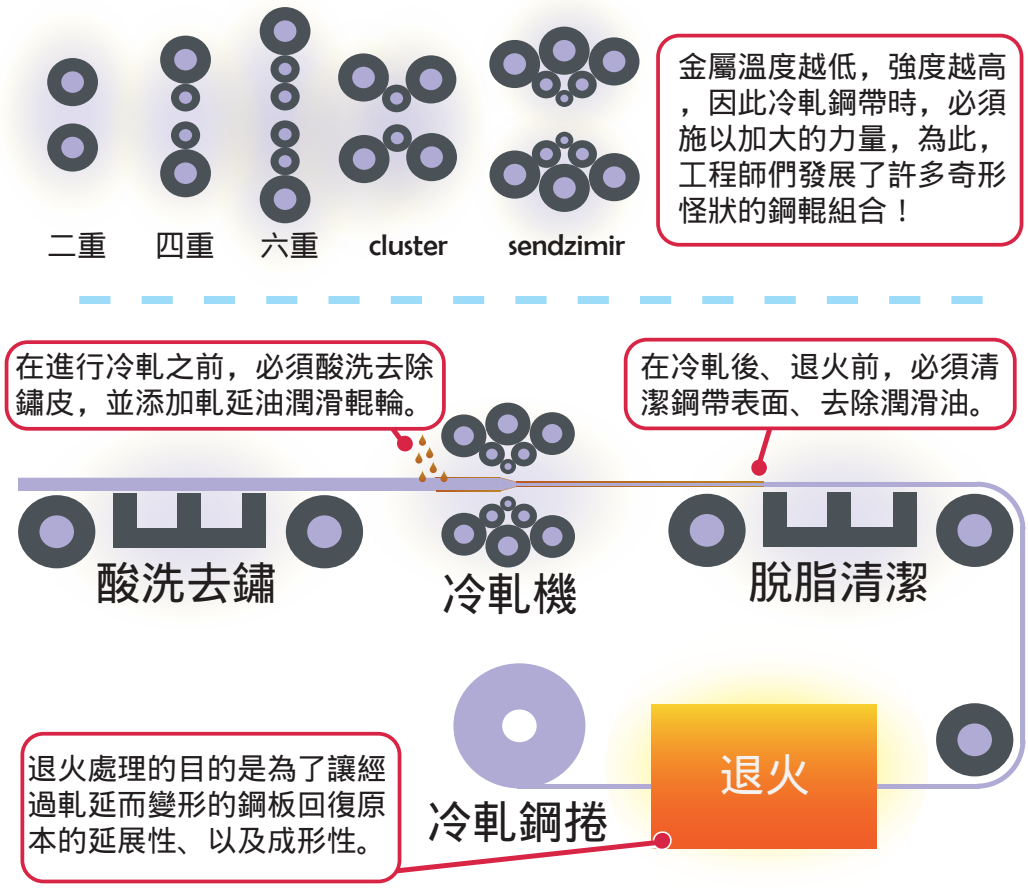
對鋼廠來說，熱軋製程必須非常仔細地監控與維持，如此才能持續、穩定的產出高品質的產品！


鏽皮
未完整清除
滾軋機
除鏽皮如果不完全，在滾軋後，鏽皮會被輾進鋼帶裡，造成缺陷、不良品。此外，鏽皮通常比較硬，因此有可能對鋼輥造成損傷！鋼輥損傷時又必須停工更換，對工廠來說損失很大
滾軋機
滾軋機
滾軋機如果控制不恰當，有可能會產出波浪狀的鋼帶。
軋延到一定程度之後，再將鋼板送往精軋機。
鋼捲
鋼板由粗軋機運送過來，經過精軋機後是一去不復返，直接捲成鋼捲產品、或者進入下一步製程

冷軋製程 (cold rolling)

冷軋製程是將熱軋鋼捲進行酸洗除去銹皮，然後利用二重、四重、五重、六重甚至更多重的滾輪冷軋機冷軋。多重輥輪的冷滾軋機可以施加很大的力量，將鋼捲軋成較薄的厚度。

由於冷軋的過程中會產生大量的熱，需要用軋延油降低摩擦。總不能給顧客油膩膩的鋼捲吧！因此冷軋後需要脫脂清洗以去除油脂。



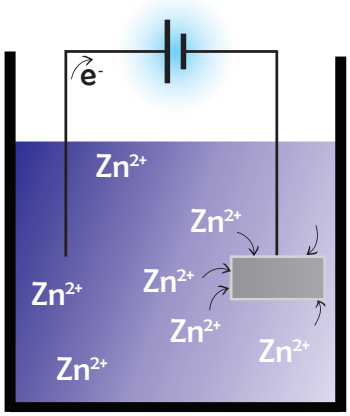
經過冷軋後，冷軋薄板有累積巨大的變形。我們從前面得知鋼鐵加工後會硬化，因此不易後續的成形。所以在最後，會將鋼捲重新加熱到 600~900°C 進行退火處理。退火的目的是：調整伸長率、調整降伏強度和抗拉強度。退火後作最後精整除去多餘的邊角，就可包紮爲成品。

鍍鋅鋼片

鍍鋅鋼片的製程分爲**電鍍鍍鋅**和**熱浸鍍鋅**，電鍍鍍鋅鋼捲片是將經過脫脂、酸洗、電鍍及各種後處理的冷軋鋼捲，送入連續電鍍生產線，而成電鍍鋅產品。

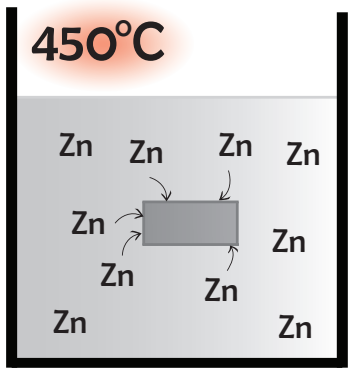
電鍍鋅基本原理，就是將鋼板接在外部電源的**陰極**，然後浸泡在含有鋅離子的電解液中，鋅離子就會在鋼板的表面還原。

熱浸鍍鋅則是將鋼片浸泡在鍍鋅槽中，然後金屬鋅就會**透過擴散、滲透**到鋼片中，產生**合金化反應**。通常鍍鋅槽的熔融鋅液純度在 97.5% 以上，溫度大約爲 450~500℃。



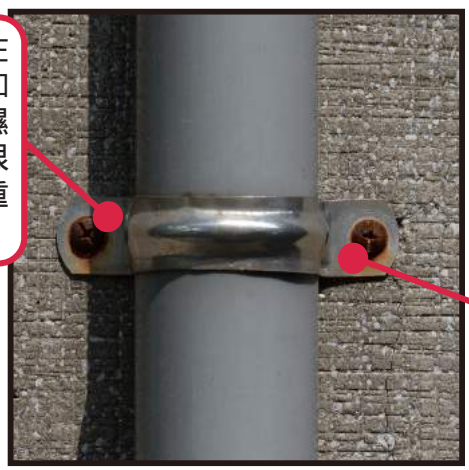
帶正電的Zn被陰極吸引發生電化學反應。

$Zn^{2+} + 2e^- \rightarrow Zn$



Zn擴散進入鋼板，並發生合金化反應。

$Zn + Fe \rightarrow Zn_xFe_y$



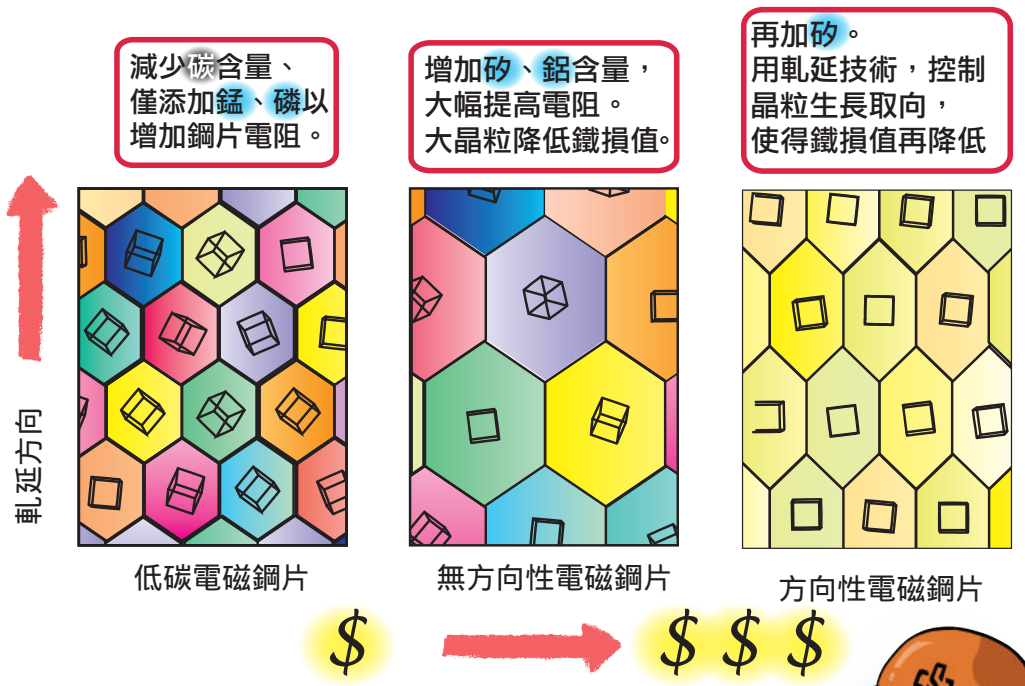
未鍍鋅的螺絲，在使用時間久後、加上台灣靠海、潮濕鹽分高的環境，很容易就會發生嚴重的鏽蝕。

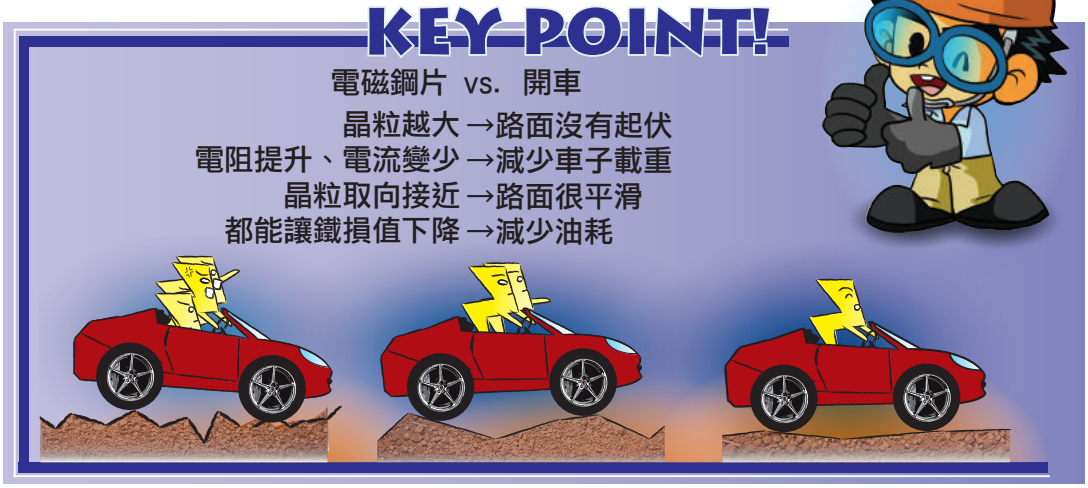
鍍鋅的水管夾，不僅可以讓鋼板變得美觀，也可以保護鋼鐵、使其使用壽命可以延長

電磁鋼片

電磁鋼片，分爲低碳電磁鋼片、無方向性電磁鋼片以及方向性電磁鋼片。前兩者生產方式與一般的冷軋產品類似，屬於較低階的產品；而方向性電磁鋼片，則是藉著控制鋼板晶體方位取向，獲得低鐵損值、高磁化率的電磁鋼片。

電磁鋼片的種類



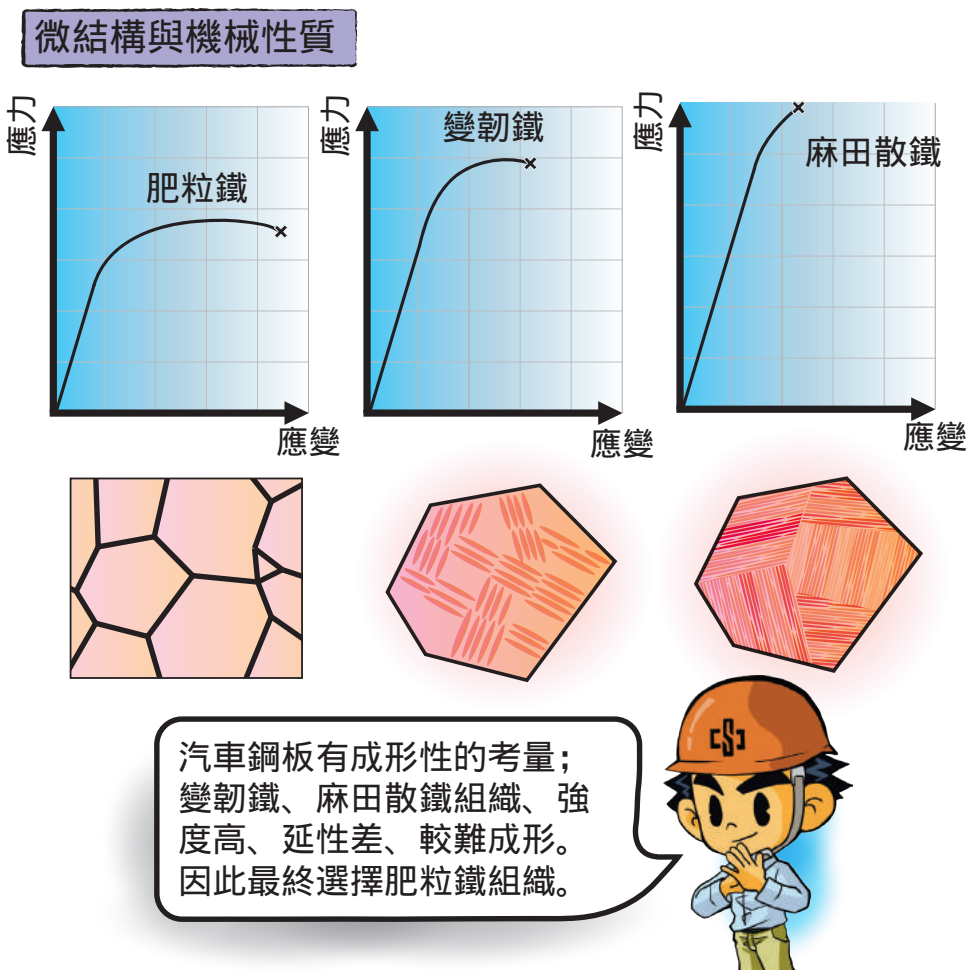


3-3 薄板的尖端科技

Advanced development of sheets & strips

奈米析出鋼板

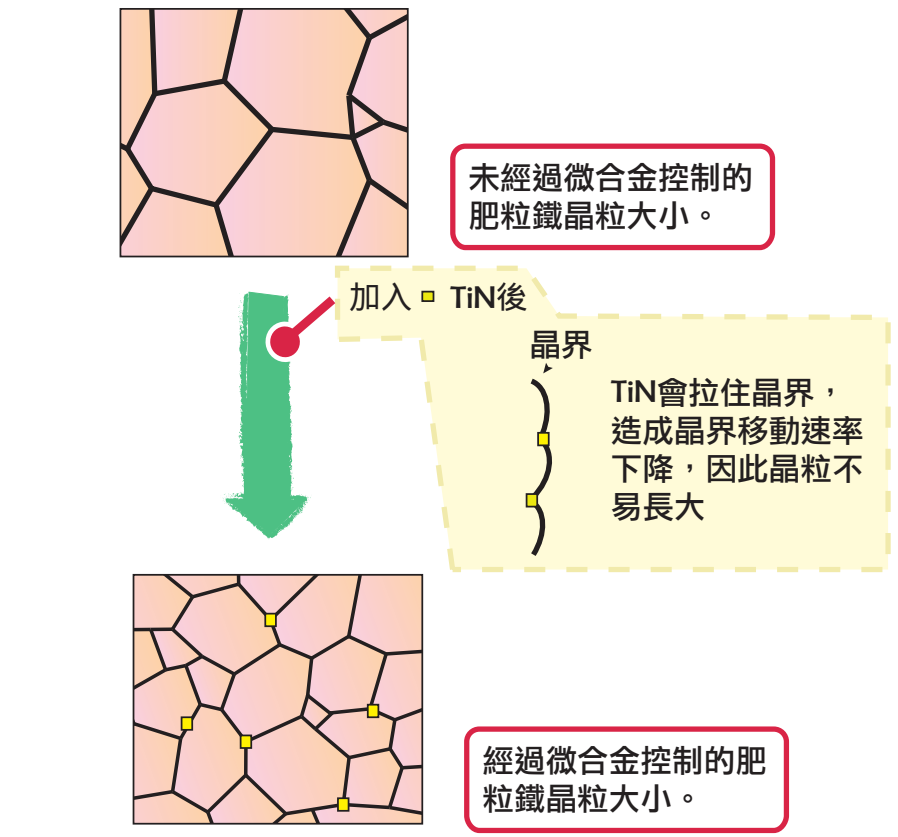
前面我們有提到過，汽車用鋼正在往輕量化發展，要減少重量又要保持強度必須使用高強度的鋼片，一般鋼片要達到 600MPa 以上的抗拉強度時，必須控制鋼材的微結構爲麻田散鐵或是變韌鐵，然而這類的微結構雖然有強硬的性質，卻因爲伸長率很低而無法良好成形，如果要運用在汽車用鋼上極爲不利，因此從成形性的要求來看，微結構的基材最好爲伸長率高的肥粒鐵。



而在此條件下，我們可以強化肥粒鐵的機制爲晶粒細化和析出硬化、固溶強化。固溶強化要有顯著效果，添加的量必須要多，如此一來鋼鐵成本會提高、製程也會較難控制。奈米析出鋼就是以晶粒細化、析出強化的機制來發展的先進鋼種。

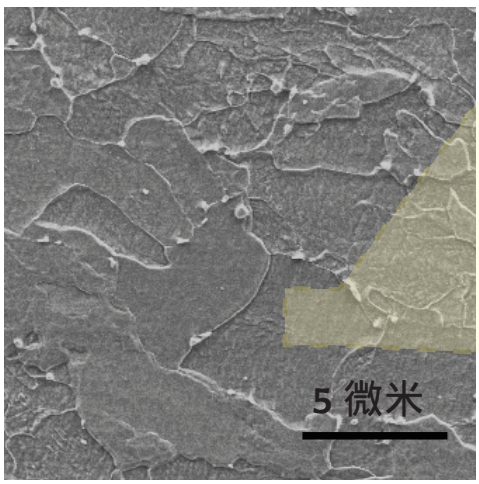
從晶粒細化的角度來看，奈米析出鋼添加了鈦，鈦和氮會化合成氮化鈦，氮化鈦在高溫中也能穩定存在，此外氮化鈦處在晶界的能量較低，因此晶界會被氮化鈦釘住，不容易再移動。因此可以降低晶粒的大小，進而使強度增強。

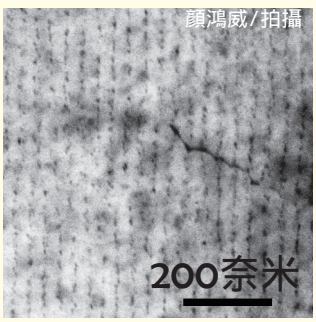
晶粒細化的原理



此外，我們知道析出物的尺寸越小、析出物的總量越多，析出硬化的效果越好，因此如果能將析出物的尺寸降到奈米級，必能大量提升鋼片的強度，奈米析出鋼中添加了鈦和釩，和鋼料中的碳化合成 (Ti,V)C，在適當的溫度下，(Ti,V)C 會整齊的排列。此特殊現象稱作介面析出。而奈米析出鋼因爲其優異的性質，至今已被用來製成許多產品，包括防撞鋼樑、輪圈和卡車大樑等汽車零組件。中鋼在民國 96 年完成開發後，第一年的供應量約 9 千多噸，替國內零組件業者取得許多國外訂單。

由此可得知如果沒有電子顯微鏡的發明，要控制和觀察析出物大小是非常困難的，奈米析出鋼可能就無法誕生，由此可知科技進步和鋼鐵發展有絕對的相關性。





在穿透式電子顯微鏡下，可發現極為細小的(Ti,V)C析出物，這些小析出物又密、又整齊，因此可以提高鋼鐵強度。

KEY DESIGN!

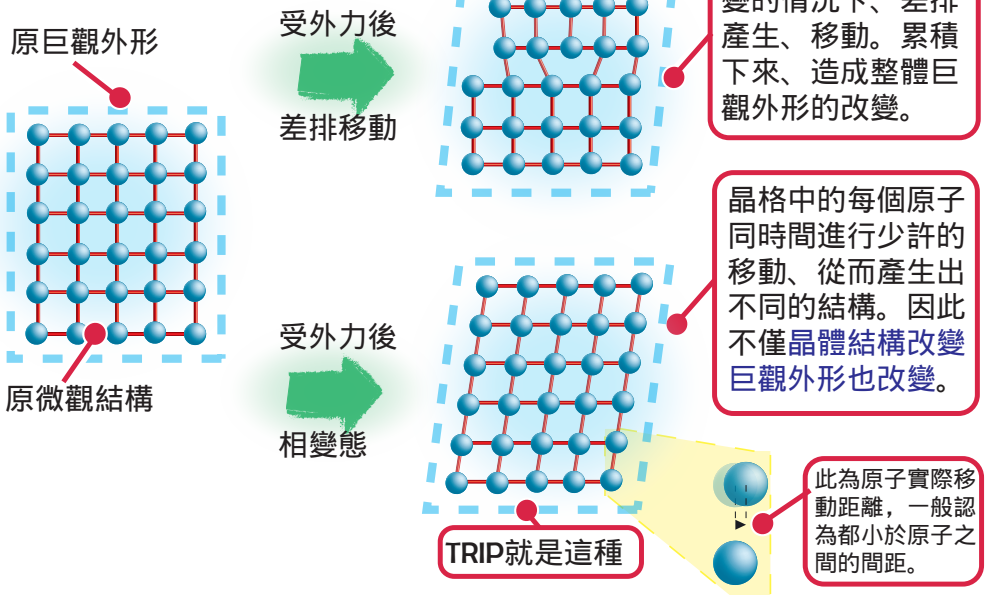
加入微合金如 Ti, V, Mo
控制奈米級碳化物的製程

TRIP 鋼

TRIP(TRansformation Induced Plasticity, 相變誘導塑性) 鋼，運用的則是另外一種解決強度、延伸率的方式。

前面我們提到，鋼鐵的塑性變形、表示結構中的差排產生與移動；而事實上，沃斯田鐵、變成麻田散鐵相變態，本身也是一種塑性變形；而且反過來，塑性變形則可誘導沃斯田鐵改變結構、相變態成爲麻田散鐵！當此相變態發生時，可以讓鋼鐵的強度和延展性提升，因此特稱此現象爲 TRIP ！

應變誘導相變態



TRIP鋼，其組織含有無碳化物的變韌鐵。

無碳化物的變韌鐵當中，包含兩種殘留沃斯田鐵：夾在束狀變韌鐵中的γ_b、與夾在變韌鐵之間的γ_f。

殘留沃斯田鐵在受外力之後可能變成較硬麻田散鐵，因此相對於原始組織、強度變高了！

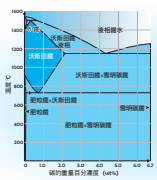
研究顯示，γ_b較容易先相變態為麻田散鐵(α')、γ_f較晚相變態為麻田散鐵。

然而，一般鋼鐵殘留的沃斯田鐵並不多，小於 5 個百分比；那麼這麼好的沃斯田鐵要怎麼留多一點呢？關鍵在於：如何讓雪明碳鐵 (Fe_3C) 這種碳化物不要析出！

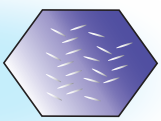
如何多一點沃斯田鐵？

已知：鋼鐵 C 越多 則 沃斯田鐵 越穩定

然而：



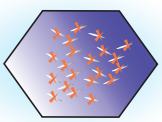
相圖



微結構

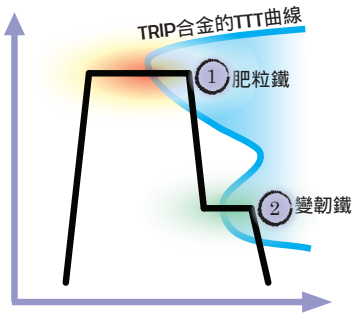
相圖與實際微結構的觀察，都顯示鋼鐵的一般合金、與熱處理容易產生雪明碳鐵。雪明碳鐵為由三個鐵，一個C所組成的化合物，因此會大量消耗C。

只要加入足夠多的Si、Al之後：



雪明碳鐵的出現被抑制！ ➡ C 可以被留下來以穩定沃斯田鐵

TRIP熱處理



1. 在高溫進行肥粒鐵相變態、產生部分肥粒鐵由於肥粒鐵飽和碳含量低，因此，C 被丟到沃斯田鐵中。
2. 在低溫進行變韌鐵相變態、可以產生薄膜狀、高 C 的穩定沃斯田鐵。

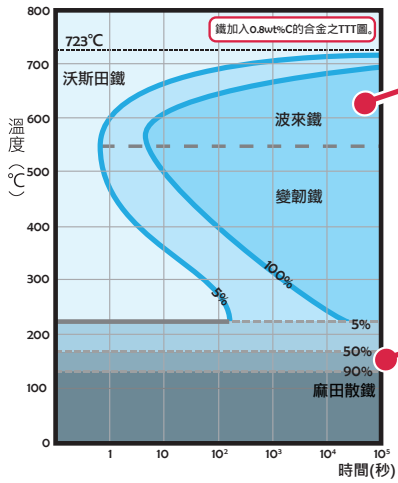
KEY DESIGN!

加入 Si、Al 等元素，以抑制雪明碳鐵析出、增加沃斯田鐵！

Q&P 鋼

Q&P(Quenching and Partitioning) 鋼，其實跟前面的 TRIP 鋼類似，基本原則，也是利用了殘留沃斯田鐵的相變誘導塑性的特性。主要的不同點，則是在熱處理的不同。Q&P 利用產生部分的麻田散鐵、再將之升至高溫使碳擴散離開麻田散鐵，從而得到高碳的沃斯田鐵。

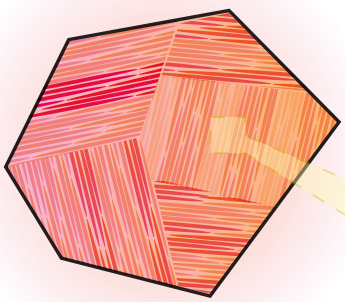
TTT圖與麻田散鐵



一般鋼鐵在高溫的相變態，如波來鐵、肥粒鐵等，在高溫持溫夠久、都可以完成相變態。

然而，麻田散鐵則是完全不同。只要溫度到達就會生成固定的量；持溫再久，量也不會改變。
要得到更多的麻田散鐵，只能靠近一步的冷卻。這就是TTT圖中，麻田散鐵畫成一直線的原因

Q&P的原理



麻田散鐵結構

Q&P處理

沃斯田鐵就具有較高濃度的碳、且在室溫時依然穩定。

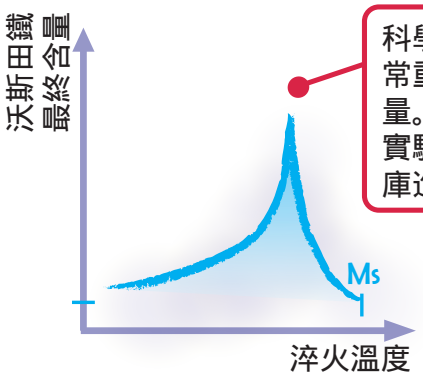
一般的麻田散鐵、是肥粒鐵中含過飽和的碳。

經過Q&P處理後、麻田散鐵的過飽和的碳、跑到周遭沃斯田鐵中

TRIP 鋼和 Q&P 鋼都是相當先進的鋼種，透過精密地控制微結構來得到非常優良的性質，目前市面上也有這些鋼種的應用，國外知名鋼廠號稱 Q&P 鋼打造的車輛雖然成本提升 8 萬多元，但是可以節省 5% 的油耗，並且大大地提升安全性。

如何多一點沃斯田鐵？

已知：鋼鐵 C 越多 則 沃斯田鐵 越穩定

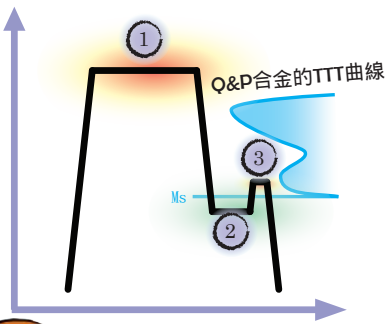


科學家發現，淬火溫度T_p的選擇非常重要！決定了最終沃斯田鐵的含量。而其中最好的溫度T_p，不必靠實驗嘗試、而可以經由已知的資料庫進行計算、來達到。

此外...也要避免雪明碳鐵在後續加熱時析出。

合金需添加Si、Al

Q&P的熱處理



1. 將鋼鐵沃斯田鐵化
2. 將鋼鐵迅速冷卻到Ms以下的T_p避免肥粒鐵、變韌鐵相的產生並產生的部分麻田散鐵相。
3. 將麻田散鐵回到約400℃的高溫，讓C可以由麻田散鐵跑至殘留沃斯田鐵中、從而讓沃斯田鐵穩定。

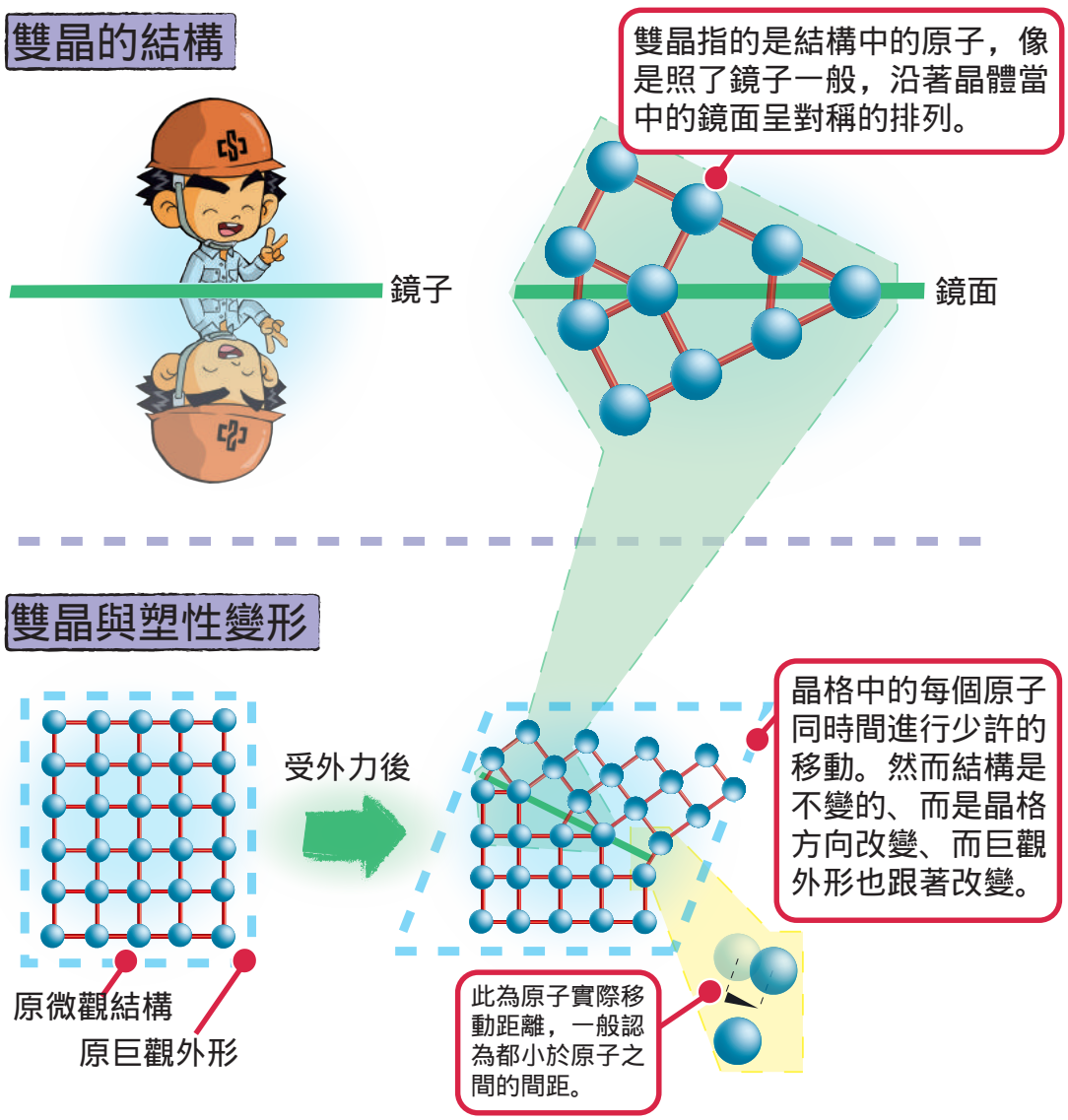
KEY DESIGN!

抑制雪明碳鐵、再調整適當的熱處理溫度、以增加沃斯田鐵！

TWIP 鋼

TWIP(Twinning-Induced Plasticity，雙晶誘導塑性）鋼，是一種擁有高強度和韌性的鋼種。此鋼種的最大特色在於，添加約 15%~30% 的大量錳，讓鋼鐵形成全沃斯田鐵的結構。

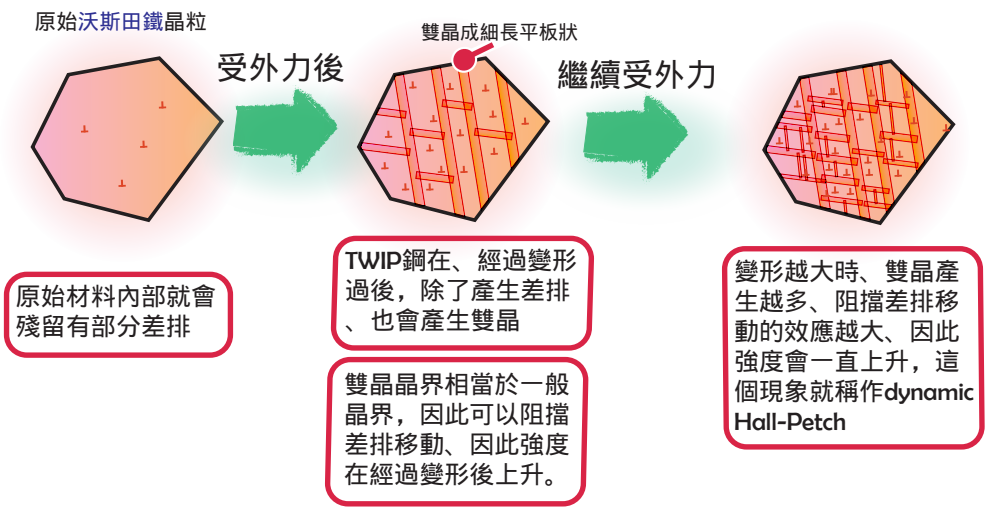
前面提到，沃斯田鐵在受到塑性變形的時候，除了產生差排移動、也有可能產生麻田散鐵；然而適當的合金設計，也可能使得塑性變形之後，沃斯田鐵產生雙晶。



Twin 就像一個晶界一樣，可以阻擋差排的移動，所以當變形中差排移動時，會被生成的 Twin 抵擋而使強度上升，因此有良好的加工硬化效果，乍看有點類似動態的晶粒細化，被稱爲 Dynamical Hall-Petch effect，由於拉伸強度的提升，延遲了頸縮的發生，變形能夠均勻地發生，提高了塑性變形的能力，此現象就稱作 TWIP。

TWIP 鋼的機械性質非常地卓越，常被利用在車體耐衝擊和底盤等零組件，但是其合金量較高，在生產的工藝上成本較高，要廣泛地運用和大量生產還需要時間，從科學的角度來看，要準確地量測 Twin 的含量、完整地描述機制都是未解且熱門的題目，因此非常有研究的價值。

Dynamic Hall-Petch



KEY DESIGN!

加入大量的錳、使塑性變形時產生大量雙晶！

鋼鐵與生活

Steel and You

第四章
條鋼

章節概要

條線是一種截面積接近正方形、或圓形的長鋼條。它的產品大多是應用在小型工具零組件。而在 4-1 條線產品的應用 會介紹生活中的條線產品、及條線產品的要求；接著 4-2 條線產品的製程 將介紹各種條線如何製造。

2-3 條線的先端科技 則介紹近年來條線的研究新發展。

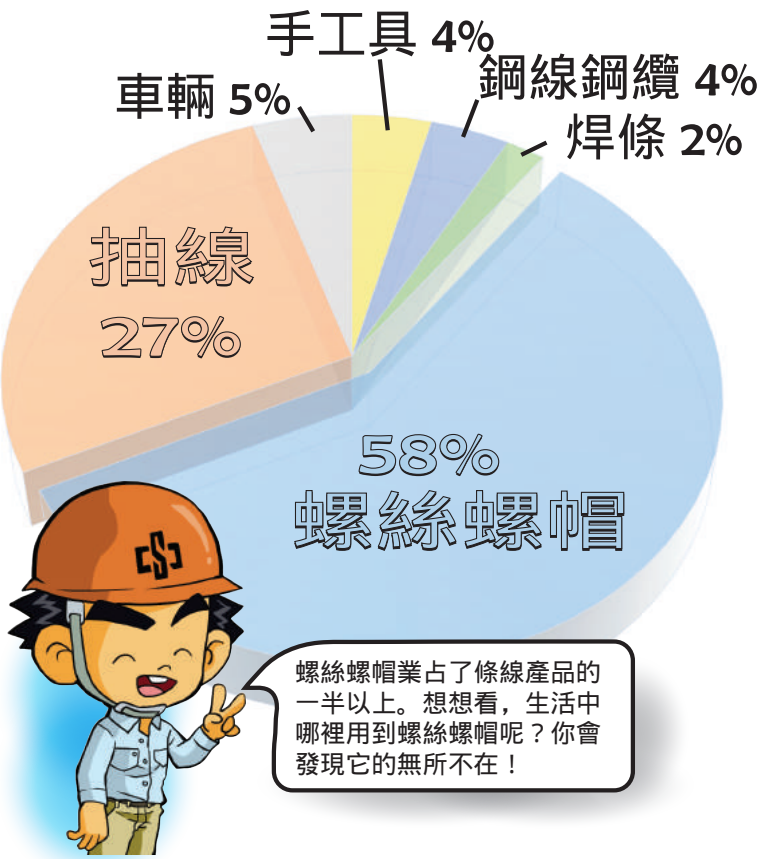
4-1 條線產品的應用

Applications of steel bars

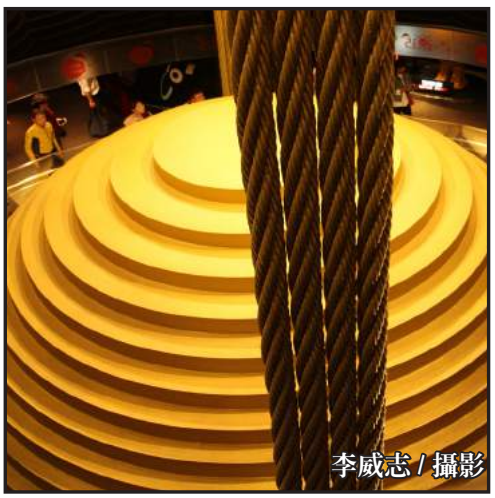
鋼鐵條線產品簡介

線材，指的是單一的、可彎曲的金屬線或金屬棒。通常做成圓柱的長條形狀。鋼鐵線材的產品應用的面向很廣，可能爲**承受機械負荷**如彈簧、鋼纜、預力鋼線、手工具和螺絲螺帽等等；或者是用作**精密機械構造**，如汽車零件、鐘錶和引擎用閥等等；此外，**焊條和焊線**亦爲線材最主要的產品之一。

接著我們對生活中常見的產品，進行一一介紹。



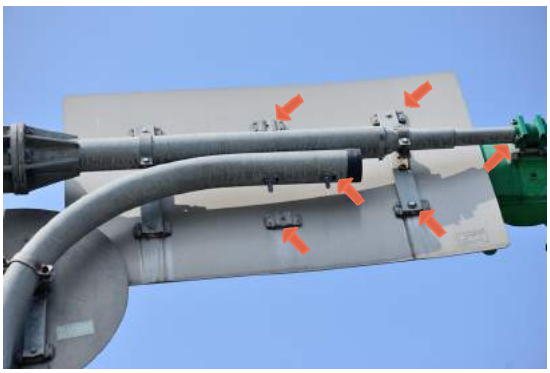
▲ 條鋼的產品用途



▲ 條鋼常用在螺絲與螺絲起子，又稱扣件；還有纜線支撐用途，如 101 大阻尼器的吊線；以及機車用的避震器。

螺絲與螺帽

生活中有很多地方，都必須用到螺絲、螺帽。想想看，也許在你的身旁就有手錶、眼鏡、手機、相機和電腦等等，幾乎不可避免的，一定會有大大小小的螺絲，用來把東西鎖在一起。



動也不動的 - 軸承

不知道你有沒有想過一個簡單的問題：爲什麼腳踏車能夠往前進呢？在騎腳踏車的時候，是人坐在不動的車架上，腳對著腳踏車踏板踩踏；腳踏板藉著鍊條、齒輪，從而帶動後車輪轉動；後車輪與地表產生摩擦力、帶動整台腳踏車往前進。

奇怪的事情出現了，爲什麼正在轉動的腳踏板，與正在轉動的前後輪，能夠跟完全不動的車架，固定在一起而不分開呢？

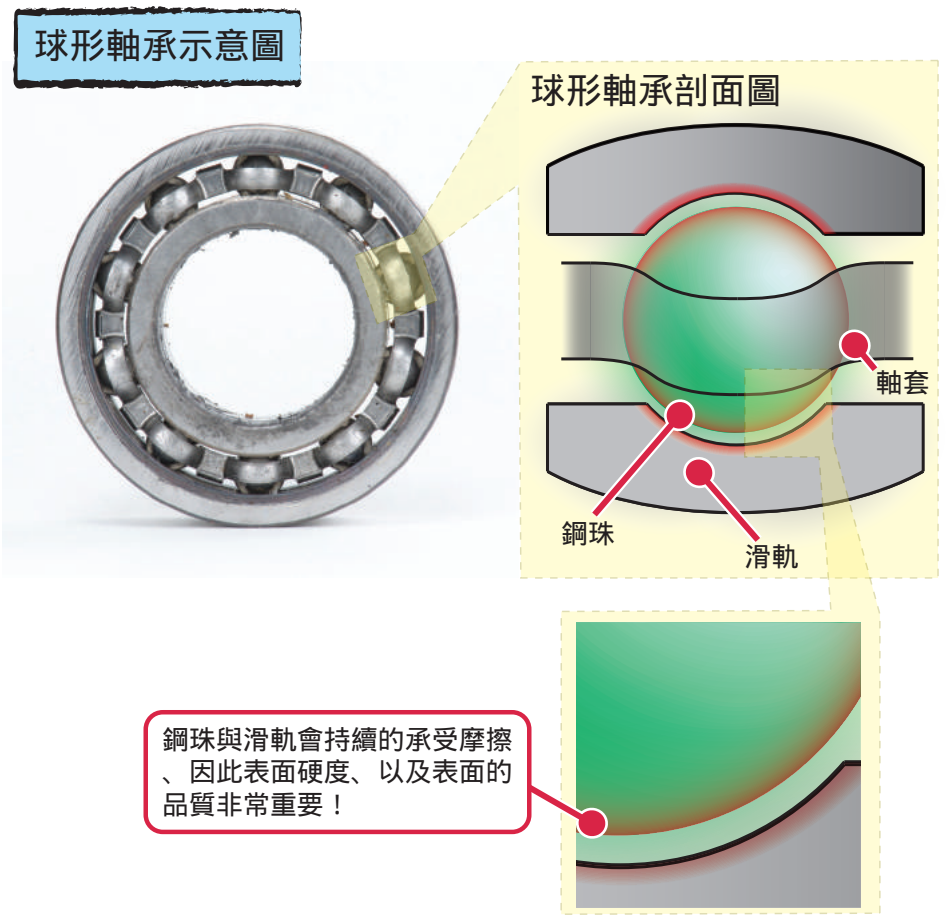
這個問題的答案便是軸承。

▲ 在日常生活的腳踏車中，最主要會有三處球型軸承。一處在腳踏板與車架的連接處、另外兩個則是車輪與車架的連接處；腳踏車的軸承未好好保養、往往會發出摩擦聲、並造成騎乘不順。

軸承 (bearing，也許我們也稱聽過培林、啤令) 指的是機械中的**固定元件**，用來**維持軸的中心位置**，**幫助並控制其他機件在軸上自由轉動或是線性移動**。

最簡單的軸承只需要有承受力量的面，更複雜的軸承則還需要考量**表面的形式、大小、粗糙度以及位置**等。但由於軸承一定會遭遇到摩擦，因此一般要求軸承必須要硬度高、耐磨耗、而且不容易變形、否則軸心一偏掉，便會發出奇怪的摩擦聲響。軸承的種類繁多，以**滾動軸承**、**滑動軸承**最爲普遍。

有了軸承、才有發電機、馬達、車子、電風扇、洗衣機等等。



團結力量大 - 鋼纜

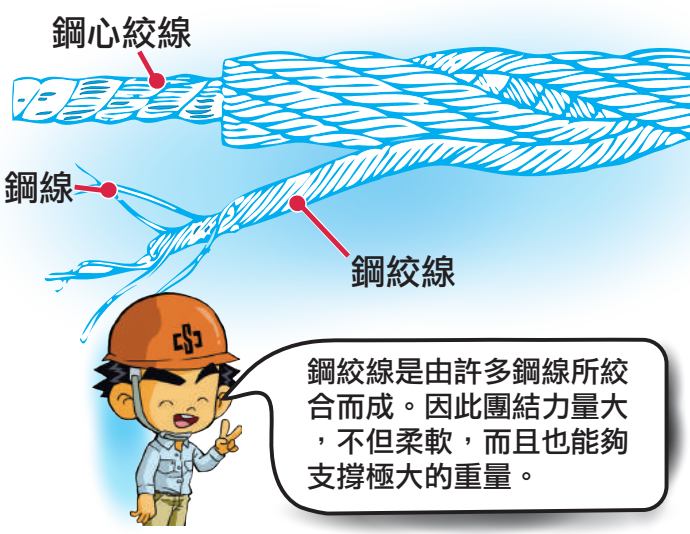
一根筷子折得斷、但是一堆筷子便折不斷了；同理，生活中所利用的鋼纜，大多數都是由多數鋼線絞繞而成。因此，鋼纜的特性與鋼棒或鋼線等單條材料有些區隔。

鋼纜的特性有：

1. 抗拉強度高；
2. 柔軟性佳，可配合滑輪使用；
3. 重量輕、彈性大、耐衝擊。
4. 在高速運轉時慣性小，不產生噪音
5. 可製造很長的長度。

鋼纜的使用範圍非常廣泛，日常生活中常見的例子有：高樓電梯的升降鋼纜、腳踏車的煞車用鋼纜、橋梁吊車用的鋼纜等，纜線在機械上用於起重、牽引、拖曳與傳遞力量。

鋼纜的用途及其選用須互相搭配：在使用頻率高、通過滑輪的次數多之場所，應選用耐疲勞性高的鋼纜；與滑輪或組件等會產生激烈摩耗的地方，則應選用耐摩耗性高的鋼纜；在易生銹的環境使用時，則應選用耐腐蝕性高的鍍鋅鋼纜。



▲ 許多優美的吊橋，例如這座位於美國紐約的布魯克林橋，是利用許多鋼纜、鋼線以支持橋面、車輛的重量。 攝影 / 廖希翎

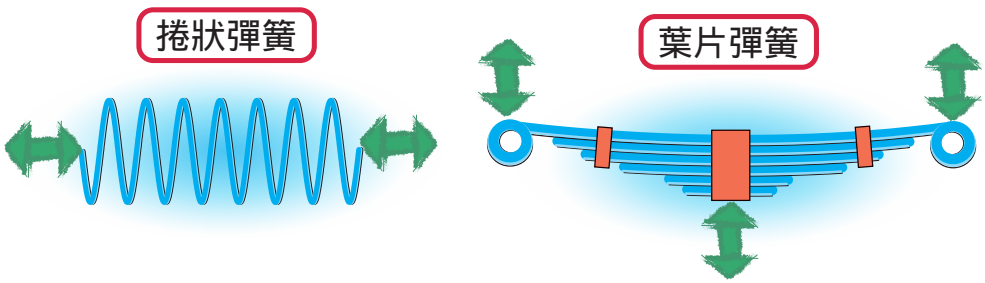
▲ 基隆港中有許多吊車，配有耐用、強壯的鋼纜以調送貨物等等

彈來彈去的彈簧

什麼時候我們會需要用到彈簧呢。一隻按了、筆芯出來；再按一次、筆芯收回去的「按掣原子筆」，將筆整個拆開來後、就可以發現彈簧。這個彈簧就是筆能夠回去的關鍵！

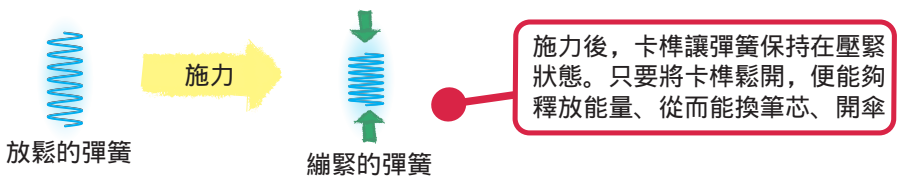
彈簧依形狀主要可以分爲捲狀彈簧（Coil Spring）與貨車、火車專用的葉片彈簧（Leaf Spring）。日常生活中彈簧的用途廣泛，除了前面提到的筆之外，例如：汽車的懸吊系統、機車的避震彈簧、健身用的拉伸彈簧

彈簧的種類

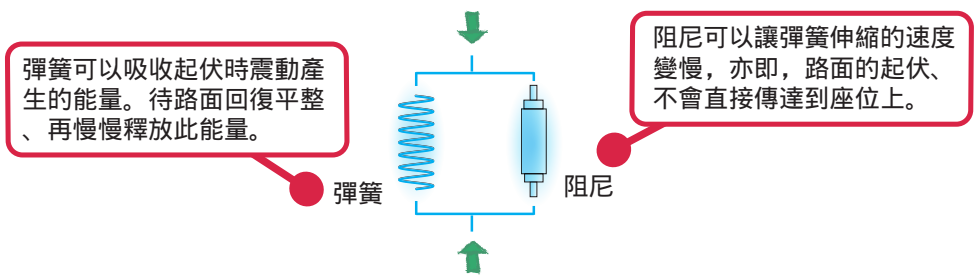


彈簧的作用

① 在自動筆、自動傘等等中，會有彈簧。彈簧的用處是：暫時以彈性位能的方式儲存能量！



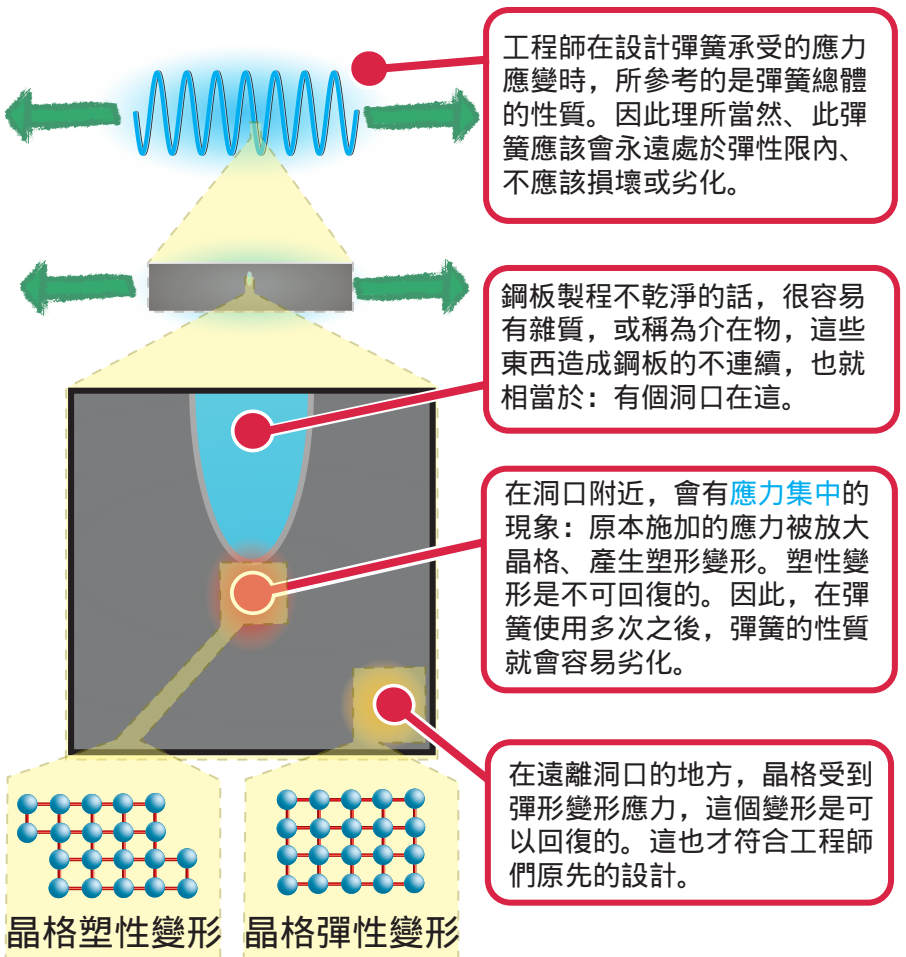
② 車輛懸吊系統當中的避震器，是由彈簧加上阻尼所組成。適當的設計能夠減少路面不平造成的震動。



、汽車雨刷之扭轉彈簧、床墊彈簧等用途比比皆是。

虎克定律只能用於彈簧處於**彈性限**內；同樣的，彈簧要能夠重複使用的關鍵，在於彈簧一直處於**彈性範圍**內。然而彈簧巨觀上雖然使用於彈性範圍、但是由於微結構的關係，可能造成進入塑性變形區。

例如在汽車上加入避震彈簧，可以緩和因爲路面高低所引起之振動。由於此避震彈簧須經過長期、連續持久的震動，因此彈簧之耐疲勞性能、鋼料的表面缺陷、表面脫碳層等要求極爲嚴格。



重大工程的基礎 - 預力鋼線

預力鋼線，又稱爲 PC 鋼線，其正式名稱是高強度異形預力鋼棒 (Deformed Prestressing Steel)。其最主要的應用是與混凝土結合。而整個的製造過程，是將進行了預力處理的高強度鋼線、組成骨架後，再填入混凝土，便完成了預力混凝土的結構。

預力鋼線、混凝土的原理

① 鋼線編織成結構物的骨架後、對鋼線兩端作拉力。

② 灌入混凝土。待混凝土固化後、放掉鋼線拉力

③ 鋼線想收縮回來但受限於混凝土。因此鋼線會殘留拉應力；混凝土則殘留壓應力。

PC 鋼棒主要應用在高強度預應力混凝土基樁的主筋，例如：高架道路、橋樑和擋土牆，預力混凝土電桿，PC 枕木及 PC 高架橋柱橋腳及 PC 路面等，可說 PC 鋼棒在公共建設上扮演相當重要的角色。

▲ 最終完工的高架道路、我們通常只看得到外頭的混凝土，
但事實上裡頭也埋了相當多的鋼線！

▲ 爲了讓蘇花公路更安全的道路擴寬工程、可見到在岩壁埋設的大量鋼線。
◥ 高架橋的柱腳通常都是由大量鋼線做成主體、再填入混凝土。

4-2 條線產品的製程

Processing of steel bars

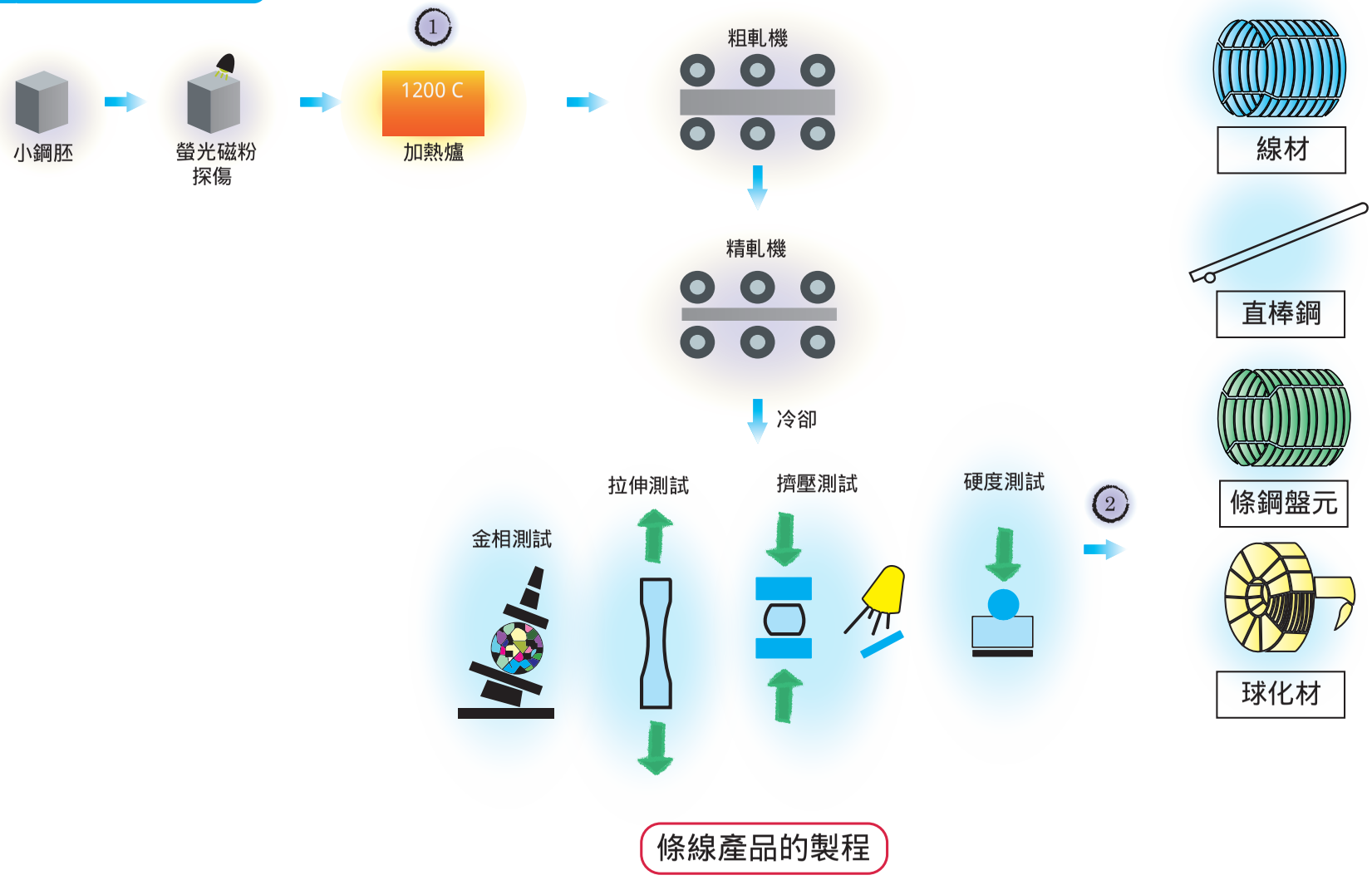
條線產品製造簡介

鐵水自轉爐連鑄而出鋼後，形成小鋼胚。接著，小鋼胚經過數個軋延機、逐漸減少鋼胚大小，此步驟直到達到需求的線材直徑，產品型態有線材、直棒鋼和盤元等。

從轉爐所煉出來的小鋼胚，在經過加熱之後，接著進行一連串、後續條鋼的製程。

完成製程的細細線材，在平台上輸送、連續冷卻之後，接著最後會作盤元以方便運輸出貨。

鋼鐵條鋼製程之示意圖

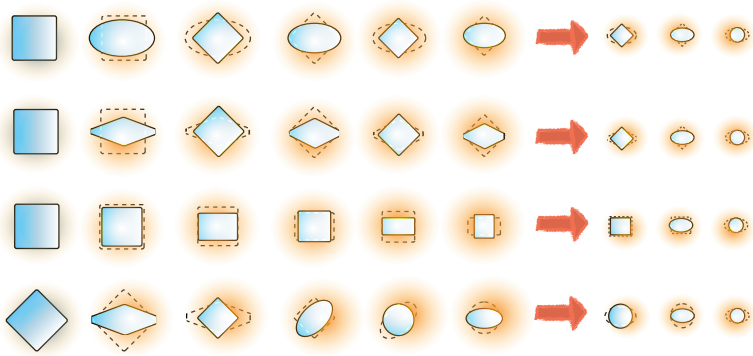


條線產品的製程

接著，下游廠商對這些產品，進行軋延成形等加工、如；抽線、鍛造、切削……等等，至最終產品的尺度、形狀。最後如有需要，再進行最後一道熱處理，以提高其耐磨耗性、強度、延展性等等性質。

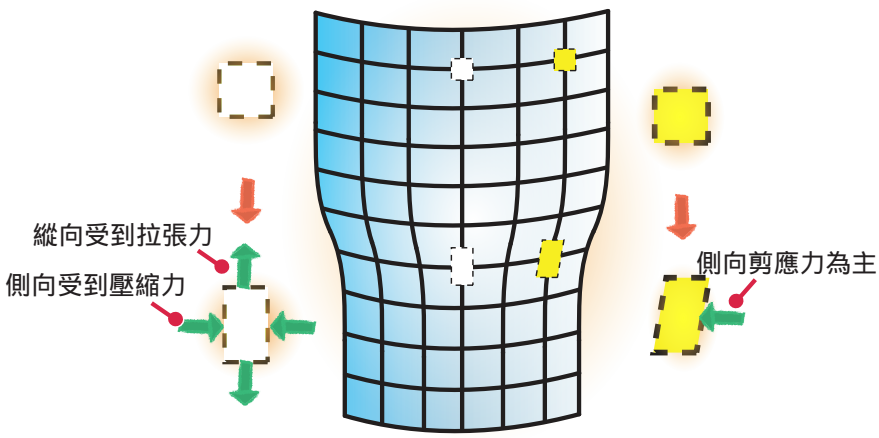
鐵杵「抽」成繡花針 - 抽線製程

我們都曾聽過，只要有耐心，鐵杵都能磨成繡花針的故事；然而現在工業講求效率，繡花針的製造就改成用「抽」的。抽線，是將鋼材通過一個比其截面積小的模穴使其產生塑性變形。模穴的截面形狀可爲圓形、六角形或其他特殊形狀。抽線加工的目的爲：提高尺寸精度、提升強度並改善機械性質、得到熱軋無法達到之截面形狀或尺寸。



▲ 條條大路通羅馬：方形條鋼經多道次模穴後，逐漸縮小截面積而成圓形

抽線加工過程中材料的變形爲：中心部主要受到壓縮與拉張力而變形，而外層材料則受到剪應力而變形。

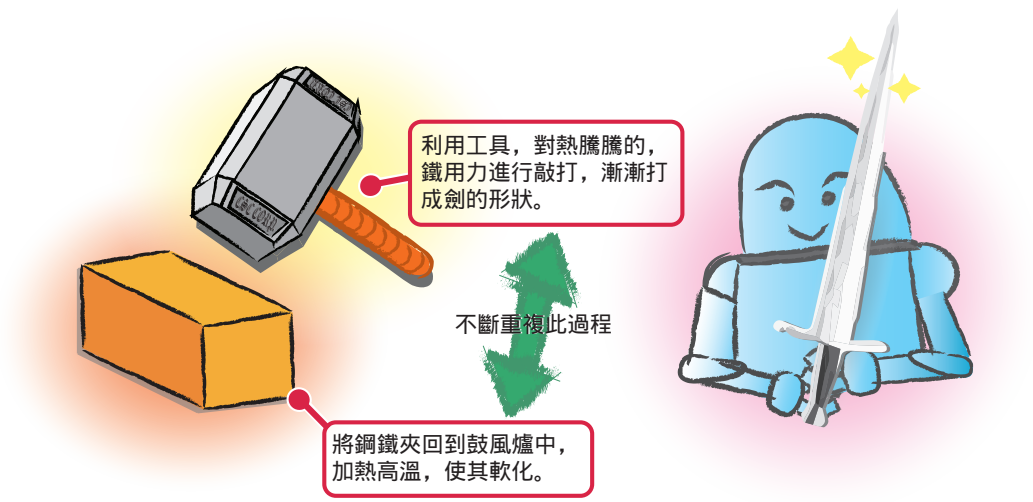


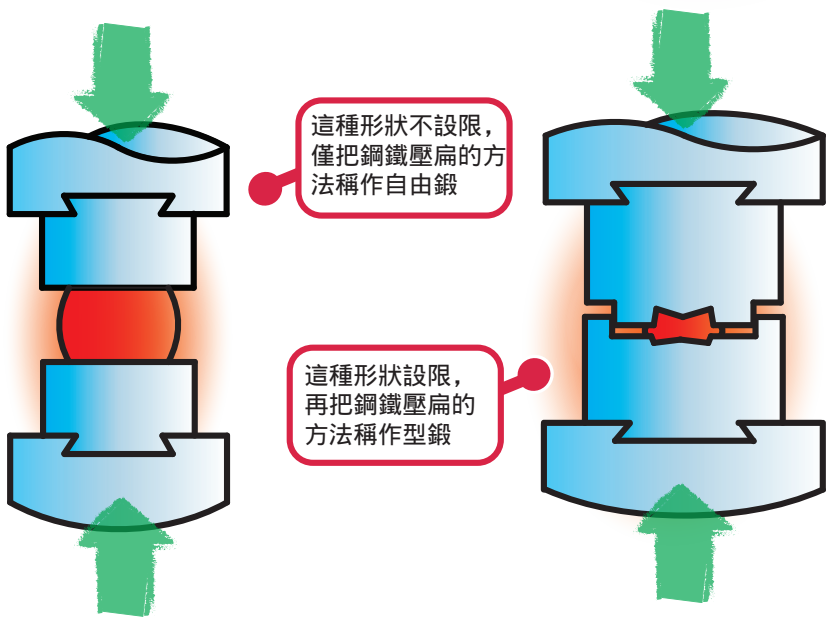
千錘百鍊 - 鍛造

在一些古裝劇中、我們可以看見打鐵師傅，他們往往身體壯如牛、光著上身流著汗，拿著槌子對火紅的鐵敲打啊打。這個打鐵的動作，能夠將鐵打成我們所需要的工具或武器。在現代我們則稱這種**用壓力使鋼鐵產生變形，而形成我們要的形狀，就是所謂的鍛造**。

當然現代的打鐵，或者說鍛造加工，都仰賴大量機器輔助。而鍛造加工後的鋼材組織往往較均勻，不均勻的都被打散了！

鍛造可分爲**熱間鍛造**與**冷間鍛造**。熱間鍛造的工作溫度約爲 1000~1300°C，功能有成型、改善鋼材內部空孔、粗糙組織及偏析等，達到增強韌性的效果。



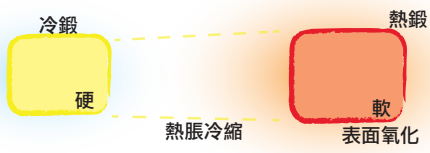


千錘百鍊 - 冷間鍛造

冷間鍛造常用於較小的零件，例如螺絲、螺帽。

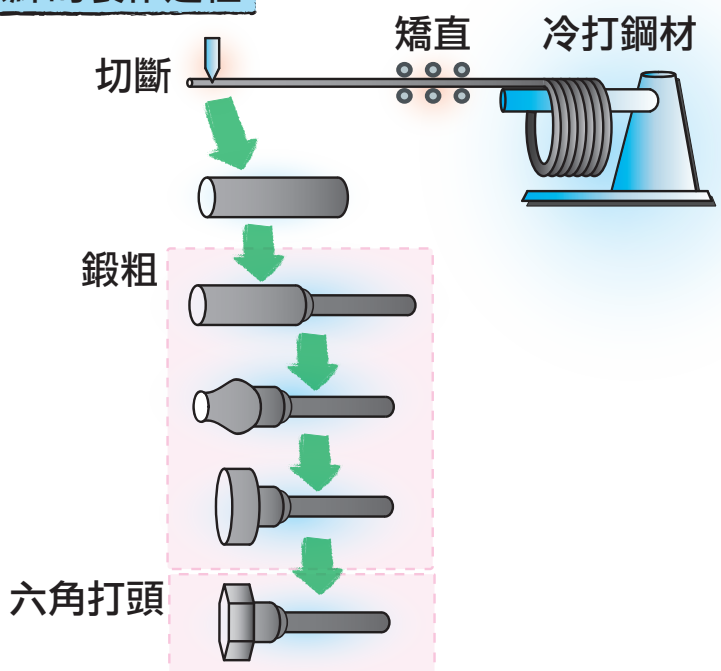
冷間鍛造

缺點：
工具磨耗增加！
材料純度要求高！
高硬度合金須退火處理



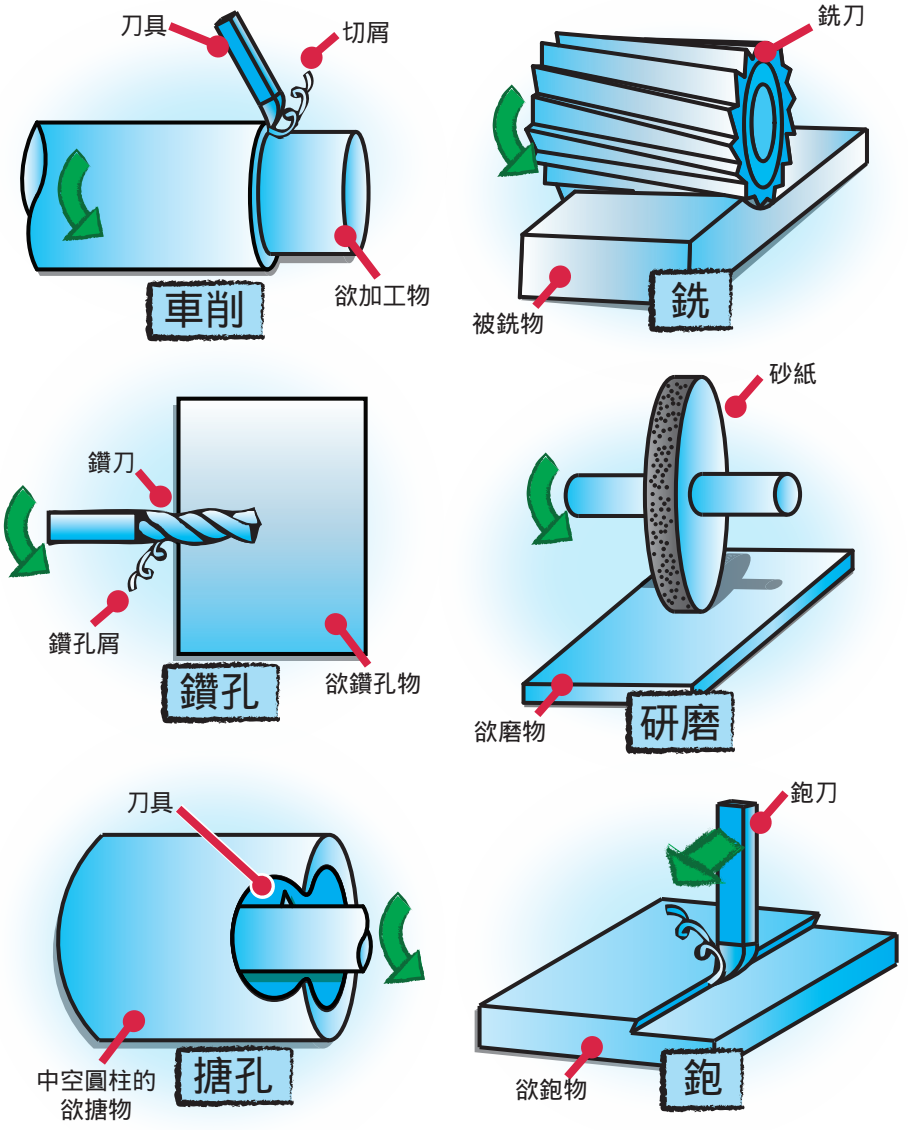
優點：
精度提升！
不需額外加工
表面加工硬化
材料使用率高！

螺絲的製作過程



精密機械加工 (machining process)

機械加工的種類主要可分爲 (1) 車削、(2) 鑽孔、(3) 搪孔、(4) 鉋、(5) 銑、(6) 研磨、(7) 鋸。依照產品形狀決定其加工方式。



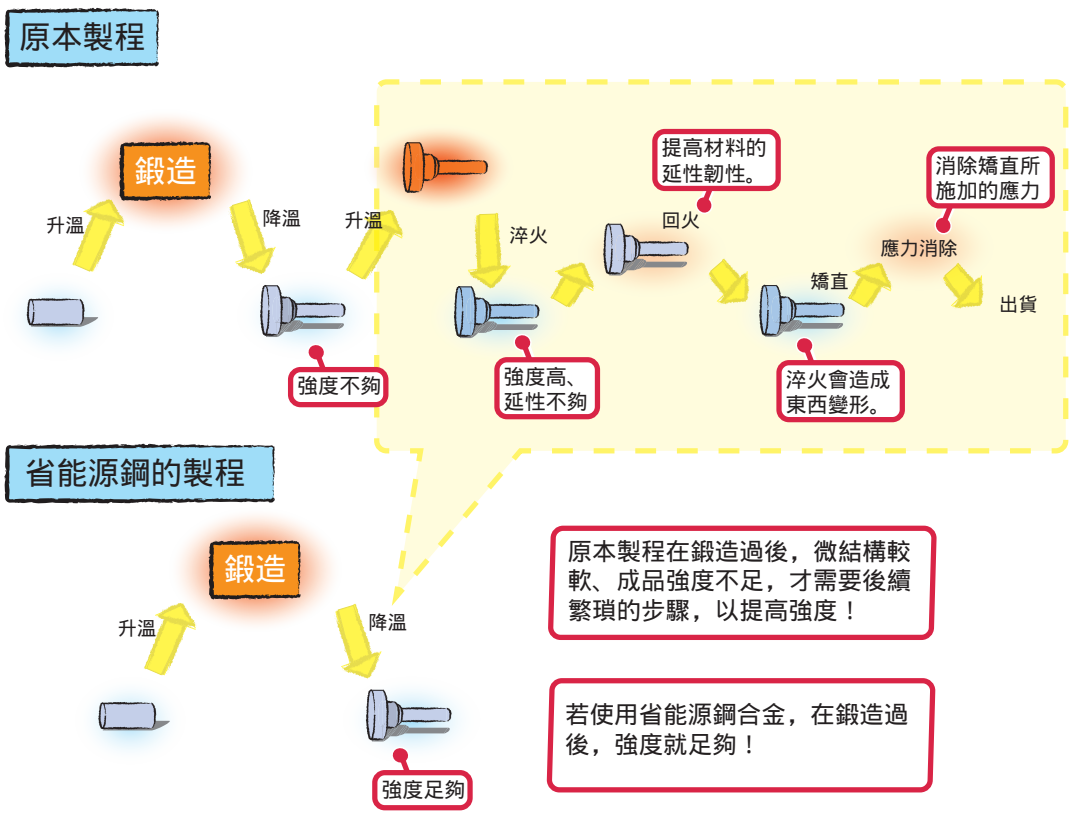
4-3 條線產品新進展

Advanced development of steel bars

省能源鋼

鋼鐵工業的發展需要消耗大量能源，因此開發節省能源的鋼鐵材料是刻不容緩。對條線產品而言，在製好成品之後，還需要再經過額外的熱處理、讓條線回到原本該有的強度。

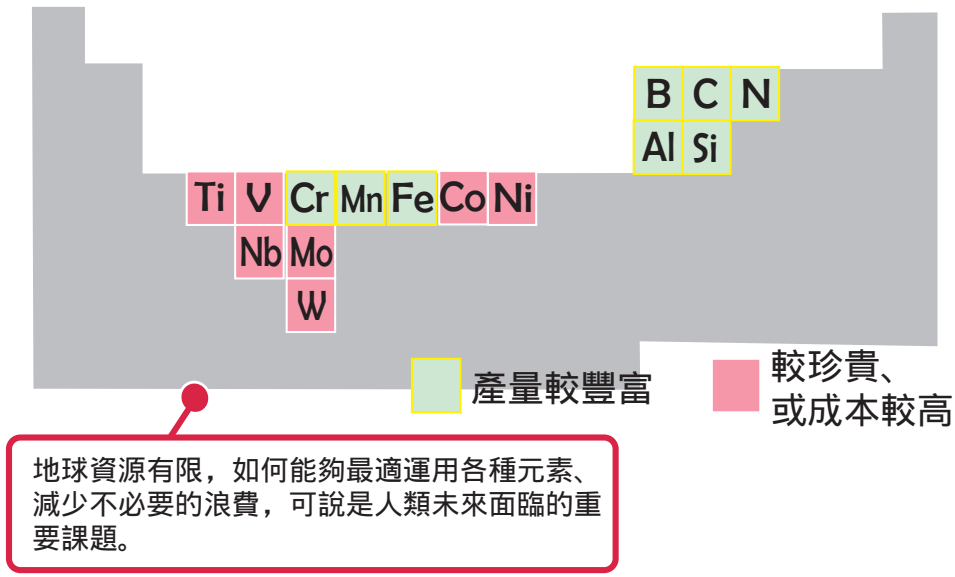
省能源鋼，則是利用添加少許合金元素，如 V, Nb, Ti, Cr 等。這些元素能夠調整相變態的速率。因此只要在熱鍛後控制鋼材的冷卻速率、就能達到強度的要求。因此不需要額外的熱處理、達到節省能源的結果。



省資源鋼

合金元素 Ni, Cr, Mo 等等、跟地球資源一樣，過份開採總會有短缺的時候。因此，減少這些合金的元素使用量、從而能使永久一些、也是冶金學家的一個重要目標。

從前，添加 Cr, Mo 的目的、是爲了調整鋼鐵的**硬化能**。硬化能是一種描述鋼鐵的參數、代表鋼鐵容不容易在熱處理後、形成硬的麻田散鐵組織。美國在二戰期間，由於重要礦場落入德軍手中，因此發展一系列的**硼鋼**。僅添加 10ppm 的硼、就與添加 0.6%Cr、2.5%Ni、1.7%Mn 的效果相同。因此可以取代合金量較高的合金鋼。

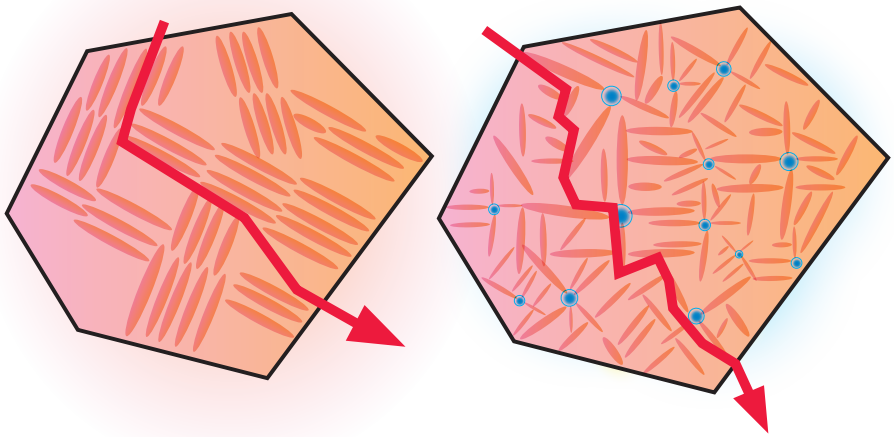


大入熱量焊線

在焊接的時候通常必須添加焊料、這焊料通常就是以條鋼所製成。在厚板的先進發展章節 (p.116) 中，我們提到，目正在開發大入熱量的焊接製程；而焊料的成分，爲了因應製程的變化，因此也必須加以改變。

大入熱量焊線的成分調整邏輯，基本上與大入熱量鋼板相同，都是要添加 Ti 等合金元素，調整組織，使得針狀肥粒鐵產生。有了大入熱量焊線、大入熱量焊接鋼板兩者的搭配、可以避免大入熱量製程，造成晶粒粗化和韌性下降。

裂縫的傳遞



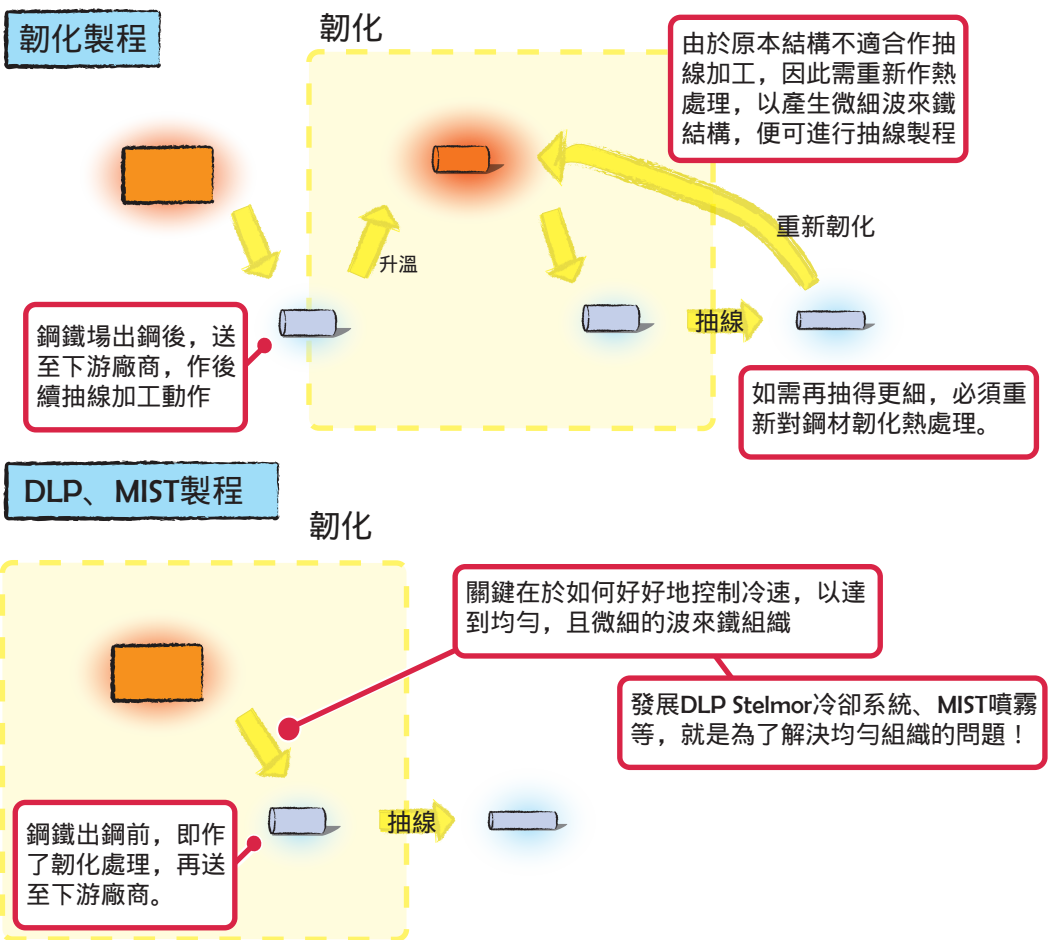
不同的晶粒內部的原子排列可能不同，遇到晶界使裂縫必須轉彎所以微細的晶粒會使裂痕走得不那麼順遂，裂痕比較容易停住，造就比較好的韌性。

“→” 裂縫傳播路徑

線上韌化處理鋼材

DLP(Direct Lead Patening) ，顧名思義即是在鋼材生產時，直接做鉛浴韌化處理。 利用 Stelmor 冷卻系統 (DP) 配合微合金添加技術、與最新發展的 DLP 系統可使高碳線材在熱軋狀態完後的機械性質大幅提升，甚至接近傳統鉛浴韌化處理 (LP) 的效果。

此外，更進階的是利用噴霧 (Mist) 冷卻技術結合 Stelmor 冷卻系統同樣也可以達到採用 DLP 系統的效果，噴霧冷卻鋼材已經證實可以完全達到傳統鉛浴韌化 (LP) 的需求。



鋼鐵與生活

Steel and You

第五章
不鏽鋼

章節概要

不鏽鋼是加了很多鉻的鋼鐵、鉻能夠增加鋼鐵的抗蝕性。在 5-1 鋼鐵防鏽 會簡介鋼鐵防鏽的方法；5-2 不鏽鋼的原理 則介紹不鏽鋼的科學。

5-3 不鏽鋼的種類特性 則介紹各種常見的不鏽鋼、及其結構特性。

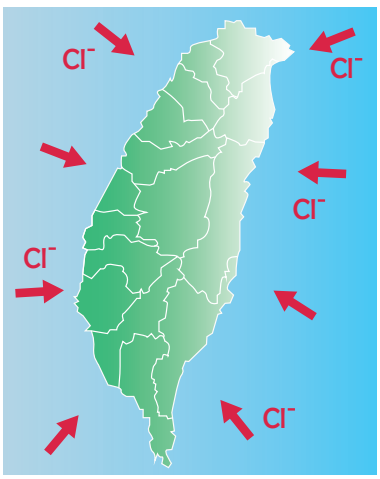
5-1 鋼鐵防鏽

Rust prevetion

鋼鐵防鏽的方法

鋼鐵是用途廣泛且價格便宜的材料，但是它存在一項重大的缺點：容易腐蝕。尤其是在台灣這種海島型氣候的國家，輕微的腐蝕會破壞美觀，嚴重的腐蝕則會造成鋼鐵結構的損壞。許多防銹蝕的技術因而應運而生。

如果是運用在大型工件上，油漆塗裝是首選的方法，在鋼鐵或鋼構的表面上塗上一層油漆來隔絕水氣或是侵蝕物，是最便宜且最方便的防蝕方法；如果是運用在汽車鋼板等要求品質的中型工件，就要使用之前章節提及的電鍍鍍鋅或是熱浸鍍鋅，除了能形成附著良好的隔絕層，鋅的高活性可以代替內部鋼鐵的氧化；以上提及的防銹方式，就像土司塗果醬，表面要塗的均勻、美觀。如果防鏽塗層、鍍層不均勻、或者表面受損傷，內部還是會受到侵蝕，所以本章節要介紹更爲直接的防銹方式，就是直接生產不會生銹的鋼材，以下將介紹不鏽鋼的原理、種類和特性。



下次到海邊附近時，觀察一下會發現：沿海一帶的鐵皮屋會特別容易生鏽。這是因為：海風中會帶有氯離子，而氯離子會促進鐵的氧化反應。

台灣由於四周都是海洋，空氣中氯離子濃度高；此外天氣又長年濕熱；因此對鋼鐵來說，可以說是相當嚴苛的環境！

鋼鐵防鏽方式

塗漆

上漆以隔絕氧氣、水氣。

鍍鋅

鋅氧化膜緻密，因此氧氣難以穿透。

犧牲陽極

活性高金屬先氧化犧牲、因而保護了鋼板

建築或者橋梁等等使用鋼鐵時，常常會利用塗漆、以達到鋼鐵的保護作用。此外建築本身也較美觀！

5-2 不鏽鋼的原理

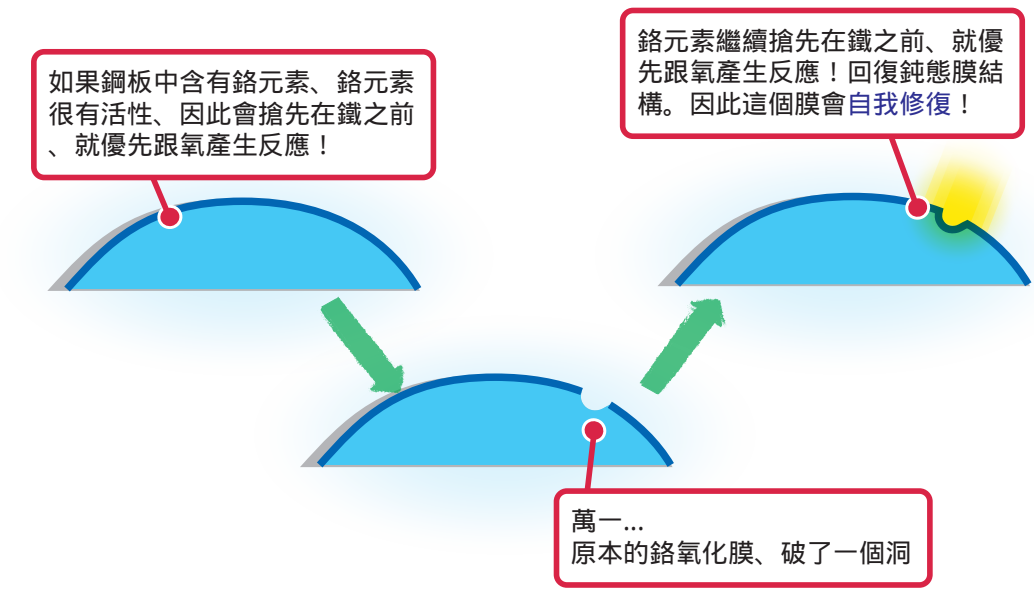
Priciples of stainless steel

不鏽鋼的簡介

不鏽鋼 (Stainless Steel)，俗稱白鐵。不鏽鋼當中的鉻元素，其含量必須大於 11%，因爲在小於 11% 時，鋼鐵的腐蝕速率會隨著鉻含量上升而快速下降，必須到達 11% 才有足夠的防銹水準。

鉻元素的最主要作用，則是因爲鉻會和大氣中的氧氣，會在鋼鐵表面形成 1~5 奈米厚的緻密透明的氧化層，此氧化層就可以用來阻隔內部受到腐蝕，甚至、有防止高溫氧化的效果，由於鋼鐵中就含有鉻，如果表面的氧化層受損，在含氧的環境中鉻和氧會自動修復保護膜，因此比油漆和鍍鋅有更好的防銹效果。

自我修復

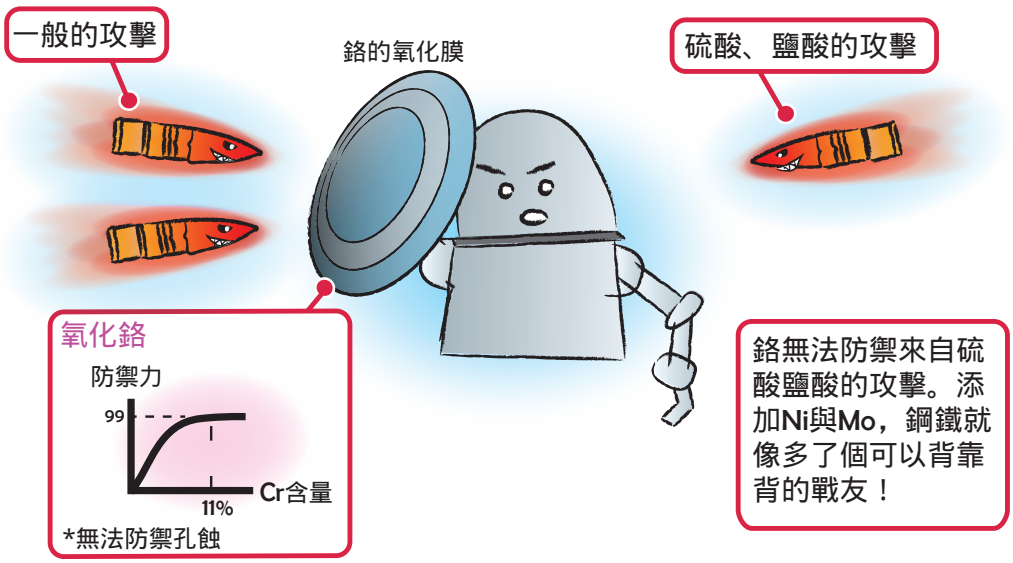


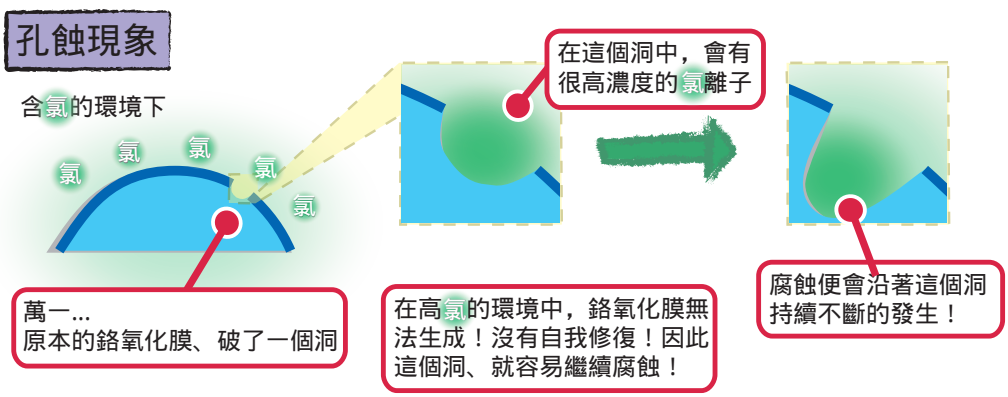
不鏽鋼的生鏽

然而不鏽鋼雖稱作不鏽鋼，實際上它還是會生鏽的。

鉻形成的氧化膜雖然緻密、但是並非無所畏懼的金鐘罩。例如：雖然可以抵擋硝酸的侵蝕、卻非常害怕硫酸和鹽酸的攻擊。此外，不鏽鋼用久了，有時會出現孔蝕的問題。

爲了解決這些問題，不鏽鋼中可能會再多添加一些昂貴的鎳元素、來提升對硫酸的抵抗力，添加鉬也有助於抵抗非氧化酸類的侵蝕。





不鏽鋼的敏化

不鏽鋼最害怕的是過量的碳元素，碳容易和鉻形成碳化物（碳化鉻，$Cr_{23}C_6$），當不鏽鋼元件加熱至攝氏 500~800 度左右，碳化鉻很容易在晶界等的地方成核成長，由於晶界附近的鉻都被抓去形成碳化鉻，所以晶界附近的鉻含量可能會低於 11%，容易造成粒界腐蝕 (inter-granular corrosion)，此現象又稱爲敏化 (sensitization)。

由於銲接的時候、無可避免的，焊道附近必須經過高溫，因此，不鏽鋼的焊接都需要特別注意、否則不鏽鋼很快就會壞掉了。

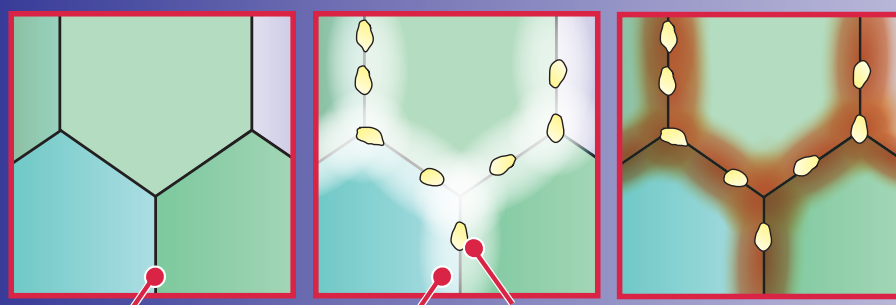
SENSITIZATION

敏化現象：在高溫時，鉻與碳形成碳化鉻造成不鏽鋼的部分區域沒有鉻了！因此，此區域就會特別容易腐蝕！

不鏽鋼在攝氏500到800度時、由於溫度高、擴散較快，產生碳化鉻的速率很快。

晶界能量較高，因此碳化鉻優先在晶界生成。因此臨近晶界的區域，鉻變少了。

在晶界的旁邊的鉻比較少。缺了鉻的保護、因此很容易就氧化了！因此不鏽鋼就容易壞。



不鏽鋼的應用

不鏽鋼被廣泛運用在家庭器具、刀具、建築飾板等民生用途與化學、食品、軍品工業等耐蝕用途上。由於不鏽鋼的防蝕性使其外觀優美，可利用在藝術品或是建築物表面，其氧化層的保護也可以杜絕細菌的孳生，可以運用在製作食品的設備和餐具，除此之外不鏽鋼也跟一般鋼鐵一樣具有 100% 可回收再利用的性質，可謂人人稱道的優質材料。

▲ 賣場中琳瑯滿目的不鏽鋼用品，如鋼具、保溫瓶等

▲ 不鏽鋼餐具

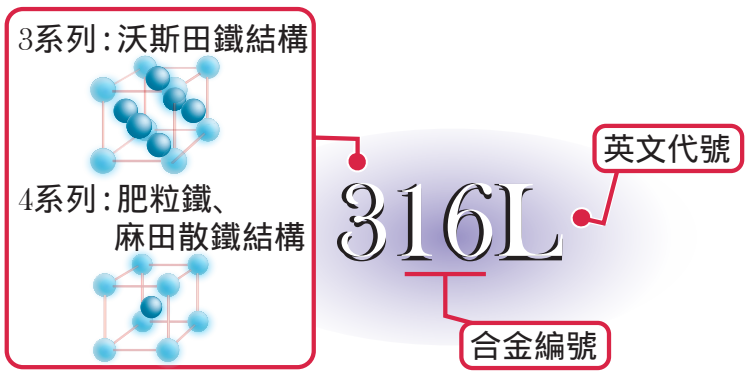
▲ 不鏽鋼的流理臺

5-3 不鏽鋼的種類特性

Priciples of stainless steel

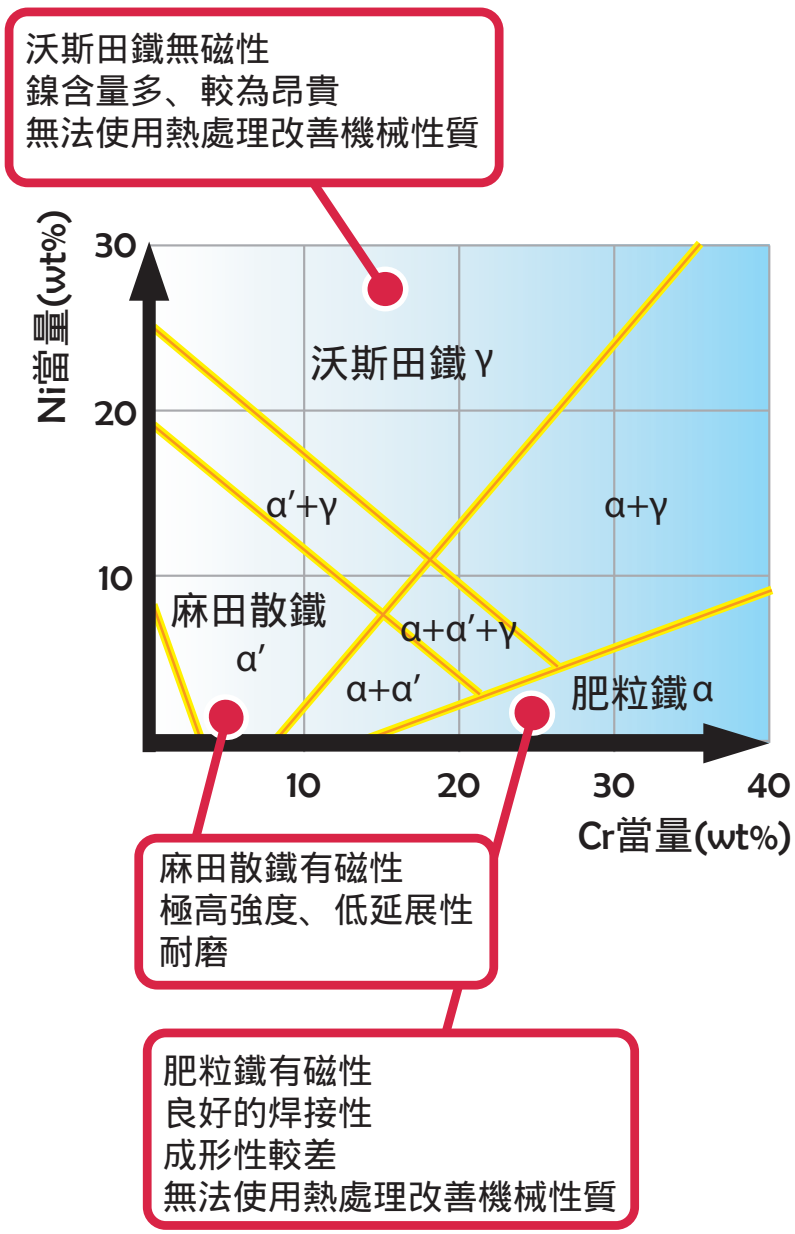
不鏽鋼的種類與特性

不鏽鋼的種類可以說是五花八門，因爲除了元素添加的量不同，微結構對鋼材的影響也非常的大。分別爲肥粒鐵系、沃斯田鐵系不鏽鋼和麻田散鐵系不鏽鋼，這些不鏽鋼依照中國國家標準 (CNS)、日本工業標準 (JIS) 及美國鋼鐵協會 (AISI) 的規定以編號來分類。常聽到的 304、316 不鏽鋼是屬於 3 系列的沃斯田鐵系不鏽鋼，4 系列則含有肥粒鐵和麻田散鐵系的不鏽鋼，而如 304L 編號中的 L 代表低的碳含量，是爲了防止之前提及的粒界腐蝕發生。



編號的秘密 - 附加英文代號表	
L	表示低碳 (Low carbon)，碳含量低於 0.030%。
F	表示具快削性 (Free cutting)。
S	表示性質特優 (Super)。
Se	表示添加硒 (Se)，改善切削性。
N	表示添加氮 (N) 來提高強度。
B	表示在沃斯田鐵系中添加 Si，來提高抗氧化性。
A, B, C	在麻田散鐵系中表示碳含量不同，且依 A, B, C 順序增加。
Jx	表示日本加以改良之鋼種，其中 x 爲數字表示改良鋼種
XM	表示新推出之尚未編碼鋼種。

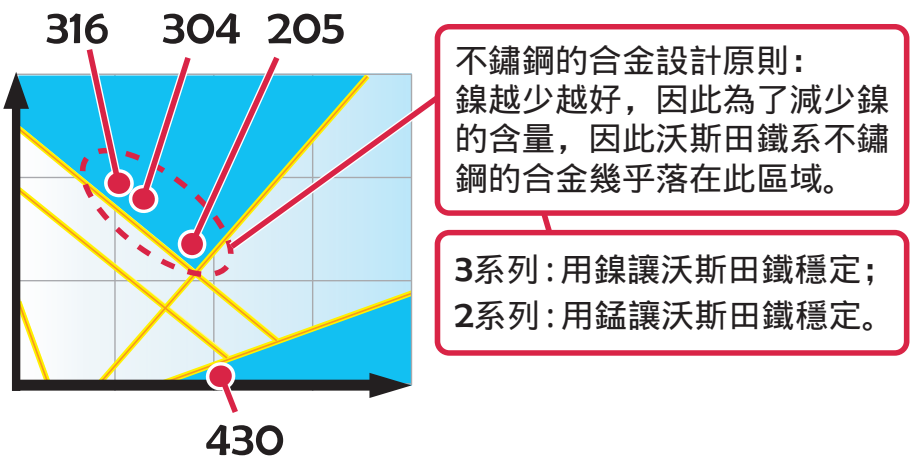
不鏽鋼中最主要的成分是Cr、Ni。
調整這兩個合金成分，能夠讓組織改變、從而得到不同結構的不鏽鋼。而將Cr、Ni成分與組織關係作圖，稱為謝弗勒圖(Schaeffler diagram)



肥粒鐵系、沃斯田鐵系不鏽鋼

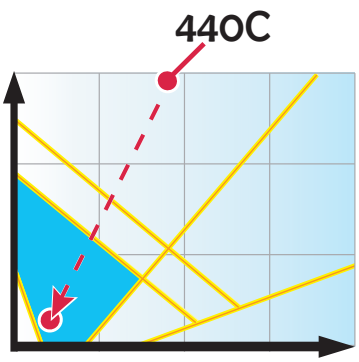
肥粒鐵系的不鏽鋼中最著名的是 430 不鏽鋼，主要添加了 16~18% 的鉻，在高溫的狀況下仍可以保持肥粒鐵的相，所以有良好的銲接和耐蝕性，但其機械性質相較其他種類的不鏽鋼差，也無法進行如淬火回火等熱處理來改善性質，只能使用退火來處理鋼材，由於成形性較差，用途較爲縮限。

沃斯田鐵系的不鏽鋼是最爲知名的不鏽鋼，世界用量最大的 304 不鏽鋼標準成分是添加 18% 的鉻和 8% 的鎳，又稱爲 18-8 不鏽鋼，由於沃斯田鐵的相不含有磁性，所以許多人購買此類的鋼品時會帶磁鐵去判斷眞僞，會如此謹愼的原因是此系列的不鏽鋼添加了昂貴的鎳元素，每噸高達 20000 美元，鎳元素會穩定沃斯田鐵的相，因此擁有優良的韌性和加工性，雖然錳元素也有相同的效果，但是含錳的不鏽鋼運如果用在食品工業上，對人體有危害，因此必須謹愼鑑定鋼材，沃斯田鐵系的不鏽鋼也無法使用熱處理改善性質，但在常溫下使用加工硬化等方式可以增強強度和硬度，所以用途最爲廣泛。



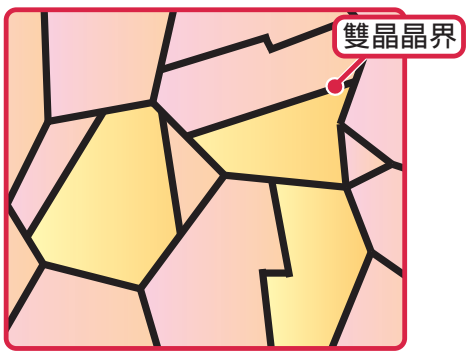
麻田散鐵系不鏽鋼

麻田散鐵系不鏽鋼故名思義是擁有極高強度、但低延展性的不鏽鋼，通常需要高溫淬火的熱處理來達到麻田散鐵相，因此調控碳含量、淬火溫度等參數就非常重要，其特點是非常耐磨，常運用在刀具、外科用具、扳手和渦輪機。

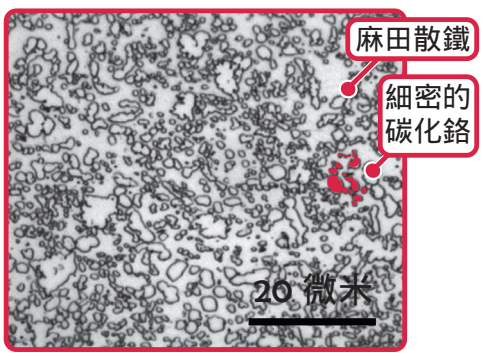


440C添加了許多碳，因此直接由圖中預測，結構為沃斯田鐵。

然而實際上，在高溫時，鉻會和碳形成碳化鉻；經過鍛打後細密的碳化鉻有助提升強度。而由於碳化鉻造成碳減少、鉻減少，因此最終成分會落在麻田散鐵區。



304C的結構示意圖



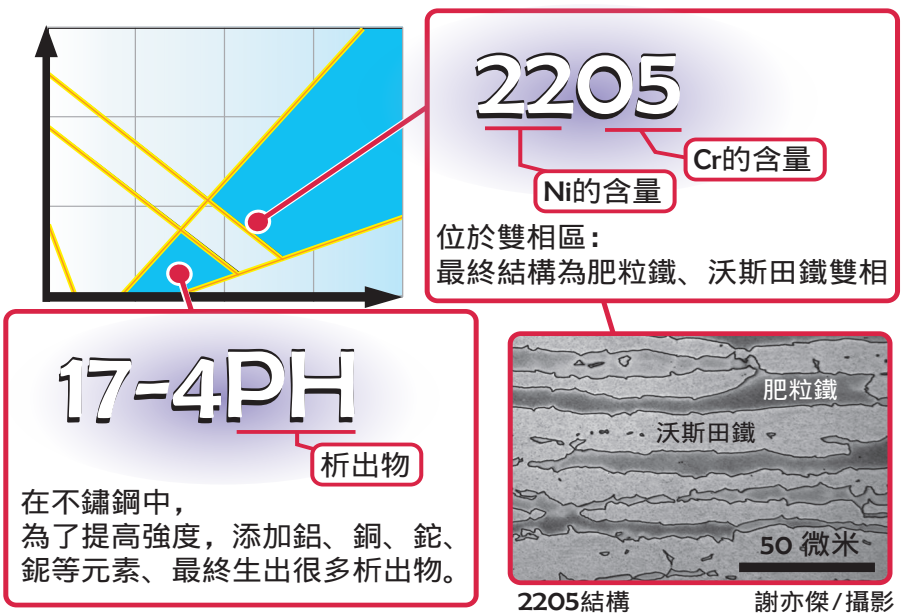
帶給不鏽鋼很高的強度！

440C的結構　　張雅齡/攝影

析出硬化、雙相不鏽鋼

除了以上提及的三種基本不鏽鋼，析出硬化系不鏽鋼和雙相不鏽鋼也開始被大量運用，析出硬化系不鏽鋼是添加了銅或鋁等元素，經由熱處理使析出物散布在基地中，進而提升鋼材的強度，著名的鋼種如 17-4PH 和 17-7PH，PH 代表析出硬化 (Precipitation Hardening)。而 17-4PH 使用 Cu-Ni 析出物、17-7PH 則使用 Ni-Al 析出物來強化鋼材。

雙相不鏽鋼是相當新興的鋼種，目前在歐美地區被大量運用在管件和容器等處，其特點爲同時包含了沃斯田鐵相和肥粒鐵相，各取優點來填補彼此的不足，所以擁有良好的強度、韌性和銲接性，著名的鋼種有 2205 和 2507，前兩個數字代表鉻的含量，後兩個數字代表鎳的含量，雖然雙相不鏽鋼擁有良好的機械性質，但因爲含有兩個相，兩者熱膨脹係數和強度的不匹配、容易造成軋延時熱軋邊裂等問題，仍須製程上的改進來克服。



2205結構　　謝亦傑/攝影

不鏽鋼的展望

近年來鎳價不斷飆高，許多不鏽鋼廠致力於研發”去鎳”不鏽鋼，企圖用其它的合金元素來取代鎳，如 200 高錳不鏽鋼等等，大幅降低了製造成本，也有許多廚具製造商力推加銅和銀的不鏽鋼提高抗菌力，海上建築和航太建築更添加更多的鉻、銅、鉬、鈦來提升耐蝕性、抗潛變與抗高溫氧化，藉由合金控制來延伸用途，跟做菜時添加的調味料一樣，有許多值得玩味的地方。

由以上的介紹可以知道鋼鐵不同的微結構深深地影響了鋼材的表現和性質，元素和相的轉變使不鏽鋼有了各種變化和丰采，因此用途相當廣泛，小到從手錶、手機殼和鐵窗，大到油罐車、蒸氣葉片和橋梁，都可以見到不鏽鋼的蹤影，然而不鏽鋼沒有取代掉鋼鐵的一個最大因素爲成本，不鏽鋼中需要添加許多的合金元素，大幅地提升了鋼材價格，所以例如船隻和建築物結構還是以傳統的碳鋼居多，有趣的是台灣的不鏽鋼用量非常高，除了因爲海島型國家的需求外，台灣衆多的不鏽鋼二次加工廠也是原因之一，經過了以上的介紹，相信您對不鏽鋼有相當的認知，不妨帶著您的磁鐵，試著在生活中找尋不鏽鋼的蹤跡吧！

▲ 不鏽鋼鋼表

▲ 捷運車廂

鋼鐵與生活

Steel and You

第六章
展望

章節概要

本章，我們將在 6-1 鋼鐵的未來 中，介紹鋼鐵未來發展的趨勢。因應未來降低溫室效應、節省能源、環保的需求，我們分別在 6-2 節能科技 、 6-3 環境保育 中介紹科學家如何努力、讓鋼鐵生產不再是傳統、高汙染的產業。

最後，則在 6-4 鋁合金與鈦合金 中，我們介紹、能夠取代鋼鐵的這兩種材料。讓珍貴的地球資源，能夠得到最好、最適當的應用。

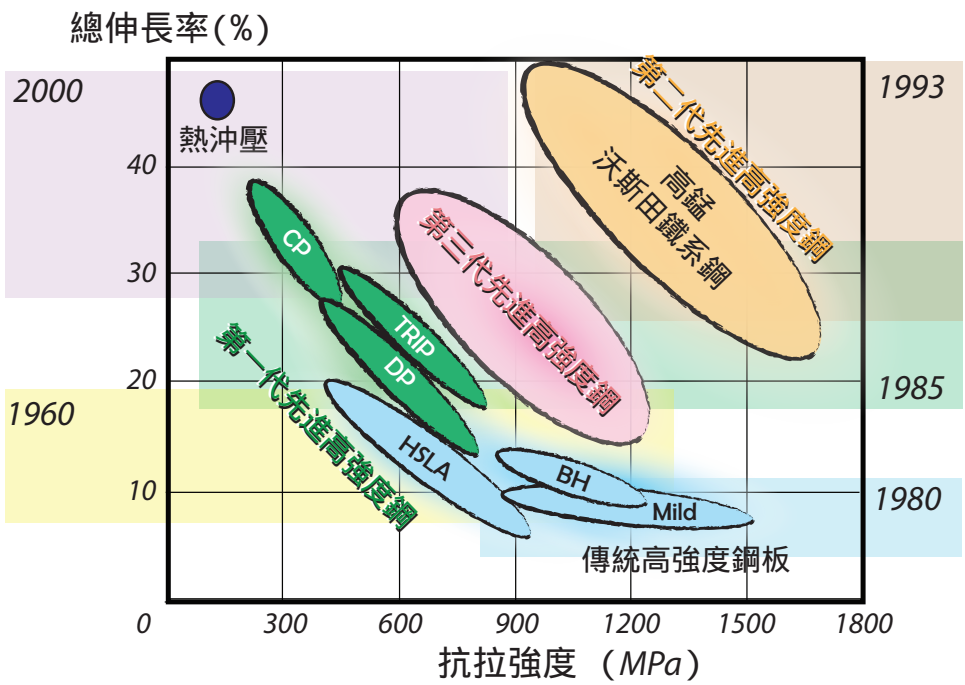
6-1 鋼鐵的未來

Steel - Future development

鋼鐵的研究方向 -Banana Curve

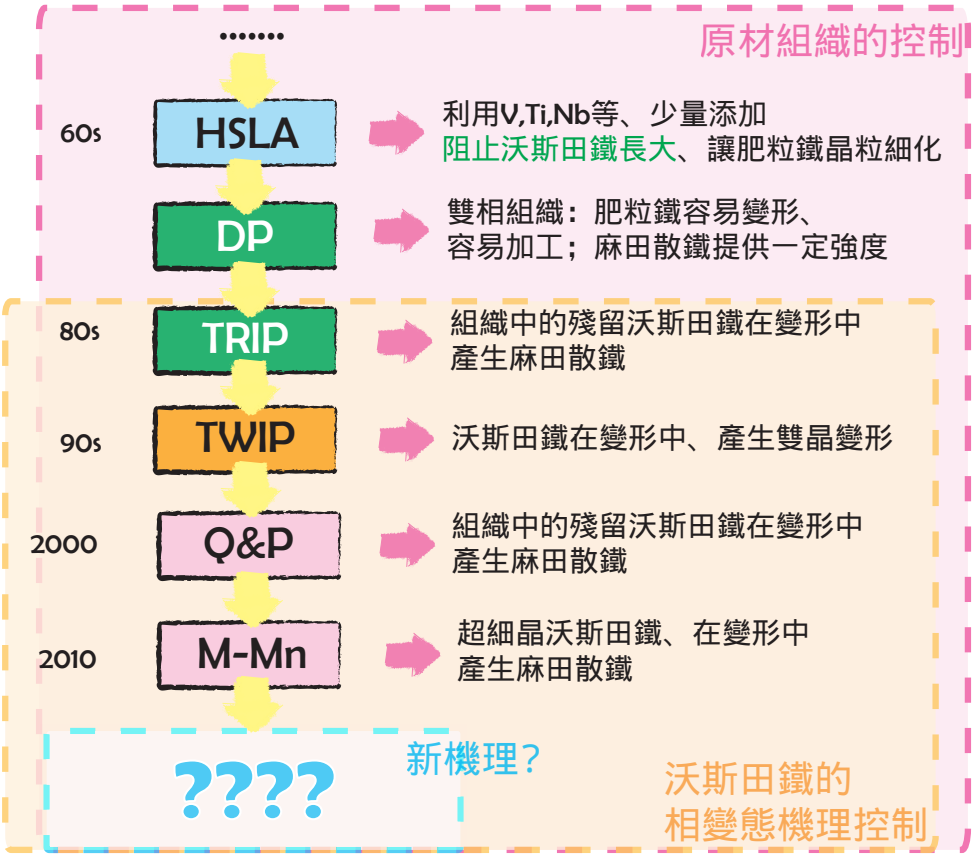
對很多人來說，鋼鐵工業是一樣日暮西山的傳統產業 - 似乎不太像是日新月異的高科技產業。然而在冶金學家的眼裡，鋼鐵科學是一門不斷在進步的學科。

如果我們把 1980 年代以前的、所發展的所有合金機械性質，畫在下圖中、則可以得到所謂的香蕉曲線 (banana curve)。這個香蕉曲線、代表的就是：強度與延性不可兼得。這稱之爲**第一代先進高強度鋼**。(First Advanced High Strength Steel, 1st AHSS)



然而隨著冶金學家，對鋼鐵相變態機理的更加了解：**添加了大量錳的鋼鐵合金**，成爲 TWIP 鋼 (見 P.148) 後、不但提高了強度、也提高了延展性。此一重大突破、讓 banana 曲線往右上方移動，稱之爲**第二代**先進高強度鋼 (2nd AHSS)。

而由於添加大量錳的鋼鐵合金、成本會比較高，讓冶金學家轉而發展在 1st AHSS、2nd AHSS 的 banana 曲線中間，代表成本適中、卻有優異機械性質的**第三代**先進高強度鋼 (3rd AHSS)。代表性的如中錳鋼 (5-7Mn)、Q&P 製程 (見 P.146)、TRIP 製程 (見 P.144)。

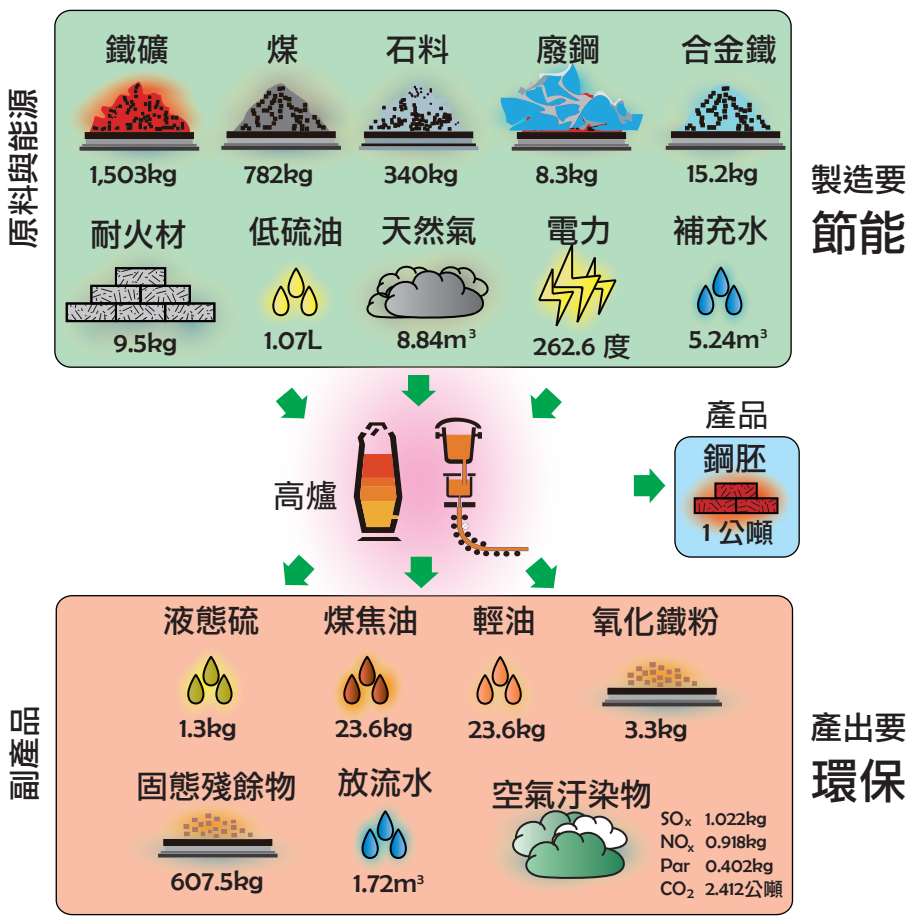


6-2 節能科技

Energy Saving Technology

鋼胚的原料、能源與產出

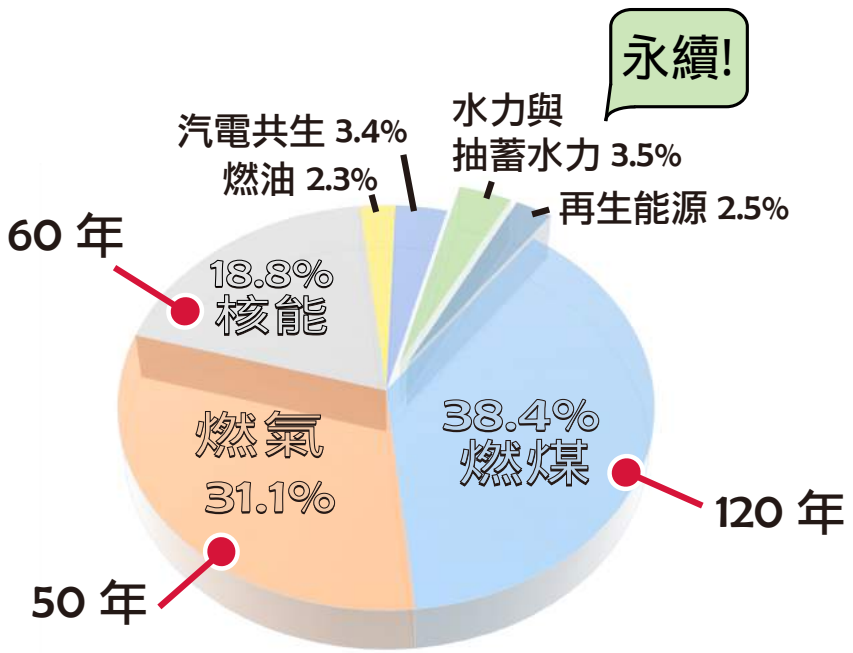
實際鋼鐵在生產時，會消耗很多原料；熱騰騰高爐中的高溫，最主要是由**原料發生化學反應**所放熱產生；而後續軋延的動作，則必須使用大量電能以使機器運作。而鋼鐵產出之後，亦會生成許多副產品。下圖是中鋼公司，生產每噸鋼胚中，所投入的原料與能源、以及其產出的關係。



能量的永續經營

在鋼鐵生產的過程中需要耗費相當多的能源，不管是運輸原料、原料處理、高爐煉鐵、熱軋和冷軋等製程皆須要花費眾多的能量。除了本身氧化還原反應放出的熱量外，其他能量，可能來自火力發電或核能發電等處，然而這些能量終有用完的一天。根據國際能源署估計，目前全球的石油儲存量只剩下 40 年，天然瓦斯只剩下 50 年，鈾礦只剩下 60 年，而煤礦也只剩下 120 年。

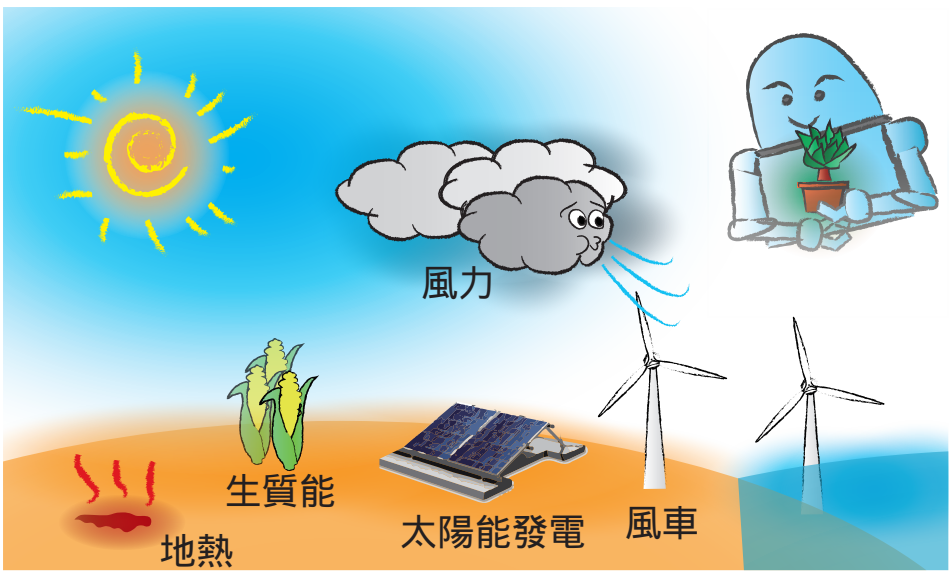
如果能夠節約能源，不僅**可以延長珍貴礦產資源使用之期限，也可降低鋼鐵生產的成本**，可說是一石二鳥，以下將介紹幾項有用的節能科技，期望能夠達成產業的永續經營和發展。



節能科技 - 可再生能源 (renewable energy) 發電

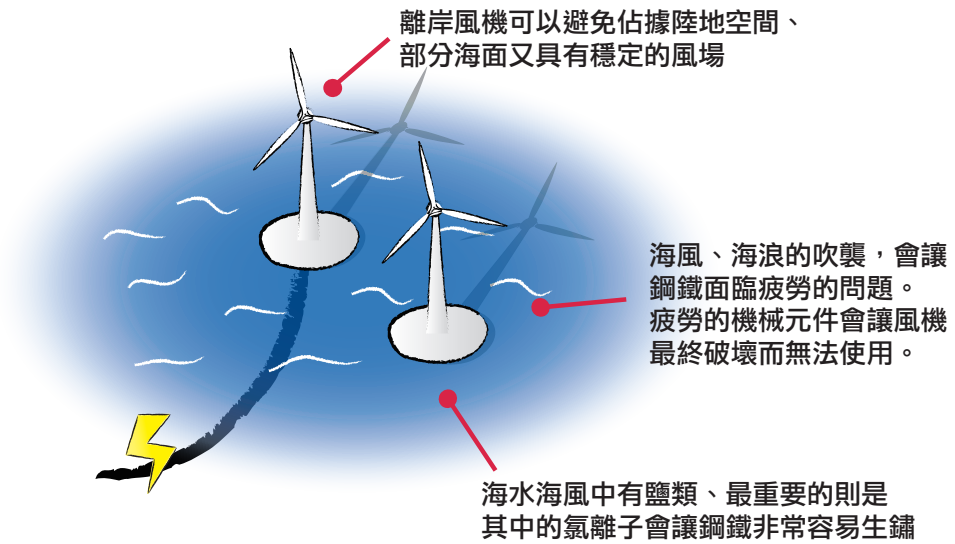
第一種解決方式，是尋找新的能量來源。就是除了火力或核能發電等傳統發電方式的新技術，其中包括風能、海洋能、水力能、地熱能、太陽能和生質能。

前三者是利用地球上擁有動能的介質去推動發電機，藉由氣壓和潮汐等自然現象驅動空氣和水，使新生的能量源源不絕（地熱能也有相似的原理，不過驅動的自然現象爲地殼中蘊藏的地熱，利用地熱加熱地下水，地下水受熱蒸發後成爲水蒸氣，這些水蒸氣再推動渦輪發電機來生電；太陽能則和前面所提的發電方式有些差異，太陽能可被太陽能電池吸收，直接轉化成電能使用，此方法相當便利且沒有汙染產生，只要有太陽升起的地方，就能夠發電，可謂用之不竭的能量來源；最後一項生質能則是利用生物特性轉換能源，如玉米等植物可以吸收太陽能，轉化成儲存在植物中的化學能，此即爲現成的燃料。



可再生能源的缺點

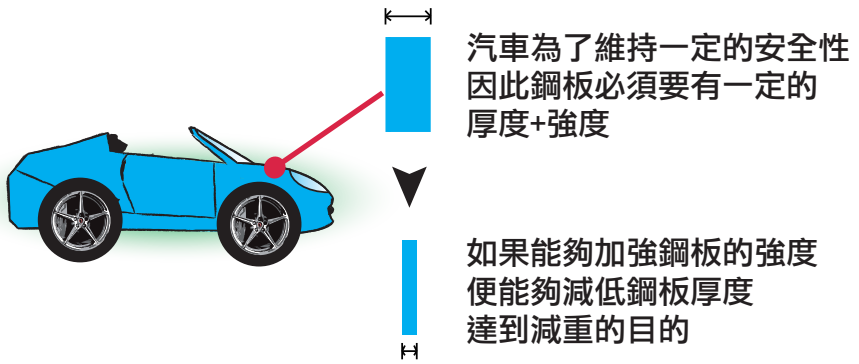
雖然上述產能方法有許多的優點，但也有相當多的限制使其無法廣泛利用。陸上風力發電機需要廣大的腹地，並且產生低頻的噪音，如果將其設置在海上，又必須擔心海水侵蝕的問題；海洋能和水力能則依賴沿海都市或有較大高低差地形的區域；地熱生電則需要設置在有地熱或火山地區的周圍；太陽能電池的問題出在生產成本太高和生電效率太低，這些限制使得新發電技術無法大量複製生產，因此現今仍有許多科學家和工程師致力於改善這些問題，期望能突破面臨的窘境，其中也不乏許多技術和設備依賴**高強度**或**防鏽**的鋼材，這也有賴於鋼鐵研究或業者的幫助和輔助。

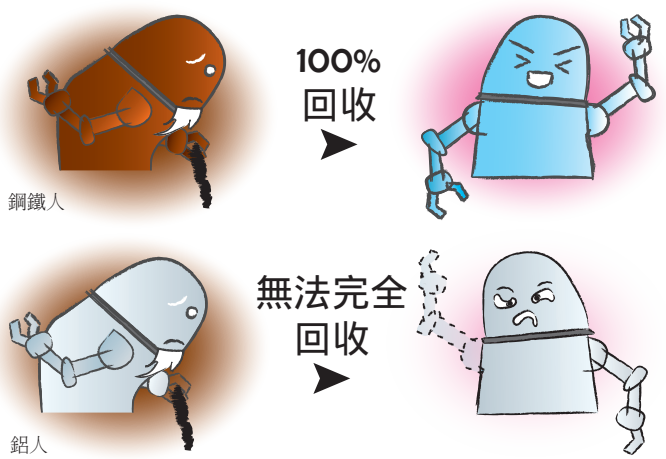


節能科技 - 節能產品

第二項是產品導向的間接節能，對於鋼鐵廠來說，生產高強度鋼種是其中一種手段，鋼材強度越高，工業產品所需的量越少，鋼廠所需求的能量也越低，此手段在先前的章節已經提過，是世界各大鋼廠正在努力的目標，高強度汽車用鋼在汽車使用階段可達到減少油耗，並且降低車體鋼料使用量，目前有鋼鐵廠已開發出強度比傳統軟鋼高 3.5 倍以上的鋼種，並且具備優良的衝壓成形性與點銲性，目前成功應用於輕量車體。

除此之外鋼鐵是可 100% 回收再生使用的環保材料，也是當今回收再生比例最高的材料，可以說從車體材料製造、汽機車使用、乃至廢棄回收等各階段，鋼鐵都是最節能減碳、最環保的汽車材料。





第二種節能產品，思維則是：使用壽命較長的鋼材。如此一來，除了減少汰換鋼材所需的開銷，亦可以大幅節省重新冶煉的能量，例如耐候鋼搭配防銹材料，可讓鋼材使用壽命大幅增長；第三種是生產高效率的電磁鋼片，高效率的電磁鋼片運用在變壓器中，可以節省耗費掉的電能，不僅省下不必要的能量，也減少了變壓器的體積。

目前，台灣一年總用電量有 2200 多億度，其中馬達就耗用了 50%，因此馬達效率每提升 1%，台灣一年的用電量即可節省 10 億度，減少 CO_2 排放 63 萬噸。

▲ 台北的關渡大橋。大型鋼結構體，若使用耐候鋼以及油漆塗佈保護， 則其壽命可以大大增加。

節能科技 - 製程節能

試想如果利用煮菜時散出的熱氣再燒一鍋菜，是否就能減少許多浪費呢？

第三項是製程導向的直接節能，包括廢能的回收和製程效能的提升，是最容易執行也最普遍運用的節能手段，而且有許多成熟的技術被運用在各種製程中。

在燒結原料的過程和高爐煉鐵中有許多的廢熱排出，此時回收產生的廢熱氣和熱能，利用鍋爐或是熱電材料的手段重新產能。而對使用電爐的業者，也有其對應的節能手段。

▲ 中鋼廢熱鍋爐

▲ 熱電發熱系統

▼ 高爐煉鋼之節能表

高爐頂壓發電	24 度電力 / 噸
高爐熱風爐廢熱回收	熱風爐燃料節省 8%
燒結冷卻廢熱回收	燃料節省 12% 產製 13 度電力 / 噸
煉焦爐焦炭乾式淬火發電	產製 140 度電力 / 噸
提升高爐粉煤噴吹率	節省煉焦能源 15%
提升高爐球團礦使用率	節省燒結能源 12%

▼ 電爐煉鋼之節能表

轉爐氣顯熱回收	產製 76 公斤蒸氣 / 噸
廢鋼預熱	節省 40 度電力 / 噸
吹氣噴油助燒技術	節省 20% 耗電
操作自動化技術	節省電力 65 度 / 噸
頂底同吹技術	節省電力 10~30 度 / 噸， 電極棒耗用減少 ~60%
直流式電弧爐	節省 20% 耗電

軋鋼業者也有各種節能技術，其中值得注意的是在製造過程中，希望保持鋼材的溫度，因爲加熱鋼材需要耗費相當大的能量，所以在生產過程中會避免在各個製程段中重新加熱。

除此之外照明設備和空調設備的用電節能也非常的重要，像是採用高效率環保省電燈具和使用自然採光設計的廠房（熱浸鍍鋅鋼廠），朝南北向的建築物也較東西向的建築物節省了 29% 的冷氣用電，在這些製程以外的小地方著手也能替鋼鐵業者省下大筆的開銷。

能量會以許多不同的形式存在，如同黏土可以捏成不同的形狀，但是我們能夠利用的樣貌相當侷限，因此如何轉換這些形貌以及如何節省使用它們都藏有許多的學問，以上提及的方式也只是衆多方法的冰山一角，當這項需求的驅動力越大，也將有更多的節能科技出現，而像是隨手關燈這類的小舉動，也能成爲不可小覷的節能技術。

▼ 軋鋼之節能表

爐溫電腦化操作	節省燃料 8~12%
廢熱回收	節省燃料 20~35%
鋼胚熱進爐	降低能耗 30% 以上
蓄熱式燃燒技術	降低能耗 10%~30%
熱間直接軋延	節省燃料油約 30 公斤 / 噸

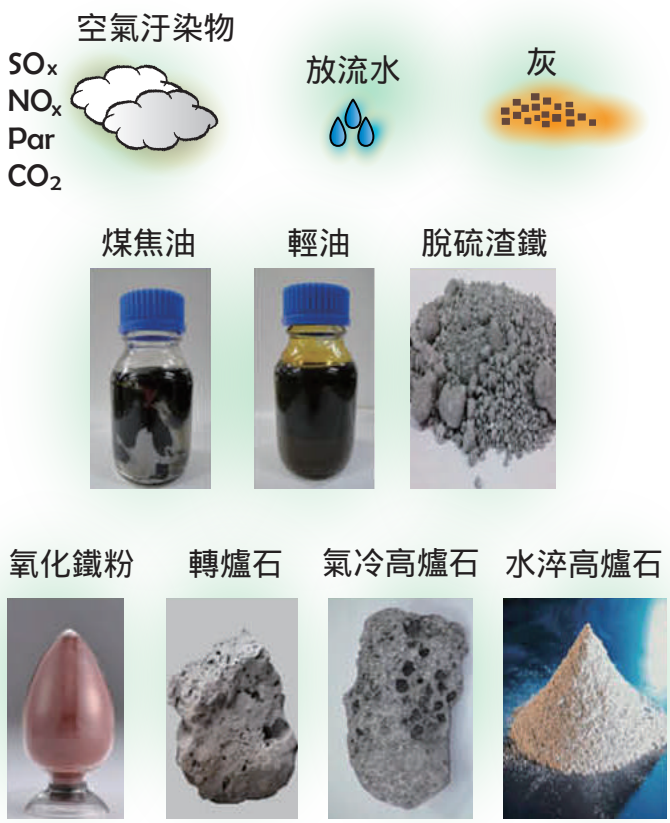
▲ 熱浸鍍鋅工廠

6-3 環境的保育

Enviromental Protection

鋼鐵生產的副產品

要達到環保、降低汙染的目標，就是讓製造時產生的副產物能夠減少；能夠妥善處理；或者能夠，副產物成爲副產品、讓鋼鐵生產更具經濟效益。

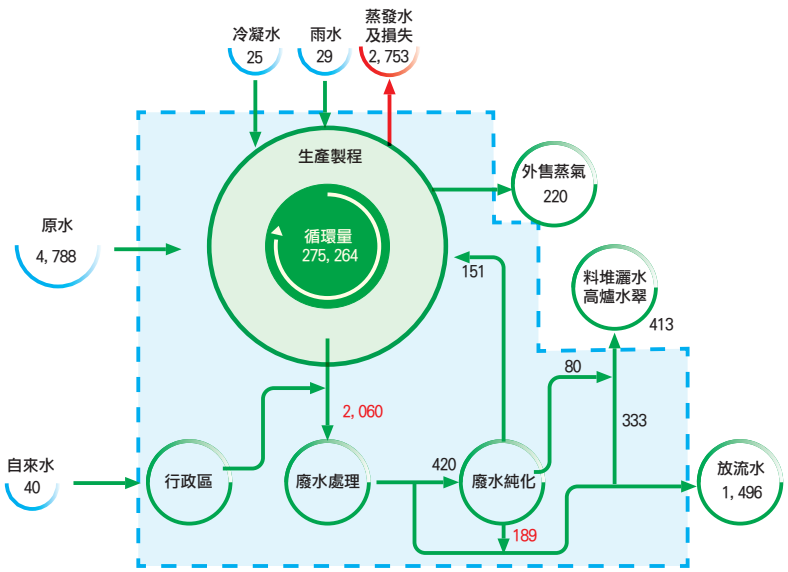


▲ 各種鋼鐵生產時所產生的副產物

水資源

在鋼鐵的生產過程當中，需要大量的水進行鋼鐵的除鏽、冷卻、潤滑、除塵等等用途。例如，中鋼公司每年用水量爲 5000 萬噸，大約是 1/5 的石門水庫總儲水量。因此，水資源的節省使用、以及廢水處理便是非常重要課題。爲了節省用水，通常經過使用的廢水，重新經過軟化、濾水、逆滲透等等處理後，就繼續使用。

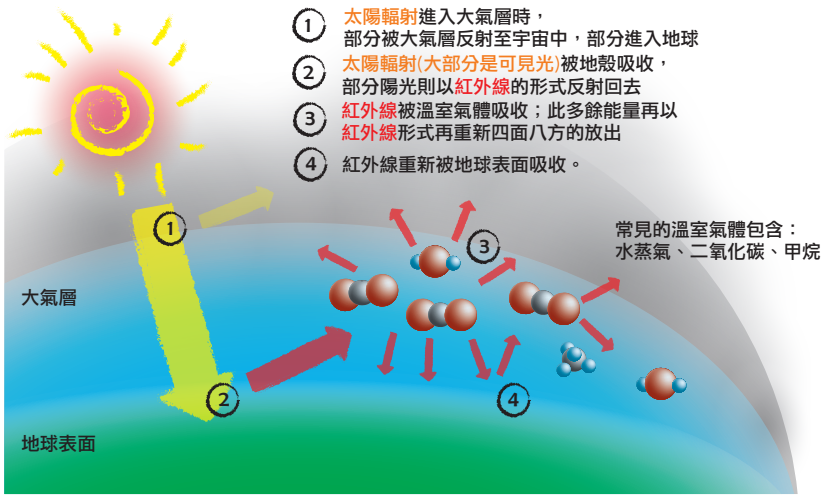
▲ 中鋼公司的廢水處理裝置



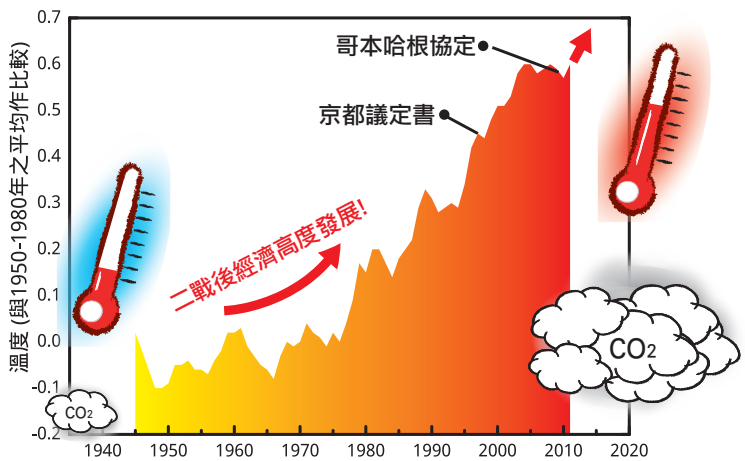
▲ 中鋼公司的水循環圖

二氧化碳與溫室效應 (Green House Effect)

近幾年來，溫室效應已成爲重要的國際議題，由於二氧化碳等溫室氣體的大量排放，使地球的普遍溫度升高。爲了減緩此現象的發生，許多國際合約如京都議定書、哥本哈根協議等皆被認同且簽署，因此減少碳排放已經成爲許多產業及國家的執行方針。



▲ 溫室氣體的作用過程

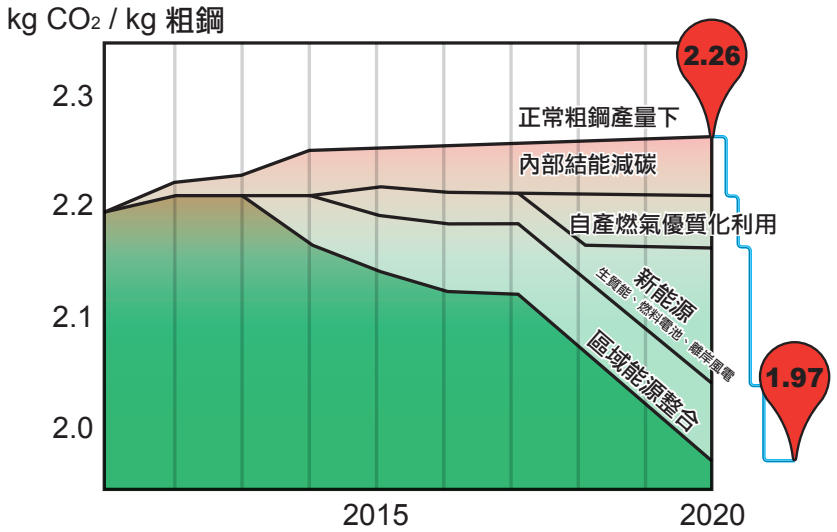


▲ 科學家發現人類活動產生的 CO_2 等氣體的濃度上升，恰與溫度的上升趨勢符合。事實上，大氣層當中，二氧化碳的濃度，目前是千萬年間的最高點。

鋼廠面對的挑戰

鋼廠由於利用焦炭在高爐進行鋼鐵的氧化還原反應，此製程排放的二氧化碳相當多。然而此製程技術成熟、最具經濟效益，因此爲不可取代的鋼鐵製程。故如何控制二氧化碳，是鋼廠必須非常重視的課題。

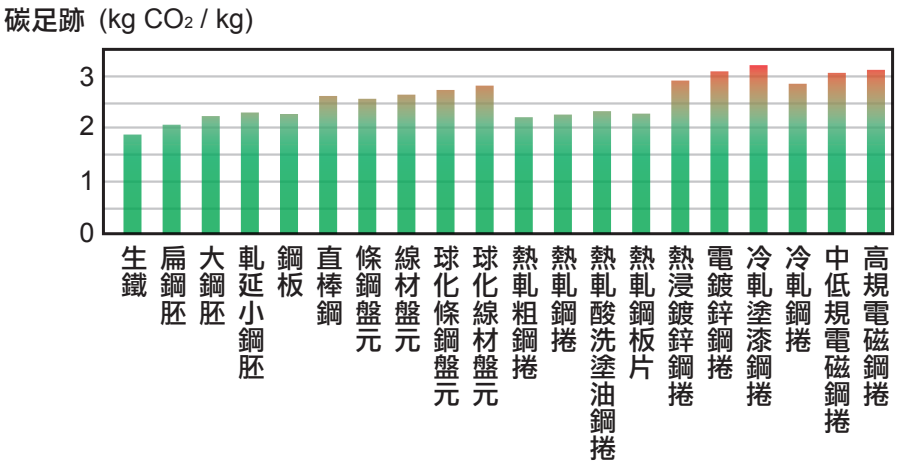
中鋼公司平均生產每噸鋼鐵，須排放 2.4 公噸的二氧化碳。



▲ 中鋼公司預期在未來達到的減少排放二氧化碳之目標。預期五年內可以達到減二氧化碳約一成的排放。

二氧化碳政策 - 碳足跡

所謂的**碳足跡**，爲針對特定產品所關聯產生的溫室氣體排放量進行監測，從產品的製造到棄置回收都被納入考量，以此評估此產品是否可以合格生產。



▲ 將產品生產的二氧化碳排放量進行計算，稱作碳足跡；高級鋼捲需要後續的軋延製程，因此會排放較多的二氧化碳。

二氧化碳政策 - 碳捕捉

碳捕捉，故名思義，是想把工廠排放的二氧化碳在燃燒前、或燃燒後捕獲下來。常見的有**吸收法**、**吸附法**、**薄膜分離**、**生物固定法**。

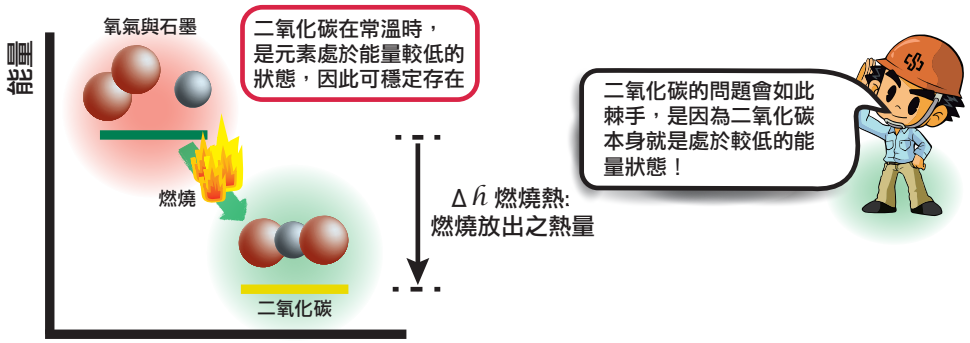
吸收法，是將二氧化碳通過特殊的醇胺溶液、形成複合化合物，從而將二氧化碳分離，是目前商業應用發展較成熟的方法。

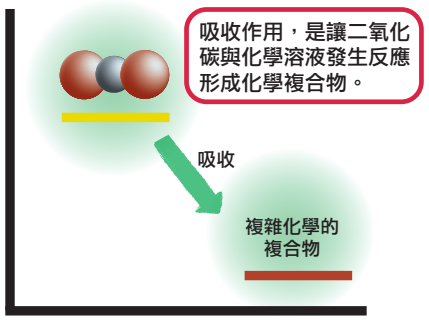
吸附法則利用活性碳、碳纖維複合分子將二氧化碳吸附。

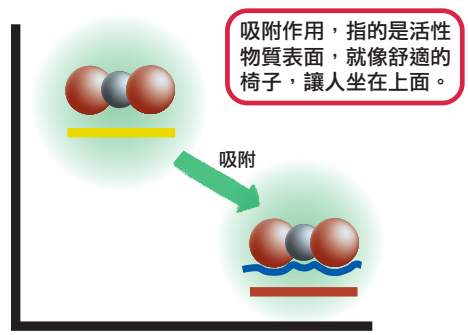
薄膜分離則像個特殊的篩子，將二氧化碳像淘金一樣篩出來。

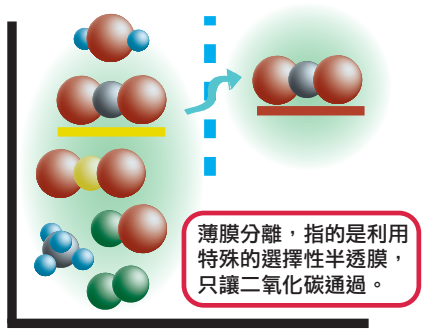
生物固定法則是利用生物的光合作用吸收二氧化碳，通常使用藻類；藻類生長速度快、且在經過一定方式後，又可轉換成生質油。

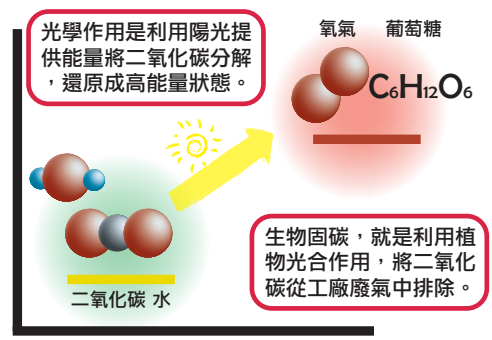
然而各種方法各有優缺點，目前都仍在更進一步發展當中。









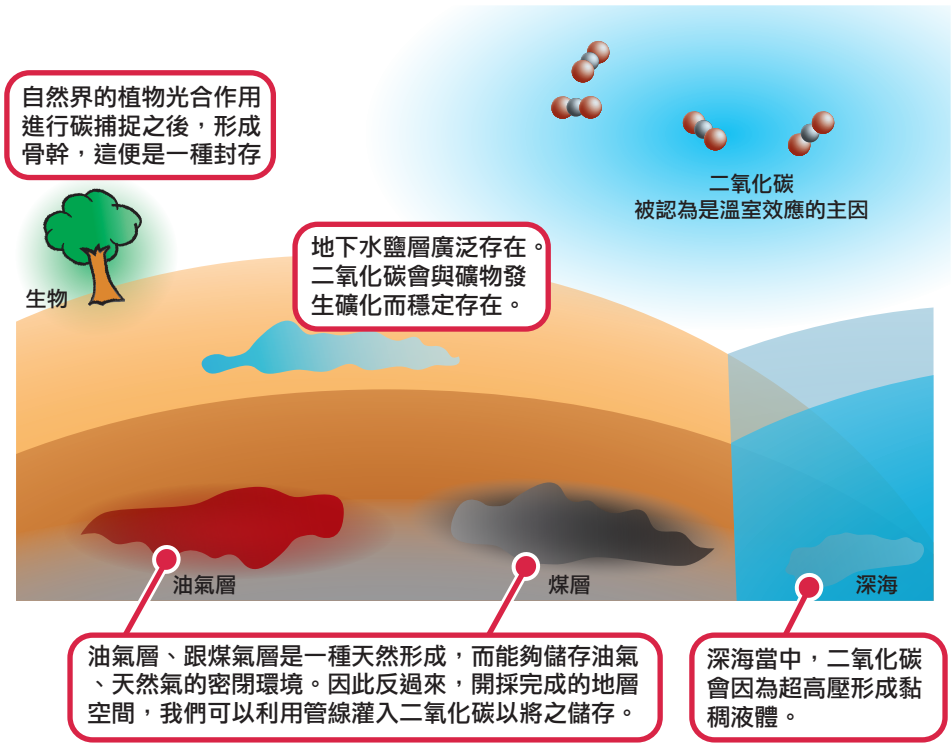


二氧化碳政策 - 二氧化碳的再利用與碳封存

二氧化碳的再利用，是將其回收利用於如滅火器、焊接劑、反應溶劑等等；或者經化學轉換作用生產如碳酸脂、尿酸等等工業原料。然而，二氧化碳產生的量遠超乎需求量，因此，發展碳封存才是解決二氧化碳的問題。

碳封存是將二氧化碳予以隔離、壓縮後運輸至封存場封存。常用的有**海洋封存**、**礦物封存**、**地層封存**等。台灣的地質構造和海域是儲存二氧化碳的優良場所，據估計，分別可存放 20 多億噸及 600 多億噸。

發展**碳捕捉與封存 (carbon capture and storage,CCS)** 的技術，讓二氧化碳慢慢隨著時間和環境使其重回地球的懷抱、而不讓地球受到氣候變遷的衝擊，便是 21 世紀的我們亟需努力的目標。



▲ 二氧化碳的封存的各種可能性。

副產物資源化

高爐石、轉爐石、脫硫渣、輕油等等鋼鐵製程外的副產物；以及鋼鐵在高溫時，表面產生的鏽皮；或者甚至是工廠廠房中的廢棄土，都可用於製造成有經濟價值的副產品。也就是讓環境保護等工作不再是徒增成本的繁雜工作，而是增進私人和大眾利益的雙贏手段。

高爐石、轉爐石，分別爲高爐、轉爐煉鐵時所產生的副產物。可經乾燥、磨粉之後，替代水泥使用。因此也節省了水泥生產所耗用天然資源及能源。此外，還可作爲人工魚礁的原料或用於海洋牧場。

脫硫渣爲鐵水經過脫硫處理的產物。當中，可將鐵進行磁選回收後，其餘因其爲高鹼性，故可作爲農業土壤改質劑、肥料。

輕油可用於提煉重要的化學原料：苯。

鏽皮則可以重新回收，作爲煉鐵的材料。

廢棄土可作爲土資廠材料、或者填海造陸。

種類	資源化用途
高爐石	水淬後生產爐石粉，或氣冷後作爲各類工程材料
轉爐石	回收殘鋼及部份作爲燒結工場原料、高爐助熔劑及盛渣桶墊底料外，其餘作爲整地、臨時道路、瀝青混凝土骨材、混凝土助劑
脫硫渣	回收殘鐵後用於整地、臨時道路、土壤改良材料、低強度混凝土及水泥製造原料
集塵灰	除了煤灰與礦泥拌混後作爲水泥製造原料以及轉底爐產出的氧化鋅粉直接外售提煉鋅金屬之外，其餘全部用爲廠內的煉鐵原料
礦泥	電鍍鋅線產出的高鋅礦泥直接外售提煉鋅金屬，其餘可優先在廠內回收做爲煉鐵原料，無法回收者則外售水泥廠做爲水泥製造原料
銹皮	回收做爲煉鐵原料
廢耐火材	回收殘鋼及部份作爲煉鋼助熔劑、渣桶保護材外，其餘供應商逆向回收作爲耐火材原料
營建棄土	可進行填海造陸、作爲新生地填築材料
石灰石泥餅	營建材料的參配料
其他	主要爲廠內回收，其餘由供應商逆向回收、外售、執行機關回收及處理廠家處理等

其他產物

此外，鋼鐵生產，還有其他產物：

① SOx 與 NOx 等氣體：必須利用額外的脫硫、脫硝設備進行處理。

②逸散性粉塵：利用靜電集塵器進行回收、減少空氣中粒狀物含量。

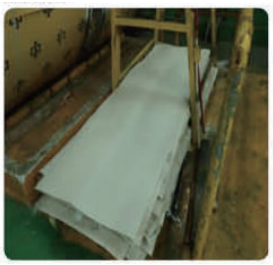
③戴奧辛：利用活性碳、觸媒進行回收。

④有機溶劑、腐蝕液體、廢棄物：交由特定廠商處理。

減少廢物的另一個方法可以從小地方著手！例如，產品的包裝可以使用包裝鋼帶以及防鏽紙。包裝鋼帶可以後續廢鋼回收；而防鏽紙可重複使用或可廢紙回收，可達到零廢棄物之目標。

由此我們可以知道，只要能多加努力，鋼鐵廠也可以從傳統的高汙染產業、轉變成爲低汙染、環保的綠色產業。

▲ 包裝鋼帶



▲ 防鏽紙

▲ 煙囪的監控設備

▲ 袋式集塵器。

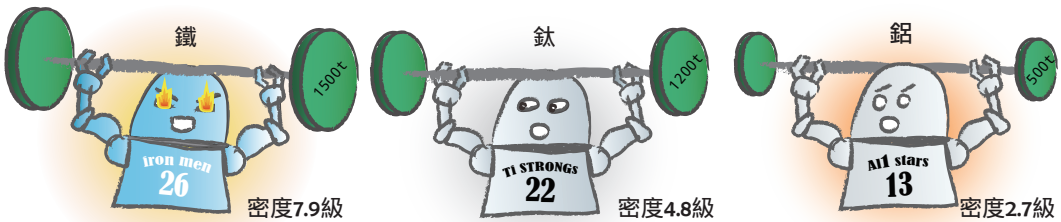
▲ 高爐的除塵系統。

6-4 鋁合金和鈦合金

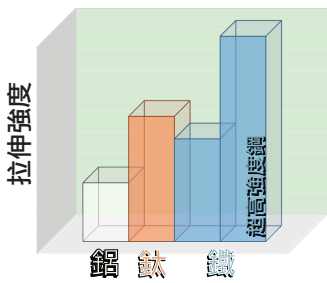
Aluminium &Titanium Alloy

鋼鐵，why not ?

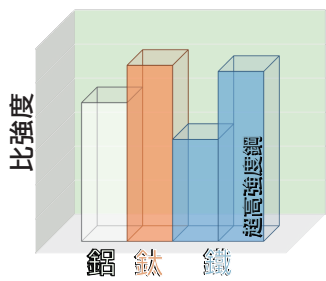
鋼鐵雖然是非常經濟實惠，且用途廣泛的金屬，然而其密度、導電、導熱、或者防鏽性，相較其他金屬來說，並不是很好的。因此，其他金屬的應用也是不可或缺的。以機械性質的應用來說，鋁合金和鈦合金與鋼鐵最爲接近、也各有擅長。因此，我們將鋁合金與鈦合金、加入我們鋼鐵與人生的討論當中。



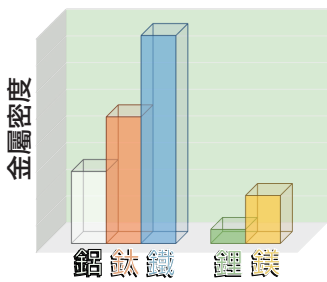
一般而言，進行試驗得到的強度，依序是鐵、鈦、鋁。然而，就像拳擊、舉重等運動，不同體重的參賽者、必須依不同公斤級、分開比賽一樣、它們的密度是不一樣的，同樣的試片尺寸重量不一樣。科學家為了更公平起見，定義了比強度，計算方法是：強度/密度。



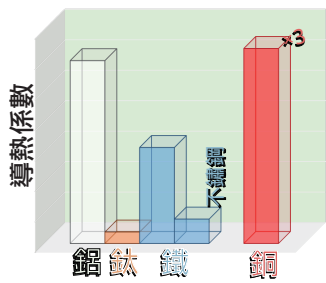
強度以鐵為最高。鈦居次、鋁為最低。然而鈦幾乎可與高強度鋼種並駕齊驅。



比強度一比下來，鈦是最好的。而鋁可說跟鐵差不多。差異來自於鋼種的不同。



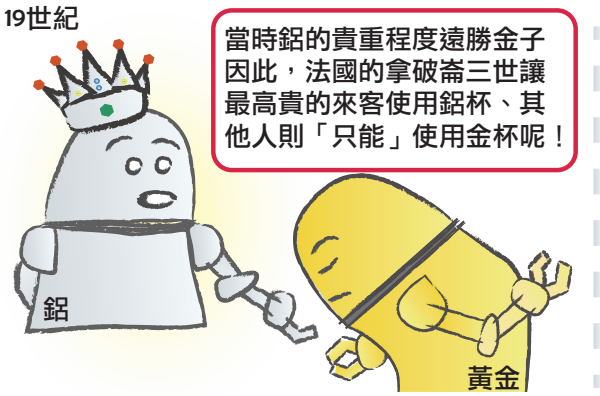
密度當中鐵最高，接著鈦、鋁。鎂合金則是另一種工程可見的輕金屬。鋰合金用於電池、密度比水小。



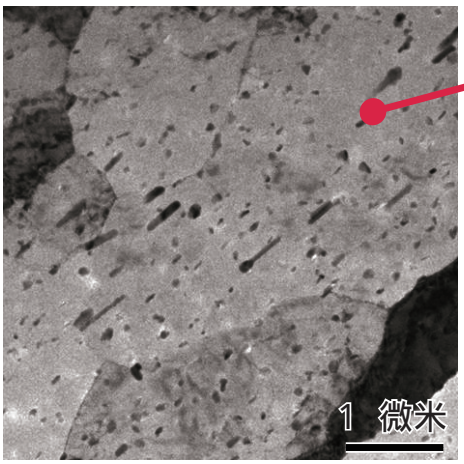
導熱係數鋁最好，約為銅的三分之一。鈦最低。不鏽鋼由於添加大量合金，導熱性也很差。

鋁合金簡介

鋁元素爲地殼中含量第三多的元素（僅次於氧與矽），鋁爲銀白色金屬，但因爲在化學上相當活潑，所以很難在大自然界中找到自然金屬型態的鋁，所以純鋁金屬都是必須經過提煉而得，在過去，因爲生產上的困難、使得鋁金屬成爲非常貴重的金屬！而這種曾經珍貴但現在相當普遍的金屬到底有些什麼特別性質呢？就讓我們繼續看下去！



鋁金屬活潑，但因爲能在空氣中迅速形成緻密氧化層，保護內層金屬，所以具有相當好的**耐蝕**能力。此外它也**具有良好的延展性、導電性以及導熱性**。不過純鋁金屬的強度相對較小，所以不能以純元素的形態作爲結構用材料，故在應用上會添加其他金屬元素如形成鋁合金的方式來改善強度，鋁合金增強機制來自於裡面有許多細小的**析出物**。（參見析出強化節）。由於此強化效果，鋁合金能和某些等級的鋼鐵材料的強度相當，使得鋁合金擁有較高的**比強度**。（**強度 / 密度**）



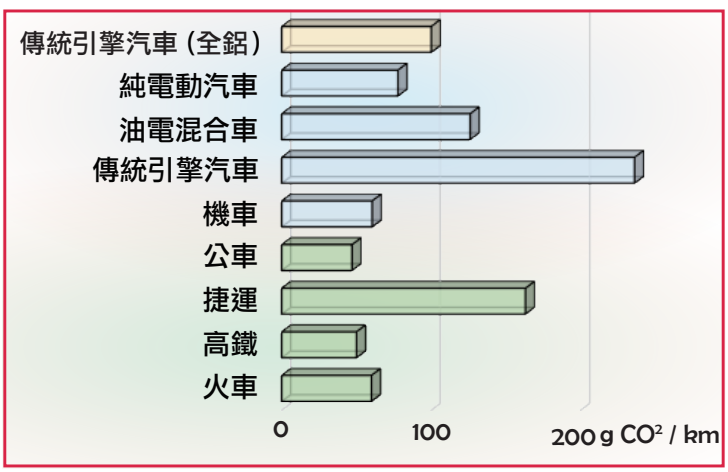
◀ 黃柏銘 / 攝影

鋁合金的應用

鋁金屬不只蘊藏量多，在人類生活中有極大程度的應用，鋁廣泛地使用於現代航空器中因爲它的高強度和低重量比率，大家十分熟悉的大型民航機波音—747 的整體鋁合金比率就達到 82%，雖然目前複合材料和鈦金屬在航空器的使用正在大幅增加，但鋁合金還是航空器材料的主流之一。

此外汽車工業也一直對鋁合金的特點進行充分的利用，包含不斷提高鋁合金占車體的比例、持續增進鋁合金車體的設計以及創造更高強度等級之鋁合金，而使用鋁合金的汽車則能夠因爲較輕的重量，進而減少行駛過程的能源消耗量，例如 Jaguar 捷豹汽車製造公司於 2014 秋季發表的新款汽車 XE，全車材料有約 75% 採用鋁合金，該公司預估能夠將每公里的二氧化碳排放量降低在 100g 以下，也使其有更佳的燃油行駛效率。

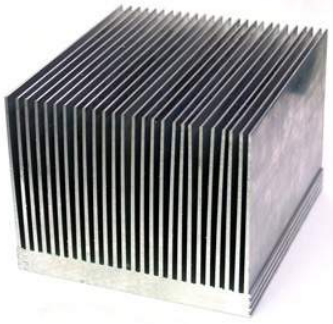
除了工程應用上的發展，鋁合金在一般日常生活中也還有很多產品，例如家家戶戶都有的鋁門窗、智慧型手機多變且輕盈的外殼，還有食品工業中的瓶罐跟鋁箔，鋁可以說是遍佈在我們生活中的一種材料。



▲ 運行每公里，所排放的二氧化碳。綠色代表大衆運輸工具，藍色爲個人交通工具。

▲ 飛機的機身目前的主流爲使用鋁合金。

▲ 以鋁合金打造的汽車身，能夠減重，從而減少汽車二氧化碳的排放。

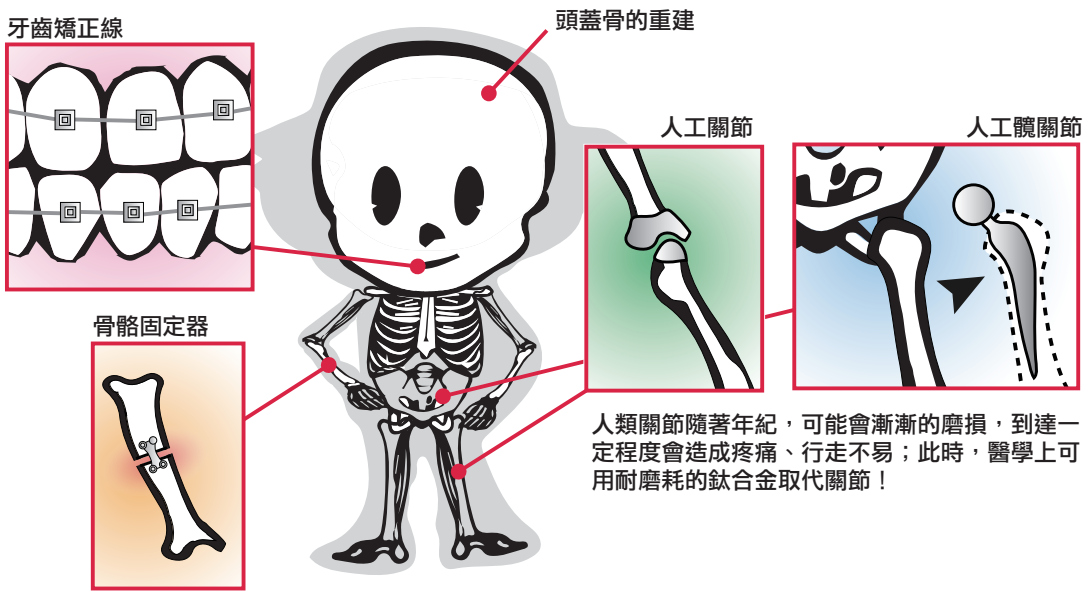


▲ 鋁合金的高導熱性，使得它常常用於CPU、顯示卡的散熱片。作爲3C產品的金屬外殼也有助於散熱。

鈦合金的簡介

鈦似乎是種有點陌生但又有些熟悉的金屬，大家可能有戴過鈦金屬的眼鏡，那種又輕延韌性又好的質地眞是令人難忘，但究竟這樣的金屬還擁有什麼樣的性質，就讓我們在這裡稍微的了解一下。

鈦元素在地球上儲量相當豐富，儲量僅次於鋁、鐵、鎂。鈦元素相當活潑，所以在自然界中不會以純金屬狀態存在，所以鈦礦採取之後必須經過萃取冶煉的過程才能得到純鈦。鈦金屬具有非常好機械性質，在同樣的強度之下鈦金屬的重量大約只有高強度鋼鐵的 60%，鈦擁有所有金屬裡面最高的比強度，另外鈦有極佳的抗腐蝕性，鈦的高溫強度優於其他輕量金屬鋁和鎂合金，比如飛機速度到達音速的 2.7 倍之後，因爲飛機表面溫度到達 400~500°C，這時候鋁和鎂合金就不能維持它原本的強度而必須改採用鈦合金，鈦合金在航太領域的應用也逐年在成長中。



▲ 鈦合金具有生物相容性，也就是與細胞組織接觸的時候，組織不會產生排斥性。此外，鈦合金不會析出離子、無毒性、也可以抵抗人體分泌物的腐蝕、彈性係數與人體骨骼接近。也因此我們可以用鈦合金來作生醫方面用途。

鈦合金的運用

鈦金屬的生物相容性高，不容易因組織液而產生變化，所以也大量的應用在生醫材料上，例如人工骨骼或是關節、牙根材料以及牙齒矯正線等。大家可能會覺得鈦金屬似乎都用在我們比較難以看到的地方，飛機總是在距離我們很遠很遠的空中，近看似乎也無法分辨哪個是鈦金屬，而鈦的生醫材料很可能大多數放置在身體內部或是在嘴巴裡，總是不能輕易看見它，事實上鈦金屬還用在另外一個地方，而且在這個應用中鈦合金的成品外觀面積非常大，大部份的人都能看見也很難忽視，而這樣巨大的應用其實就是建築物的屋頂或是外牆，因爲鈦金屬的導熱性不好，所以適合用以做隔絕外界氣溫的建築材料，此外也因爲鈦金屬密度較輕，所以當需要大面積的屋頂時就可以借助這項優勢達到減少建築結構支撐的負擔，如圖所示世界上許多大型建築物或是體育場館的屋頂或外牆都是以鈦合金爲建構材料的，台北市的大小巨蛋也都是鈦屋頂呢！

鈦金屬眞是性質非常優異的材料，在地球上的蘊藏量也不算稀少，但由於鈦金屬本身生產成本較高的關係，所以無法完全取代其他金屬材料的使用，不過如何降低鈦金屬的生產成本也許是一個可以思考改善的方向！

▲ 台北小巨蛋所使用的屋頂便是以兼顧強度、重量的鈦合金所建構而成的！此外鈦合金導熱較差，因此附帶有隔絕外界熱源、降低空調耗電的附加功能。

進階資訊
Further information

中鋼集團教育基金會
http://www.csc.com.tw/csc/gef/index.asp

秉持著擔負更多社會責任的精神，中鋼公司成立了中鋼集團教育基金會。除了有環境教育巡迴車、定期辦理各類人文講座，更重要的是！也舉辦大家能夠報名參加的國小暑期生態營、中鋼營 - 希望藉此能夠讓更多人了解生態保育、也讓大家更了解我們生活周遭的鋼鐵！

鋼鐵大學
http://www.steeluniversity.org/

鋼鐵大學，爲一個世界性、推廣鋼鐵教育的網站。裡頭包含了煉鐵、煉鋼、鋼鐵加工成形、相變態等等衆多的鋼鐵知識。同時，附有豐富的動畫、互動遊戲，讓人更深刻了解鋼鐵製程。此外、每年都會舉辦煉鋼挑戰賽！成績達到一定資格、就能獲得高額獎金喔！

進階書籍相關
Advanced books

物理冶金 / 劉偉隆 等譯
Physical Metallurgy

物理冶金，是了解金屬物理化學性質的基本參考書。其中包含了金屬的微結構、熱力學、晶體結構學、熱處理、機械性質等等簡介。

機械材料 / 黃振賢
Mechanical Engineering Materials

機械材料這本書，以鋼鐵爲主角，除了介紹鋼鐵的微結構、熱處理外、更深入介紹了各種鋼鐵合金、其運用及選擇。

鋼顯微組織與結構 / Honeycombe 等
Steels: Microstructure and Properties

(in Eng.) 深入的介紹了各種鋼鐵的組織，如麻田散鐵、肥粒鐵、波來鐵等等的形成機理。

鋼鐵熱處理的原則 / G.Krauss
Principles of Heat Treatment of Steel

(in Eng.) 詳細介紹了鋼鐵的組織、提供了十分精細、清楚的顯微結構圖片、並詳細討論熱處理、與機械性質的關係！

Book Title

鋼鐵與生活

Staff

出版者：中鋼集團教育基金會

發行人：鄒若齊

總編輯：楊哲人

編審：陳煌淙、顏鴻威、劉純宇

資料撰寫：簡佑全 (Ch.1)、鄭至閎 (Ch.1, Ch.2, Ch.6)、
謝亦傑 (Ch.3, Ch.5, Ch.6)、張馨尹 (Ch.4)

統整 / 繪圖 / 攝影：蔡宇庭

國內著作權保障、請勿翻印