

工程材料原理

The Principles of
Engineering Materials

原著者：Craig R. Barrett

William D. Nix

Alan S. Tetelman

譯述者：黃 偉 哲

科技圖書股份有限公司

280245

本公司經新聞局核准登記
登記證局版台業字第1123號

書名：工程材料原理
原著者：Barrett 等
譯述者：黃偉哲
發行人：趙國華
發行者：科技圖書股份有限公司
台北市博愛路185號二樓
電話：3110953
郵政劃撥帳號：15697

六十八年七月初版 特價新台幣130元

原 序

材料科學——工程材料的研究——在過去十年中，已成為工程教育的一門新興而重要的科目。在急劇改變的技術環境中，由於工程師所需的熟練程度日增，材料科學得在課程中佔一席之地。材料的性質與特性，幾乎在每一現代工程設計中，佔有相當重要的地位。同時，亦提供了新發展的機會，對於許多技術上的進步，亦定出了極限。所以固體的研究以及組織與物理性質間的關係，成為現代工程教育的一個重要部門。

我們相信，有關工程材料的簡介，原理的強調要比經驗事實的強調來得重要。因此，本書並不給予讀者有關許多工程材料的廣泛知識，主要是藉着強調內部組織與性質間的關係，以提供了解有關工程材料諸性質的觀念。本書重在材料本性的一般敘述。材料使用時的機構、以及如何控制它們的性質，所討論的主題，足供充分知識，使工程師們了解現有的材料，並能有效地開發新的材料。

「工程材料原理」一書，適於大學部二年級或三年級學生用，所以讀者必先具備基本的物理、化學、與微積分知識。本書分為三個主要部分，第一部份在於處理材料的內部結構，包括「完美」與「不完美」的結構，同時涉及擴散、相變態以及組織的控制；第二及第三部分在於處理材料的機械與電子性質，示出它們與結構間的關係。此兩部分，本身並無關聯。依授課的目的，若強調結構用材料，則僅選讀第一與第二部分即可。假如着重電子材料，只要選讀第一與第三部分即可。

另外，對於本書所使用的單位制，在此作一說明。作者為了一個極重要的理由，以避免在本書中只採用一種單位制（即 cgs、mks、S.I. 制等等）。因事實上，不管國際上承認何種單位，用於材料科學中不同範疇的單位，並不屬於統一的單位制，此乃不爭的事實。目前我們將面臨兩種抉擇，一為使用一種普遍單位制，使擁有不同工程訓練的學生與工人間的溝通障礙問題得以解決，一是當討論不同題材時，採用完全不同的單位。最後，我們選擇後者的方法。其理由是，對各種常用單位的認識，畢竟比僅對一種單位有很熟練的運用，要來得有價值些。本書的附錄中，將列出

不同單位制間的換算表。

作者對於史丹福大學同事的協助與有用的建議深表謝意。本書乃為史丹福大學初等材料科學課程，自然的結果。許多人對於此一成果有相當大的貢獻。尤其要對 R.A. Huggins, O.D. Sherby, D.A. Sterenson, 與 T.H. Geballe 諸位教授，以及提供註釋與建議的學生致特殊的謝意，使本書在初定原稿時得以改善。另外，幫助本書準備的許多人士，作者亦十分感激，Phyllis Parks, Anne Morse, 與 Trilby Nattkemper 負責原稿的打字，尤其感謝；Prentice-Hall 圖書公司 Margaret McAbee 女士，對本書的準備，給予有力的幫助，於此敬表謝意。

最後，我們要感謝家人與許多朋友，在過去五年中，他們以愛與友情，間接地協助本書的完成。

C. R. Barrett 巴萊脫

W. D. Nix 尼克司

Tetelman 泰德爾門

工程材料原理

目 錄

第一章 材料科學的本質

1-1	緒 論	1
1-2	材料科學的內容	4
1-3	工程學背景中的材料科學	6
1-4	本書的範圍	14

第二章 完美固體的結構

2-1	緒 論	16
2-2	原子的電子結構	17
2-3	電子結構與化學性質	23
2-4	原子間力	24
2-5	位能井的概念	33
2-6	原子排列	36
2-7	結晶學用的符號	51
2-8	結晶構造的分析	55
問 題		62
參考書目		64

第三章 不完美固體之結構

3-1	緒 論	65
3-2	結晶固體內的點缺陷	67
3-3	非晶質固體內的點缺陷	73
3-4	結晶固體內的線缺陷	79

2 工程材料原理

3-5	固體內的面缺陷	86
3-6	體缺陷	96
問 題		98
參考書目		100

第四章 平 衡

4-1	緒 論	102
4-2	機械平衡、熱平衡、與化學平衡	103
4-3	熱力學第一定律	105
4-4	不可逆性與熱力學第二定律	107
4-5	晶體內缺陷的平衡濃度	111
4-6	單一成分系統的相平衡	117
4-7	多成分系統的相平衡	120
4-8	無變度反應	127
4-9	平衡圖的應用	133
4-10	氧化物的相平衡圖	138
問 題		141
參考書目		143

第五章 動力學

5-1	緒 論	144
5-2	反應速率理論	145
5-3	固體內的原子擴散	150
5-4	擴散 - 控制作用程序	159
5-5	相變態動力學	161
5-6	液態 - 固態轉變	170
5-7	固態 - 固態轉變	177
5-8	材料的環境剝蝕作用	179
問 題		189
參考書目		191

第六章 固體的機械性質概論

6-1	緒 論	193
6-2	彈性變形與應力分佈	194
6-3	受單軸向荷重下的應力 - 應變關係	202
6-4	材料在低溫及中溫時的強度	211
6-5	高溫時的材料強度	215
6-6	材料的破壞	218
	問 題	222
	參考書目	224

第七章 結晶固體的塑性變形

7-1	緒 論	225
7-2	晶體的理論強度與差排運動	226
7-3	差排的能量與安定的葡格向量	230
7-4	滑動面與滑動系統	233
7-5	差排移動與塑性流的關係	236
7-6	差排的發生	240
7-7	結晶固體內的其他變形形式	246
	問 題	249
	參考書目	250

第八章 強化機構

8-1	緒 論	251
8-2	屈服的差排理論	252
8-3	屈服點現象	257
8-4	強化的一些機構	258
8-5	應變硬化與回復	268
8-6	高溫變形的機構	275
8-7	破壞的機構	282
	問 題	290
	參考書目	292

第九章 機械性質與控制顯微組織間的關係

4 工程材料原理

9-1 緒 論	293
9-2 金屬的冷加工、再結晶與熱加工	294
9-3 析出硬化	300
9-4 鋼的熱處理	304
9-5 複合材料	316
問 題	325
參考書目	327

第十章 非晶質材料的變形

10-1 緒 論	328
10-2 網狀非晶質固體與過冷溶液的區別	329
10-3 網狀非晶質固體的變形	331
10-4 長鏈聚合物固體的變形	335
10-5 彈 體	343
問 題	346
參考書目	348

第十一章 固體內的電子

11-1 緒 論	349
11-2 電子的能準位與能帶	351
11-3 金屬的自由電子理論	354
11-4 量子狀態及能準位	359
11-5 費米 - 迪拉克統計法	363
11-6 週期電位場中的準自由電子	367
11-7 描述金屬、半導體、及絕緣體的物理基礎	371
11-8 金屬的靜態電子性質	375
問 題	381
參考書目	382

第十二章 電子的傳輸

12-1 緒 論	383
12-2 金屬傳導的物理基礎	383

12-3	金屬傳導的古典處理法	386
12-4	金屬電阻度的促成因素	391
12-5	超傳導性	396
12-6	自生半導體	402
12-7	自生半導體內傳導電子與電洞的密度	406
12-8	他生半導體	409
12-9	溫度對他生半導體內的載子濃度的影響	412
12-10	霍爾效應	415
12-11	結構缺陷與不純物對半導體的影響	418
12-12	結構控制的應用	419
	問 題	423
	參考書目	426

第十三章 接面的電性質

13-1	緒 論	427
13-2	表面狀態	428
13-3	接面的性質	430
13-4	用 $p-n$ 接面的電特性為基礎的半導體裝置	443
13-5	$p-n$ 接面的製作技術	447
13-6	材料的熱電性質	450
	問 題	454
	參考書目	455

第十四章 材料的磁性質

14-1	緒 論	457
14-2	材料內的磁場	458
14-3	反磁性	465
14-4	順磁性	466
14-5	自生磁性	470
14-6	磁 區	477
14-7	鐵磁性材料及亞鐵磁性材料的磁滯性質	489
14-8	磁性材料	496

6 工程材料原理

問 題	503
參考書目	505

第十五章 材料的光學性質

15-1 緒 論	506
15-2 基本定義	507
15-3 受原子鍵結影響的光學性質	513
15-4 發 光	519
15-5 光電導性	522
15-6 受激放射 — 微波增幅器及雷射	525
15-7 照相影像	532
問 題	532
參考書目	533

附錄

第一章

材料科學的本質

1

The Nature of Materials Science

1-1 緒 論

從過去的數世紀，我們從無數新技術系統的發展已得到了證明與利益：我們使用的電能，大部份現在可從核子動力設備得來；高速噴射機在今天以每小時 700 哩的速度，可攜帶數百位旅客，而在幾年內將能更快。太空船早已訪問月球，且很快地將使人類到達其他行星上。說得近些，在家庭裏，高速電算機影響我們許多生活的情況——從銀行的核算程序到擁擠的高速公路上速度的控制；電子工業的進步，引導了衛星通訊、彩色電視與複雜的外科手術中所使用的雷射等的發展。這些技術都因材料的新特性的開發而進步。例如：電晶體與其他固態電子裝置，如隧道雙極管（tunnel diodes）、太陽能蓄電池（solar batteries）、及積體電路（integrated circuits）等，幫助了電子工業的迅速進步，如無這些，將不可能達到如通訊衛星（communication satellites）、電算機、及飛彈導向系統（guidance systems）等裝置的尺寸、重量與動力的要求。

這些進展，強調了材料作為發展工程主要基石的重要性。一方面，材料的性質幾乎指示出每一種設計，與工程師所能想出的每一有利的應用。

但是，由於今日工程學的複雜微妙，我們不再只是滿足利用現有材料來設計這一個問題，現正需要有新性質的新材料來用在我們的設計。這是所有工程界的事實，不論它是機械工程師，試着要設計高強度、輕重量的火箭外殼；是電機工程師，要設計一種能在溫度攝氏幾百度以上作業的固態電子裝置；或是核子工程師，處理需要含有某種核子反應的材料，並要能控制它、利用它。這些對具有改良性質的新材料的尋求，在工程界裏佔了一個很重要的位置。

在尋求新材料的過程中，我們覺悟到，只有當了工程師才能充分瞭解材料的各種不同性質時，材料的有效利用才能實現。原因是：實際上，材料的所有性質，都由它的內部結構來決定。這相當廣義的名詞「內部結構」(internal structure)被定義為材料內電子與原子的排列。我們可由下列陳述直接瞭解：對某一已知化學成分的材料，它的內部結構並非一定的，能有很大的變化。這是決定於；(1)材料是如何被製造的（正確地說，是過程狀況為何），與(2)材料被置在何種情況（溫度、壓力、暴露在放射線……等等）下使用。看起來很簡單的觀察，却有某些相當深奧的含義。意指：由控制狀態改變材料的內部結構，要有效地控制材料的性質是可能的。而且，因為單一材料可經處理，而得到不同的內部結構，與相應不同的性質。一個材料可作為許多應用——各種要求不同的物理性質。

為了說明內部結構的變化能引起所給材料的物性很大改變，我們將扼要地考慮兩個例子。

第一個例子，讓我們檢查一種碳鋼（鐵+0.8%碳）的機械強度，作為材料熱經歷（thermal history）的函數。在試驗前，先將三片試片加熱到 900°C ，然後用不同的冷速冷卻到室溫。屈服強度（yield strength）對冷速的變化示如圖 1-1。可知當冷速增快，則屈服強度激烈地增高。亦即，縱使所有三個試片均有相同化學成分，且在同一溫度試驗，機械強度隨着熱經歷而改變。

為了瞭解為何這些強度上的改變會發生，需要詳細地檢查材料的內部結構。例如，若將這些鋼試片磨成極光滑的表面，然後浸在適當的化學溶液裏，溶液的腐蝕作用即顯示出每一試片有一不同的構造，這構造通常都太微細，無法用肉眼分析，而需要用光學顯微鏡（ $10-1600\times$ ）或電子顯微鏡（ $2000-100,000\times$ ）來分析。因此，這種構造，稱為「顯微組織」（microstructure）。

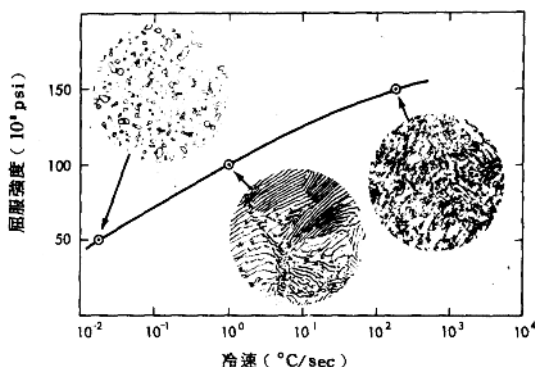


圖 1-1 Fe + 0.8% C 鋼由 900°C 冷卻後，其降伏強度隨冷卻的變化

結構中所發生的變化，皆為發生在用微米（1 微米 = 10^{-4} cm）計值的距離範圍。圖 1-1 說明了鋼試片在三種不同冷速所得的顯微組織。顯然，冷速的改變促使顯微組織的改變，而這種組織上的變化，即成為機械強度變化的基因。

內部結構對物性的重要性的第二個例子，讓我們考慮「超導導性」（superconductivity）現象。超導導性發生在溫度接近絕對零度時的某些金屬及合金。由所有電阻的消失而表現特徵，這是說，在一超導導電路中產生的電流，將無限地流動而無任何阻抗的損耗。任何材料的超導導特性，極依賴被驅動的電流密度，與任何加入的磁場。如所加的磁場或電流密度達到適度強烈，此超導導性將會消失。圖 1-2 說明電流密度與磁場間的關係。顯示某種材料將表現超導導性及一般導導性（具阻抗損耗）的兩個區域。對一已知的磁場，在超導導狀態區內所能容忍的最大電流密度，為「臨界電流密度」（critical current density）。圖 1-3，顯示臨界電流密度對內部結構極為敏感。圖中的數據顯示，對於 Nb-25% Zr 合金，其臨界電流密度以 1000 之多的因數而變。由其導線的熱機製過程（

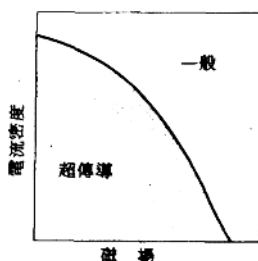


圖 1-2 超傳導性材料的電流密度，所施磁場，以及傳導性間的關係

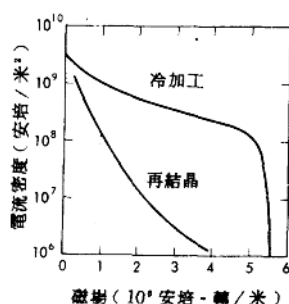
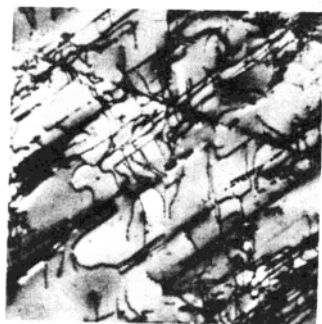


圖 1-3 兩不同內部結構之 Nb_3Zr 的超傳導性質

mechanical history) 而定。圖中專有名詞的扼要解釋如下：「再結晶」(recrystallized)，謂將試片加熱到比溶點稍低的溫度，然後冷卻到室溫。「冷加工」(cold-worked)，謂將試片施以如同再結晶的處理，再在室溫下使其塑性變形(plastic deformation)。顯然，塑性變形改變了 Nb_3Zr 合金的內部結構，而以同方式改變了超傳導的特性。事實上，經由電子顯微鏡的幫助，檢查顯微組織，將顯示出再結晶與冷加工兩種固體，有極大差異的內部結構。在圖 1-4，冷加工試片（在此情況下， Ni-Cr 合金無超傳導性）的結晶構造內含有大量缺陷〔即為「差排」(dislocations)〕，但，再結晶試片只有極少數這些缺陷。據此，我們可推斷，這些結構缺陷的密度愈高，其臨界電流密度會愈高。無疑地，因為這些結構的缺陷，而在材料中產生永久變形。一個簡單的方法即可用來改變此種合金的超傳導性。

1-2 材料科學的內容

上面敘述的兩個例子，對嘗試將材料科學(material science)的真正領域為何，作一定義，及如何將其關係到其他工程與科學範圍作一說明，提供一個很好的開端。在廣義上，材料科學牽涉到材料的結構，與性質之間的關係，與改變固體的結構——亦即性質——的方法。同時，為了瞭解並改進固體的工程性能，它在物理冶金學(physical metallurgy)



冷加工 (20,000×)



再結晶 (20,000×)

圖 1-4 說明冷加工與再結晶結構的Ni—Cr合金穿透式電子顯微圖，每一黑線表示結晶結構中的一個缺陷（差排）

、陶瓷（ceramics）、聚合物科學（polymer science）以及固體的物理學與化學方面，引進了一個整體型的發展。爲了明確地顯示材料科學如何與其他範圍的學問互相作用，便利的方法是將各種工程及科學的範圍，用各種特殊學科最注重的「尺寸範圍」（dimensional range）來分類（見圖 1-5）。首先考慮結構材料學（structural materials）的情形。機械、土木、及航空工程師們所關心的是作用於諸如 I - 樑、實翼樑、壓力容器與橋樑結構上的應力（stress）及應變（strain），所注重的最小尺寸限度是 $\approx \text{mm}$ （即，薄壓力容器壁的厚度），而最大尺寸能延伸到 $\approx 10^6 \text{ mm}$ （長橋的長度）。其次固態物理學，位在另一極端，是涉及電

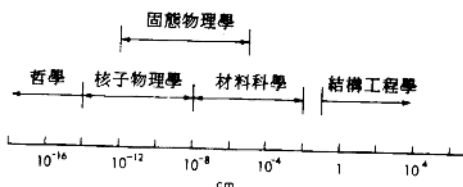


圖 1-5 科學及工程學注重的尺寸範圍

子與原子分佈 (10^{-11} 至大約 10^{-4} mm)。材料科學是為固態物理學與結構工程學之間，搭一橋樑。因為它涉及結構，而其變化從大約 10^{-7} 到大約 10^{-1} mm。因此，固態物理學與結構工程學的領域有了關連性。但這個關係是間接的，固態物理學提供瞭解材料科學（顯微組織）的部分基礎，而順序地，材料科學有意義地貢獻了對結構工程學所重視的材料性質的瞭解。

類似上面所述，材料科學亦作為固態物理學中幾個特別著重的觀念，與電機工程師在電子裝置中使用的材料性質之間的橋樑。例如，當固態物理學中要預測某原子排列（顯微組織）的電子性質，這並未包括關於一種材料如何經過處理，以得到這個結構狀態的預測。所以，仍需由材料科學來連接固態物理學的預測，與電機工程學上材料的需求。

因此，無疑地，材料科學在工程中扮演著兩個重要的角色。第一個最明顯的是對工程師們的實用任務，它強調了材料並非均質（homogeneous）、無組織的（structureless），而是一種具有顯微鏡組織特徵的工程結構組織（engineering structural feature）在內，而此結構的性質，將決定材料的製造過程及使用時的情況。所期望者，經由對材料科學較多的瞭解，可導引材料適當的利用且減少使用時的損失。其次，或許是較重要的，材料科學填補了材料的工程性質與原子物理學及化學間的空隙。因此，材料科學就像與其成相對部分的有生命材料（living materials）（生物學）。它說明了如何使物理學與化學領域的抽象概念，關連到工程界所遇到的技術問題。為了更清楚地強調這些要點，我們來詳細地考慮材料科學與工程學之間的相互作用。

1-3 工程學背景中的材料科學

材料科學與工程學之間的關係，包含有若干程度的科學與工學間的微妙。為了討論的目的，我們可將其歸為三類：(1)材料的明智利用，(2)設計與材料發展的關係，(3)次顯微（submicroscopic）或分子工程（molecular engineering）。因為今日最複雜的工程系統中包含了以上三類，值得用一些例子來說明這些相關處。

1-3-1 材料的明智利用

材料在工程系統構造的利用，是材料科學與工程間最明顯的關係。由

此，我們必須在工程研究中加入材料的潛力（potentials）及極限（limitations），兩者為重要的因素。以下的例子可說明材料的行為（behavior）知識，在工程上是如何的重要。這些例子即為工程材料明智利用的實際說明。

材料的機械性質，很敏感地決定在其使用時的溫度。例如，在第二次世界大戰期間，美國製造的自由號貨輪發現有 25% 產生破例。在 4700 艘輪船中，有 233 艘因破損得太厲害而失去或認為不安全。圖 1-6，即為其中之一，發生在 T-2 運油船，Schenectady 號的破損情形。大部分這些破裂都在極寒冷的夜晚發生，而低溫是造成脆裂的一個重要因素。事實上，試製自由輪所使用的鋼料，發現它對破損或裂痕的抵抗性能顯著的隨溫度而改變，只能支持大約 20°C 短窄的範圍，鋼料即由強韌、抗裂的材料變為一種極易破裂的脆鋼。此例說明了材料的性質可能因環境條件些微的改變而有所改變。

另一個例子，提到核子反應器內部及周圍使用塑膠及橡膠的問題。它說明了對材料性質變化的發覺的需要。當橡膠或塑膠用作封閉物時，必須

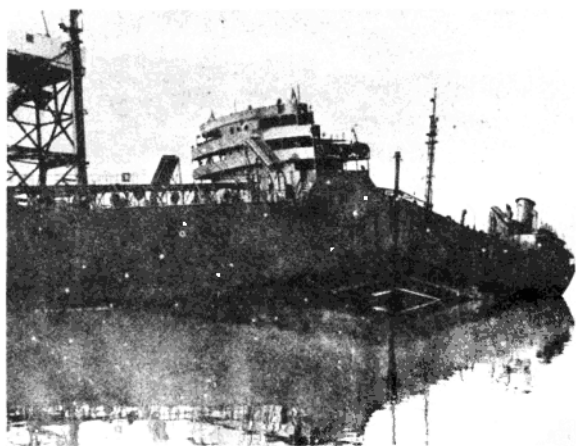


圖 1-6 停於碼頭之損壞的 T-2 運油船照片