

# 工程材料

張麗君 李志偉 陳永逸 編著



# 工程材料

---

張麗君 · 李志偉 · 陳永逸 / 編著

 高立圖書

國家圖書館出版品預行編目資料

工程材料 / 張麗君、李志偉、陳永逸編著，-- 初  
版，-- 新北市：高立，民 99.09  
面；公分  
含索引

ISBN 978-986-412-774-0 (平裝)

1. 工程材料

440.3

99016314

工程材料 (書號：1016)

中華民國 101 年 10 月初版二刷

編著：張麗君 李志偉 陳永逸  
出版經理：陳靖  
企劃編輯：林士凱 林汎祺 高焜鐘 葉韋志  
產品編輯：范僑芯 賴韋中 蘇暉婷  
出版者：高立圖書有限公司  
電話：(02)22900318 郵撥：01056147  
網址：[www.gaulih.com.tw](http://www.gaulih.com.tw)  
住址：新北市新北產業園區五工三路116巷3號  
登記證：行政院新聞局局版臺業字第1423號

有著作權・翻印必究

定價：460 元整

**ISBN: 978-986-412-774-0**

# 序 言

PREFACE

由於科技發展一日千里，工程用的材料，早已不再侷限於金屬材料，加上多位老師的催促之下，著手以高立圖書相當受歡迎的「機械材料」一書的金屬材料為主體改編，並加入「擴散理論」、「陶瓷材料」、「固態電子材料」及「奈米材料」四個章節，集結而成「工程材料」。本書可提供大專院校機械工程、材料工程或相關科系作為一學期教學之用，亦可作為工業界訓練教材或相關人員進修研讀參考之用。

本書邀集三位不同領域的老師，包括海洋大學陳永逸老師、明志科大張麗君老師及李志偉老師共同編修完成，編寫期間承蒙高立圖書編輯人員協助畫圖與校對，特此致謝。本書得以付梓亦需感謝李金山、李養光、林本源、吳炳南、陳石法、張添財、蔡希杰與謝忠祐教授於「機械材料」一書所奠下的基礎。由於編者學識有限，因此書中難免會有疏漏與謬誤之處，敬請讀者不吝指正。

張麗君  
編者 李志偉 謹序於 2010 年 12 月  
陳永逸

# 目 錄

## CONTENTS

### Chapter 1 金屬及合金

1-1 金屬及合金的定義 .....	2
1-2 金屬及合金的通性 .....	4
1-3 金屬之晶粒及組織 .....	4
1-4 金屬之結晶構造 .....	7
1-5 結晶格子中的點、方向和平面 .....	11
1-6 金屬及合金之平衡圖 .....	17
本章習題 .....	42

### Chapter 2 擴 散

2-1 擴散現象與定律 .....	44
2-2 擴散方程式的解 .....	46
2-3 擴散的原子理論 .....	49
2-4 擴散係數與活化能 .....	50
本章習題 .....	51

### Chapter 3 金屬材料之塑性加工

3-1 塑性加工之種類 .....	54
3-2 彈性變形與塑性變形 .....	55
3-3 塑性變形之方式：滑動及雙晶 .....	57

3-4	差排之概念	63
3-5	加工硬化	75
3-6	加工對金屬材料之顯微組織及機械性質之影響	76
3-7	加工後退火回復、再結晶、晶粒生長及機械性質之變化	79
	本章習題	84

## Chapter 4 金屬材料之物理性質及機械性質

4-1	金屬材料之物理性質	86
4-2	金屬材料之化學性質	87
4-3	金屬材料之機械性質	90
4-4	各種機械性質之測定方法 —— 材料試驗法	90
	本章習題	123

## Chapter 5 鋼鐵材料

5-1	鐵、鋼及鑄鐵之定義	126
5-2	純鐵之變態、顯微鏡組織、機械性質及用途	126
5-3	鋼之分類	131
5-4	鋼之變態	132
5-5	Fe-C 平衡狀態圖	138
5-6	鋼之熱處理	141
5-7	工廠中常用之熱處理	154
	本章習題	174

## Chapter 6 碳鋼及合金鋼

6-1	碳 鋼	176
6-2	合金鋼	179
	本章習題	195



## Chapter 7 其他金屬及合金

7-1	銅	198
7-2	鋁及鋁合金	207
7-3	鎂及鎂合金	216
7-4	錫、鉛、鋅及其合金	220
7-5	鎳及鎳合金	223
7-6	鈦及鈦合金	225
7-7	其他金屬及合金	229
	本章習題	234

## Chapter 8 陶瓷材料

8-1	陶瓷材料的特性與化學鍵	236
8-2	陶瓷材料的種類	240
8-3	結構陶瓷	250
8-4	功能陶瓷	288
	本章習題	293

## Chapter 9 固態電子材料

9-1	電子材料簡介	296
9-2	基本電學	296
9-3	半導體材料	301
9-4	介電質材料	306
9-5	磁性材料	314
9-6	固態照明材料	332
	本章習題	337

## Chapter 10 奈米材料

10-1	前 言 .....	340
10-2	奈米與奈米材料的定義 .....	341
10-3	奈米材料的特性 .....	341
10-4	奈米材料的製造簡介 .....	343
10-5	奈米材料的展望 .....	350
	本章習題 .....	350

## 附 錄

附錄 A	切削合金工具鋼 (CNS 2965 G3059)
附錄 B	耐衝擊合金工具鋼 (CNS 2965 G3059)
附錄 C	耐磨合金工具鋼 (CNS 2965 G3059)
附錄 D	熱加工合金工具鋼 (CNS 2965 G3059)
附錄 E	高速鋼 (CNS 2904 G3050)
附錄 F	軸承用鋼 (CNS 3060)
附錄 G	彈簧鋼 (CNS 2905 G3051)

## 英中文索引



# 金屬及合金

1-1 金屬及合金的定義

1-2 金屬及合金的通性

1-3 金屬之晶粒及組織

1-4 金屬之結晶構造

1-5 結晶格子中的點、方向和平面

1-6 金屬及合金之平衡圖

本章習題



## 1-1 金屬及合金的定義

近代工程科技中，材料是決定生產技術成敗的因素，因為沒有適用的材料，再好的設計亦無法製造，而選擇了正確的材料，則可以使產品或工程省工、省時、省料，不但對降低生產成本大有裨益，而且亦可以提高品質與精度，增加其使用期限，可說是材料為一切工業產品的本體。因此，從事機械工程的人員，必須深入的瞭解機械材料的各種性質、處理法、加工法和用途，以符合設計的需求，而製造出高品質的機件。

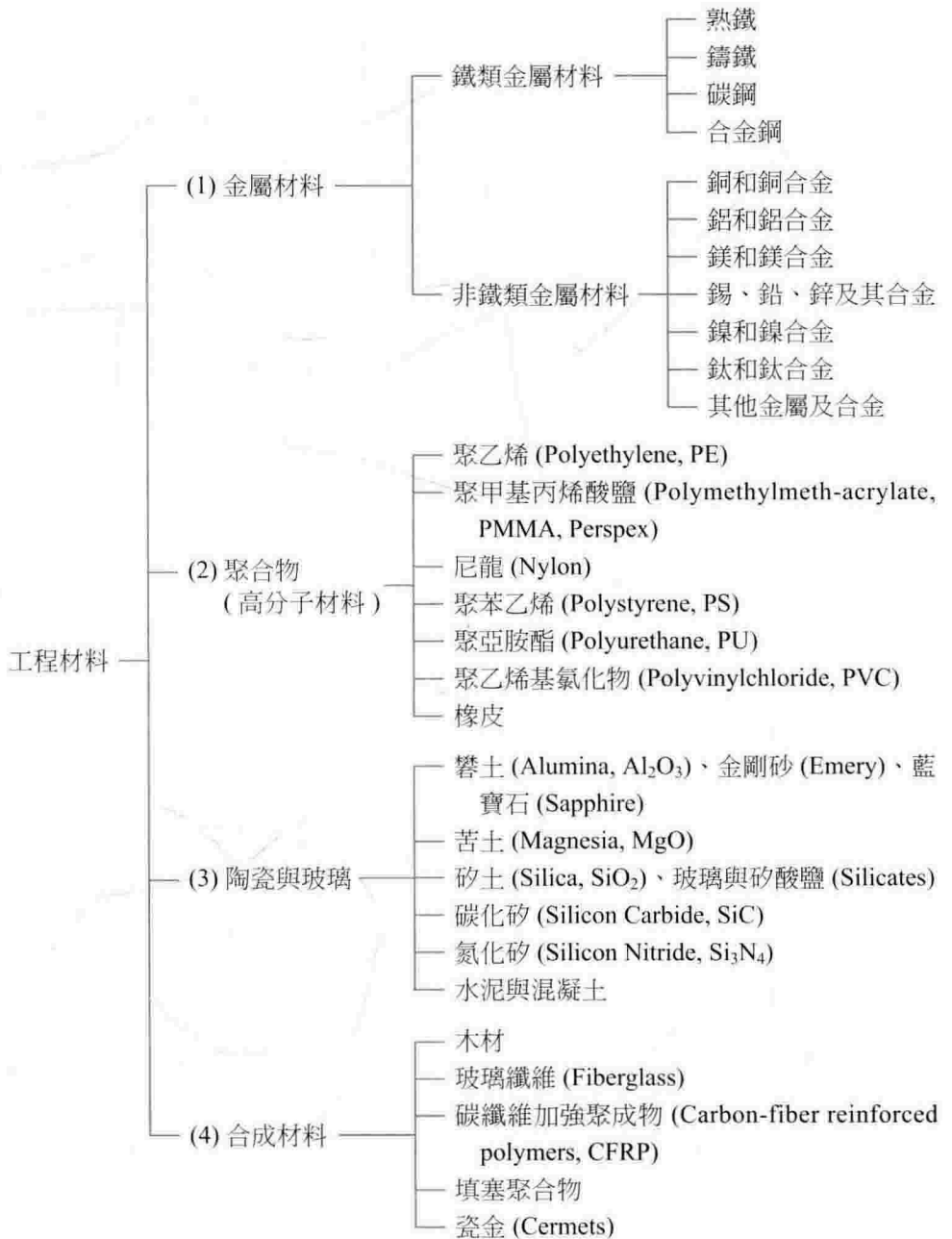
工程材料可區分為四大類：(1) 金屬材料；(2) 聚合物 (polymers) - 高分子材料；(3) 陶瓷與玻璃；(4) 合成材料。如表 1-1 所示。而機械工程所使用的機械材料，是以材料的機械性質為基本，如強度、延性、韌性等，而在以上四大類的工程材料中，以金屬材料最能滿足機械工程的需求，故實際上機械工程以金屬材料使用最多，幾近三分之二，因此，機械材料乃以金屬材料為主，而本書也以金屬材料為主要部分。

金屬材料因強度、耐久性、安全性等都比其他材料優良，而且產量多，加工性也良好，並可大量製成各種形狀的儀器和機械，用途非常廣泛。為了獲得優越的機械性質，包括高強度、延性、韌性等，一般機械工業所使用的金屬材料均以合金 (alloy) 狀態使用，少以純金屬 (pure metal) 狀態來使用。

學術上稱為金屬者係指純金屬，即由單一的元素所構成，而不含其他雜質 (impurity)。迄今，為人類所發現的元素計達 106 種，金屬元素有七十多種，其中以鐵、銅、鋁、錫、鉛、鋅、鎢、鎳、鉻、鈷、鉬、鈮、鈦、鈹、金、銀、白金、汞等最為重要，較常使用。

合金，簡單地說係由兩種或兩種以上的金屬融合而成的物質，但更廣義的合金尚包含由金屬與非金屬融合而成者，故合金的最適切定義為「一種金屬和另一種或一種以上的金屬或非金屬互相組合，而具有金屬特性的物質」。例如，黃銅為銅鋅合金，皆由金屬所組成，且具有金屬的特性。又例如，鐵和碳所成的合金稱為碳鋼 (carbon steel)，由金屬與非金屬組合，同樣具有金屬的特性。但非金屬元素含量多時，便失去金屬之性質，這時

表 1-1 工程材料



註：陶瓷係無機非金屬結晶材料，玻璃是非結晶 (amorphous) 固體。工程用玻璃大多為非金屬，但現已製得金屬玻璃 (metallic glasses) 適於工程使用。

就不能稱為合金，如鐵和氧結合而成的氧化鐵或鐵礦石。

一般金屬 (metal) 泛指純金屬與合金兩者。因為純金屬無法達到工程上所需的特性，而藉著合金的設計、加工及熱處理，才能使金屬發揮優良的性質，而滿足工程上日益嚴苛的使用條件。



## 1-2 金屬及合金的通性

日常生活中見到的金屬及合金很多，其性質隨金屬、合金之種類而不同，但凡是金屬或合金均具有下列共同的特性：

1. 不透明且具有金屬光澤。
2. 常溫時為固體且為結晶體（汞及表 1-1 附註所述之金屬玻璃除外）。
3. 易於塑性變形，富於延展性。
4. 電和熱的良導體。
5. 除鋰、鈉、鉀外，比重恆大於 1。通常比重大於 4 者稱為重金屬，如鐵、銅、鎳等；比重小於 4 者稱為輕金屬，如鋁、鎂、鈹等。
6. 氧化物或氫氧化物若能溶於水，多呈鹼性反應（但鈹、鋁、鉻等兩性元素呈兩性反應，為例外）。

純金屬添加合金元素製成合金後，其性質會發生變化，如熔點、延性、導熱度等降低，而強度、硬度、電阻、熱處理性能等增加，且耐蝕性、磁性亦會發生變化。亦即純金屬配製成合金後，機械、物理及化學性質均可獲得改善，而滿足所需的特性。



## 1-3 金屬之晶粒及組織

金屬是由原子構成，而原子本身的構造可決定金屬的各種性質，金屬材料的各個晶粒 (grain) 的成分、粗細、形狀、方向、相 (phase) 和其分佈的組合，稱為金屬的組織 (structure)。金屬材料的各種性質，不但因化學成分而不同，也因其組織而互異。欲瞭解金屬的組織，須先知道金屬由液態凝固時所發生的現象，此種觀察得藉助於光學顯微鏡或電子顯微鏡。

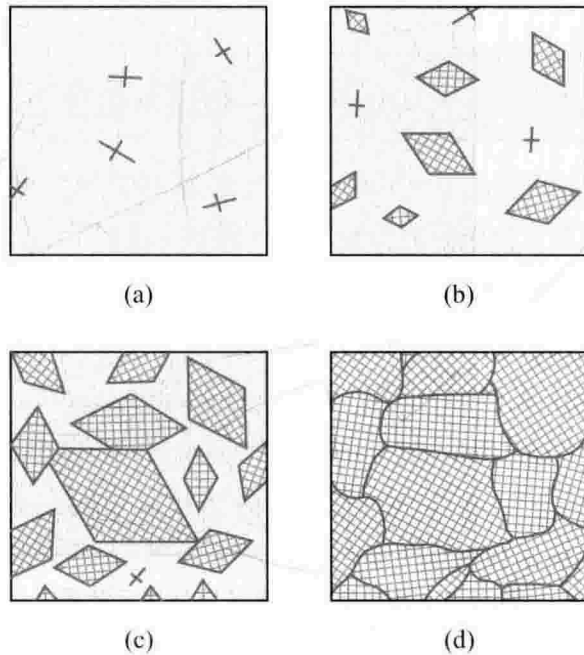


圖 1-1 金屬結晶化過程示意圖

固體金屬之原子排列是有規則的，這些原子以平衡位置為中心不停地在熱振動。對固體金屬加熱時，各原子的能量增加，其振動之振幅變大，致使鄰接原子互相碰撞，而使原子不再停留在原來之平衡位置。此時原子的移動率很大，而且漫無規律，為非晶態 (amorphous)，金屬變為液體。溫度下降時，原子的動能降低而逐漸安定下來，準備凝固。凝固時，液體內生成無數的微細晶核 (nucleus)，金屬原子不斷地向各晶核聚集，且以一定的規則排列起來，這種現象稱為結晶化 (crystallization)。圖 1-1 顯示金屬結晶化的過程。圖 (a) 顯示熔液內有微細晶核生成，特別注意圖示之晶核具有「方向性」，長劃方向代表其易於晶化的軸向。圖 (b) 顯示金屬原子不斷凝集於各晶核上，沿其軸向生成較大的晶粒 (crystal grain)。圖 (c) 顯示晶粒由於生長的結果而互相接觸。圖 (d) 為完全凝固後的情形，所有的晶粒互相接觸在一起，每一個晶粒仍保存其初結晶時 (晶核) 的軸向，這種晶粒可由電子顯微鏡清楚地觀察到。晶粒與晶粒交接之處形成晶界 (grain boundary)，如圖 1-2 所示。一般脆性金屬材料斷裂時，在斷口處亦可看到很多的微細粒子，此即晶粒的表徵。

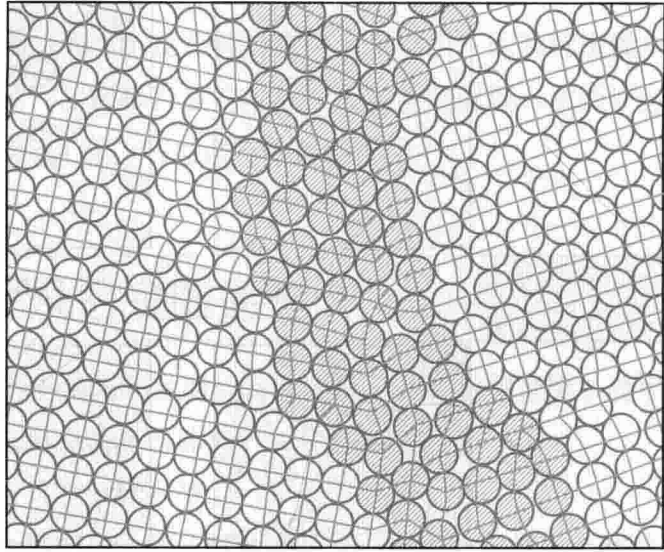


圖 1-2 晶粒界面處原子排列之示意圖 ( 斜線的原子群構成粒界 )，注意格子的扭曲情形。

一般金屬材料是由許多晶粒所構成的，此種材料叫做多晶體 (polycrystal)，而由一個晶粒所構成的材料則稱為單晶體 (single crystal)。大部分工程用材料以多晶體為主，而單晶體只適合於高溫下的特殊場合使用，如渦輪葉片。在室溫下以多晶材料具有較高的強度，且晶粒的大小隨加熱或冷卻之條件而異，一般約為  $10 \sim 100 \mu\text{m}$ 。

典型的晶粒形狀有下列幾種：

1. **多邊形晶粒 (Equiaxed Grains)**：其沿各方向之尺寸相當，如圖 1-1(d) 所示。
2. **針狀晶粒 (Acicular Grains)**：外觀如針形，常在硬化的金屬內發現，如麻田散鐵。
3. **柱狀晶粒 (Columnar Grains)**：為柱形、其晶軸垂直於較外的表面，常見於鑄件外部。
4. **樹枝狀晶粒 (Dendritic Grains)**：為具有許多分枝的晶粒。
5. **伸長型晶粒 (Elongated Grains)**：為多邊形晶粒受到軋延後，沿軋延方向伸長變形而成的晶粒。
6. **破碎晶粒 (Fragmented Grains)**：為多邊形晶粒受錘鍛加工而破碎的晶粒碎片。



## 1-4 金屬之結晶構造

金屬在固體狀態皆為結晶體 (crystal)，其晶粒形狀可由金相實驗 (metallographic test) 得知。所謂結晶體係指構成物體之原子或分子，在物體內具有一定規則的排列，此種規則排列無法由物體外形看出，因為原子為非常小的粒子，雖然目前高倍率電子顯微鏡已可觀察到原子，現在仍利用 X 線繞射法 (X-ray diffraction method)、電子繞射法 (electron diffraction method) 或中子繞射法 (neutron diffraction method) 來間接地測出結晶構造 (crystal structure)，一般以 X 線繞射法最常用。

取一個晶粒用 X 線繞射法加以分析時，由繞射所得的圖樣 (pattern) 可知在晶粒內之原子是依照一定的規則排列的，亦即原子按照結晶格子 (crystal lattice) 排列。結晶格子是一種假想之格子，可代表晶體內原子在空間之配置情形，因此又稱為空間格子 (space lattice)。將結晶格子細分至最小程度而仍能代表整個結晶格子之特質者稱為單位格子 (unit lattice) 或單位晶胞 (unit cell)，而整個結晶格子可視為由完全相同之單位晶胞堆積構築而成，如圖 1-3 所示。

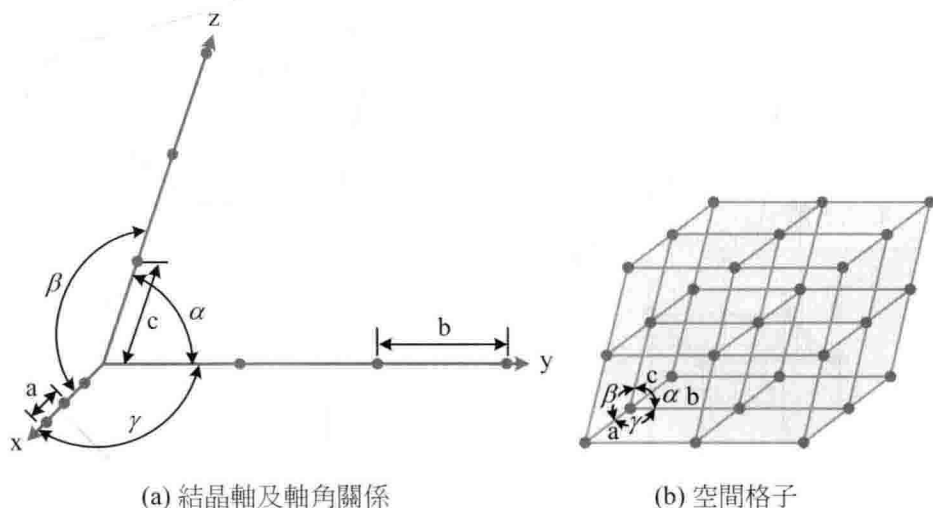


圖 1-3 空間格子及單位晶胞

金屬中主要的結晶格子型式有 14 種，這些格子稱為布拉菲格子 (Bravais lattices)，如圖 1-4 所示。又可歸納為七大結晶系統，其軸長、軸角之特徵如表 1-2 所示。

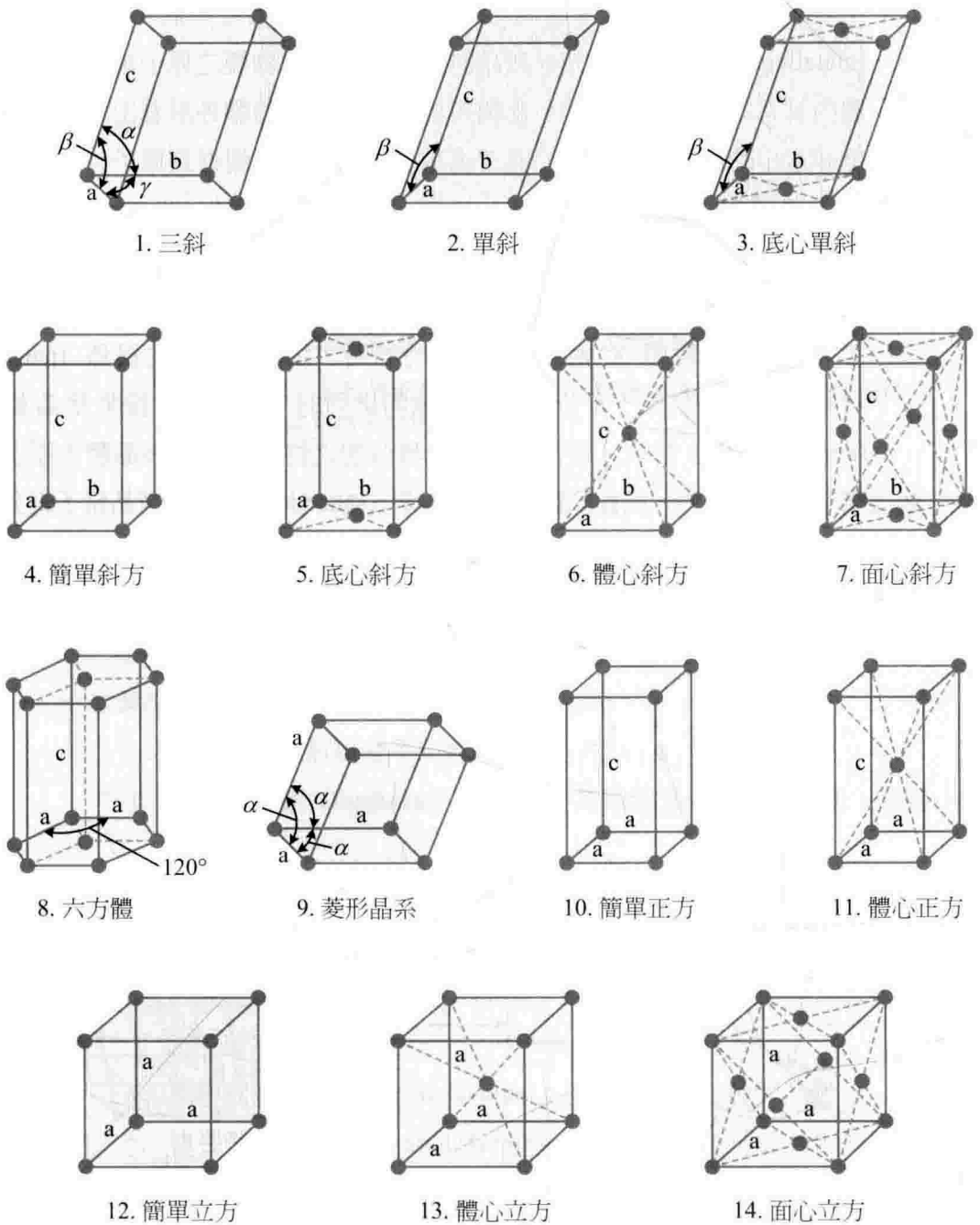


圖 1-4 14 種空間 ( 或布拉菲 ) 格子的單位晶胞

表 1-2 七種晶系的性質

結構	軸	軸間夾角
立方	$a_1 = a_2 = a_3$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
正方	$a_1 = a_2 \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
斜方	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
六方	$a_1 = a_2 \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$
菱形	$a_1 = a_2 = a_3$	$\alpha = \beta = \gamma < 120^\circ$
單斜	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90^\circ < \beta$
三斜	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma$

最常見而且很重要的金屬結晶格子有下列三種：

### 1. 體心立方格子 (Body-Centered Cubic Lattices, 簡寫為 BCC)

體心立方結晶構造之原子排列成立方體，包括每一角隅各有一個原子及立方體中心有一個原子，如圖 1-5(a) 所示，而 (b) 圖所示為其單位晶胞。體心立方結晶構造中，每一格子點均可為角隅之原子或體心之原子，如圖 1-5(c) 所示，因此每個格子點均為對等的。屬於體心立方格子之金屬有  $\alpha$ -Fe、Ti、W、Mo、Nb、K、Na、V、Cr、Zr 等。體心立方結構，其性質強度高而缺乏延性。

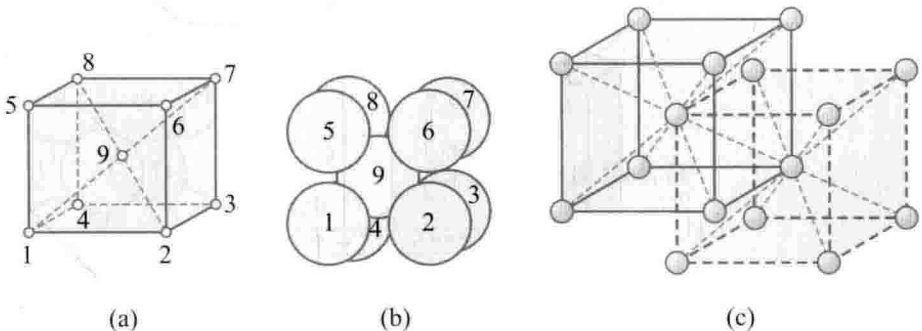


圖 1-5 體心立方格子