

金屬材料學

原著者：B W. Niebel

A B. Draper

譯述者：李 春 輝

科技圖書股份有限公司

金屬材料學

原著者：B W. Niebel

A B. Draper

譯述者：李 春 輝

科技圖書股份有限公司

本書將有關生產工程用的金屬材料的性能，以簡潔的說理，豐富的資料編譯成書。以供專科學校機械科用的教科書，或從事生產事業技師們的參考書。要生產良好成品必先瞭解生產用材料，這是本書編印的主旨。

本公司經新聞局核准登記
登記證局版台業字第1123號

書名：金屬材料學
原著者：Nebel and Draper
譯述者：李春輝
發行人：趙國華
發行者：科技圖書股份有限公司
台北市重慶南路一段49號四樓之一
電話：3118308・3118794
郵政劃撥帳號 00156070

七十四年六月初版

特價

科技圖書公司
有成書業公司
\$23.00

編輯者言

本書係根據美國賓州大學工業工程系主任 B. W. Niebel 教授與 A. B. Draper 教授合著的“Product Design and Process Engineering”中有關生產工程用金屬材料各章編譯而成。由於本書說理雖簡潔，取材却豐富，可供本國工業專科學校機械科等的教科書，也可作為從事生產事業技師們的參考書。蓋生產良好成品必需使用良好材料，要超人一等，應先瞭解材料性質，這是一成不變的至理，也為本書編印的主旨。

科技圖書股份有限公司編輯部 誌

金屬材料學

目 錄

編輯者言

第一章 材料的性質與形態

1.1 概 論.....	1
1.2 材料的物理性質.....	4
1.3 材料的機械性質.....	18
1.4 材料性質的比較.....	33
1.5 工程材料的相對價格.....	36
1.6 問題與習題.....	39

第二章 材料性質的改進

2.1 應變硬化.....	43
2.2 晶粒大小.....	45
2.3 改進機械性質的固態反應.....	47
2.4 含鐵合金的固態變化.....	48
2.5 含鐵材料的熱處理.....	51
2.6 表面硬化.....	62
2.7 鋁的熱處理.....	70
2.8 鋁合金的熱處理步驟.....	73
2.9 結 論.....	76
2.10 問題與習題.....	77

第三章 含鐵金屬材料

3.1 鐵 - 碳平衡相圖.....	80
3.2 鑄 鐵.....	84
3.3 鋼 料.....	98

2 機械材料

3.4	鋼料的資料卡	110
3.5	選擇鋼料諸要素	114
3.6	結 論	132
3.7	問題與習題	133

第四章 非鐵金屬材料

4.1	鋁	138
4.2	鎂	150
4.3	銅與銅基合金	154
4.4	黃 銅	159
4.5	青 銅	160
4.6	鎳與鎳合金	161
4.7	鉬	164
4.8	鈷	165
4.9	鈦	165
4.10	低熔點合金	168
4.11	結 論	172
4.12	問題與習題	172

第五章 粉末冶金

5.1	粉末冶金	175
5.2	結 論	183
5.3	問題與習題	184

第一章 材料的性質與形態

1.1 概 論

通常設計師或工程師對受到負荷或位在磁場中的材料，其行態 (behavior.) 較具興趣，而比較忽視此材料為何會有如此行態的原因。只要設計師或工程師對材料本身的性質以及材料的物理性質與機械性質懂得愈多，就愈能正確的選擇適當的材料作為特定的用途。就一般而言，材料的性質是一個可量測的量，依照標準步驟，在特定環境下，依操作標準的試驗而量測所得的資料。在工程材料中，負荷 (load) 是用機械方法操作的，而材料的性質，常記錄在手冊上。對新創的材料，另有補充資料。通常這些資料，均只列出在室溫下的記錄。故當材料必需在低於熔點溫度下，或在高溫下使用時，工程師就需具備更多有關的知識。

材料的性質包括兩種：一種是結構敏感性質 (structure - sensitive property)，一種是結構不敏感性質 (structure - insensitive property)。結構不敏感性質包含各種傳統的物理性質，如電導度 (electrical conductivity)，熱導度 (thermal conductivity)，比熱 (specific heat)，比密度 (specific density)，磁學或光學性質。結構敏感性質，計包含：拉伸強度 (tensile strength)、屈服強度 (yield strength)、硬度 (hardness)、衝擊抗阻 (impact)、潛變抗阻 (creep) 以及疲勞抗阻 (fatigue resistance)。有些資料來源，主張硬度不應視為一種機械性質，因硬度隨着使用不同的壓痕器而改變，因此，硬度只是技術測試的結果。衆所週知的其他材料機械性

2 金屬材料學

質，隨着不同的負荷速率、溫度、衝擊試驗中所刻畫的凹痕幾何形狀以及試片本身的尺寸與幾何形狀而有顯著的不同。依這種觀點來說，所有材料的機械性質都是技術試驗測得的結果。此外，由於材料性質由試驗所得的結果經過統計而後列出的平均值，故商用材料性質的記錄值，都含有 $\pm 5\%$ 的誤差。

在固態 (solid state) 中，材料被畫分成金屬、高分子、陶瓷與複合材料等四種。任何一種特殊的材料，均受到外在環境的影響，分別用其行態來描述。因此，當材料在已知的負荷方向、荷重、速率以及環境下受到的負荷，則材料的反應，就稱為機械性質 (mechanical property)。材料內部的構造與材料在使用期間有很多可能的複雜關係如圖 1.1 所示。諸如屈服強度，衝擊阻抗，硬度以及疲勞阻抗等機械性質，是強烈的結構敏感性質。也就是說，這些性質與晶格 (crystal lattice) 中原子的排列以及排列上的瑕疵 (imperfections) 有關。但物理性質，就比較不具結構敏感性。物理性質包括電、熱、磁與光方面的性質。物理性質只有部分與其結構有關。舉例而言，金屬材料的電阻度 (resistivity) 隨著冷加工量的增加而增加。物理性質，主要是與構成鍵結 (bond) 的電子的相對多少以及這些電子的可用性 (availability) 與遷移性 (mobility) 有關。在具有高電子遷移性的導體以及具有低電子遷移性之間，精確控制原子的排列結構，就產生半導體 (semiconductors)，這種半導體的電子遷移性，受達到計畫性的控制修改。類似的，固態光學的進步，引出輻射能量 (radiant energy) 受到激發而發射出光線，因而發展出微波光譜 (microwave spectrum) [雷射 (masers)] 以及可見光譜 (visible spectrum) [雷射 (lasers)]。

研究材料的結構時，一般可分成三個步驟：第一，原子結構 (atomic structure)、電子軌跡構形 (electronic configuration)、鍵結力 (bonding force) 與原子集團 (aggrega-

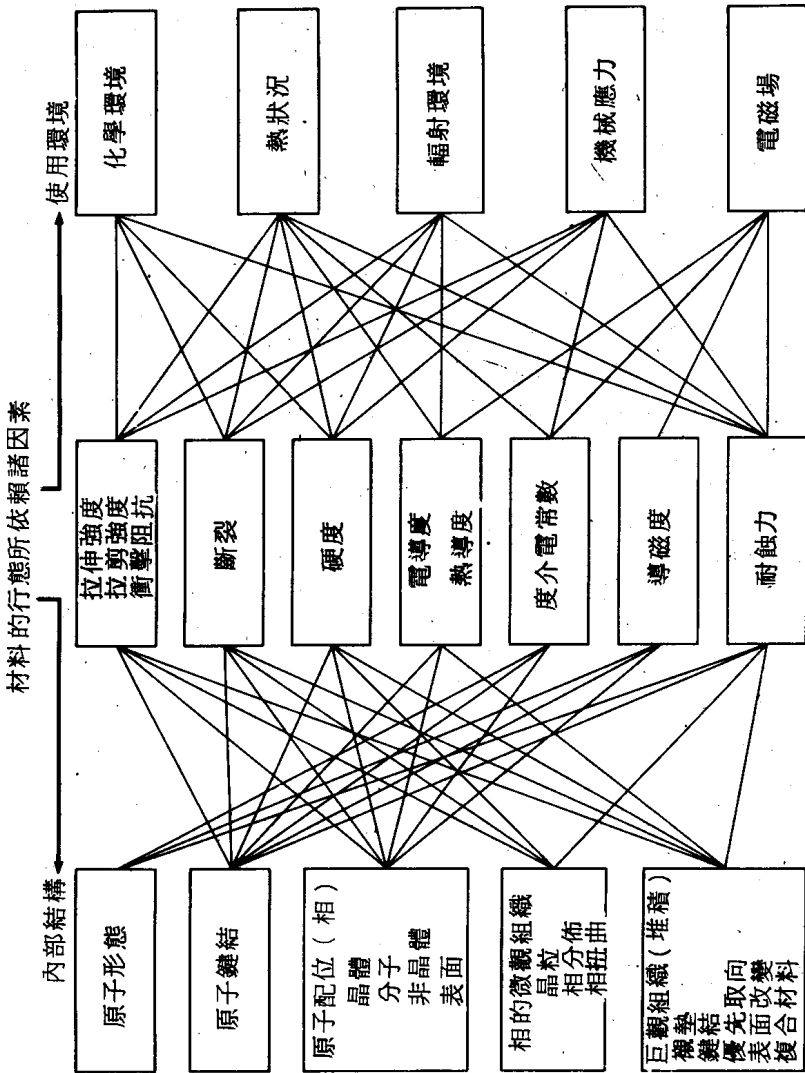


圖 1.1 材料形態、內部結構與環境間的關係

4 金屬材料學

tions of atoms) 的排列；第二，材料的物理性質，包括電導度、熱導度、比熱與磁性；第三，材料的巨觀性質 (macroscopic property)，如材料受荷重的機械的行態，這種行態能用晶格結構中的缺陷 (impurity) 以及操作步驟來解釋。

1.2 材料的物理性質

本節說明機械工業用材料。通常許多工程師只談由試驗所得的巨觀性質的平均值，很少關心微觀的 (microscopic) 原理。只有少部分人，因材料本身的特殊性，必需用很多時間去考慮微觀性質。材料性質的平均值絕大部分與材料的缺陷、不同的成分，由加工所造成的密度不同等有關。微觀性質，是與原子、分子以及它們間的交互作用有關。由工業上的問題直接研究這些材料性質而發展出新的可能性質，均能估計出來。

爲使不與材料微觀性質與經由試驗所得的性質間造成在理論上的矛盾相混淆，茲考慮能說明在不同程度下的材料諸性質的原理。這些程度分別成：普通的、非常小的以及非常大的等三種。普通程度，與試驗所得性質有關，其原理包括由古典物理 (classical physics) 所發展的原理。非常小的原理，絕大部分由量子力學 (quantum mechanics) 來解釋，非常大的原理，只能由相對論 (relativity) 來說明。

相對論，是討論有關具相當大質量的物體。如行星，以及以高速移動的較小質量的粒子，可小到原子以下的粒子。核子工程師與電機工程師要處理粒子加速器的問題時，常使用到相對論來解釋。對機械製造工程師而言，相對論只作為學術研究上的應用。

[1] 量子力學理論的應用

量子力學，一度只是學術象牙塔中的一門學問，如今已是一種平凡的論題。相對論，是討論有關原子或小於原子的粒子的一

門學問。但，必需了解，這些粒子的行態，才能對熱傳導度，熱容量 (heat capacity)、電導度與電晶體、溫度調節器 (thermistor) 等有更深一層的了解。

量子力學，是一門艱深的學問，絕大部分不能在本書中討論。但其兩個重要理論，將有助於機械設計工程師對材料的基本特性的研究，因而在本章中略作敘述。其中的一個理論是 Plank 的量子假說 (quantum hypothesis)。此假說被 Einstein 以及其他的科學家加以推廣。另一理論是 Pauli 的不相容原理 (exclusion principle)。

Plank 量子假說，假設受到束縛的質量非常小的粒子的能態 (energy state)，因不能用連續性函數來描述此能態，所以能態在本質上是不連續的。因此，一個受到束縛的粒子，其任意兩個存在的能態間的區域，是禁止其他能態的存在。

任何一個原子，其中每一電子都有一個特殊的能階 (energy level) E_1 、 E_2 、 E_3 等等。一個電子由低能階跳到高能階，必需有足夠的能量才能越過能量禁帶 (forbidden energy regions)。因此，位在能階 E_2 的電子要跳到能階 E_3 ，必需具有 ΔE_2 的能量才能順利跳到 E_3 (如圖 1.2 所示)。

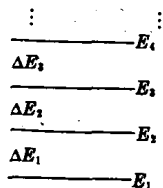


圖 1.2 行星電子模型能階觀念

如能階 E_2 的電子要跳到能階 E_3 ，它必需具有 $\Delta E_2 + \Delta E_1$ 的能量。如電子的能量無法跳過能量禁帶，則此電子會將此多餘的能量以電磁輻射發射 (electromagnetic radiation) 出去，

6 金屬材料學

本身仍停留在原來的能階上。由此看來，如一個能階 E_1 的電子所具的能量大於 ΔE_1 但小於 $\Delta E_1 + \Delta E_2$ ，則此電子只能跳到能階 E_2 ，並將超過 ΔE_1 的能量以電磁輻射發射出去。

所有的物質，都趨向最低能態。故任何一個原子的電子先填滿低能階，只有在受到電磁輻射、粒子撞擊 (particle bombardment) (如電子、中子等)，電場 (electric field) 或熱激發 (thermal excitation) (也就是溫度升高以增加原子振動振幅，因而造成原子碰撞) 的作用時，部分能量轉移到電子，使電子提升到較高能階。

因此，如果一個電子離開了常態能階 (normal energy)，此電子只能佔據較高而且未被佔滿的能階，或者離開原子。這種現象一旦發生，所留下的未填滿能階，立刻就會被原來的電子或高能階電子所佔據；如此一來，任何一種情況，電子由高能態跳到低能態，其所釋放的能量都以電磁波的形式發射出來。接著就使該電子原來的能階空了下來，則會繼續發生電子轉移的現象，直到所有的常態能階都被填滿為止。

原子的電子數與原子核中的中子數是相等的。如果原子的部分電子或全部電子脫離原子而成爲離子時，在此離子附近的自由電子會立刻填入空的能階中，而將多餘的能量，以輻射方式發射出去。

上述的討論，也就說明原子中的每個電子，存在一個特殊的能態上，但只有一個電子存在一個特殊的能階中。這個論點，可由 Pauli 不相容原理來解釋。Pauli 不相容原理說明在交互作用的系統中，有兩個束縛粒子不能同時存在同一能態上。因此，在原子的一個電子“殼層” (shell) [主量子數 (principal quantum number)] 中有兩個電子時，通常可將此兩個電子的能量認爲是相等的，其實它們所處的能階是不同的，雖然彼此的能量非常相近。依此類推，在一個“殼層”中有八個電子時，則此

八個電子分別位在八個不同的能階上。將兩個或更多的電子拉攏在一起時，則能階會有轉變與分開的現象。

第一個“殼層”（主量子數）所能容納的電子數為 2，第二個為 8，第三個為 18，第四個為 32 等等。對於一個獨立的原子而言，在第一個主能階中有兩個個別的能階，第二個有 8 個，等等（見圖 1.3）。如兩個原子被拉攏在一起，則第一個主能階中有 4 個能階，第二個有 16 個，等等（見圖 1.4）。當很多原子被拉攏在一起時，在任何一個主能階中，都會有很多個別的能階，而且這些個別的能階之間的能量差非常的小，以致無法分辨出是個別的能階。實際上是以能帶（energy bands）的形式來代表集結在一起的原子能態。一克原子（gram-atom）中有 6.023×10^{23} 個原子，也就是一個 Avogadro 常數。

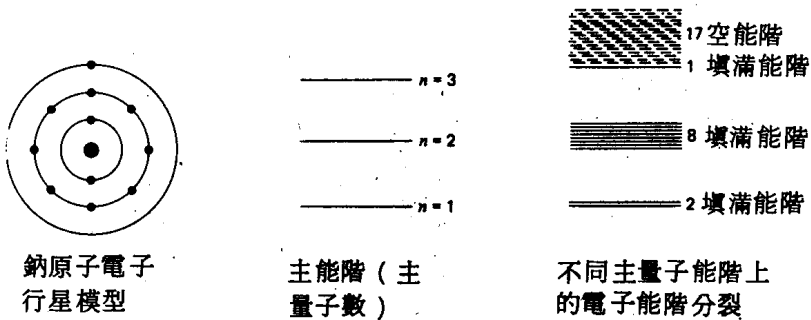


圖 1.3 鈉原子的電子行星模型與能階間的關係

每種原子，各有其自己特殊的能階排列（energy-level arrangement），只有在能階同時為一致時，才會使能量分裂，而形成能帶，如圖 1.4 所示。但是，如有兩種不同的原子 A 與 B，它們的能階也不一致。當這兩種原子結合在一起時，則此化合物的能階排列有疊合現象，而不是能階移轉（shifting）如圖 1.5

8 金屬材料學

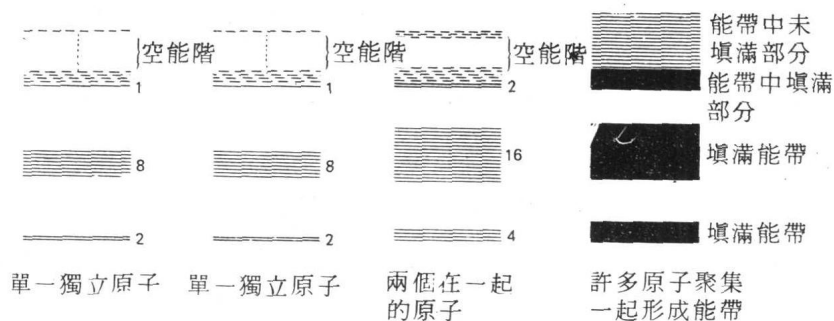


圖 1.4 固態中能帶的形成

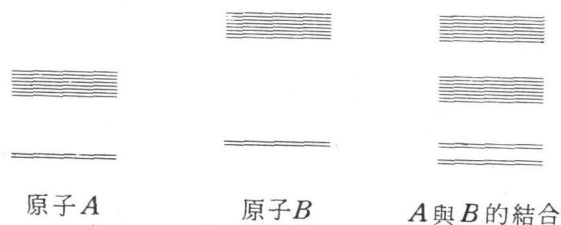


圖 1.5 能階的疊合

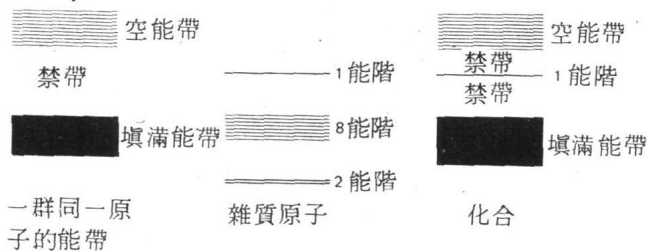


圖 1.6 雜質原子在同一原子的能帶上的疊合

所示。

同理，如果有一大群同類原子與雜質原子形成一集合體，則能階一致者會造成能階移轉，能階不一致者就疊合在一起如圖 1.6 所示。這種疊合現象使原本能量禁帶中，有其他的能階存在。經由此種疊合步驟，電子就無需具有相當大的能量，就能跳到較高的能階上。

如固體的某固定能帶中的所有能階都被填滿，而且能量較高的次一能帶中都是空的能階，則此種材料稱為絕緣體 (insulator)。如欲使此絕緣體能導電，其價電子 (valence electron) 需要加速，才能獲得高於基態 (ground state) 的能量，但絕緣體的能量禁帶很寬，在基態附近沒有較高能階存在。為使電子越過此能量禁帶，所需的能量要比通常激發形式所需的能量還要多得很多，因此才稱此種材料為絕緣體，但若供應相當的能量，仍能使絕緣體導電。

如果固體的價電子只佔半滿的能帶，只須很少能量，就能使電子加速，稱此種材料為導體 (conductor)。

如固體的價電子佔滿整個能帶，但能量禁帶相當窄，只要大致為 kT 左右的能量在室溫下就不難使電子越過能量禁帶 (其中 k 為 Boltzmann 常數 $= 1.38 \times 10^{-16}$ ergs / °K, T 是絕對溫度 K)。我們稱此材料為本質半導體 (intrinsic)。

就絕緣體與半導體而言，最高全滿能帶 (top filled band)，稱為價帶 (valence band)，能量較高的空能帶 (empty band)，稱為導帶 (conduction band)。

就導體而言，能量較高的電子位在導帶上，而且即使沒有激發，也能自由移動。相反的，絕緣體的電子則需相當高的能量才能由價帶越到導帶上。所以，絕緣體的電子被附以相當能量，也能使絕緣體導電。在導帶中自由移動的電子，稱為自由電子 (free electrons)，不是固定附在某一特定原子上的。這些自

由電子，就是導電與傳熱的物質。

現再繼續說明另一個機構 (mechanism)，可用來估計材料的物理性質。這個機構，就是束縛在固體的原子或分子的振盪運動。就氣體與液體而言，原子可自由的移動，但固體中的原子或分子，則在一定的位置上作振盪運動。

在絕對零度以上，固體中的原子或分子只在固定位置上作來回振盪。溫度愈高，振盪的振幅愈大，而且振幅直接與電導率有關。振盪所儲存的能量，直接與固態材料的熱含量有關。

說明運動粒子與波運動間的關係的 De Broglie 的關係式，不僅可應用於相對論及量子物理的理論上，而且也應用在近代物理上。De Broglie 的構想認為，運動粒子可能與波運動有關連，而且波的傳遞，可視為粒子的運動。這個觀點能說明諸如電子及中子的繞射現象，也可說明光子類似粒子的碰撞運動。

[2] 熱含量

固體的熱含量 (heat capacity)，與固體中的原子或分子在其平衡位置振盪的振幅有關。因溫度愈高振幅愈大，故熱含量亦愈大。熱含量以每單位質量的能量來計量。(物質的比熱，是該物質本身的熱含量與水的熱含量的比值)。在不同範圍內，熱含量隨著溫度的變化可用連續函數來表示。但，由於振盪粒子不可能用連續形式振盪，而以量子化的形式振盪。故只能用不連續性函數來表示此變化。

由低溫開始，熱含量與溫度的三次方成正比增加，直到經過一臨界溫度，又稱為 Debye 溫度 θ 。此後，熱含量則逐漸變成常數 $3R$ [大致為 $6 \text{ cal}/(\text{mol})(^\circ\text{K})$] 如圖 1.7 及表 1.1。

由於物質的不同，每莫耳重量也不同，即使他們每克莫耳的熱含量相同，每磅的熱含量也是不同。

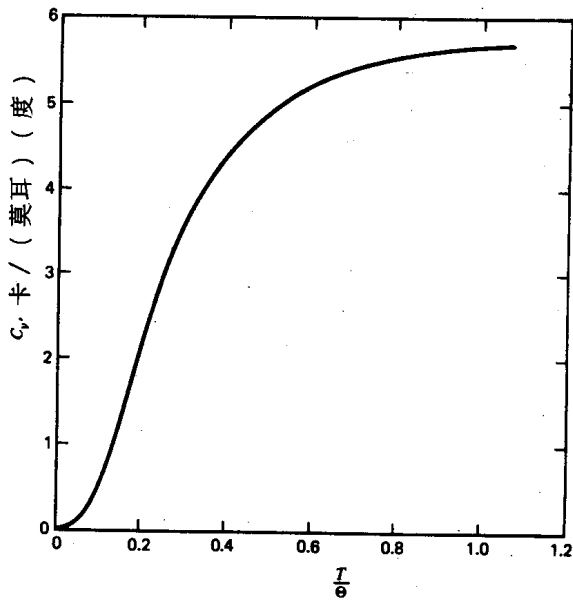


圖 1.7 根據 Debye 逼近法的固態 (三度) 的熱含量

表 1.1 元素的 Debye 溫度

物質別	$\theta, ^\circ\text{K}$
鉍	1160
鎂	406
鉬	425
鎢	379
鐵	467
鎳	456
銅	338
鋅	308
鋁	418
鉛	94.5