

778303

5(3)4

7/7122

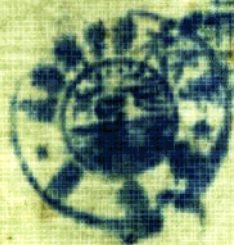
工程材料學

Engineering Materials

原著者：Michael F. Ashby

David R. H. Jones

譯述者：劉 錫 蘭



本館書

科技圖書股份有限公司

代 序

致同學們：

在工程的不絕推陳出新中，常常表示出對一項新材料的應用。也就是說，對一項材料作新的應用。在觀念上並不需要“新近有如何發展”（不過有時仍為需要）。塑膠製迴紋針與陶質渦輪葉片兩者均表示該兩種材料均曾作過金屬的代用品，現更將其作更多的用途。許多工程上的災難，常因材料使用不當所導致。當採用塑膠茶匙調製咖啡時會變彎，當一隊飛機由於機尾發生裂縫而被迫著陸，這都是因為工程師在設計時採用了不適當的材料，或是不瞭解所採用材料性質而導致的結果。故職業工程師必需懂得如何去選擇材料，以期適合其設計的需要——既經濟而又美觀，同時強度與耐久亦適合其要求，必需要知道材料的性質與缺點。此類知識對工程師而言是十分重要。

本書將對材料的特性與缺點作一廣泛的介紹。雖然不能使你成為材料專家，但亦能幫助你能對材料作明智的採擇，如何避免以往曾經遭遇的困擾與悲劇，予以詳盡說明，作為今後使用材料的參考。

你將會從本書目錄中注意到每章均包括一“組”節目，均係描述某一特性：諸如彈性模數、強韌性、抵抗銹蝕、……等等。每一組節目，開始說明其性質意義，描述其如何量度試驗，並列出求解問題時，在材料的選擇與應用上將所需的資料表。然後再介紹有關各特性的基本科學，並指出如何應用這些基本知識來設計具有較好性質的材料。每組節目後均附有事例研究（case studies），將所包括材料的各種特性資料與基本知識應用到實際工程問題中，附有作進一步研究時，應予閱讀的基本參考書目。

本書尚附有一系列的習題：每習題的意義是在加強或發展你對本書中某一部份的印象。從你記憶猶新的某一節目內容求證此項習題，並作分析。用此等方式使你能掌握各該主題的內容而更具信心。

沒有一位工程師會將材料特性的有關數值表能背誦如流。不過你必需記得，這些數值的大略情形。所有雜貨商均知道“一公斤蘋果大概是十個”，不過在買賣時仍舊是要秤一秤，因為經驗告訴他們，如此做法才不會發生錯誤，而致發生金錢上的損失。同樣情形，一位工程師必需知道“大多數彈性模數是位於 1 至 10^3 G Nm^{-2} 間，而且金屬的彈性模數約為 10^3 G Nm^{-2} ”。在任何實際設計中，你需要一個精確的數值，而且也能從材料商處獲得是項規格；但具有此種數值的知識，可避免在使用“單位”時發生錯誤，或做出其他愚昧的設計，而致浪費、錯誤等情形。為了提供參考，在本書末附有你必需知道的，或是必需導出的有關重要定義與公式的項目表，以及材料特性數值範圍的摘要表等。

致教師們：

本書係供以前尚未研讀是項課程的學生們用的工程材料教科書。按其與工程設計、工程力學及結構學等課程發生關連的情形下編纂的，並符合 1980 年代工程學生的需要。編寫的方式能符合作為研習材料科學的初步課程，並對應用方面予以加強。

本書內容經過慎重選擇後再予精簡。本教材中包含一組可應用在授課後的個案研究（2.5、3.5、4.4、5.4、6.2、6.4、7.2 與 8.1 節）。本書末附有供學生練習用的習題。

著者在編本書時，儘可能使數學分析簡化，不過，仍維持其能在實質上的基本瞭解，求得結果雖屬近似但很實用。著者為避免僅備講解教材外，另加入事例研究與習題，以及有關資料數據，對實際的以及假定的各類問題加以分析，並求其數值答案。此種水準的分析，以及此型數值資料，係供採擇材料或作設計分析（或設計 - 故障）方面時的初步研究用。必需對學生予以強調說明，次一步驟需採用更精確的力學（可參閱最後所附“參考書目”），以及從材料商處索得的資料，或材料試驗所得數值，作詳細的分析。有關材料資料，盡人皆知其變化很大。本書各表所列的近似值，雖然可用，但不可用作最後設計。

編輯者言

工程材料學，為大專工程學生的必修課程。數十年來一向用巨觀方式說明其性質與用途，諸如用應力、應變等靜態彈性為主來說明。但在最近三十年來世界上屢次發生巨艦腰斷、飛機折翼等現象，勢需改用動態塑性才能解說其現象。晚近更由於塑膠、陶瓷等材料的勃興，使以往僅限於金屬木材的討論範圍又大異其趣，以往的巨觀方式無法解說的必需改用微觀方式來敘述，因而有“材料科學”這一門的新興課程。依教育立場，這一門新課程是屬於高年級開設的，因其涉及微觀性質，勢非從原子分子構造着手，則近代物理非預先學習了解不可，但大專工科學生所習物理仍囿於古典內容，因而對研究材料科學，視為選修而少專攻。目前國際間的科技競爭日烈，而材料科學尤屬基本。坊間雖有若干種材料科學書的中文譯本行世，常不易被工科學生所接受，無法在學校中接受此種新知，深感遺憾。茲覓得英國劍橋大學工學部教師（英國學制每系（部）僅設一位教授餘稱教師）Ashby與Jones兩氏所著的Engineering materials (1981)，該書作為該大學工學部的效本有年，並被列入素以出版嚴謹的Pergaman書局的國際材料科技叢書”行銷全球。原書共分二十七個單元，經商同譯述者劉錫蘭先生同意，改編成為七章，以供本國大專教師作為一般工程材料講授的教材，一學期三學分之用。此書用簇新的原理以解說日常遇到的材料性質與用途，著者津津有味的道來，令讀者恍然大悟的接受，真是一本難得一遇的好書，特為介紹如上。

科技圖書公司編輯部謹識

目 錄

代 序

編輯者言

第一章 工程材料特性、價格與來源

1.1 工程材料的特性	1
1.2 材料價格與來源	8

第二章 彈性模數

2.1 彈性模數	19
2.2 原子鍵	29
2.3 固體中的原子堆積	38
2.4 楊氏模數的物理基礎	52
2.5 模數極限度設計事例研究	59

第三章 屈服強度、拉力強度、硬度與延性

3.1 屈服強度、拉力強度、硬度與延性	68
3.2 結晶中的差排與屈服	85
3.3 加強方法、與聚結晶的塑性	96
3.4 有關連續體的塑性移動	103
3.5 屈服限度設計中的事例研究	111

第四章 快速斷裂、韌性與疲勞

4.1 快速斷裂與韌性	120
4.2 快速斷裂的顯微機制	130
4.3 疲勞破壞	136
4.4 快速斷裂與疲勞破壞的事例研究	144

第五章 潛變變形與斷裂

5.1 潛變與潛變斷裂	157
5.2 擴散的動態理論	165
5.3 潛變的機制與材料的潛變阻力	173
5.4 渦輪葉片——一個潛變限度設計的事例研究	182

第六章 氧化與腐蝕

6.1 材料的氧化	194
6.2 乾氧化的事例研究	202
6.3 材料的濕腐蝕	208
6.4 濕腐蝕事例研究	215

第七章 摩擦、磨損與磨耗

7.1 摩擦與磨耗	223
7.2 摩擦與磨耗事例研究	231

第八章 事例研究

8.1 汽車設計中的材料與能源	238
-----------------	-----

附錄一 習題	250
附錄二 符號與公式	269
附錄三 課外讀物目錄	276

第一章 工程材料特性、價格與來源

1.1 工程材料的特性

1.1.1 概 說

設計一結構物或一項裝置時，工程師的腦海中，具有一個範圍頗廣的材料可資選擇，如何就這些材料加以組合，使其得到最佳結果，乃是一項問題。如有錯誤，可能導致不良後果。例如，在二次世界大戰期中，用某種銲接的商輪，曾經遭遇到極嚴重的損失。這並非受到敵方的攻擊，而是在航行途中半數發生破損。由於銲接材料的破裂韌性（fracture toughness）甚低，圍着船身四周，沿着銲縫發生裂縫，致遭破壞。這種特性為材料的重要力學性質之一。表 1.1 所示為諸如此類材料的一般特性。在設計時，必需先加考慮，並對材料細心採擇。這些材料的性質可能對你均不熟悉。在本節中僅用舉例方式指出。但這是本課程中各種材料的基本。以下將會看到各種不同類型的材料（詳表 1.2 所列），並據此製成我們的產品。

在本節中，將用各種不同的實例，舉出設計人如何在材料上加以採擇，以期適合其所需的性質。第一個例是就一枝塑膠柄螺絲刀用材料所作的採擇。

1.1.2 塑膠柄螺絲刀

通用的螺絲刀具有一個桿身附有高碳鋼製成的刀口。何以採用鋼，因其模數（modulus）高。模數，是用來量度材料對彈性撓曲的抵抗力。假如用聚乙烯（polyethylene）類的聚合物（polymer）代替鋼來製造螺絲刀的桿身，就會發生過度的扭曲。此種特性（模數），為此項應用中採擇材料的一種標準。但選採的標準，並不只此一種。螺絲刀的桿身尚需具有高的屈服強度（yield strength）。假如不

2 工程材料學

是如此，在旋轉時過份用力，螺絲刀就會發生永久彎曲（劣質螺絲刀會有此種情形）。同時，刀口必需具有高的硬度（hardness），否則會被螺絲釘頭將其扭斷而發生損壞。最後，螺絲刀用桿身與刀口，不但要能抵抗彎曲與扭曲，尚需能抵抗斷裂，這是一種似玻璃狀的斷裂形態，例如，即使具有高的模數，高的屈服強度，但若具脆性，用作此項用途時，很明顯的，仍是屬於不良材料。更精確的說，是具有很低的破裂韌性（fracture toughness）。鋼具有高破裂韌性，也就是說，在斷裂前，事先會發生彎曲。

表 1.1 特種類別

價格與來源 密度 模數與阻滯 屈服強度，拉力強度，硬度 破裂韌性 疲勞強度，熱疲勞抵抗 潛變強度	重要力學特性
熱特性 光特性 磁特性 電特性	重要力學特性
氧化與腐蝕 摩擦，磨損，與磨耗	表面特性
易於加工 裝配，接頭，修飾	製造特性
外觀，質地，觸覺	美觀特性

螺絲刀柄，係用聚合物或塑膠製成。本例係採用聚甲基丙烯酸鹽（polymethylmethacrylate），或稱為PMMA，或（perspex）。柄的斷面較桿身大出甚多，故其扭曲及其有關模數較不重要。若用橡皮（另一種聚合物）製造，即不相宜。因橡皮的模數過低，但大多數其他聚合物均可採用。當然，以往的螺絲刀柄係用另外一種更為複雜的聚合物，天然木材製成，假如你知道木材每年的消費量，你就會知道木材仍是工程用的一種最重要聚合物。PMMA 所以能取代木材做成螺絲刀柄，是因為PMMA 加熱就會變軟，很快就能成型，很容易製成最後的形狀。供此類應用時，其易裝配性（ease of fabrication）高。作此採擇的另一理由是：外觀（appearance），與觸覺或稱質地（texture）頗佳；同時其密度低，用起來不費力。最後因PMMA 成本低廉，可使產品的價格合理。

表 1.2 材料種類

(1)金屬與合金

鐵與鋼

鋁及其合金

銅及其合金

鎳及其合金

鈦及其合金

(2)聚合物

聚乙烯（Polyethylene, PE）

聚甲基丙烯酸鹽（Polymethylmethacrylate, PMMA, Perspex）

尼龍（Nylon）

聚苯乙烯（Polystyrene, PS）

聚亞胺酯（Polyurethane, PU）

聚乙烯基氯化物（Polyvinylchloride, PVC）

橡皮

(3)陶瓷與玻璃*（見下頁）

4 工程材料學

礬土 (Alumina, Al_2O_3) , 金剛砂 (Emery) , 藍寶石 (Sapphire)

苦土 (Magnesia, MgO)

矽土 (Silica, SiO_2) , 玻璃與矽酸鹽 (Silicates)

碳化矽 (Silicon carbide, SiC)

氮化矽 (Silicon nitride, Si_3N_4)

水泥與混凝土

(4)合成物

木材

玻璃纖維 (Fibreglass, GFRP)

碳纖維加強聚合物 (Carbon-fibre reinforced polymers, CFRP)

填塞聚合物

耐熱鋁合金 (Cermets)

-
- * 陶瓷係無機非金屬結晶物。玻璃是非結晶〔無定形 (amorphous)〕固體。大多數工程用玻璃為非金屬的。但現已能製得適用於工程特性的金屬玻璃 (metallic glasses)。

第二個例子，取材於“巨型噴射機”用Rolls-Royce RB211 渦輪扇葉推動的噴氣引擎所採用的高級材料設計的低度技術。空氣受到渦輪扇葉的壓力進入引擎，同時也產生圍繞在外殼四週外側的空氣動態推力。此項空氣更進一步受到加壓葉片的壓力，於是與燃料混合，並在燃燒箱內發生燃燒。膨脹的廢氣帶動了引擎葉片，形成渦輪扇葉與加壓葉片的動力，最後自引擎的尾部噴出而形成推力。

渦輪扇葉 (turbofan blades) 係用鈦合金製成，是一種金屬，具有充分優良的模數、屈服強度，與破裂韌性。但此金屬亦需能夠抵抗疲勞 (fatigue) (由於迅速的反覆荷重而起)，表面磨耗 (surface wear) (是由於高速小水滴的打擊而起) 與腐蝕 (corrosion) (作海上航行用頗為重要)。最後，非常明顯其密度極為重要，鈦合金是一種最輕的金屬。為求更進一步將重量減輕，已在試用一種稱為

CFRP 製成的合成葉片，其密度要比鈦小一半。但是用於渦輪葉片時，其韌性不足。受到“飛鳥攻擊”時，CFRP 渦輪葉片會立告摧毀。

製造引擎葉片的材料，尚需更多的要求。為了節省燃料，必需儘可能能在高溫下燃燒。現今第一流的引擎葉片（“HPI”葉片）已能在金屬溫度高達約 50° C 時作正常運轉。如此需再加上對潛變（creep）與氧化（oxidation）的抵抗力，以適合上項要求。用極為複雜製造過程所製得的鎳基合金（nickel-based alloys），適用於此種極為苛求的情形，亦足代表今日在高級材料技術上的成就一斑。

茲另舉一例以說明某些不同的要求情形。內燃機中的火星塞（spark plug），其發火電極（spark electrode）必需能抵抗熱疲勞（thermal fatigue）（起自迅速的溫度回復），磨耗（wear）（起自發火的侵蝕），與包含硫，鉛（起自抵抗撞擊的摻料）等污穢化合物，留在汽缸上方的廢氣的氧化與腐蝕等。採用鎢合金電極始能適合是項特性要求。

圍繞於電極芯四週的絕緣體（insulation），亦為本例中頗重要的非金屬材料。在此情形中，係採用礬土質（alumina）的陶瓷（ceramic），因其具有絕緣特性，同時亦有良好的熱疲勞抵抗力，以及對腐蝕與氧化抵抗力（其實早已完成氧化！）。

在消費品工業中，現已廣泛採用非金屬材料，下一實例是巡洋艦，其中顯示“傳統”的鋼、木材與棉等材料，如何廣被聚合物以及人

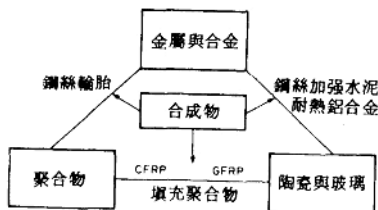


圖 1.1 按成品製造用材料的工程材料分類

造合成物所取代。一個典型的巡洋艦艦身 (hull) 係用 GFRP 製成。因其可作整體塑造，外型美觀，不像鋼會生銹，或木材遭蛀木蟲侵害。桅桿 (mast)，係用鋁合金製造，既較木材為輕又比木材堅固；現今更能用硼製“細絲” (whiskers) 的加強合金製成（一種人造的合成物）桅桿。至於帆，以前均棉織品，現在都改為聚合物的特麗龍 (Terylene) (三角帆用尼龍)，船用纜索也不用棉麻索，而改用聚合物製品。最後，護舷墊、錨、浮袋，與救生艇罩等等均廣泛的改用聚合物，諸如 PVC 等類。

至此，吾人已經提到三種人造合成材料，即：玻璃纖維加強聚合物 (GFRP)；非常昂貴的碳纖維加強聚合物 (CFRP)；以及仍然頗為昂貴的硼纖維加強合金 (boron-fibre reinforced alloys, (BFRP))。合成物的範圍頗廣，且正在成長中（見圖 1.1）；未來的十年，將會增加對鋼與鋁在傳統各種用途的競爭能力。

以上對可獲得的各種工程材料在力學與物理的特性加以介紹。但尚有一非常重重，當是超乎一切的因素，那就是材料的價格 (price) 與來源 (availability)。表 1.3 所列為材料價格的大概情形。

表 1.3

基本構造	木材、混凝土、結構鋼	每噸價值(美金) 60 ~ 550
中等及輕型工程	飛機，汽車，日用品等使用的金屬、合金、與聚合物。	550 ~ 5500
特殊材料	渦輪葉片合金，高級合成物 (CFRP, BFRP) 等。	5,500 ~ 200,000
貴重材料	藍寶石軸承，銀製收縮物，黃金製微電路。	\$200,000 ~ 2.2 (百萬元)
工業用金剛鑽	切割及磨光用工具	900 (百萬元)

結構用材料作大宗應用的計有木材、水泥與混凝土，與結構鋼，其成本約在每噸美金 60 至 550 之間。另外，尚有具其他特性的材料，如鎳、鈦等，則未將其價格列入。

輕型與中型工程材料的成本較大，故其價值亦高。通常在選擇材料時，受到經濟上的約束尚不嚴重，佔據結構物成本中較大比例部份為：人工、製造與裝配。不銹鋼、鋁合金，以及大多數聚合物的成本在每噸美金 550 至 5500 之間。在市場中，此類材料的競爭最為激烈，其中具有極廣泛的各種構想新設計。

聚合物與合成物直接與金屬發生競爭，新型結構之陶瓷中（碳化矽，與氮化矽），可能又與上述兩種材料，在某些應用方面發生競爭。

其次，有些材料係作高級應用，或是特殊用途。諸如：鎳合金（渦輪葉片）、鎢（用於火星塞電極），以及特殊合成材料諸如 CFRP 等等。其價格範圍為每噸美金 5500 至 200,000 之間。此類高級材料的製造技術，研究發展的活動，仍在繼續進行，不斷有新產品出現。同樣，新材料出現仍然競爭十分激烈。

最後，被稱為貴重金屬與寶石等，在工程上用途亦多；諸如黃金用於微電路，白金用作觸媒，藍寶石用於軸承，金剛鑽用作切割工具等等。其價格範圍為每噸自美金 200,000 以至於超過 2,200,000 而達 900,000,000。

工程設計計包括頗多的考慮因素（圖 1.2）。材料之採擇必需能

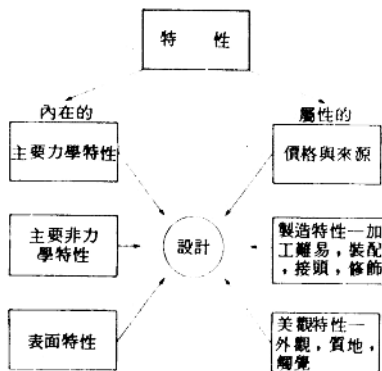


圖 1.2 工程材料特性對產品設計的影響

符合一定標準，其中包括重要的與表面特性（例如：抵抗腐蝕）。但是，又必需能製造裝配，對消費者具吸引力，在價格上尚要能與其他材料競爭。次一節將會談到在經濟上着眼所作的採擇，隨後各章將討論其他特性。

1.2 材料價格與來源

1.2.1 概 說

上一節已介紹過，設計工程師所需的工程材料特性範圍，但未提到材料的價格與來源。此常為某一工程作材料選擇時，超乎一切因素之上。本節將對審查材料的經濟特性，作一較詳盡的說明。

1.2.2 材料價格資料

由於任何設計，成本均頗重要。故將各種材料的價格，依序列於表 1.4。此乃是將 1.1 節中表 1.3 再予分項列出；同時，1.1 節中按材料價格所作的分類，也照樣可用於表 1.4。這些資料究從何處得來？同時，如何與有關材料的資料取得聯繫？以及這些資料會受到何種因素所控制？下文將逐一加以說明。

材料供應雜誌常列有基本材料的當時價格，以及六個月與一年前的價格。是對價格及其趨向的良好指針。表 1.5 係摘自 1980 年 1 月 16 日的價目表。其中列出一部份非鐵金屬的單價，並顯示兩種情形。第一，就長期來看，材料價格有上漲趨勢。二十年前，銅每噸單價為美金 440，鋁每噸為美金 240；現今單價已高出四倍以上。第二，短期內，物價反復變動頗大。鋁在六個月中下跌 30%。在同一期間，黃金却上漲 140%。鎳在過去 12 個月中上漲 47%，但前一年却下跌 40%。這是大幅度的改變。對於材料採構人而言，頗為重要。

短期物價波動，與物資真實短缺或過剩的關係甚微。此乃由於供求雙方發生稍許差距，因而對商品供應的將來情形，過份誇張所致。這種物價市場的誇張性質，可在數日間使物價發生很大變動其理由很簡單，乃係投機商人對此過份敏感。但工程師却很難對此情形加以預測，也不能設法予以抵制。政治因素也極端重要。例如 1978 年世界上

表 1.4 每噸價格, $\bar{\rho}$ (1980 年 1 月)

材 料 別	$\bar{\rho}$ (美金噸 ⁻¹)
工業用金剛石	900,000,000
白金	26,000,000
黃金	19,100,000
銀	1,140,000
硼 - 環氧金成物 (料價 60 %, 工價 60 %)	330,000
CFRP (料價 30 %, 工價 60 %)	200,000
碳化鈷 / 鎢	66,000
鎢	26,000
鈷	17,200
鈦合金	10,190-12,720
聚亞氨基鹽	10,100
鎳	7,031
PMMA	5,300
高速鋼	3,995
尼龍 66	3,289
GFRP (料價 60 %, 工價 40 %)	2400-3300
不銹鋼	2400-3100
銅, 製品 (片, 管, 桿)	2253-2990
銅, 錠	2253
聚碳酸鹽	2550
鋁合金, 製品 (片, 桿)	2000-2440
鋁, 錠	2000
黃銅, 製品	1650-2336
黃銅, 錠	1505
苦土, MgO	1990
礬土, Al ₂ O ₃	1100-1760
鋅, 製品 (片, 管, 桿)	950-1740

10 工程材料

鋅，錠	733
鉛，製品（片，管，桿）	1100-1670
鉛，錠	961
環氧	1650
玻璃	1500
發泡聚合物	880-1430
天然橡皮	1430
聚丙烯	1280
聚乙烯，高密度	1250
聚苯乙烯	1330
硬木	1330
聚乙烯，低密度	1210
聚乙烯基氯化物	790
碳化矽	440-770
夾板	750
低合金鋼	385-550
軟鋼，製品（角鋼，片，桿）	440-480
鑄鐵	260
鐵，錠	238
軟木	431
混凝土，鋼筋（樑，柱，版）	275-297
燃料油	200
煤	84
水泥	53

主要鈷產地 Zaire 的礦工，遭到當地游擊隊的攻擊，以致缺貨。

長期變動的原因頗多。部份係反映原料的開採與運輸，以及精煉成工程材料所需的實際成本（包括投資報酬、勞工工資以及能源等等）。通貨膨脹與能源成本的增加，很明顯的會使價格上漲。同時開採原料所需的成本，亦會影響其價格，例如銅、鎳的成份逐漸貧乏，

表 1.5 1980 年 1 月 16 日物價資料舉例

	本月份	6 月前	12 月前
鉻（躉售）， 美元／噸	7700	7040	6380
銅 美元／噸	2314	2037	1680
黃金 美元／兩	1340	251	490
鉛，精鍊錠， 美元／噸	961	1270	942
水銀 每瓶	860	300	280
鎳，精鍊 美元／噸	7031	5885	4772
鎢，粉末 美元／公斤	26.0	28.2	29.7

使將含銅鑛石打碎以及機械作業等所需能量增加，以期得到能達可予精煉的濃度。

故就長期情形來看，即可知道何種材料儲量是否豐富，以及可能發生缺乏的情形。另外，又需要知道市場對其需求量。

1.2.3 材料的消費型態

已開發國家對材料的消費方式常有一定標準。所有鋼料、混凝土、與木材消費，均用於各項建設；鋼與鋁一般情形多用於工業；銅則用於電的傳輸，聚合物用於日用品等等，而且大致形成一定比例。

例如英國進口的工程材料佔總進口額的 20%。表 1.6 所示為這些材料費用的分配情形。鐵與鋼以及煉製此等材料的成本，佔此項費用之四分之一。其次為原木與木板，仍是輕型建築廣被應用的材料。銅、銀、鋁與鎳等金屬的消耗佔去四分之一以上。包括橡皮等所有聚合物總額約佔 10% 弱。如再將鋅、鉛、錫、鎢、與汞等金屬加上，則佔進口材料總金額的 99%，故可很安全的將其他未列各種材料略去不計。