

基礎材料科學與工程

上 冊

L.H. 范 韦 拉 克 著

曉 園 出 版 社
世 界 圖 書 出 版 公 司

基礎材料科學與工程

原著者 Lawrence H. Van Vlack

譯著者 蔡希杰 · 徐祖光

曉園出版社
世界圖書出版公司

北京 · 廣州 · 上海 · 西安

1992

譯 序

一本書的誕生是不容易的。多少人的時間與精力，多少人的思想結晶，才能滿足莘莘學子一些微薄的求知慾。

無可置疑地，“材料”將是21世紀發展尖端科技所不可或缺的一門；舉凡機械，電機，化工，土木，都硬得是在許多方面依靠著“它”，以求發展與創新。因此，對於工科的學生而言，了解“材料”一些基本的結構，性質與性能是必須具備的。

Van Vlack 教授以其在材料方面的經驗與學識，著作了這本“材料科學工程”。而今已是第五版，無庸說，這是一本好書。

蔡希杰先生畢業於清華大學，並以教育部公費於美國加州史丹福大學取得碩士學位。回國任教後，於百忙之中，譯著本書一至七章。陳皇鈞先生目前正於台大攻讀博士學位，課餘受託譯著本書八至十六章。本人則擔任本書的校訂及補遺。

許多事是很難完美的。與其他大多數的書一樣，原文版也有一些瑕疵。例如，例題 1-5.1，4-8.1 的計算部分，練習題 2-4.7 的解答，隨堂測驗 4L 及 4P，……等等。在譯本書時已作改正，另外 4-7.3 圖，本書也已改成“Ni⁵⁹”，目的是想與譯文一致。

本人才疏學淺，校訂時，懷著戰戰兢兢的心情，下筆前，無不一一推敲原句，幾經斟酌，務使讀者能以“平常心”，領略原作者所教導的觀念。為避免有些原文含義略清，本人也已作適當的補充，例如，在例題 4-5.1 註中，“金屬原子”半徑的定義，而原文並沒有“金屬原子”四個字。

編譯期間，感謝周良德先生從容協助校稿，更感謝“晚園”對本人的信任與支持，最後，付梓倉促，若有疏忽，尚請讀者指教。

徐 祖 光

1985 年 9 月 20 日

於晚園

原 序

如同先前 Cohen 教授獨到的描述，這本工程的主題是以材料內部結構的觀點來探討材料的性質及行為。結果，為了要符合材料的性質，在其內部結構上便必須做某些適切的改變。此外，若製作過程或使用條件改變其結構時，材料的特性也跟著改變。

這本新版的基礎材料科學與工程和前四版一樣，逐一地展現結構 $\longleftrightarrow$ 性質 $\longleftrightarrow$ 性能之間的關聯，這是建立在大學的基礎化學和物理上，利用他們的理論及擷取其背景資料而發展出我們所需要的理論，工程上大量的應用已能顯現上述所提之關聯。

本版已做有計劃的改進，以期能使學生更能獲益。(1)題目上已分成三個部分以符合教學的需要。(2)在聚合體，陶瓷，電子及複合材料上已適度的增加，此舉係受到參與材料先修課程鑑定的 180 所學校中之多數所鼓舞。(3)每章末尾的複習和練習部分已增大以作為補助教學之用。

本版包含了三個部分，第一部分闡明材料的相，包括——結構，性質和性能。這部分（至第九章）一般都是做為工程上的訓練之用。這幾章包括了原子規則與不規則的排列；金屬，聚合體，陶瓷和半導體以及非導體材料。若有時間上的限制，則第一部分可作為先修課程。第二部分考慮多相材料而著重在相的關係，熱處理，複合物及應用上的性能，這部分特別注重設計上的訓練。第三部分介紹使用廣泛的鑄鐵（最便宜的金屬），混凝土（最重的），及木材（最大體積的），此部分為選修。這三種材料都不是純物質，但是基本上在結構和性質方面卻是近似的。

第六章（聚合體材料）已重新寫過，加入了製作過程方面的資料。如同第十二章（複合物），第九章（磁，電偶，和光學材料）也是新的。此外，在第十三章也已增加破壞強度一節，因為其在製造可信度上非常重要。

在補助教學上仍保留第四版中所包括的預習部分和在每章節結

來時共將近 200 題的例題以及每章結束後超過 500 題的習題。另外第五版在每章結束後增加了隨堂測驗（及答案），專有名詞和觀念的闡釋。

習題分成兩種形式，第一種是試作（未遮陰影的），這些題目與例題非常類似或直接可以列式計算，目的是讓學生在未正式接觸難題（陰影部分）之前先“進入情況”，因為這些難題需要更多的分析與更精確的計算。

如同先前的幾版，教師可以刪除一些章節及主題以順應初學者的學習時間及學習次序。有（●）圓點的標記表示此節非必要學習只是附屬於無標記的章節以求連貫。

遺憾地是，我無法向數百位密西根大學的學生以及數十位外校教師一一致謝，因為他們對這本新版書，有諸多貢獻，他們所有的建議都被認真的考慮過，而且大部分都被採納。

若是對於 Bigelow 教授對前版書的批評及建議沒有致謝的話，那我就太怠慢了！同時也感謝 M. Cohen（麻省理工學院）教授，對於第五版所給予我的許多鼓勵和建議。同樣地，Filisko, Hosford, Hucke, Leslie, 和 Tien 等教授們對於課堂上迴響，更是有非常高的價值。而後的校訂者是在我辦公室經常與我合作的 Ardis Vukas 女士，及 Addison-Wesley 公司的 Marion Howe 和 Dick Morton，真的很高興與他們再度一起工作，他們使工作進行的非常順利。Fran 的鼓勵和耐心是豐盛而不可缺少的。

Ann Arbor, 密西根
1984 年 9 月

L.H.VV.

目 錄

第一章

材料科學工程導論

- 1-1 材料與文明 2
- 1-2 材料與工程 4
- 1-3 結構 $\longleftrightarrow$ 性質 $\longleftrightarrow$ 性能 7
- 1-4 材料的類別 10
- 1-5 一些材料性質的回顧 13
- 複習與研討 20

第一部分

固相的結構和性質

第二章

原子與原子之配位

- 2-1 單獨的原子與離子 29
- 2-2 分子 34
- 2-3 原子的配位 39
- 2-4 原子間距 45
- 2-5 在配位原子間電子的運動 52
- 2-6 基於原子配位之概論 56
- 複習與研討 57

第三章

固體內原子的規則排列

- 3-1 晶體 67
- 3-2 立方晶體 70
- 3-3 六方體晶體 76
- 3-4 同素異形 79
- 3-5 單位晶胞之幾何學 80

3-6	晶體方向	84
3-7	晶體平面	89
●3-8	X-光繞射	96
	複習與研討	100

第四章

固體內原子的不規則排列

4-1	固體中的雜質	115
4-2	金屬固溶體	115
●4-3	固溶體化合物	119
4-4	晶體內的缺陷	123
4-5	非結晶體材料	132
4-6	原子的振動	137
4-7	原子的擴散	143
●4-8	擴散過程	152
	複習與研討	155

第五章

單相金屬

5-1	單相合金	167
●5-2	單相合金的加工	173
5-3	彈性變形	175
5-4	單晶的塑性變形	180
5-5	金屬在塑性變形後的性質	188
5-6	再結晶	193
5-7	多晶金屬的行爲	201
	複習與研討	206

第六章

分子的相

6-1	巨大分子	216
6-2	線性聚合體	226
6-3	三度空間之聚合體	232

6-4	分子結構的變化	237
6-5	玻璃轉變溫度	239
6-6	分子晶體	242
6-7	聚合體材料的變形	246
●6-8	成形過程	253
	複習與研討	259

第七章

陶瓷材料

7-1	陶瓷的相	271
7-2	陶瓷晶體 (AX)	273
7-3	陶瓷晶體 (A_mX_n)	279
7-4	多元化合物	282
7-5	矽酸鹽	285
7-6	陶瓷材料的機械性質	291
7-7	陶瓷材料的製造過程	296
	複習與研討	305

附 錄	317
-----	-----

索 引	323
-----	-----

第一章

材料科學工程導論

前 言

材料在人類文化和文明的發展上已經成為不可或缺的一部分；例如，以前是使用石頭、青銅和鐵器的時代。同樣地，今日，在許多儀器產品和系統中，都必須含有複雜精妙的尖端科技材料。而工程師的專長便是使用材料和能量來配合社會的需要。

本書的主題為材料之性質決定於其內部的結構，而後在製造和使用時，材料之性質則影響其性能。為改變材料之性能，吾人必須改變其內部的結構。相反地，如果使用之條件改變了材料結構，工程師必須能預期其性質和性能將如何地改變。

在此章最後一節中，將回顧一些和普通物理有關之重要性質，這些性質可給予我們將結構 $\leftrightarrow$ 性質 $\leftrightarrow$ 性能互相結合的基礎。為了方便起見，我們通常將材料分類成金屬、聚合體和陶瓷三類。

目 次

1-1 材料與文明	金屬
1-2 材料與工程	聚合體 (通常稱為塑膠)
1-3 結構 $\longleftrightarrow$ 性質 $\longleftrightarrow$ 性能	陶瓷
內部結構與性質	1-5 一些材料性質的回顧
性質與生產	導電性 (和電阻係數)
性質與使用之行爲	應力與應變
工程的處理方法	應力-應變圖
1-4 材料的類別	

此章如本書之其他章節一樣包含有複習和研討一節，其中含(1)摘要 (Summary)，(2)重要之術語與觀念解釋，(3)討論主題，(4)隨堂測驗問題，和(5)習題。

學習目的

1. 熟悉材料與歷史文化及現代科技進步之間的密切關係。
2. 時時記住材料具有內部結構之觀念 (後面幾章中將詳述各種不同的結構)。
3. 認識材料的三大類別——金屬、聚合體和陶瓷及分類之基礎。
4. 由普通物理來複習一些重要的性質，因而對結構 $\longleftrightarrow$ 性質 $\longleftrightarrow$ 性能之密切關係有一初步之認識。
5. 熟悉和材料及工程有關之術語與觀念。

1-1 材料與文明

製造物體的能力，為人類的許多特殊屬性之一。當然，所有之物品、工具、配件和工程之體系均須要用到材料以達成其目的。材料在文明之進化上的確扮演了相當重要之角色，以致考古學家和歷史學家能由較特殊之材料來印證早期之文化。這包括早期之石器、青銅和鐵器之時代。如此之印證亦可施行於現代，如果我們不侷限於一種特殊之材料，而是針對許多

複雜微妙的材料如——塑膠、矽、鈦、尖端科技陶瓷、光學纖維等等。
(圖 1-1.1)。

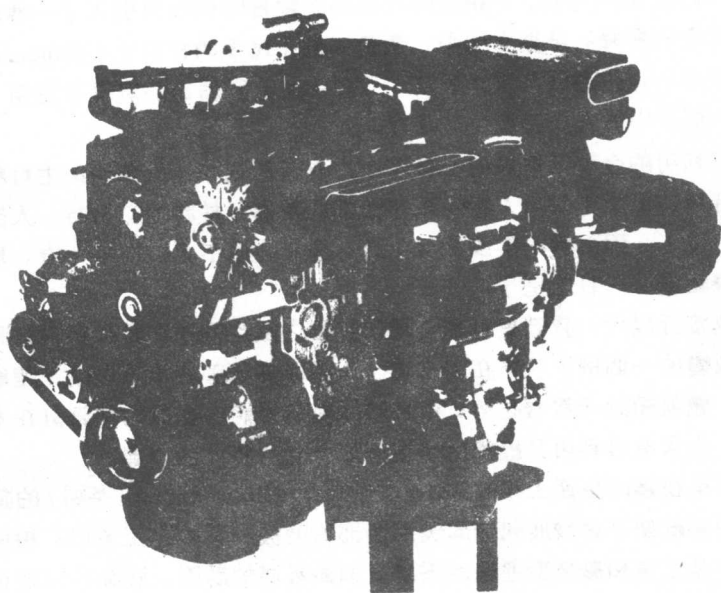


圖 1-1.1 在此汽車引擎中有好幾百種不同的材料(讀者可試著辨認一些較明顯者)。設計工程師選擇每一種材料是基於其可製造性、性質、使用的行為、成本和用途。未來十年材料的改良仍有必要，因為重量的限制益形重要、為獲得更有效之能量轉換而重新設計引擎、和原料的供應緊縮等理由。(取自福特汽車公司)

隨著歷史的演進，工匠和工藝學家改良了材料，因而可以製造更進步之產品。例如，衣服可以變得更有保護性或更迷人；工具可以變得更好用以減少勞力；家也設計得更舒適；武器變得更具破壞性和殺傷力，並致力於對抗敵人進步之武器以尋求安全；車輛能走的更遠及更快，而便利於食物、補給品及娛樂之取得。實用的產品隨著材料的改變在進步著，藝術及工業亦受工匠們把這些材料製成所希望之成品的能力所影響。

就像今日一樣，材料在早期的文明中廣泛地影響了其他的人類活動。

4 基礎材料科學與工程

在石器時代時，有較好之打火石的地方就產生了村落及原始的以物易物中心。後來，為使材料能迎合社會的需求，因而導至了探勘、政治風暴和戰爭。大約在 3500 年前，青銅器時代轉變成鐵器時代時只引入了一些額外的非技術性的變遷。早期文明中，鐵是一個「民主的材料」(democratic material)，此乃因其用途廣泛，且經由工具和器皿的發現及使用，因而對每一部落中的庶民都產生了衝擊。

可利用的金屬其優點已不再僅由富有者所獨享。此種新民主材料之最顯著特徵，可能是使用人數的急速膨脹。在進行材料的交易時，人們需要更多的技工。因而數十年或數百年即有進步，而不必幾千年才有，現在更是突飛猛進，一日千里了。

越接近現代，我們更可舉美國和英國之鐵路系統作為材料科技和社會經濟改變的一個例子。早在 1830 年，人們即嘗試著使用蒸汽機在陸地的運輸上。鐵軌顯然非常有必要，但那時鐵軌只是將一排軟的熟鐵釘在木板上而已，尚未有可利用又經濟的金屬能配合當時特殊的需要。

如果在鋼的生產上沒有 Kelley (美國) 和 Bessemer (英國) 的發展，鐵路的系統便不會發展到造成美國西部的開發和英國之工業化。相反地，如果不是工業和農業對運輸的需求，鋼鐵發展的誘因，資金和技術也必然消失。

現今在科技和非科技間相互發生作用的一個例子，便是矽的介入。就經濟的觀點而言，矽引入了幾十億美元的工業。通訊幾乎可以無所不至，日常生活也因室內之娛樂活動和可處理個人資料之電腦的引入而變化。而此種變化不僅是科技方面的。

1-2 材料與工程

許多有希望成為工程師的學生曾問，“工程師是做什麼的？”最簡單，最普遍的答案是

工程師使用材料和能量以符合社會之需要。

更明確地說，工程師設計產品和系統，製造它們並監督其使用。每一個產品都是用材料所製成，而在生產使用甚至在通訊裏均有能量的介入。這種

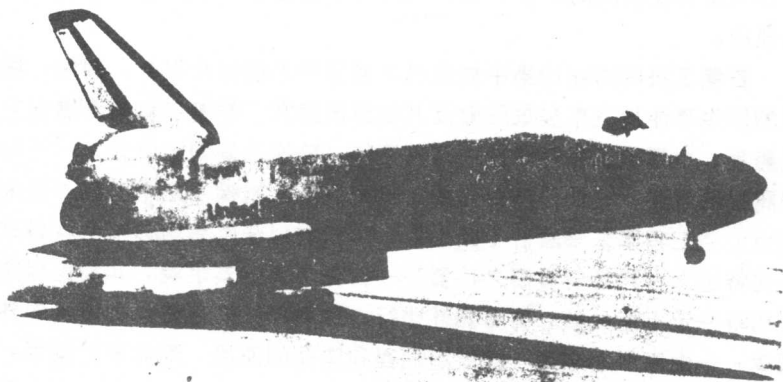
設計生產和使用間的結合，即為工科的學生要在大學課程中修習材料課程的理由。

各種工科的課程均集中於自己之產品和系統的次集合。例如，機械工程的學生專注於汽車發電設備及其他機械設備，造船工程則考慮海上運輸之船隻，而電子工程將設計由百萬瓦特之輸送系統到十億分之一瓦特之電腦訊號的電路。石油提煉由化學工程來設計；橋樑由土木工程；而太空梭則由太空工程學家來設計（圖 1-2.1）。所有這些產品均必須由材料來製造。任何特定之材料必有有用之性質——首先是考慮其生產，其次是用途。在使用時一定不能失效，有可靠性才行。材料加工的花費，必須兼顧外界的標準——由原料之來源，經製造過程和產品的使用，到最後的廢棄。這意味著一些新科技的領域，如“環境工程”和“公共政策工程”也必須考慮材料。

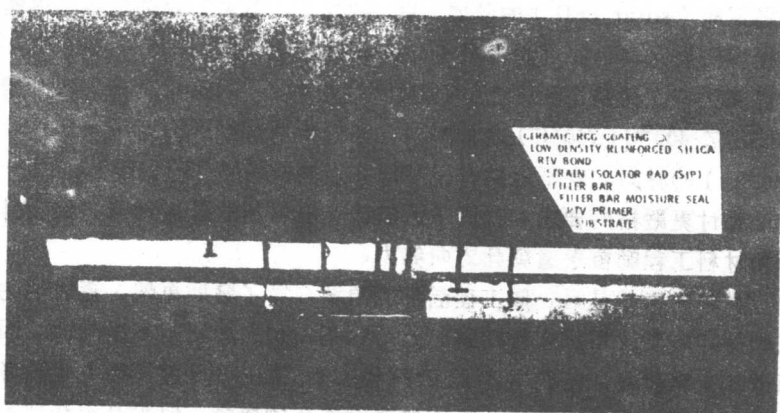
科技的時代同時也是材料障礙的時代。能量的轉換最能顯示此種障礙。太陽電池（solar cell）的發展（圖 1-2.2），要求工程師能將半導體淨化的過程趨於完美，而晶體成長（crystal growth）至今仍有待努力。將木炭變成瓦特之轉換在較高之蒸汽溫度時將更有效。因此當設計工程師發展出能使用於 400°C (750°F) 之材料後，進一步地想發展出適用於 450°C (840°F) 的材料，就不足為奇了。現在這些材料都已開發成功，而下一步驟將是應付更嚴格的要求。我們永遠無法克服材料的最後障礙，但設計工程師和材料工程師會永遠朝此方向努力。

材料的替代是另一個工程活動的領域。為了發展更輕、更省油的汽車，人們並非自動使用鋁來替代鋼，此乃因鋁和鋼之加工是不相同的，因此必須改變工廠設備。它們有不同的剛性，此點在設計之技術上也要考慮。以不銹鋼來替代普通鋼使橋樑或船隻有更長的壽命，似乎是很合理的，但在比較費用、可製造性和考慮原料之來源及牽涉到複雜的國際關係後，可能就不可行了。材料在現代社會扮演的角色是多元性的。

有些工程師在畢業後的第一項工作分配將不會遭遇到材料，也可能有一些工程師因其職務關係從未考慮過材料；然而，遲早大多數之工程師，將直接地（或是和公司內之同仁）與材料的選擇及其性質發生密切之關係。材料（和能量）對今日之工程師言，是無法避免的。

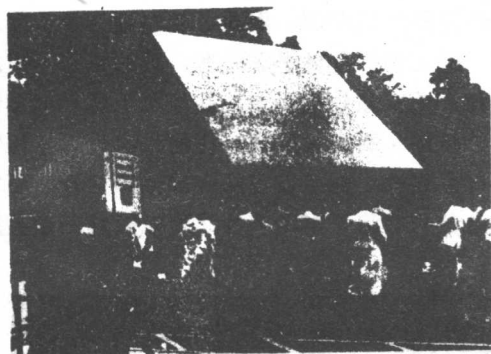


(a)

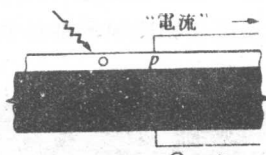


(b)

圖 1-2.1 太空梭的材料系統(a)第一次太空梭飛行着陸之剎那(1981)。太空梭表面覆蓋著 30,757 個絕緣瓷磚。(b)可再使用之表面絕緣裝置(橫截面)。太空梭飛行的成功即與此絕緣瓷磚之性能有關(設計時即已考慮重複使用)。(取材自 NASA 和 J.D. Buckley, Langley Research Center)。



(a)



(b)

圖 1-2.2 開發中的太陽能(a) 5 仟瓦的光電陣列 (photovoltaic array), (b) 太陽電池 (圖示)。此展示裝置由 72 個配電盤組成, 每個大小 $65\text{ cm} \times 130\text{ cm}$ 且裝有 150 個電池, 每個電池可提供 15 個加油站之幫浦和照明之動力。此電池在商業化發展的可行性取決於材料技術之突破。(取材自 Solarex Corp.)。

1-3 結構 $\longleftrightarrow$ 性質 $\longleftrightarrow$ 性能

每一種已知的材料, 工程師們都要考慮其用途。但有些因其可用性、原始之性質、成本或使用性能等原因而未廣泛地被使用。其他像鐵、鋼、紙、混凝土、水和聚乙烯塑膠等均已廣泛地使用。當然, 這些材料可以再細分類別。例如, 有人統計目前已有 2000 種的鋼, 5000 種塑膠, 和 10,000 種玻璃。姑且不論這些數字是否實際, 工程師對其設計之產品所使用之材料的確有許多的選擇。

除了上面所提的材料外, 我們還要考慮改良材料性質的可行性, 就像齒輪的情形。在製造時, 它們必須是弱和軟的, 但當使用在汽車的動力傳動或重工程設備上時就必須是強的和耐磨的。因此, 要知道各種不同材料之性質和其行為是一件很艱巨的工作。再者, 市場上每月都會出現數以百計各種不同的新材料。這意指每一個工程師無法熟悉所有不同形式之材料的性質和性能。然而, 工程師卻可以學習如何選擇和應用材料之指導原理。

內部結構和性質 既然不可能要求每一個工程師或科學家去認識數以千計可利用之材料，且不可能和新的發展並肩齊步。因此，工程師必須確實地了解決定所有材料性質的原理。對工程師及科學家而言，最重要之原理為材料之性質起源於其內部的結構。這就像是電視機或其他電子產品的操作（圖 1-3.1）決定於產品內部之組件、裝置和線路。任何人都可以按扭開啓電視，但電工如想有效地修好電視機，他必須了解內部線路才行；而電機工程師和物理學家則必須知道每一線路元素的特性才可以設計或改良產品之性能。

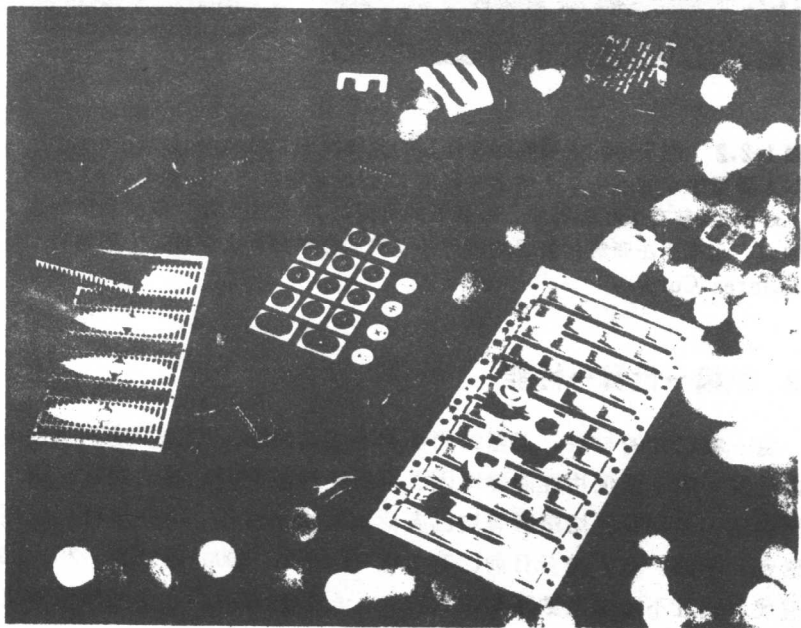


圖 1-3.1 電子計算器，一個計算器之性能取決於其內部線路之元件排列。同理，材料之行爲亦決定在其內部組成元件之結構。我們將看出這些排列牽涉到原子周圍之電子，原子之配位，晶體的結構，和鄰接晶體之顯微結構。工程師和科學家可選擇和修正這些內部結構以符合設計之需要，就像電路工程師修正電路的組成元件一樣。若想明智地把這個工作做好，我們必須知道材料之性質與結構間的關係（取自 Arnold Engineering Company）。

材料之內部結構包括原子及在晶體，分子，和顯微結構內原子與其鄰近原子結合的方式。在下面幾章中，我們將專注於這些結構，因為技術人員必須了解結構後，才能生產和使用材料；機械工程師一定要了解內燃機的操作，才能設計或改良在未來十年所需要的汽車。

性質與加工過程 材料必須予以加工才能符合工程師設計產品時所需要的規格，工程師稱此為生產。最常見的生產過程只是將材料的形狀改變而已，如機械切削或鍛造。當然，材料性質對這些加工過程之容易與否是很重要的。特別硬之材料會馬上破壞切削刀具的邊緣，而軟的材料像鋁則會粘住鋸子、磨輪和其他之工具的刀。同理，強的材料不易作塑性變形，特別當這些材料為非延展性時（亦即脆的）。例如，若使用鋼板來做汽車的擋泥板必定是非常地昂貴的（除了軟的材料以外）。

加工過程通常不僅只藉著機械切削或塑性變形來改變材料之形狀，且加工也改變了材料的性質。例如，線材經由鑄模被抽拉而縮小直徑時會被強化和硬化。一般而言，此硬化對用於電導體之銅線是不希望有的；但工程師卻可利用在加工過程中所得之強化而使鋼線能用於鋼圈輻射輪胎（steel-belted, radial tire）。不論是否按照吾人的希望，只要製造過程改變了材料的內部結構，其性質一定會有所變更的。當材料變形時，其內部結構改變，因而也改變了性質。

熱處理過程也可能影響材料的結構。這些過程包括由退火（annealing），高溫之淬火及其他熱處理。我們的目的是想了解結構改變之本質，以便工程師可以指定合適之加工步驟。

性質和使用時之行為 一個材料之成品具有某些性質——強度、硬度、傳導性、密度、顏色等——可加以選擇以適合設計之需要。假設內部結構沒有改變時，材料將永遠地保持這些性質。然而，如果材料之產品因使用之條件而改變其內部結構時，我們必可預見其性質和行為亦隨之改變。這可解釋為何橡膠當暴露於光和空氣下會逐漸地變硬；為何鋁不能使用在超音速飛機上的許多地方；為何金屬在反覆之應力下會疲勞；為何磁鐵在 rf 場裏會失去其極性及為何半導體會因核子放射線而損害等。這類例子不勝枚舉，因此工程師不只要考慮最初的使用要求還要考慮造成內部結構及性質改變之使用條件。