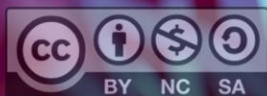


工程材料 性質基礎

楊侑倫、尤尚邦、林哲宇、林懷恩 / 編

Fundamentals of Engineering Materials Properties



本書緣起

國立臺北科技大學 教務處 教學資源中心

開放教科書 (Open Textbook, OTB) 具免費、數位化、自由混搭等特性，不僅拓展了創新教學與行動學習的彈性空間，也拉高了教科書客製化的可行性。

本校自 109 年起推動「[OTB 導入課堂](#)」計畫，旨在帶動師生認識及應用 OTB。隨著計畫推展，我們汲取教學現場的經驗與回饋，於 113 年另闢 OTB 應用路徑，推出「[OTB 社群共構](#)」計畫，獎勵教師自組社群，選用多元 OTB 資源，結合自身教學成果，共同打造貼近在地教學情境的客製化教科書，並實際導入課堂。

本書《工程材料性質基礎》即誕生於此計畫背景下，由本校機械工程系林懷恩、楊侑倫、林哲宇與尤尚邦等四位教師所組立「工程材料性質教材研發社群」共同編撰。四位老師長期教授材料相關課程，涵蓋《工程材料》、《材料力學》、《機電材料學》與《奈米科技概論》等領域。由於授課內容高度關聯，且皆有教材適性化的需求，遂決定整合教學經驗，攜手開發可跨課程共用的 OTB。

本書內容以七本 OTB 為參考基礎，發展出四大主題模組，包括：「工程材料簡介與材料機械性質介紹」、「原子結構、鍵結與結晶」、「合金與相變化」、以及「陶瓷、高分子與化合物」。全書經中文轉化與改寫，更貼近本校實際教學情境與學生學習需求。

本書的完成，不僅實踐了教科書客製化的理念，也為教學現場提供一種更靈活、開放、且具在地特色的教材選擇，更為本校推動開放教育資源 (OER) 的實質轉化歷程，寫下了重要一頁。

引用之 OTB

01 : Introduction to Aerospace Structures and Materials

02 : Mechanics and Science of Materials

03 : Materials Science

04 : Inorganic Chemistry

05 : Mechanics of Materials

06 : Basic Principles of Organic Chemistry

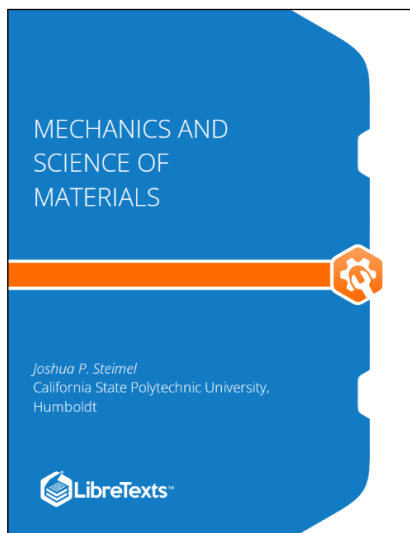
07 : Polymer Chemistry

01 : [Introduction to Aerospace Structures and Materials](#) (2018)



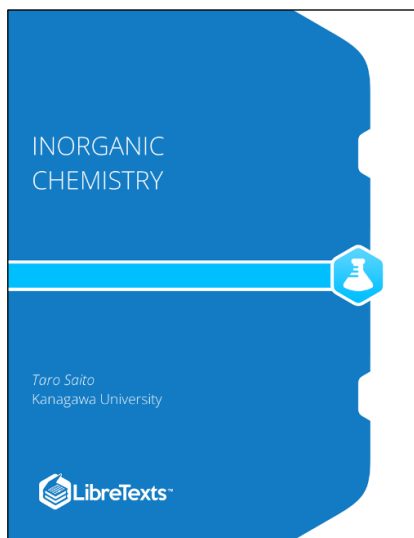
- 作者：René Alderliesten
- 學科領域：材料科學
- 內容概述：
本篇 OTB 介紹航空結構與材料之基礎知識，內容涵蓋材料物理特性、環境耐久性、材料類型與製造技術等基礎，並探討機體結構設計、負載分析、及認證程序。書中強調材料選擇對結構強度與剛性之影響，並討論疲勞與耐久性，及結構接點之設計與應用。
- CC 授權：CC BY-NC-SA 4.0
- 應用頁數範圍：Chapter1~10

02 : [Mechanics and Science of Materials](#) (2024)



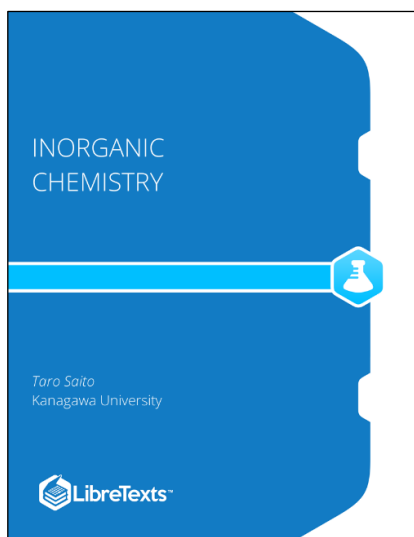
- 作者：Joshua Paul Steimel
- 學科領域：材料科學
- 內容概述：
- 本篇 OTB 介紹材料力學與材料科學的基本概念。內容涵蓋材料的結構、鍵結、缺陷、與相圖，並探討材料的機械行為、電化學、及腐蝕現象。書中深入分析晶體結構、非晶材料、與液晶的性質，並講解聚合物與軟物質的行為。此外，還探討了材料的電、磁與光特性，強調材料科學在工程應用中的重要性。
- CC 授權：CC BY-NC-SA 4.0
- 應用頁數範圍：Chapter1~6 & Chapter 8

03 : [Materials Science](#) (2022)



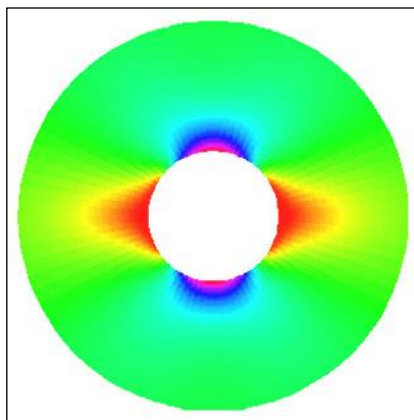
- 作者：University of Cambridge (社群共編)
- 學科領域：材料科學
- 內容概述：
本篇 OTB 內容涵蓋材料的結構、性質、製程、與性能。其中提及晶體結構、缺陷、相圖、材料機械行為、及電磁性質等材料特徵，並探討聚合物、陶瓷、金屬與複合材料的基本性質。
- CC 授權：CC BY-NC-SA 2.0 & 4.0
- 應用頁數範圍：TLP Library I-II

04 : [Inorganic Chemistry](#)



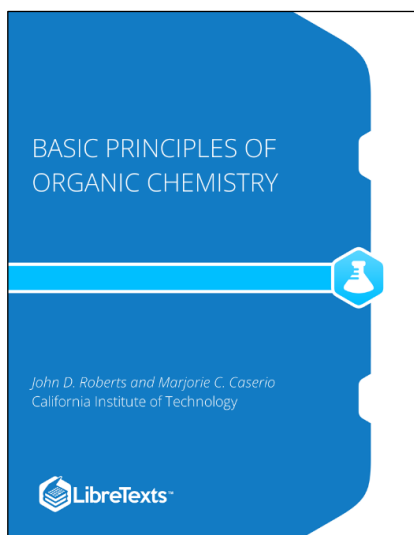
- 作者：Taro Saito
- 學科領域：材料科學
- 內容概述：
本篇 OTB 內容涵蓋元素的起源與週期性、鍵結與結構、反應機制、及非金屬與金屬元素的化學性質。內容從基礎元素電子結構與鍵結類型開始，逐步探討各族元素及過渡金屬的特性與反應，並延伸至稀土元素。書中也提及電化學及氧化還原反應等基礎化學知識，提供無機化學全方位的知識框架，並藉由練習題強化理解與應用。
- CC 授權：CC BY-NC-SA 3.0
- 應用頁數範圍：Chapter 2

05 : [Mechanics of Materials](#)(1999)



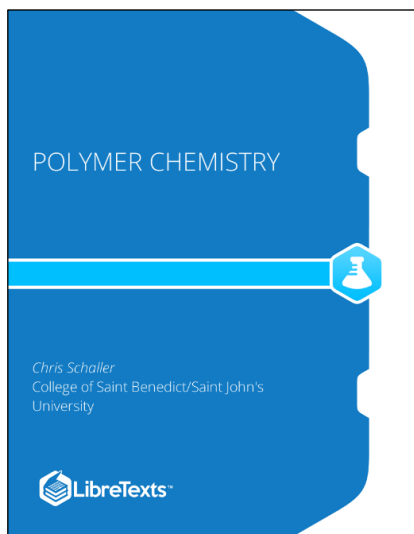
- 作者：David Roylance
- 學科領域：材料科學
- 內容概述：
本篇 OTB 以「加工 - 結構 - 性質 - 性能」作為核心框架，介紹固體力學的基本知識。
- CC 授權：CC BY-NC-SA 4.0
- 應用頁數範圍：Chapter1~24

06 : [Basic Principles of Organic Chemistry](#) (1977)



- 作者：John D. Roberts and Marjorie C. Caserio
- 學科領域：材料科學
- 內容概述：
本篇 OTB 介紹有機化學的基礎概念，包括共價鍵、分子結構、反應機制、與官能基的性質與反應。教材涵蓋烷烴、烯烴、炔烴、芳香族化合物、及碳水化合物，並深入探討立體化學與有機合成策略。內容強調反應能量圖與中間體的分析，幫助學生理解反應歷程。
- CC 授權：CC BY-NC-SA 4.0
- 應用頁數範圍：Chapter 2

07 : [Polymer Chemistry](#) (2024)



- 作者：Chris Schaller
- 學科領域：材料科學
- 內容概述：
- 本篇OTB介紹高分子化學的基礎與進階知識。內容涵蓋單體與聚合物的種類與結構、聚合反應機制（如自由基聚合、離子聚合和配位聚合）、及動力學與熱力學特性。此外，也探討聚合物的分子量、黏度、流變行為、玻璃轉移與結晶度等性質。教材強調聚合物的合成方法及其在材料科學與工程領域的應用，適合作為高分子化學或材料科學課程的核心參考。
- CC 授權：CC BY-NC 3.0
- 應用頁數範圍：Chapter4

作者群介紹

本書由參與國立臺北科技大學「開放式教科書 (OTB) 社群共構計畫」之「工程材料性質教材研發社群」共同撰寫。作者群長期致力於材料相關課程之教學與教材開發，具備紮實學術背景與豐富教學實務經驗。



- 林懷恩 副教授 | 國立臺北科技大學 機械工程系
學經歷：東京工業大學材料系 博士
研究方向：電化學工程、薄膜製程、材料腐蝕與防治、能源材料(太陽能水分解、超級電容、鋰離子電池)、電阻式記憶體(RRAM)、化學感測器



- 楊侑倫 助理教授 | 國立臺北科技大學 機械工程系
學經歷：英國倫敦帝國理工學院博士
研究方向：金屬成形、材料機械性質、有限元素分析、材料微結構模擬



- 林哲宇 副教授 | 國立臺北科技大學 機械工程系
學經歷：日本東京大學材料工學博士
研究方向：固態超音波銲接、異質高強度鋼/輕合金銲接製造、雷射銲接、鋰電池封裝、非傳統加工技術、表面處理、銲接界面顯微結構設計



- 尤尚邦 助理教授 | 國立臺北科技大學 機械工程系
學經歷：國立臺灣師範大學機電工程學系 博士
研究方向：積層弧銲製造、金屬微成型、銲接工程、奈米材料製備

目錄

Chapter 1 工程材料簡介與材料機械性質介紹	1
Section 1-1 工程材料簡介	2
(一) 本單元之學習成果	2
(二) 工程材料的主要類別	2
(三) 材料選用的基本要求	3
(四) 重要機械性質和物理性質	4
(五) 某些特定應用材料的例子	4
(六) 結論	5
(七) 習題	5
(八) 參考資料	5
Section 1-2 拉伸應力-應變行為	6
(一) 本單元之學習成果	6
(二) 本單元之重要性	6
(三) 拉伸測試的基本過程	8
(四) 應力和應變的定義	9
(五) 應力-應變曲線中的各階段	10

（六）蒲松比	11
（七）真實應力與真實應變	11
（八）進一步理解拉伸行為	12
（九）應用場景	12
（十）補充知識	12
（十一）總結	12
（十二）習題	13
（十三）資料來源	13
Section 1-3：真實應力-應變行為與硬度	14
（一）本單元之學習成果	14
（二）應力-應變行為概述	14
（三）工程應力和應變的限制	14
（四）真實應力與真實應變的概念	15
（五）真實應力-應變曲線的物理意義	15
（六）頸縮現象	16
（七）材料的硬度及其測量	16
（八）常見的硬度測試方法	17
（九）硬度與抗拉強度的關係	17

(十) 材料的加工硬化行為	17
(十一) 材料硬度的應用與局限性	18
(十二) 硬度與耐磨性	18
(十三) 總結	19
(十四) 習題	19
(十五) 資料來源	19
Section 1-4 : 韌性與潛變阻力	20
(一) 本單元之學習成果	20
(二) 應力-應變行為概述	20
(三) 韌性與強度的區別	20
(四) 潛變概述	22
(五) 總結	25
(六) 資料來源	25
Section 1-5 : 疲勞阻力	26
(一) 本單元之學習成果	26
(二) 疲勞的定義與意義	26
(三) 疲勞的基本機理	26
(四) 疲勞應力的表示方法	27

(五) S-N 曲線 (應力-壽命曲線)	28
(六) S-N 曲線圖示	28
(七) 疲勞壽命的影響因素	29
(八) 疲勞的設計考慮	29
(九) 補充知識：低循環疲勞與高循環疲勞	30
(十) 結論	30
(十一) 習題	30
(十二) 資料來源	31
Chapter 2 原子結構、鍵結、與結晶構造	33
Section 2-1 鍵結	34
(一) 本單元之學習成果	34
(二) 本單元之重要性	34
(三) 概述	35
(四) 原子鍵結	36
(五) 工程材料中的鍵結	40
(六) 資料來源	41
Section 2-2 晶體結構	42
(一) 本單元之學習成果	42

(二) 本單元之重要性	42
(三) 晶體形態介紹	42
(四) 金屬晶體結構	45
(五) 單位晶胞的使用	46
(六) 資料來源	47
Section 2-3 晶體材料的變形	48
(一) 本單元之學習成果	48
(二) 本單元之重要性	48
(三) 本單元之重要性	48
(四) 滑移系統	50
(五) 資料來源	52
Section 2-4 晶體結構中的缺陷	53
(一) 本單元之學習成果	53
(二) 晶體破壞與缺陷	53
(三) 差排、滑移與強化	55
(四) 資料來源	58
Chapter 3 合金與相變化	59
Section 3-1 合金和強化	60

(一) 本單元之學習成果.....	60
(二) 本單元之重要性	60
(三) 工程材料的主要類別	60
(四) 平衡相圖	65
(五) 確定雙相區域中每相的量.....	67
(六) 資料來源	70
Section 3-2 強化和非平衡條件	71
(一) 本單元之學習成果.....	71
(二) 本單元之重要性	71
(三) 固溶強化	71
(四) 析出強化	75
(五) 參考來源	78
Section 3-3 金屬-鐵合金.....	79
(一) 本單元之學習成果.....	79
(二) 本單元之重要性	79
(三) 含鐵合金的分類	79
(四) Fe-C 合金的微觀結構	81
(五) 鑄鐵.....	85

(六) 範例問題	86
(七) 參考來源	86
Section 3-4 金屬熱處理	87
(一) 本單元之學習成果	87
(二) 本單元之重要性	87
(三) 非平衡相和結構	87
(四) 熱處理	89
(五) 機械性質	92
(六) 參考來源	92
Chapter 4 陶瓷、高分子與化合物	93
Section 4-1 陶瓷	94
(一) 本單元之學習成果	94
(二) 本單元之重要性	94
(三) 什麼是陶瓷 ?	94
(四) 晶體結構	95
(五) 陶瓷的機械行為	95
(六) 測量陶瓷的「拉伸」性質	96
(七) 其他特性	96

(八) 現代陶瓷的製造	97
(九) 應用	97
(十) 參考資料	98
Section 4-2 聚合物-結構和拉伸性能	99
(一) 本單元之學習成果	99
(二) 本單元之重要性	99
(三) 聚合物的分類	99
(四) 結構	100
(五) 本單元之重要性	104
(六) 聚合物的拉伸性能	105
(七) 參考資料	109
Section 4-3 化合物	110
(一) 本單元之學習成果	110
(二) 本單元之重要性	110
(三) 本單元之重要性	110
(四) 聚合物基複合材料的性能	114
(五) 結構複合材料	118
(六) 結構材料要求	119

(七) 典型應用	120
(八) 參考資料	121

圖目次

圖 1、工程材料主要類別示意圖 (Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International license)	3
圖 2、延性材料的應力-應變曲線 (GNU Free Documentation License).....	9
圖 3、真實應力-應變曲線與工程應力-應變曲線(CC BY-SA 3.0)	16
圖 4、延性材料的應力-應變曲線 (GNU Free Documentation License)...	21
圖 5、潛變曲線中的主要階段(CC BY-SA 3.0).....	23
圖 6、S-N 曲線(CC BY-SA 3.0)	28
圖 7、最密堆積平面	44
圖 8、六方最密堆積	45
圖 9、六方最密堆積	54
圖 10、六方最密堆積.....	54
圖 11、晶界分隔的相鄰晶體.....	55
圖 12、晶格中的小原子或顆粒	57
圖 13、(a)透過溶劑原子的替換進行合金化； (b)透過將溶質原子添加到溶劑原子間の間隙進行合金化.....	62
圖 14、(a)溶劑 Cu 和溶質 Ni； (b)形成具有完全溶解度的固溶體	63
圖 15、糖/水之相圖	64

圖 16、(a)100%Cu (b)50%Cu · 50%Ni (c)100%Ni.....	65
圖 17、Cu-Ni 合金系統的平衡相圖	65
圖 18、(a)100%鉛；(b)50%鉛 · 50%錫；(c)100%錫之冷卻溫度圖	66
圖 19、共晶系統(如鉛-錫)的平衡相圖.....	66
圖 20、共晶系統(如鉛-錫)的平衡相圖.....	67
圖 21、慢速冷卻共晶鉛-錫合金時的微結構.....	67
圖 22、L 及 S 相之平衡比例	68
圖 23、L 及 S 相之兩相平衡圖.....	69
圖 24、L 及 S 相之兩相平衡圖.....	70
圖 25、鉛-錫合金之平衡圖.....	70
圖 26、差排存在引起的應變場	72
圖 27、(i-a)較小的溶質原子施加拉伸晶格應變並聚集到差排的壓縮應變場(i-b)； (ii-a)較大的溶質原子施加壓縮晶格應變並聚集到差排的拉伸應變場(ii-b)	73
圖 28、0.1% 抗拉強度 (MPa) 隨 Cu 合金中溶質質量百分比的變化	74
圖 29、Al-Cu 合金系統的相平衡圖.....	75
圖 30、含 96%Al-4%Cu 合金的慢速冷卻與時間-顯微結構圖	76
圖 31、含 96%Al · 4%Cu 合金的析出強化溫度與時間圖	77
圖 32、含 96%Al · 4%Cu 合金的析出強化溫度與時間圖	77

圖 33、含 96%Al · 4%Cu 合金的析出強化溫度與時間圖	78
圖 34、(a)建築廣泛使用之低碳鋼；(b)用於軸承之高碳鋼 (找尋免費開源素材)	79
圖 35、鐵合金的分類.....	80
圖 36、共晶和共析點的 Fe-C 平衡相圖	82
圖 37、顯示共析鋼冷卻時形成的微觀結構的 Fe-C 平衡相圖	83
圖 38、顯示共析鋼冷卻時形成的微觀結構的 Fe-C 平衡相圖	83
圖 39、在緩慢冷卻亞共析鋼過程中獲得的顯微結構	84
圖 40、在緩慢冷卻超共析鋼過程中獲得的顯微結構	85
圖 41、(a)亞共析鋼的顯微結構；(b)過共析鋼的顯微結構示意圖	85
圖 42、(a)白口鑄鐵；(b)灰口鑄鐵；(c)球墨鑄鐵 之示意圖.....	86
圖 43、(a)粗波來鐵；(b)細波來鐵；(c)變韌鐵之示意圖	88
圖 44、(a)麻田散鐵；(b)回火麻田散鐵之示意圖.....	89
圖 45、共析鋼的 TTT 圖	90
圖 46、TTT 圖上的熱處理	90
圖 47、MS 和 MF 溫度隨碳含量的變化.....	91
圖 48、TTT 圖中的鋼的淬火與回火.....	91
圖 49、一個 NaCl 的單位晶胞。其晶格是面心立方	95

圖 50、陶瓷材料應用範例	98
圖 51、聚合物的典型應用	100
圖 52、聚合物之形成過程	100
圖 53、聚合物材料交鏈情形示意圖	101
圖 54、聚合物材料之非晶結構形式	102
圖 55、聚合物材料之有序結構示意圖	102
圖 56、聚合物材料之有序結構示意圖	103
圖 57、聚合物材料中受拉伸應力作用前後之長鏈結構變化示意圖	106
圖 58、聚合物材料受拉伸應力作用之應力-應變曲線圖	106
圖 59、聚合物材料受拉伸應力作用而降伏後之鏈結構變形示意圖	107
圖 60、聚合物材料受拉伸應力作用之變形示意圖	108
圖 61、聚合物材料受拉伸應力作用，長鏈結構接觸緊密化之示意圖	108
圖 62、聚合物材料之應變軟化示意圖	109
圖 63、聚合物材料之應變軟化示意圖	111
圖 64、纖維金屬增強聚合物複合材料層之範例，及成分和層板的相關應力 應變行為	117
圖 65、複合材料的典型應用範例	121

表目次

表 1、鍵結類型	40
表 2、不同晶格結構的滑移系統和變形類型總結	52

Chapter 1

工程材料簡介與材料機械性質介紹

Section 1-1 工程材料簡介

Section 1-2 拉伸應力-應變行為

Section 1-3 真實應力-應變行為與硬度

Section 1-4 韌性與潛變阻力

Section 1-5 疲勞阻力

Section 1-1 工程材料簡介

(一) 本單元之學習成果

在學習完本單元內容時，你應該能夠：

1. 說出四類主要的工程材料，並能針對不同類別之材料舉出一些範例。
2. 列出工程材料的各種重要機械性質和物理性質，並能夠辨識這些性質可以於哪些重要領域應用。
3. 根據簡單的材料選擇標準，為一些常見應用選擇合適的材料。

(二) 工程材料的主要類別

工程材料的主要類別可根據其成分和性能進行劃分。這些類別包括金屬與合金、塑膠（聚合物）、陶瓷、玻璃、及複合材料。這些分類源於對原子間鍵結之考量，針對不同類別之材料性質將在後續課程中進行詳細討論。

1. 金屬與合金：金屬材料因其良好的強度、延展性、和導電性，在工程應用中扮演重要角色。鋼是建築行業的基礎材料，而鋁因其輕量化特性被廣泛應用於航空航天領域。合金的使用可進一步提高材料的性能，使其能夠滿足特定的需求。
2. 塑膠（聚合物）：塑膠材料具有良好的成型性和耐受化學腐蝕之特性，這些性質使其在消費性產品之包裝中獲得廣泛應用。聚乙烯和聚丙烯等塑膠因其輕便和多樣的加工方法而受到應用上之青睞。因多數塑膠的加工成本相對較低，使其成為許多日常用品的首選材料。
3. 陶瓷與玻璃：陶瓷材料以其高硬度和耐高溫性著稱，常用於電子絕緣材料和耐磨部件。陶瓷的脆性限制其在部分應用中的使用，但在高溫環境中，陶瓷材料具有優良的穩定性，因而經常被使用。玻璃在透明度和化學穩定性方面皆具有高度優勢，其被廣泛應用於容器和光學產品中。

4. 複合材料：複合材料為透過將不同材料之特性結合在一起，以提供更優的性能。碳纖維增強塑膠因其高強度和輕量化特性而在航空航天和運動器材中被廣泛應用。此類材料的設計能夠根據需求量身定制，提供更多的設計彈性。

這些材料類別的定義及其特性將在後續課程中進一步探討。

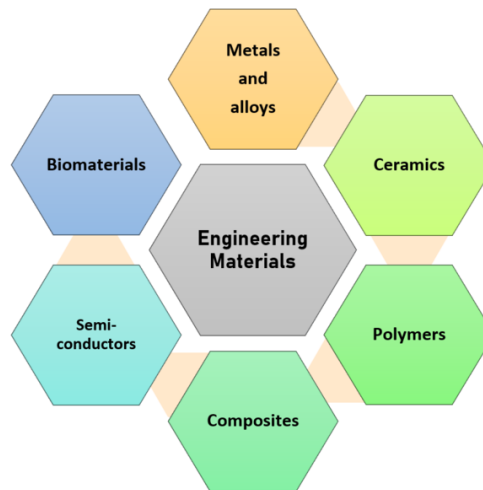


圖 1、工程材料主要類別示意圖

(Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International license)

(三) 材料選用的基本要求

在工程設計中，材料的選擇至關重要，因為工程師所設計和製造的產品均由一種或多種材料構成。選擇材料時，需要考慮材料的傳遞能力，即材料必須能夠傳遞所需的力，並且在載荷作用下不應發生破裂、過度變形或磨損。鑒於上述設計原則，工程師需具備能選擇擁有最佳性質組合的材料之能力，以滿足特定用途的需求。

例如，建築結構中的材料必須能夠承受風力和自重，而電子產品的材料需要具備良好的導電性和絕緣性。材料的選擇不僅影響產品的功能，還可能對其安全性和壽命產生深遠的影響。

(四) 重要機械性質和物理性質

作為工程師，我們需要了解材料的特定性質，這些性質將賦予產品所需的性能。我們稱這些性質為材料的機械性質和物理性質（或化學性質）。材料的性質與形狀和尺寸無關，其為材料的一項特徵。以下列舉一些主要工程設計上的需求及其相對應的材料性質。

在最簡單的形式下，材料設計涉及選擇具有最佳所需性質值的材料。一般應用中須同時考量多個材料性質，因此，在進行材料設計與選擇前需要在這些需求間找到平衡。機械性質與物理性質的結合，例如強度與重量比（強度/密度），在航空航天、汽車和運動應用中尤其重要。

一些關鍵的機械和物理性質包括：

1. 強度：材料承受應力而不破壞的能力。這是設計中最重要指標之一，通常以抗拉強度或抗壓強度表示。
2. 硬度：材料抵抗局部變形或壓痕生成的能力。材料的硬度決定其在摩擦和磨損環境下的耐久性。
3. 延展性：材料在破裂前拉伸的能力。具備高延展性的材料在受力後能夠產生較大的變形，這對於許多結構應用至關重要。
4. 導熱性：材料傳導熱量的能力，對於熱管理和電子元件的散熱設計具有關鍵影響。
5. 導電率：材料傳導電流的能力，這對於電機工程應用和電子產品的性能評估至關重要。

(五) 某些特定應用材料的例子

在材料選擇中，通常會面臨多種材料可以滿足某一特定功能的情況。然而，對於特定的應用，通常會有一種最佳材料。這將根據機械性質、物理性質、及其製造難易度進行選擇。成本為實務應用中須考量的最重要條件。

舉例而言，製造盛裝碳酸飲料的容器時，可能會用到鋼、鋁、和塑膠等多種材料。為何會有這麼多材料選擇？不同材料的特性使其在滿足特定要求方面各有優劣。例如，塑膠 PET 因其輕便、易於生產和回收的特性而被廣泛應用於碳酸飲料瓶中，而鋼和鋁則因其優良的強度和耐久性而常用於瓶蓋。

在選擇材料時，除須考量性能和成本外，還需考慮到環境影響和材料的永續性。這些因素在當今的設計中變得越來越重要，尤其是在環保和資源管理方面的考量。

(六) 結論

總體而言，工程材料在設計和製造過程中扮演重要角色。瞭解材料的基本概念、分類、性能、及其在不同應用中的重要性，將有助於工程師在設計過程中做出更合適的材料選擇。隨著科技的進步，工程材料的種類和性能將不斷演進，未來的工程材料將在更廣泛的應用中發揮重要作用。

(七) 習題

1. 請列出四類主要的工程材料，並為每一類舉出至少一個例子。
2. 解釋為什麼複合材料在航太應用和運動器材中具有廣泛的應用，並說明其性能特徵。
3. 解釋在建築結構和電子產品中，分別需要考量哪些材料性質，並舉例說明。

(八) 參考資料

- 01 : Introduction to Aerospace Structures and Materials
<https://open.umn.edu/opentextbooks/textbooks/introduction-to-aerospace-structures-and-materials>

Section 1-2 拉伸應力-應變行為

(一) 本單元之學習成果

在學習完本單元內容時，你應該能夠：

1. 明白進行拉伸測試之原因。
2. 定義工程應力、工程應變、楊氏係數、蒲松比、降伏強度、應力、抗拉強度、延展性、彈性與塑性變形、加工硬化。
3. 了解如何進行拉伸測試，並能夠分析原始數據以獲得材料的拉伸性質。
4. 了解應力-應變曲線中各個階段的意義。

(二) 本單元之重要性

拉伸測試是理解材料在實際應用中機械行為的基礎。其提供關於材料強度、剛性、延展性、及韌性之關鍵數據。無論是結構工程、航空航天、或電子產品，拉伸測試都被廣泛用於選擇和評估材料。拉伸測試的結果可幫助我們預測材料在受力過程中的表現，從而確保結構的穩定性和安全性。

1. 為什麼進行拉伸測試？

拉伸測試不僅是為了獲取數據，它還能揭示材料內部的微觀機理。隨著應力的施加，材料內的晶格結構、位錯運動、裂紋生成等過程都會體現在應力-應變曲線中。這些微觀變化最終決定材料的宏觀行為，如強度和延展性。拉伸測試還能幫助我們理解材料在實際應用中的潛在失效模式。例如，具有較高延展性的材料在拉伸過程中會出現明顯的頸縮現象，此現象意味它們能夠承受較大的塑性變形而不斷裂。這類材料適合應用於需要吸收能量的結構中，如汽車碰撞吸能裝置。

2. 工程應力與應變的實際應用

實際工程中，工程應力和工程應變是設計和評估結構的重要參數。例如，

在建築結構中，鋼筋和混凝土都需要進行拉伸測試，以確定它們能夠承受的最大負荷。透過分析應力-應變曲線，我們可以知道材料在何時會發生塑性變形，並根據這些數據確定結構的安全係數。此外，工程應力和應變還可幫助設計者進行失效分析。若材料在使用中出現斷裂，設計者可透過逆向分析應力-應變數據，找出材料失效的根本原因。這對於提高材料的設計和製造質量非常重要。

3. 彈性與塑性變形的區別

在應力-應變曲線中，彈性變形與塑性變形的區別至關重要。彈性變形為可恢復的變形，當應力被移除時，材料會回到其原始形狀。而塑性變形則是不可逆的，當材料超過降服點後，即使應力移除，材料仍會保持變形的狀態。此差異對於結構的設計尤為重要。例如彈簧或汽車懸掛系統，材料須在彈性區域內工作，以確保其長期使用不會發生永久變形。而對於一些一次性使用的結構元件，例如汽車碰撞時的緩衝區，材料需要具有高塑性，能夠在極端應力條件下發生大變形，從而吸收能量並保護乘客。

4. 加工硬化的實際意義

加工硬化是金屬材料在拉伸過程中發生的典型現象。在塑性變形階段，錯位運動使材料內部的結構變得更加緊密、並提高材料的強度。此現象在金屬加工中非常有用，例如冷軋鋼材和鍛造零件的強度可透過加工硬化顯著提高。然而，加工硬化也會帶來材料延展性降低的問題。在實際設計中，須在強度和延展性間做出平衡。例如，在飛機結構中，外殼材料需要高強度以抵抗空氣動力負荷，但同時也需要一定的延展性應對飛行過程中的振動和壓力變化。

5. 真實應力與應變的深入分析

隨材料進入頸縮階段，橫截面積顯著減少，此時的應力和應變變得更加複雜。使用工程應力和應變已經不足以精確描述此過程，因此須使用真實應力和真實應變以更好地表徵材料的行為。真實應力考慮瞬時橫截面積的變化，使得我們可更精確計算材料在頸縮階段的應力分佈。真實應變則透過對應變的對數處理反映大變形的行為。這些真實數據在材料科學研究中具有重要的意義，特別是在設計高應變率應用中，如金屬成型和爆炸防護材料。

6. 材料延展性與斷裂韌性

延展性是材料在破裂前能夠產生塑性變形的能力。對於許多應用，材料的延展性是至關重要的，因為延展性可防止材料在受到突發應力時脆性斷裂。例如，在地震多發地區，建築材料需要具有高延展性，以確保在地震作用下，建築結構能夠承受一定的變形而不會立即斷裂。另一方面，斷裂韌性則是指材料在出現裂紋後仍能抵抗裂紋擴展的能力。高斷裂韌性的材料在裂紋產生後不會立即失效，這對於飛機、橋樑等關鍵結構至關重要。

7. 實際案例分析

- (1) 飛機結構材料：飛機的機翼和機身需同時具備高強度和延展性，以抵抗飛行過程中的空氣動力負荷。使用拉伸測試可確定飛機材料在極端應力條件下的表現，從而設計出安全可靠的飛行器。
- (2) 橋樑建築材料：橋樑結構的鋼材和混凝土在設計時須進行拉伸測試，以確定其最大承載能力和應變極限。這些數據可幫助工程師設計出能夠承受長期使用和極端天氣條件的橋樑。

8. 補充知識點：

- (1) 材料的各向異性：在實際應用中，材料性能可能在不同方向上有所不同。此現象稱為各向異性。例如，冷軋鋼板的強度在軋製方向上更高，而垂直於軋製方向的延展性則更低。在設計過程中，需要考慮材料的各向異性，以避免不必要的失效風險。
- (2) 時間效應（潛變）：材料在長時間負荷作用下會發生潛變變形，意味材料即使在應力低於降伏強度的情況下，也會隨時間逐漸變形。這對於高溫應用（如渦輪機葉片）尤其重要，拉伸測試結果須結合潛變行為進行綜合分析。

（三）拉伸測試的基本過程

拉伸測試是一種在控制的條件下將樣品拉伸至斷裂的測試方法，通常需要配備拉伸測試機（通過夾具固定樣品），及負荷感測器和位移感測器以測量施加的力和變形。

1. 測試準備：

- (1) 樣品的橫截面通常為圓形或矩形，並且中間部分均勻以確保應力均勻分佈。
- (2) 標距 (L_0) 是樣品上被觀察的部分長度，用於計算應變。

2. 施加拉力：

- (1) 逐步施加力，並在整個過程中測量樣品的變形量（即伸長量）。

3. 記錄數據：

1. 測試機記錄負荷（力）和標距區域的延伸量，可用來計算應力和應變。

（四）應力和應變的定義

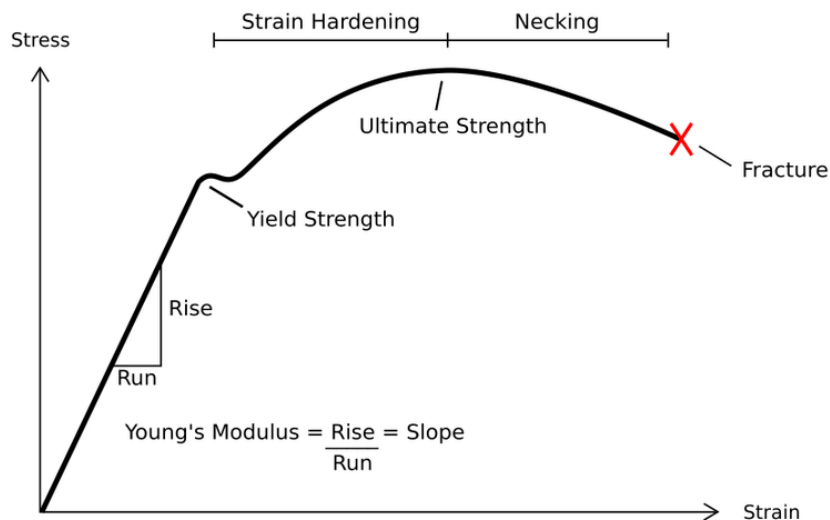


圖 2、延性材料的應力-應變曲線
(GNU Free Documentation License)

圖 2 展示延性材料在拉伸過程中的應力與應變關係。圖中包括彈性區域、降伏點、塑性區域、抗拉強度（UTS）及斷裂點等關鍵階段，說明材料從彈性變形到塑性變形直至最終斷裂的過程。

1. 工程應力 σ ：工程應力表示在拉伸過程中施加的力除以樣品的初始橫截面積：

$$\sigma = \frac{P}{A_0}$$

其中， P 是施加的力， A_0 是樣品的初始橫截面積。

2. 工程應變 ϵ ：工程應變表示標距長度的變化與初始標距長度的比值：

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

其中， ΔL 是標距長度的延伸， L_0 是初始標距長度。

(五) 應力-應變曲線中的各階段

1. 彈性區域：

- (1) 在應力-應變曲線的初始部分，應力與應變成正比，且材料變形是可恢復的（彈性變形）。

- (2) 此段區域的斜率稱為楊氏係數 E ，其表現材料的剛性：

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

- (3) 若應力不超過彈性區域，材料卸載後會回到原始形狀。

2. 屈服區域：

- (1) 當應力超過彈性極限後，材料進入屈服區域。意味材料開始產生不可恢復的塑性變形。

- (2) 降伏強度 σ_y 是材料開始產生顯著塑性變形時的應力值。

3. 塑性區域：

- (1) 當超過降伏強度後，應力-應變曲線進入塑性區域。在此階段中，材料變形量顯著增加，但應力增加的速度較慢。

- (2) 加工硬化：儘管材料正在塑性變形，內部位錯的增多使得繼續變形變得更困難，造成加工硬化。

4. 抗拉強度 (UTS):

- (1) 抗拉強度 σ_{UTS} 是應力-應變曲線的峰值，代表材料能夠承受的最大應力。
- (2) 在達抗拉強度後，材料內部的應力集中會導致局部頸縮，最終導致斷裂。

5. 斷裂點：

- (1) 在斷裂點，材料無法承受更多的變形，並最終破壞。

(六) 蒲松比

當材料在縱向拉伸時，其橫截面積會減小。蒲松比 ν 用來描述橫向應變與縱向應變間的關係：

$$\nu = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_x}$$

不同材料的典型蒲松比數值：

- 金屬：約為 0.3；陶瓷：約為 0.2；聚合物：約為 0.35-0.4。

(七) 真實應力與真實應變

當材料進入頸縮階段後，工程應力和應變不再準確，這時需要使用真實應力和真實應變描述材料的行為。

1. 真實應力：

$$\sigma_T = \frac{P}{A}$$

其中， A 是材料在頸縮階段的瞬時橫截面積。

2. 真實應變：

$$\epsilon_T = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right)$$

真實應力和真實應變能更準確描述材料在大變形階段的行為。

(八) 進一步理解拉伸行為

工程設計中，材料強度、延展性及剛性是至關重要的。設計師透過拉伸測試確定材料在各種應力條件下的表現，從而確保結構在實際使用中的安全性和穩定性。

(九) 應用場景

1. 建築材料：如鋼材和混凝土的強度和延展性決定建築結構的穩定性。
2. 航空航天：如鋁合金和複合材料的拉伸強度對飛機結構的輕量化設計至關重要。
3. 醫療器械：如人工關節的材料，須具有優異的機械強度和耐磨性。

(十) 補充知識

1. 楊氏係數的應用：楊氏係數反映材料抵抗彈性變形的能力。在設計中，高楊氏模量的材料更適合用於需要剛性支撐的結構中。
2. 蒲松比的應用：蒲松比幫助我們理解材料在不同方向上的變形行為，尤其在多軸應力狀態下的材料性能。

(十一) 總結

拉伸應力-應變行為揭示材料從彈性變形到塑性變形直至最終斷裂的過程。透過這些測試，我們可全面評估材料的機械性能，並根據實際應用要求選擇合適的材料。

(十二) 習題

1. 定義以下術語：工程應力、工程應變、楊氏係數、蒲松比、降伏強度、抗拉強度。
2. 解釋彈性變形與塑性變形的區別，並舉例說明每種變形的實際應用。
3. 描述曲線中的彈性區域、降伏區域、塑性區域和斷裂點，並說明每個階段的意義。
4. 抗拉強度 (UTS) 和降伏強度有何不同？在實際應用中如何利用這些數據進行設計？

(十三) 資料來源

- 01 : Introduction to Aerospace Structures and Materials
<https://open.umn.edu/opentextbooks/textbooks/introduction-to-aerospace-structures-and-materials>
- 02 : Mechanics and Science of Materials
<https://commons.libretexts.org/book/eng-97896>
- 03 : Materials Science
https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Materials_Science

Section 1-3：真實應力-應變行為與硬度

(一) 本單元之學習成果

在學習完本單元內容時，你應該能夠：

1. 描述拉伸測試中的頸縮現象。
2. 定義真實應力和真實應變，並解釋它們與工程應力和應變的關係。
3. 了解應力-應變曲線中的不同區段以及各個區段的物理意義。
4. 說明硬度的定義及其測量方法，並探討硬度與抗拉強度之間的關係。

(二) 應力-應變行為概述

在材料科學和工程中，應力-應變行為是描述材料在不同應力條件下的變形特徵的核心概念。當施加外力時，材料會經歷不同的變形過程，這些變形過程可分為彈性變形和塑性變形。在初始階段，應力和應變間的關係是線性的，表明材料在此階段經歷的是彈性變形。當應力超過材料的降伏點時進入塑性變形階段，此時應變與應力不再以線性增加，材料會發生永久變形。

(三) 工程應力和應變的限制

在材料拉伸測試中，工程應力和工程應變通常被用來描述材料在受力過程中的行為。然而，當材料進入塑性區域後，特別是在出現頸縮現象時，工程應力和應變變得不再準確。這是因為工程應力和應變是基於樣品的初始橫截面積和標距長度計算的，隨著頸縮的出現，材料的實際橫截面積和標距長度會發生變化，導致計算結果與材料的實際應力和應變不符。

(四) 真實應力與真實應變的概念

為更精確描述材料在塑性區域中的行為，科學家和工程師引入真實應力和真實應變的概念。這些參數考慮材料在拉伸過程中的橫截面積和標距長度的變化，從而提供更準確的數據。

1. 真實應力 σ_T 是材料在瞬時橫截面積 A 上承受的負荷 P ：

$$\sigma_T = \frac{P}{A}$$

意味隨頸縮出現，橫截面積減小，真實應力會比工程應力高。

2. 真實應變 ϵ_T 是考慮標距長度變化後的應變。真實應變可表示為：

$$\epsilon_T = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) = \ln(1 + \epsilon)$$

其中， L 是瞬時標距長度， L_0 是初始標距長度。

(五) 真實應力-應變曲線的物理意義

當我們使用真實應力和真實應變描述材料行為時，應力-應變曲線會提供更準確的數據，特別是在大變形情況下。真實應力-應變曲線能夠顯示材料的加工硬化行為。在塑性變形區域內，隨著材料的變形，錯位密度增加導致材料的強度增強，此現象稱為加工硬化。

加工硬化的發生使得材料在塑性區域中的應變硬化指數 n 增加，意味材料在進一步變形時會需要更大的應力。此行為在真實應力-應變曲線中表現為應力隨應變的上升，直到最終材料破壞。

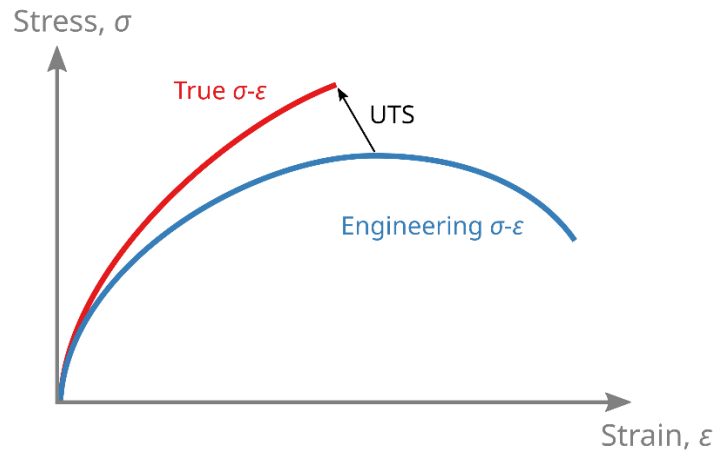


圖 3、真實應力-應變曲線與工程應力-應變曲線(CC BY-SA 3.0)

此圖展示真實應力-應變 (True σ - ϵ) 與工程應力-應變 (Engineering σ - ϵ) 間的差異。紅色曲線代表真實應力-應變，藍色曲線代表工程應力-應變。在材料進入頸縮和塑性變形後，真實應力會隨應變增大，與工程應力在這些區域中的行為不同。

(六) 頸縮現象

頸縮是拉伸測試中的一個關鍵現象，特別是在接近材料斷裂的過程中。當材料進入塑性區域且應力超過抗拉強度時，材料的某個區域會發生局部變形，導致該區域的橫截面積顯著減小，此現象稱為頸縮。頸縮代表材料即將失效，並且材料的應變集中在頸縮區域，導致最終的斷裂。在工程應力-應變曲線中，頸縮的出現使得應力看起來降低，但這只是因計算時仍然使用初始橫截面積，而不是瞬時橫截面積。然而，當使用真實應力和應變時，我們可更準確地描述材料的行為。

(七) 材料的硬度及其測量

硬度是材料抵抗局部塑性變形的能力，是另一個重要的機械性質。硬度測試通常用來評估材料的表面強度，並且在工程中具有廣泛的應用。硬度測試可幫助我們了解材料在受力過程中的耐磨性和抗壓性能。

(八) 常見的硬度測試方法

1. 布氏硬度測試：布氏硬度測試使用一個鋼球壓入材料表面，並測量壓痕的直徑計算硬度。布氏硬度值 HB 定義為：

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

其中， P 是施加的負荷， D 是鋼球的直徑， d 是壓痕直徑。

2. 洛氏硬度測試：洛氏硬度測試是透過使用鑽石壓頭或鋼球壓頭，測量壓痕的深度計算硬度。洛氏硬度測試速度快且容易操作，因此在工業中應用廣泛。洛氏硬度值直接從儀器的刻度盤上讀取。
3. 維氏硬度測試：維氏硬度測試使用鑽石四棱錐壓頭，測量壓痕的對角線長度計算硬度。維氏硬度試驗能夠測量非常小的壓痕，因此特別適合於測試薄層材料和微小樣品。

(九) 硬度與抗拉強度的關係

硬度與材料的抗拉強度通常呈現一定的線性關係，意味我們可透過硬度測試的結果估算材料的抗拉強度。對於許多金屬材料，抗拉強度 σ_{UTS} 和布氏硬度 HB 間的關係可表示為：

$$\sigma_{UTS} \approx 3.45 \times HB$$

此關係表明硬度值較高的材料通常也具有較高的抗拉強度，適合於承受高應力的應用。

(十) 材料的加工硬化行為

加工硬化，亦稱為應變硬化，是指金屬材料在塑性變形過程中，隨變形量增加、材料強度逐漸提高的現象。這是由於錯位密度增加及錯位運動受阻礙導致。在真實應力-應變曲線中，加工硬化會表現為應力的增加。

加工硬化在金屬加工過程中具有重要意義。例如，冷軋鋼板和冷拉鋁棒的強度可透過加工硬化顯著提高。在這些加工過程中，材料經歷大量塑性變形，使得其內部結構發生了變化，錯位密度增加，從而提高材料強度。

然而，加工硬化也會導致材料的延展性降低。意味雖然材料的強度增加，但它變得更加脆弱，容易在應力集中處發生斷裂。因此，在實際設計中，工程師需在加工硬化的強度增益和延展性損失之間做出平衡。例如，在飛機結構中，材料需要具有足夠強度抵抗飛行過程中的應力，但同時也需保持一定的延展性吸收飛行中的震動和衝擊。

（十一）材料硬度的應用與局限性

硬度測試被廣泛應用於材料科學和工程中，特別是在材料選擇和質量控制方面。然而，硬度測試也有其侷限性。首先，硬度值只反映材料的表面性質，並不能全面反映材料的整體性能。其次，硬度測試結果可能受到試樣表面狀態、測試環境等因素的影響，因此需要謹慎解釋測試結果。在實際應用中，硬度測試通常與其他機械性能測試（如拉伸測試、彎曲測試）結合使用，以獲得更全面的材料性能數據。例如，在汽車製造中，車身結構材料的硬度測試可幫助工程師確定材料的耐磨性，而拉伸測試則能提供材料在碰撞時的能量吸收能力數據。

（十二）硬度與耐磨性

材料的硬度與其耐磨性密切相關。硬度越高的材料通常在摩擦、滑動和衝擊載荷下的耐磨性越好。例如，在齒輪、軸承和刀具等應用中，材料的硬度是關鍵指標。高硬度材料能夠在高速運轉中保持穩定，延長使用壽命。然而，硬度過高的材料也會變得脆弱，容易產生裂紋。因此，在設計耐磨零件時，工程師須考慮硬度和韌性間的平衡。某些應用中，常透過表面熱處理（如淬火或滲碳）提高材料表面硬度，進而保持內部的延展性，以獲得理想的綜合性能。

(十三) 總結

真實應力-應變行為和硬度是材料科學中的兩個重要概念。真實應力和應變能夠更準確地描述材料在大變形過程中的行為，特別是在塑性變形階段。硬度測試則提供關於材料表面性質的關鍵數據，並且與材料的抗拉強度密切相關。在實際應用中，這兩者可以結合使用，以更全面評估材料的機械性能。

(十四) 習題

1. 定義真實應力和真實應變，並說明它們與工程應力和工程應變的主要差異。
2. 解釋為什麼在頸縮階段，真實應力和應變更能準確描述材料行為。
3. 什麼是加工硬化？它如何在真實應力-應變曲線中表現出來？
4. 為什麼加工硬化在金屬加工過程中非常重要？舉例說明其應用。

(十五) 資料來源

- 01 : Introduction to Aerospace Structures and Materials
<https://open.umn.edu/opentextbooks/textbooks/introduction-to-aerospace-structures-and-materials>
- 02 : Mechanics and Science of Materials
<https://commons.libretexts.org/book/eng-97896>
- 03 : Materials Science
https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Materials_Science

Section 1-4：韌性與潛變阻力

(一) 本單元之學習成果

在學習完本單元內容時，你應該能夠：

1. 認識韌性與強度的區別，並了解如何進行韌性測試。
2. 描述潛變行為及其對材料在高溫應用中的影響。
3. 了解材料在長期應力作用下的變形機制，並能夠解釋潛變的不同階段及其意義。

(二) 應力-應變行為概述

韌性 (Toughness) 是材料在受力過程中吸收能量而不斷裂的能力。韌性可透過應力-應變曲線下的面積衡量，該面積代表材料在拉伸測試過程中吸收的能量。

$$\text{韌性} = \int_0^{\epsilon_f} \sigma(\epsilon) d\epsilon$$

其中， $\sigma(\epsilon)$ 是應力， ϵ_f 是材料的斷裂應變。積分代表材料在斷裂前吸收的總能量。

(三) 韌性與強度的區別

強度與韌性是材料性能中的兩個不同參數。強度表示材料承受應力的能力，強度高的材料在應力作用下不容易破壞。而韌性則表示材料吸收能量的能力，具有高韌性的材料在承受衝擊載荷時不會發生脆性斷裂。

1. 韌性測試方法

- (1) 拉伸測試：在拉伸測試中，韌性可透過應力-應變曲線下的面積表示。積分描述材料在發生塑性變形並最終斷裂前吸收的能量。

$$\text{公式： } U = \int_0^{\epsilon_f} \sigma(\epsilon) d\epsilon$$

- (2) 衝擊測試：

- 夏比衝擊試驗和愛氏衝擊試驗是常見的衝擊測試方法。這些測試測量材料在高速撞擊下吸收的能量。
- 試驗過程包括用重錘撞擊樣品並測量其斷裂時吸收的能量。韌性材料吸收更多能量，表現出較強的抗脆性斷裂能力。

2. 應力-應變曲線中的韌性表現

圖 4(應力-應變曲線) 展示材料的彈性區和塑性區，整個曲線下的面積代表材料的韌性：

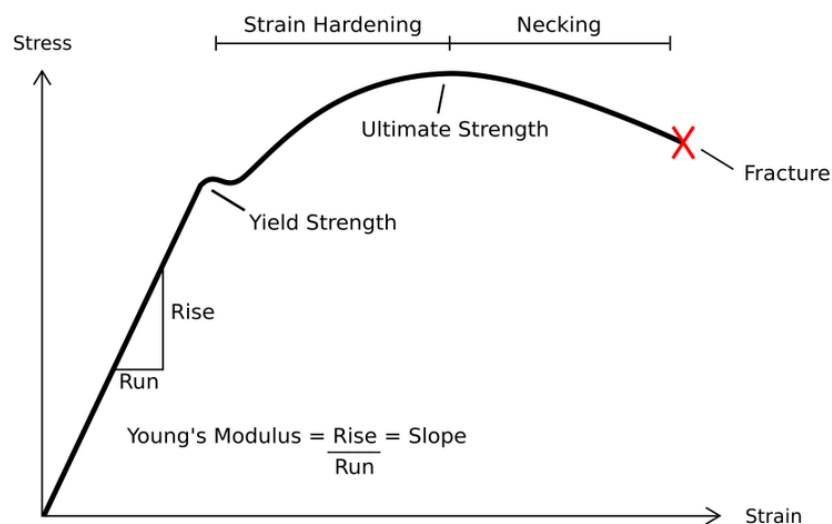


圖 4、延性材料的應力-應變曲線
(GNU Free Documentation License)

應力-應變曲線：

- 在彈性區 (線性部分)，應力與應變成正比，斜率為楊氏係數。
- 在塑性區，曲線逐漸平坦，表示材料開始塑性變形。材料進入降伏點，進一步變形會消耗能量，直到最終斷裂。

(四) 潛變概述

潛變 (Creep) 是材料在持續應力下隨時間逐漸變形的現象，特別是在高溫條件下發生。潛變行為通常分為三個階段，材料的變形隨時間逐漸累積。

潛變的變形速率受應力和溫度影響，並遵循以下潛變速率公式：

$$\dot{\epsilon} = A\sigma^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

其中：

- $\dot{\epsilon}$ 是穩態潛變速率
- Q 是潛變活化能
- A 是材料常數
- R 是氣體常數
- σ 是應力
- T 是絕對溫度
- n 是應變硬化指數

1. 潛變的三個階段

- (1) 初始潛變階段：在初始階段，潛變速率較高，隨時間逐漸減小。此階段表現為材料內部組織的重排。

數學表示：

$$\frac{d\epsilon}{dt} = C\sigma^m t^{-\beta}$$

其中 C 、 m 和 β 是材料常數，表示變形速率隨應力和時間的變化。

- (2) 穩態潛變階段：潛變過程的主要階段，變形速率保持穩定，且與時間無關。

穩態潛變速率公式：

$$\dot{\epsilon}_{ss} = A\sigma^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

- (3) 加速潛變階段：在最終階段，潛變速率急劇增加，材料內部的損傷迅速累積，最終導致材料破壞。此階段往往伴隨裂紋擴展和晶界滑移。

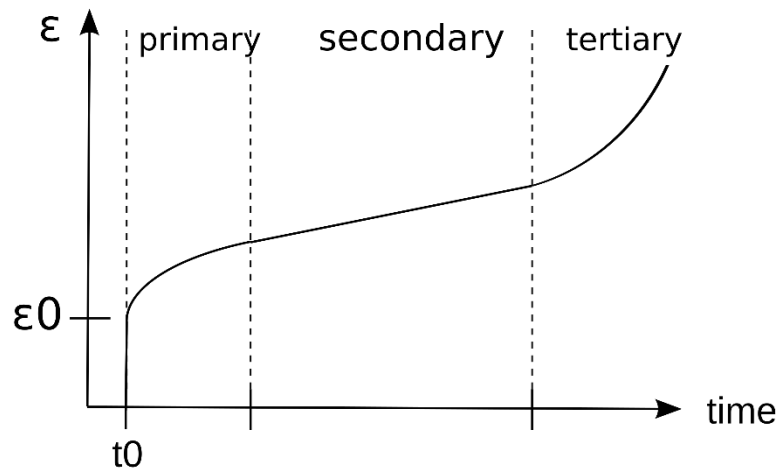


圖 5、潛變曲線中的主要階段(CC BY-SA 3.0)

2. 潛變曲線

潛變曲線顯示材料在恆定應力和溫度條件下的應變隨時間的變化。潛變曲線分為三個階段，曲線斜率表示不同階段的潛變速率：

- (1) 初始潛變階段：曲線斜率逐漸減小。
- (2) 穩態潛變階段：曲線呈線性趨勢，表示應變速率穩定。
- (3) 加速潛變階段：曲線斜率迅速增加，最終導致材料斷裂。

3. 潛變的應用與影響

- (1) 渦輪機葉片：渦輪機葉片在高溫條件下長期運行，潛變是決定其壽命的關鍵因素。這些葉片需要選用耐高溫潛變的材料，如鎳基合金。
- (2) 核電站設備：核電站中的材料長期處於高溫和高壓環境下，潛變行為對

其使用壽命有著重大影響。工程師需要仔細選擇抗潛變材料，以確保設備穩定運行。

- (3) 飛機發動機：飛機發動機的燃燒室和渦輪部件暴露在極高溫和應力條件下，潛變會影響這些部件的長期性能。為防止潛變失效，發動機材料通常經過強化處理，以提高其耐潛變性能。

4. 潛變的應用與影響

- (1) 恆溫潛變測試：在恆定溫度下施加固定應力，並記錄隨時間的變形數據，為一種常見的潛變測試方法。
- (2) 應力鬆弛測試：施加一個初始應變，並測量隨著時間的應力變化，以評估材料在長期應變條件下的潛變行為。

5. 潛變斷裂機制

潛變過程中，材料內部的微觀結構發生顯著變化，這些變化包括：

- (1) 晶界滑移：晶粒間的界面發生相對位移，導致材料的整體變形。
- (2) 孔洞生成：材料內部的孔洞開始生成和擴展，進一步加速潛變斷裂。
- (3) 微裂紋擴展：裂紋在應力集中區逐漸擴展，最終導致材料的斷裂。

潛變斷裂是材料長期暴露於高溫和應力下的結果，潛變壽命測試能夠幫助工程師設計出更具潛變抗力的材料，並預測材料的使用壽命。

6. 防止潛變失效的方法

- (1) 選擇高潛變抗力材料：鎳基高溫合金、陶瓷基複合材料等材料具有良好的抗潛變能力，這些材料在高溫條件下仍能保持穩定性能。
- (2) 降低應力水平：透過結構設計減少材料所承受的應力，可顯著延長潛變壽命。優化結構形狀和負荷分佈，減少應力集中。
- (3) 使用熱屏障塗層：在材料表面施加熱屏障塗層，可減少材料暴露於高溫環境中的時間，從而降低潛變速率。這種技術在渦輪機葉片和燃燒室中應用廣泛。

(五) 總結

潛變和韌性是影響材料在高溫和高應力環境中長期性能的關鍵因素。韌性決定材料在承受衝擊載荷時的抗脆性斷裂能力，而潛變則描述材料在長期應力作用下的逐漸變形行為。透過精確測量潛變速率、潛變壽命及應變-時間曲線，工程師可設計出更具耐久性和抗潛變能力的材料。

(六) 資料來源

- 01 : Introduction to Aerospace Structures and Materials
<https://open.umn.edu/opentextbooks/textbooks/introduction-to-aerospace-structures-and-materials>
- 02 : Mechanics and Science of Materials
<https://commons.libretexts.org/book/eng-97896>
- 03 : Materials Science
https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Materials_Science

Section 1-5：疲勞阻力

(一) 本單元之學習成果

在學習完本單元內容時，你應該能夠：

1. 了解疲勞失效的基本機制及其對材料性能的影響。
2. 解釋應力範圍、平均應力、應力幅值和應力比的概念。
3. 探討疲勞強度與壽命的關係，並描述 S-N 曲線的應用。
4. 探討影響疲勞壽命的因素，並了解防止疲勞失效的設計策略。

(二) 疲勞的定義與意義

疲勞 (Fatigue) 是指材料在反覆或交變應力作用下，應力水平低於其靜態抗拉強度時發生破壞的現象。疲勞失效在工程結構中非常常見，尤其是在承受動態負荷的零件中，如飛機機翼、汽車車軸、橋樑等。這些結構的疲勞失效可能導致嚴重的事故，因此在設計中需要特別注意疲勞阻力。

疲勞失效的危險之處在於材料可能在應力低於其靜態強度的情況下斷裂。意味即使設計中考慮材料的強度極限，動態載荷下仍可能發生疲勞破壞。因此，疲勞測試和分析是工程設計中不可或缺的一部分。

(三) 疲勞的基本機理

疲勞失效的基本機制包括三個主要階段：

1. 裂紋起始：在材料表面或內部缺陷處，由於應力集中，微裂紋開始形成。此過程通常發生在應力較大的區域，如尖角、孔洞或表面不規則處。
2. 裂紋擴展：隨載荷的反覆作用，裂紋逐漸擴展。每個應力循環都會使裂紋進一步增長，裂紋擴展速率與應力幅值相關。裂紋在擴展過程中消耗材料的韌性，並逐漸減少材料的有效承載橫截面積。

3. 最終失效：當裂紋擴展到某一臨界點時，材料剩餘的橫截面不足以承受外部應力，導致突然斷裂。這通常是快速的、脆性的斷裂過程。

(四) 疲勞應力的表示方法

在疲勞分析中，應力的表示方法包括應力幅值、平均應力和應力比，這些參數幫助我們描述交變應力的特徵：

1. 應力範圍 $\Delta\sigma$ ：

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$$

應力範圍表示交變應力中最大應力與最小應力的差值。

2. 應力幅值 σ_a ：

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2}$$

應力幅值是應力範圍的一半，表示應力在一個完整循環中的變化幅度。

3. 平均應力 σ_m ：

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

平均應力是交變應力中最大應力和最小應力的平均值。平均應力對疲勞壽命有重要影響，較高的平均應力會縮短疲勞壽命。

4. 應力比 R ：

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$

應力比是最小應力與最大應力的比值。應力比反映應力的對稱性。例如，當 $R = -1$ 時，應力是完全反轉的（最大應力與最小應力大小相等，但方向相反）；當 $R = 0$ 時，應力是單向的，即應力在拉伸或壓縮中變化，但沒有反轉。

(五) S-N 曲線 (應力-壽命曲線)

S-N 曲線 (應力-壽命曲線) 是疲勞分析中的一個重要工具，用來描述材料在不同應力幅值下的疲勞壽命。S-N 曲線將應力幅值 σ_a 與疲勞壽命 N (循環次數)進行對數坐標繪製，顯示材料在特定應力水平下能夠承受的載荷循環次數。

通常，S-N 曲線顯示疲勞壽命隨應力幅值的增大而迅速減少的趨勢。在許多材料中，存在一個臨界應力水平 (稱為疲勞極限)，低於這一應力水平，材料不會發生疲勞失效。這種材料在無限次數的循環應力下仍然能夠保持完整。

(六) S-N 曲線圖示

一張典型的 S-N 曲線如下所示，展示材料的疲勞壽命隨應力幅值的變化。在圖 6 中，橫軸表示循環次數 N (對數坐標)，縱軸表示應力幅值 σ_a 。曲線揭示應力幅值與疲勞壽命間的非線性關係。圖 6 展示疲勞壽命隨應力幅值的下降趨勢。曲線下方的部分代表高應力幅值對應的低循環次數，而靠近橫軸的部分表示低應力幅值對應的高循環次數。

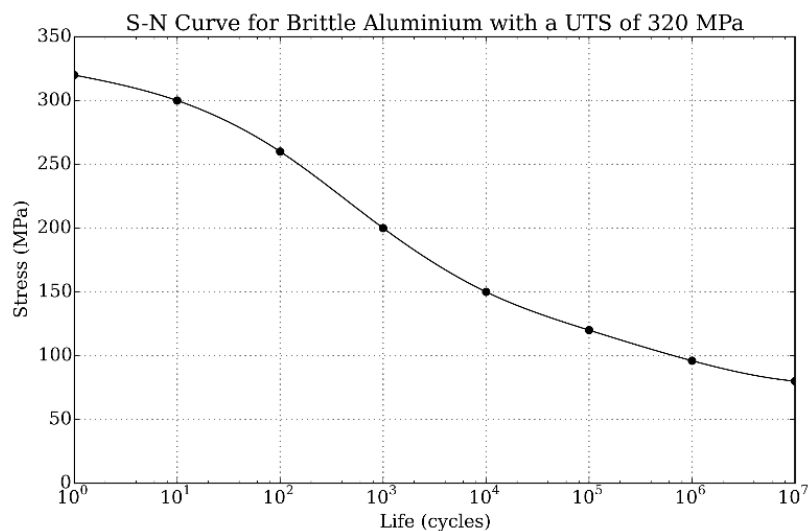


圖 6、S-N 曲線(CC BY-SA 3.0)

(七) 疲勞壽命的影響因素

1. 應力集中：任何幾何缺陷（如孔洞、尖角、裂紋等）都會造成應力集中，進而導致裂紋的提前形成並縮短疲勞壽命。設計過程中需要避免應力集中，並選擇圓滑的過渡曲線以減少應力集中效應。
2. 材料表面質量：材料表面粗糙度對疲勞壽命有重要影響。光滑表面會減少應力集中點，從而提高疲勞壽命。而存在劃痕或不平整的表面更容易產生裂紋。
3. 環境因素：溫度、濕度和腐蝕性環境會顯著影響疲勞壽命。高溫會加速材料的疲勞損傷過程，而腐蝕會降低材料的抗疲勞性能。
4. 載荷頻率：載荷的頻率對疲勞壽命也有影響。在高頻循環載荷條件下，材料的內部會積累更多的損傷，從而加速疲勞失效過程。
5. 材料內部結構：材料的晶粒尺寸、微觀結構等內部特徵也會影響疲勞壽命。較小的晶粒通常會提高材料的疲勞抗力，這是因為裂紋擴展需要克服更多的晶界。

(八) 疲勞的設計考慮

在設計過程中，為避免疲勞失效，工程師通常採取以下幾種措施：

1. 減少應力集中：設計上應避免尖角和幾何不連續，選擇圓滑的過渡面以降低應力集中點。此外，在材料的表面處理上，使用拋光、噴砂處理等技術可顯著提高材料的抗疲勞性能。
2. 選擇耐疲勞的材料：在高循環應力條件下工作的結構應選擇疲勞強度較高的材料。例如，鐵基合金、鋁合金和鈦合金在航空航天、汽車工業中被廣泛應用。
3. 改變應力比：透過調整應力比 R 可減少材料的疲勞損傷。例如，在設計中可以引入預壓應力，使得材料在循環載荷中處於壓縮狀態，從而提高抗疲勞能力。

4. 控制工作環境：降低工作溫度或改善環境條件（如防止材料腐蝕）可延長材料的疲勞壽命。例如，在海洋環境中工作的材料通常會使用防腐塗層或陽極保護技術。

（九）補充知識：低循環疲勞與高循環疲勞

低循環疲勞（Low-Cycle Fatigue, LCF）和高循環疲勞（High-Cycle Fatigue, HCF）是兩類常見的疲勞類型，主要區別在於材料經歷的應力循環次數。

1. 低循環疲勞：通常發生在應力幅值較高、循環次數較低的情況下。此類疲勞通常與塑性變形相關，並且材料經歷的應力接近或超過其降伏強度。
2. 高循環疲勞：發生在應力水平低於降伏強度的情況下，材料主要處於彈性區域。此類疲勞一般發生在反覆應力較小但循環次數極高的條件下。

（十）結論

疲勞失效對一些承受動態載荷的結構來說尤其重要。疲勞阻力取決於多種因素，包括應力幅值、應力比、環境影響、材料特性等。透過了解疲勞機理和應用設計策略來減少疲勞損傷，工程師可提高結構的使用壽命，確保其在長期使用中的安全性和可靠性。

（十一）習題

1. 定義疲勞現象，並解釋為什麼疲勞失效在動態載荷條件下特別重要。
2. 描述疲勞失效的三個主要階段，並說明每個階段的意義。
3. 簡述應力範圍、應力幅值、平均應力和應力比的定義，並說明它們在疲勞分析中的作用。
4. 什麼是 S-N 曲線？如何使用 S-N 曲線評估材料的疲勞壽命？

(十二) 資料來源

- 01 : Introduction to Aerospace Structures and Materials
<https://open.umn.edu/opentextbooks/textbooks/introduction-to-aerospace-structures-and-materials>
- 02 : Mechanics and Science of Materials
<https://commons.libretexts.org/book/eng-97896>
- 03 : Materials Science
https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Materials_Science

Chapter 2

原子結構、鍵結、與結晶構造

Section 2-1 鍵結

Section 2-2 晶體結構

Section 2-3 晶體材料的變形

Section 2-4 晶體結構中的缺陷

Section 2-1 鍵結

(一) 本單元之學習成果

在學習完本單元內容時，你應該能夠：

1. 說明原子的簡化模型，理解其結構和基本特性。
2. 定義以下基本術語：原子序數、原子質量單位、亞佛加厥常數、莫耳和同位素，並解釋其重要性。
3. 解讀元素週期表，理解其結構及其在分類和預測元素性質中的作用。
4. 描述不同類型的化學鍵結（離子鍵、共價鍵、金屬鍵、凡得瓦力和氫鍵），並舉出每種類型的典型範例。
5. 解釋原子間距與力和能量間的關聯性，並說明其圖形表示的物理意義。
6. 說明哪些材料性質可透過原子鍵結解釋（如強度、延展性等），及哪些性質無法單純透過鍵結理解（如晶體缺陷影響）。

(二) 本單元之重要性

元素原子間之鍵結類型主要取決於它們在元素週期表中的相對位置，尤其是電負度的差異。鍵結可分為主要鍵結和次級鍵結，其中，主要鍵結包括離子鍵、共價鍵、及金屬鍵，這些鍵結具有較高的鍵結能量，對材料的結構穩定性與性能表現具有決定性影響。相較之下，凡得瓦力鍵與氫鍵屬於次級鍵結，其鍵結強度較低，但在特定條件下，對材料的物理與化學性質仍可能發揮重要作用。

原子間的作用力及其鍵結能量，對材料的關鍵機械與物理特性具有深遠影響。如鍵結強度直接關係到材料的剛性與彈性模數（如楊氏模數），而鍵結的熱振動特性則影響材料的熱膨脹係數。對這些鍵結特性的深入理解，是材料科學領域中進行材料設計與優化的基礎，並對開發具有特定性能的材料具有重要指導意義。透過鍵結理解（如晶體缺陷影響）。

(三) 概述

1. 定義

- (1) 原子(Atom)：構成化學元素基本單位的個體結構，包含一個非常小的原子核，並被電子環繞。
- (2) 原子核(Nucleus)：由質子和中子組成。
- (3) 電子(Electrons)：環繞原子核運行於特定電子殼層的基本粒子。
- (4) 原子序數(Atomic number)：原子核中的質子數量。
- (5) 同位素(Isotope)：具有相同元素但不同原子質量的原子 (即質子數相同但中子數不同)。
- (6) 原子量(Atomic weight)：原子自然存在同位素的原子質量加權平均值。
- (7) 原子質量單位(Atomic mass unit)：一個質子或中子的質量，約為 $1.66 \times 10^{-24} \text{ g}$ 。
- (8) 極性(Polarity)：質子帶正電，電子帶有大小相等但方向相反的負電，中子則不帶電。因此，原子整體為電中性。
- (9) 亞佛加厥數(Avogadro's number, N_A)： 6.02×10^{23} ，表示為達到 1 克質量所需的質子和中子數量(即 $6.02 \times 10^{23} \times 1.66 \times 10^{-24} \text{ g} = 1 \text{ g}$)。
- (10) 莫耳(Mole)：包含 6.02×10^{23} 個原子或分子的物質質量。

2. 原子的簡化模型

波耳模型是一種簡化的原子結構描述方式，將原子視為由電子繞著原子核運行的系統。原子核由質子和中子組成，而電子則分布於離核不同距離的殼層中。根據量子力學理論，電子只能存在於特定的離散能量水平上，這些能階將電子束縛在原子核周圍，形成穩定的軌道運行。每個電子殼層對應於一個特定的能量，並具有固定的電子容納上限，分別為 2、8 或 18 個電子。當電子填滿外層殼層時，原子趨於穩定狀態。原子的化學

性質主要受最外層電子殼層的填充狀況影響，這決定原子在化學反應中是傾向於失去、獲得還是共享電子，以達到穩定的電子組態。波耳模型為理解原子的基本結構與化學行為提供直觀且易於理解的框架。雖然現代量子力學模型能更精確描述原子的電子分布和行為，但波耳模型仍然在科學教育和基礎化學領域具有重要的啟發與指導意義。

3. 質量與電荷

原子核包含幾乎所有原子的質量。每個質子和中子的質量約為 $1.66 \times 10^{-24} \text{ g}$ 。這被稱為原子質量單位。電子質量為 $0.911 \times 10^{-27} \text{ g}$ ，因此電子對原子質量的貢獻可忽略不計。電子帶有負電荷，大小為 $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ，質子則帶有正電荷，大小為 $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ，使得原子整體上電中性。

4. 元素分類

原子核中質子的數量被稱為元素的原子序數，它決定元素在元素週期表中的位置，並作為區分不同元素的根本依據。環繞原子核運行的電子數量通常與質子數量相等，以維持原子的電中性狀態。原子質量是指原子核中質子與中子的總數，代表原子的整體質量。而原子量則是該元素在自然界中所有同位素的原子質量的加權平均值，反映其在自然界的相對豐度與質量分佈。由於不同同位素的質量與存在比例不同，原子量通常並非整數。這些基本性質在元素分類、化學行為的預測以及物質結構的研究中發揮著至關重要的作用，為化學、材料科學以及物理領域提供堅實的理論基礎。

(四) 原子鍵結

1. 介紹

材料中發生的原子鍵結類型主要取決於外層兩個電子殼層的電子，及這些殼層是否已滿。我們可根據這些外層殼層的填充狀態，將材料分類為金屬、非金屬或類金屬。

- 金屬(Metals)
- 非金屬(Non-metals)
- 類金屬(Metalloids, Intermediate)

可根據鍵結的相對強度分類材料中原子間形成的鍵結類型。打破強鍵結所需的能量比打破弱鍵結所需的能量多。強鍵結通常被稱為主要鍵結，可能是離子鍵、共價鍵或金屬鍵。總結來說，我們可以說：

- 強的主要鍵結(Strong primary bonds)：外層電子被轉移或共享。
- 離子鍵結(Ionic bonding) → 電子的轉移
- 共價鍵結(Covalent bonding) → 電子的共享
- 金屬鍵結(Metallic bonding) → 電子的自由共享

較弱的鍵結通常被稱為次級鍵結，起源於較為微妙的原子間或分子間的相互作用。

- 較弱的次級鍵結(Weaker secondary bonds)：基於正負電荷之間更微妙的吸引力（不涉及電子的轉移或共享）。
- 凡德瓦力鍵(Van der Waals bonds)
- 氫鍵(Hydrogen bonds)

通常，一種材料中會同時存在上述多種類型的鍵結。

方向性(Directionality)：若鍵結在參與的原子間具有偏好的方向，以最大化鍵結強度，則該鍵結具有方向性。若在原子周圍所有方向的鍵結強度相等，則該鍵結為非方向性。

2. 離子鍵結

離子鍵結發生在性質不同的原子間，例如鈉 (Na) 和氯 (Cl) 間透過電子轉移形成鍵結。生成的化合物 NaCl 中包含 Na^+ 和 Cl^- 離子。此過程中，Na 將一個電子轉移給 Cl。要分離這些離子，須提供能量（例如加熱）以將電子

返回。所需的能量決定化合物的熔點。電子轉移的數量越多，所需提供的能量越大。例如，氧化鎂 (MgO) 的熔點高於氯化鈉 (NaCl))，因為在氧化鎂中，須從非金屬向金屬返回兩個電子，而不是一個電子，才能使化合物熔化。離子鍵結是非方向性的，因為沒有特定的方向能最大化鍵結強度。

3. 共價鍵結

共價鍵結通常發生在相同或性質相似的原子間。當某元素的外層殼層中約有 4 個電子時，將這些電子全部轉移以形成離子會消耗大量能量。因此，另一種更能量上有利的選擇是電子共享，形成共價鍵。例如，碳 (Carbon) 原子的電子構型為 (2,4)，即外層殼層有 4 個電子。在鑽石結構中，這些電子透過共價鍵結形成規則的四面體形狀。共價鍵結具有方向性，鍵結通常沿特定方向排列，直接影響分子的形狀和結構特徵。例如，鑽石的硬度和穩定性正是源於碳原子之間高度有序的共價鍵結排列方式。這種方向性使共價鍵在化學和材料結構中具有獨特的重要性。

4. 金屬鍵結

具有外層殼層 1、2 或 3 個電子的金屬原子可捐出這些電子，形成一個環繞金屬離子的電子海或電子雲。這些自由電子並不屬於任何特定的原子或原子對，而是自由地在晶體內移動。金屬離子與電子海之間的吸引力構成金屬鍵。金屬鍵的特性賦予金屬以下典型的物理和化學特性：

- 導熱性和導電性：自由電子的移動使金屬能夠快速傳遞熱量和電荷。
- 合金化能力：金屬可與其他金屬形成各種混合物，例如合金，改善性能。
- 高密度：金屬原子緊密堆積，使其密度通常高於具有共價鍵或離子鍵的材料。
- 形狀可塑性：金屬鍵是非方向性的，使金屬能夠在外力作用下改變形狀 (如延展或鍛造)，幾乎不改變體積，這與方向性較強的共價鍵結材料 (如陶瓷) 形成鮮明對比。

金屬鍵的特性使金屬成為工程和工業應用中的重要材料，特別是在需要高導電性、延展性和強度的情況下。

5. 凡德瓦力鍵結（次級鍵結）

原子由帶正電的質子和帶負電的電子組成。在某些情況下，原子內正負電荷的分佈可能在某一瞬間變得不對稱，導致產生一個淨電荷分佈，這被稱為偶極。偶極可為暫時的或永久的。當一個原子中形成偶極時，其可影響鄰近原子。例如，偶極中的淨正電荷可能會排斥鄰近原子的正電荷，從而誘導鄰近原子形成一個相反方向的偶極。這樣的相互作用會在兩個偶極間產生吸引力，這種吸引力被稱為凡德瓦力吸引。這種現象可在例如氫原子之間觀察到，當氫原子的電子雲在某一瞬間變得不對稱時，會產生暫時偶極。鄰近的氫原子則會被誘導形成相反的偶極，最終兩個偶極之間產生凡德瓦力吸引。這種吸引力雖然較弱，但對非極性分子之間的相互作用具有重要意義。

6. 氫鍵結

氫鍵是一種特殊的凡德瓦力鍵結，發生在氫原子與具有高電負性的原子（如氟、氧或氮）之間。由於氫原子的核質量非常小，其電子雲相對有限，因此在形成化學鍵時，氫原子通常會“損失”大部分的電子分佈，導致其附近形成局部正電荷。這使得含氫的分子具有顯著的極性，並能與鄰近分子的電負性原子發生強烈的靜電吸引。

這種相互作用會產生永久偶極，其鍵結能量明顯高於由暫時偶極形成的凡德瓦力鍵結。氫鍵強度雖然不及離子鍵或共價鍵，但仍足以顯著影響分子間的相互作用，例如水分子的高表面張力和異常高的沸點正是氫鍵的結果。

此外，氫鍵在生物和材料科學中具有重要作用。例如，氫鍵是 DNA 雙螺旋結構中鹼基配對的關鍵力量，也是蛋白質折疊和維持結構穩定性的主要因素之一。這種鍵結對於理解分子的物理和化學性質至關重要。

(五) 工程材料中的鍵結

上述對鍵結類型的描述是對現實的簡化，旨在提供基礎概念。然而，一些分子的結構仍然存在未完全理解的複雜性。此外，許多材料中的鍵結是多種類型的組合，而非單一鍵結。例如，一些化合物可能同時具有離子鍵和共價鍵的特性，而金屬間化合物可能展示金屬鍵與共價鍵的混合特徵。

1. 原子間的作用力與鍵結能量

原子間的作用力和鍵結能量是描述原子相互作用的重要指標，決定材料的穩定性和物理性質。作用力包括吸引力和排斥力，其平衡位置對應於鍵結能量的最低點，這代表原子間的穩定距離。鍵結能量反映原子間鍵結的強度，能量越高，鍵結越強，材料的熔點、硬度和楊氏係數通常越大。這些特性對材料的結構穩定性和機械性能有直接影響，是設計和選擇材料的關鍵考量因素。

表 1、鍵結類型

鍵結類型	物質	鍵結能量(kJ/mol)	熔點(°C)
離子鍵	NaCl	640	801
	MgO	1,000	2,800
共價鍵	Si	450	1,410
	C (diamond)	713	>3,550
金屬鍵	Hg	68	-39
	Al	324	660
	W	849	3,410
凡德瓦鍵	Ar	7.7	-189
	Cl ₂	31	-101
氫鍵	H ₂ O	51	0

2. 與機械和物理性質的相關性

原子間作用力與材料的多種機械與物理性質密切相關，例如楊氏模數 (Young's modulus) 與熱膨脹係數 (Coefficient of thermal expansion, CTE)。楊氏模數 E 定義為應力-應變曲線彈性區間的斜率，並且與原子間平衡距離 r_0 附近的作用力斜率成正比。因此，對於金屬材料而言，基於原子間作用力的數據可相對準確預測其楊氏模數。然而，此方法對於高分子材料並不適用，因為高分子的彈性主要來自於分子鏈的排列與結構，而非單純的原子間作用力。雖然金屬的極限抗拉強度 (Ultimate tensile strength, UTS) 似乎可透過作用力-距離曲線的最大值估算，但實際測得的結果往往低於理論預測。如鋼材的 UTS 大約為 $E/100$ ，而許多金屬材料的 UTS 僅約為 $E/1000$ ，顯示其實際強度遠低於基於原子間作用力的理論預測。這種差異主要歸因於材料內部的缺陷 (如位錯、空孔、晶界等) 以及微觀結構特性，因此僅依靠原子間作用力來預測金屬強度是不夠精確的，需進一步考量微觀組織及加工條件等因素。另一方面，某些物理性質，例如熱膨脹行為，可透過原子間能量-距離曲線解釋。由於能量曲線通常具有不對稱性，這種不對稱性決定材料在溫度變化下的膨脹趨勢，因為溫度升高會導致原子振幅增加，並沿著不對稱的勢能曲線向更大間距移動，從而產生熱膨脹現象。綜上所述，原子間作用力在理解材料的基本機械與物理行為方面具有重要意義，但在實際應用中，需結合材料的微觀結構、製程條件及環境因素，才能對材料性能進行更全面的評估與預測。

(六) 資料來源

- 01 : Mechanics and Science of Materials
<https://commons.libretexts.org/book/eng-97896>
- 04 : Inorganic Chemistry
<https://commons.libretexts.org/book/eng-97896>

Section 2-2 晶體結構

(一) 本單元之學習成果

在學習完本單元內容時，你應該能夠：

1. 理解晶體形態在物理世界中的普遍存在現象，並能解釋其形成的原因。
2. 定義以下術語並描述其意義：晶體、晶格、晶胞、單位晶胞、最密堆積方向、最密堆積平面。
3. 使用球模型說明原子如何排列形成 HCP、FCC 和 BCC 結構，並舉例說明具有這些結構的常見金屬。
4. 計算 HCP、FCC 和 BCC 結構的原子堆積因子，並利用單位晶胞的概念計算晶體材料的密度。

(二) 本單元之重要性

前章中我們了解到並非所有的機械性質都能僅透過考慮原子間的作用力解釋。材料中原子的排列方式不僅影響每單位體積中的原子數量，更重要的是其直接影響材料的強度和延展性。了解這種排列對材料性能的影響，可幫助我們學會如何控制和優化這些關鍵性質，以滿足特定的工程需求。

(三) 晶體形態介紹

我們已了解到，材料中的原子和分子排列方式是為達到系統的最小化能量，這是一個由物理法則驅動的有序過程。因此，原子排列並非隨機，而是遵循特定規律。晶體被定義為由原子或分子組成的均勻固體，其中的原子或分子按照規則的模式排列，並在三個空間座標方向上重複堆疊。用於描述此規則排列模式的術語為晶格。晶格提供一個理論框架，用來描述材料內部的有序結構及其與性能的關係。

1. 二維晶格

二維空間中，各種幾何形狀，如正方形、矩形、三角形和六邊形，可透過重複排列形成連續的區域。其中，六邊形因其具有最密堆積特性，在自然界和材料科學中廣泛存在。利用這些形狀的規則排列模擬晶體結構的有序性，有助於深入理解材料的內部結構與性能。

晶格 (Lattice) 是由位於特定規律排列位置的原子、離子或分子所構成的網狀結構，這些組成單位稱為基底 (Basis)。當基底按照特定的周期性規則排列時，形成的最小結構單元稱為原胞 (Primitive cell)。然而，在某些情況下，使用比原胞更大的重複單元描述晶格結構可能更為方便，此時最常使用的重複單元即為單位晶胞 (Unit cell)。單位晶胞可以是原胞，但通常並非如此，其選取主要基於對晶體結構描述的便利性。通過重複單位晶胞，可構建完整的晶格結構。在三維空間中，晶體結構的排列方式更加多樣，並且根據不同的對稱性與排列方式，晶體可以被分類為 14 種布拉維晶格 (Bravais lattices)，這些晶格能夠完全填充三維空間，並涵蓋所有可能的晶體結構類型。布拉維晶格的分類提供對晶體結構的基本理解，並廣泛應用於材料設計與分析中。

2. 原子 (離子) 的球模型

原子的球模型基於以下假設：當原子完成其最外層電子殼層時 (例如，金屬失去電子或非金屬獲得電子)，剩餘電子將以旋轉對稱方式分佈於原子核周圍。由於電子雲無法顯著重疊，相鄰原子或離子間的排斥力使它們被建模為具有固定大小的球體。這些球體的直徑等於離子距離，兩個相鄰離子間的間距為 $2R$ ，其中 R 是單個離子的半徑。此種球模型為理解晶體結構中的原子排列和密堆積特性提供一個簡單而直觀的工具。

3. 二維球體堆積

在方形晶格排列中，離子分佈並未達最緊密排列，因為其中包含較大空隙。然而，如果球體採用六邊形晶格排列，它們可更加緊密地堆積，從而顯著減少空隙。此種排列被稱為最密堆積，因為它實現最小的空隙量。在此種排列方式中，形成的離子平面被稱為最密堆積平面。在該平面內，可定義三

個最密堆積方向，這些方向是沿離子連續接觸的路徑，而這些路徑不會穿過任何空隙。因此，此種排列方式有助於提高材料的密度和穩定性。

4. 三維球體堆積

最簡單的三維堆積排列是簡單立方晶格，它是由方形晶格在三維空間中重複排列而成。簡單立方晶格的基本單元稱為簡單立方單元格，其結構特徵如下：

- 角落原子：每個單元格在八個角落各包含一個原子或離子。
- 晶格參數 a ：單位晶胞的邊長，定義為離子直徑，即 $a=2\times$ 離子半徑
- 最近鄰數：在簡單立方單元格中，每個原子或離子有 6 個最鄰近原子或離子。
- 實例：採用此晶體結構的元素之一是釷 (Polonium)。

簡單立方結構是所有晶格排列中最稀疏的，具有最低的原子堆積效率，因此在自然界中較為罕見。圖 7 為一個緊密堆積平面的圖示，顯示球體如何以緊密排列的方式分佈，以最大限度地減少空隙。

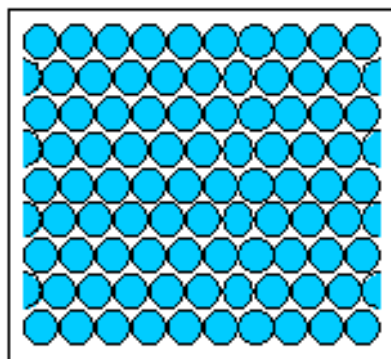


圖 7、最密堆積平面

(四) 金屬晶體結構

1. 六方最密堆積 (HCP)

最密堆積平面的堆疊有兩種可能方式，可形成兩種不同的三維晶格。其中一種是六方最密堆積 (HCP) 結構，也被稱為最密堆積六邊形 (CPH)，如圖 8。此種結構中，每個原子周圍有 12 個最鄰近原子，實現最高的堆積密度。HCP 結構中的每個平面包含三個最密堆積方向，而整個晶格結構中共有三個獨立方向，因為所有平面的最密堆積方向彼此相同。這種排列方式不僅使材料具有高的密度，還影響其物理性質，例如較低的延展性和異向性 (不同方向上的物理性質不同)。表現 HCP 結構的典型金屬包括鎂 (Magnesium)、鈦 (Titanium) 和鈹 (Beryllium)。這些金屬的 HCP 結構賦予它們獨特性能，例如高比強度和剛性，因此被廣泛應用於航空航天、汽車及結構材料等領域。

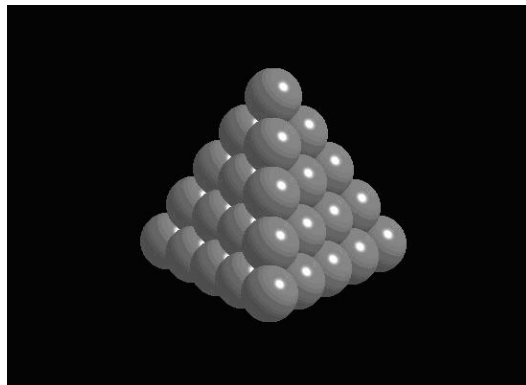


圖 8、六方最密堆積

2. 面心立方 (FCC)

當平面堆疊排列以最密堆積方式進行時，形成的三維晶格被稱為面心立方 (FCC) 晶格。在 FCC 結構中，每個原子擁有 12 個最近鄰原子，此種緊密排列實現最高的原子堆積密度 (約 74%)。每個緊密堆積平面包含三個最密堆積方向，而整個晶格中存在四個不平行的緊密堆積平面，每個平面都具有相同的三個最密堆積方向。因此，FCC 結構擁有 12 個滑移系統，使材料能夠輕鬆發生滑移，具有極高的延展性和塑性變形能力。表現 FCC 結構的

金屬包括鋁(Aluminum)、銅(Copper)、鉛(Lead)和鐵(Iron)(在 910°C 至 1400°C 間)。由於此種結構提供卓越的延展性和加工性能，這些金屬在航空航天、建築、電子設備和製造業中有廣泛應用。此外，FCC 結構的金屬通常具備良好的導電性、導熱性和抗腐蝕性能，進一步增強其實用性。

3. 較低密度的堆積-體心立方 (BCC)

在簡單立方晶胞中，中心位置有一個空間，可容納一個較小的原子或離子。若在此空間放入一個與其他原子大小相同的原子，原來位於晶胞角落的八個原子會稍微分開，形成一種稱為體心立方 (BCC) 的晶格結構。在 BCC 結構中，每個原子擁有八個最近鄰原子。由於其原子排列的特性，BCC 結構中沒有真正的最密堆積平面，但每個晶胞內的平面上存在二個最密堆積方向，這些方向穿過晶胞的體對角線區域。相比於 HCP 和 FCC 結構，BCC 結構的堆積效率較低，原子填充單位晶胞的體積比例較小(約 68%)。典型採用 BCC 結構的金屬包括鉻 (Chromium)、鎢 (Tungsten) 和鐵 (Iron)(在 910°C 以下和 $1,400^{\circ}\text{C}$ 以上)。這些金屬具有較高的硬度和強度，但延展性相對較低，因此廣泛應用於需要高強度材料的結構和工業領域，如工具鋼和耐高溫材料。

(五) 單位晶胞的使用

1. 原子堆積因子

原子堆積因子 (APF) 是用來描述單位晶胞中有多少比例的體積被原子或離子佔據的參數。其提供一個衡量晶格結構緊密程度的標準。例如，APF 為 50% 表示單位晶胞的一半體積被原子填充，其餘的體積為空隙。APF 不僅反映晶體結構的緊密性，還能與單位晶胞的幾何特性結合，用於進一步計算材料密度。密度計算需要考慮以下因素：單位晶胞的體積、單位晶胞中包含的原子數量、原子或離子的密度和質量。這些資訊對於理解材料性能 (例如密度、強度和延展性) 非常重要，並在材料設計和工程應用中具有廣泛用途。

2. 材料密度的計算

晶體材料的理論密度可根據單位晶胞的特性確定。密度是質量與體積的比值，因此需要知道單位晶胞的體積和其內部原子的總質量。單位晶胞的體積與晶格參數（例如原子半徑或邊長）有明確的幾何關係，這取決於晶體的結構類型。同時，單位晶胞內的總質量取決於其中的原子數量及每個原子的質量。每個原子的質量可透過元素的莫耳質量和單位莫耳中的原子數量計算得出，而單位晶胞中的原子數量由晶格結構決定。例如，簡單立方晶胞包含一個原子，體心立方晶胞包含兩個原子，面心立方晶胞則包含四個原子。結合這些資訊，我們可計算材料的理論密度，這對於材料設計和性能預測具有重要意義。

（六）資料來源

- 03 : Materials Science - Engineering LibreTexts
https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Materials_Science

Section 2-3 晶體材料的變形

(一) 本單元之學習成果

在學習完本單元內容時，你應該能夠：

1. 描述彈性變形與塑性變形在原子層面的區別。
2. 認識滑移導致塑性變形，並能夠從滑移系統的角度解釋脆性和延展性行為。
3. 確認 HCP、FCC 和 BCC 結構中的滑移系統並進行定量分析。

(二) 本單元之重要性

金屬在承受外加負荷時的反應，特別是其強度明顯低於理論最大強度的現象（如在原子鍵結相關討論中提到），可透過原子間鍵結的性質及晶體結構在降伏過程中的行為解釋。

(三) 本單元之重要性

1. 彈性變形

前述章節中，我們探討了金屬拉伸試樣在初始加載時的應變反應，該應變與施加的應力呈正比，其比例常數即為楊氏係數（Young's modulus）。然而，金屬的彈性變形主要源自於原子鍵結的可逆拉伸與鬆弛，此過程可能表現為線性或非線性行為。

彈性變形的顯著特徵是可逆性，即當外力移除後，材料能夠恢復其原始形狀。雖然大多數金屬在常規應力範圍內呈現線性彈性行為，但某些材料，如橡膠，則展現出明顯的非線性彈性變形，其應力與應變關係並非簡單的線性對應。這表明，材料的彈性行為並不僅限於線性響應，而是受到其內部結構與物理性質的影響，決定材料在不同條件下的力學表現。因此，在設計與選擇材料時，理解彈性變形的本質以及材料的微觀結構對其彈性行為的影響，對於工程應用至關重要。

2. 塑性變形

(1) 宏觀現象與原子現象

金屬的塑性變形是由原子平面間的永久滑移引起，因此屬於不可逆過程。當材料經歷塑性變形後，其內部的晶體結構將發生不可恢復的改變，導致材料無法恢復至其原始形狀或尺寸。此特性表明材料在塑性變形後會產生永久變形，並且隨著變形的持續，內部的錯位密度增加，進而影響其機械性能。

塑性變形的不可逆性使其成為材料加工與成形的關鍵機制，廣泛應用於金屬製造過程，如鍛造、滾壓和深拉伸等。然而，此特性同時也限制材料的回彈能力 (Elastic recovery)，即材料在去除外部載荷後僅能部分回復，而不可完全恢復原狀。因此，在設計與應用塑性加工製程時，需考慮材料的塑性極限與變形行為，以確保最終產品的尺寸精度與性能穩定性。

(2) 滑移

塑性變形是由原子平面間的相對滑移引起。滑移過程總沿能量消耗最小的方向進行，而發生滑移的特定晶面被稱為滑移平面 (Slip plane)。實際材料中，由於晶格內部普遍存在各種缺陷，如差排 (Dislocations)，滑移並非瞬時完成，而是逐步發生的。這些晶體缺陷有效地降低滑移所需的臨界應力，使材料能夠在較低的應力水平下實現塑性變形。

塑性變形最容易在緊密堆積平面 (Close-packed plane) 上發生，這些平面具有最高的原子密度，因此是滑移能量最小的方向。在六方晶系 (Hexagonal crystal system) 中，緊密堆積平面通常作為主要的滑移平面，當材料受到外部施加的剪切應力 (Shear stress) 時，滑移會優先沿這些平面發生。

外部應力作用下，材料內部的原子層在滑移平面上相對運動，最終導致塑性變形的產生。這些剪切應力通常來自於施加於材料的機械載荷，驅動晶體結構內部發生滑移，並改變材料的整體形狀。了解滑移機制對於金屬加工、成形製程設計以及材料強化機制的研究至關重要，因為它直接影響材料的延展性、強度以及變形行為。

(3) 造成滑移的能量

理論上，滑移可沿晶格中的任何平面發生，而不僅限於緊密堆積平面 (Close-packed planes)。然而，由於非緊密堆積平面 (Non-close-packed planes) 的原子密度較低，滑移過程中需要克服較高的能量障礙，因此滑移沿這些平面發生的可能性相對較小。

實際情況下，滑移通常優先發生於緊密堆積平面，因為這些平面上原子排列最為緊密，滑移所需的能量最低，使材料更容易發生塑性變形 (Plastic deformation)。

滑移過程中，原子須遠離原本的平衡位置並重新排列。當沿緊密堆積平面滑移時，原子需移動的距離最短，因而在滑移過程中克服的阻力最小。根據滑移能量的基本公式：

$$\text{能量} = \text{力} \times \text{距離}$$

由於緊密堆積平面上的原子間距較小，滑移所需的總能量也較低，這使得材料在外力作用下更容易產生滑移。此特性進一步解釋為何滑移傾向於優先在緊密堆積平面上進行，而其他平面上的滑移則需要更高的應力才能啟動。理解滑移優先方向的原理對於材料科學與工程應用至關重要，因為它直接影響金屬材料的機械性能、加工可行性以及強化機制。

(四) 滑移系統

為評估滑移在特定晶體晶格中發生的可能性，此處引入滑移系統的概念，並確定晶格中存在的滑移系統數量。滑移系統是指緊密堆積平面與緊密堆積方向的組合。滑移系統的數量是決定材料滑移能力的關鍵因素之一。滑移系統越多，材料能夠適應的滑移方向和平面越多，從而更容易實現塑性變形。因此，具有更多滑移系統的材料通常表現更高的延展性。這解釋為何晶格結構(如 FCC 和 BCC) 因擁有較多的滑移系統而在延展性方面優於 HCP 晶格。

1. 六方最密堆積晶格中的滑移系統

在每個緊密堆積平面中，有 3 個緊密堆積方向，因此每個緊密堆積平面包含 3 個滑移系統（計算為 3×1 ）。然而，在六方密排（HCP）晶格中，所有緊密堆積平面是相互平行的，意味它們的滑移系統並不彼此獨立或唯一。由於此限制，HCP 晶格中實際存在的滑移系統數量僅為三個。大幅限制 HCP 結構的滑移能力，導致其延展性較低，相比其他晶格結構（如 FCC 和 BCC）更容易呈現脆性特性。

2. 面心立方晶格中的滑移系統

在面心立方（FCC）晶格中，滑移系統由緊密堆積平面和緊密堆積方向的組合決定。FCC 結構具有四個獨特的{111}緊密堆積平面，每個平面內有三個[110]緊密堆積方向，從而形成 12 個滑移系統（ $4 \times 3 = 12$ ）。這些滑移系統分佈均勻，使 FCC 結構的材料（如鋁、銅、金和銀）能夠在多方向應力下輕鬆發生滑移，表現卓越的延展性和塑性變形能力。

3. 體心立方晶格中的滑移系統

體心立方（BCC）晶格中雖沒有真正的緊密堆積平面，但存在一些接近緊密堆積的平面。在這些平面上，有二個緊密堆積方向，這些方向由晶胞的體對角線決定。由於 BCC 晶格中共有六個接近的緊密堆積平面，每個平面包含二個緊密堆積方向，因此形成 12 個主要滑移系統（ $6 \times 2 = 12$ ）。這些滑移系統雖不如面心立方（FCC）晶格那樣易於滑移，但仍然使 BCC 結構材料在特定條件下具備一定的塑性變形能力。

4. 滑移系統與變形的總結

滑移系統的數量直接影響材料的變形行為。滑移系統越多，材料在外力作用下發生滑移的可能性越大，因此更容易實現塑性變形。然而，若滑移系統的數量有限，材料可能無法有效分散應力，從而導致變形呈現脆性特徵。以下是不同晶格結構中滑移系統數量與預期變形類型的總結，如表 2。

表 2、不同晶格結構的滑移系統和變形類型總結

晶格結構	滑移系統數量	變形類型
HCP	$3 \times 1 = 3$	脆性/延展性
FCC	$3 \times 4 = 12$	延展性
BCC	$2 \times 6 = 12$	脆性/延展性

- 透過滑移進行變形

塑性變形是由滑移所引起，當施加的剪切應力沿滑移方向作用於緊密堆積平面時，滑移就會發生。此種剪切應力通常透過對材料施加拉伸或壓縮應力誘發，從而在滑移平面上產生內部的剪切作用。滑移的發生主要取決於滑移平面上的剪切應力 (Resolved shear stress, RSS) 的大小。RSS 是驅動滑移系統運作的關鍵因素，當其值達材料的臨界剪切應力 (Critical resolved shear stress, CRSS) 時，滑移就會啟動。這使剪切應力成為控制塑性變形的一個重要參數。

(五) 資料來源

- 03 : Materials Science - Engineering LibreTexts
https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Materials_Science

Section 2-4 晶體結構中的缺陷

(一) 本單元之學習成果

在學習完本單元內容時，你應該能夠：

1. 認識晶體中發生的缺陷類型。
2. 描述差排在晶體材料變形中的作用，並認識它們在金屬強化中的作用。
3. 描述多晶體的定義並能解釋單晶體和多晶體的變形。

(二) 晶體破壞與缺陷

關於原子平面滑移與塑性變形的理論模型存在一個關鍵問題：若嘗試計算整個原子平面在理想條件下發生滑移所需的剪切應力，計算結果通常遠高於材料的實際強度。這表明即使理論計算是正確的，材料在實際變形過程中必定存在某些機制，使得原子滑移能夠在遠低於理論預測的應力條件下發生。要深入理解這些機制的起源，須認識晶體結構並非完美無缺，而是普遍存在各種晶體缺陷 (Crystal defects)，這些缺陷在材料的塑性變形中扮演著至關重要的角色。

● 缺陷類型

晶體結構中可能存在幾種類型的缺陷。第一種是點缺陷，例如缺失或多餘的原子，這類缺陷在所有方向上都具有原子級的尺寸。第二種是線缺陷，例如缺失或多餘的一排原子，這類缺陷在兩個方向上具有原子級尺寸，但在第三個方向上延伸較長。第三種是面缺陷，這類缺陷在一個方向上具有原子級尺寸，而在其他兩個方向上延伸較長，晶界便是一個典型的例子。所有缺陷都會導致晶格的畸變，從而增加材料的儲存能量。

1. 線缺陷 (差排)

晶體中的線缺陷被稱為差排，當晶體中缺失一排原子（或多添加一排原子）時，就會形成這種缺陷。差排之所以重要，是因它們使晶體能透過逐步滑移實現塑性變形，而非一次性在整個平面上完成滑移。正因如此，滑移可在實際施加的剪切應力遠低於理論計算值的情況下發生。差排主要分為兩種類型：刃差排和螺旋差排。圖 9、10 分別為刃差排與螺旋差排的結構特徵，有助於理解其作用機制。

差排的影響程度通常透過伯格斯向量量化，該向量描述由差排引起的晶體變形的大小和方向。螺旋差排之所以得名，是因此種差排中，原子平面沿差排線圍繞形成一個類似螺旋坡道的結構。此種特殊的幾何形態使螺旋差排在滑移和塑性變形過程中發揮獨特的作用。

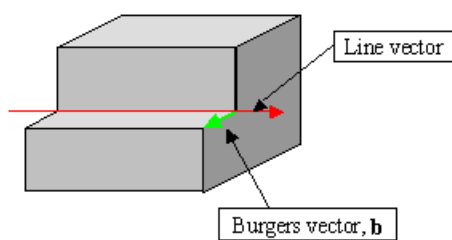


圖 9、六方最密堆積

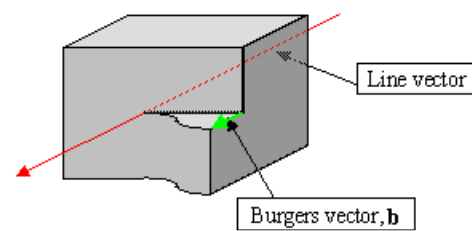


圖 10、六方最密堆積

2. 面缺陷 (晶界)

目前為止，我們已基於晶格中原子或離子形成的重複模式探討晶體結構，並識別這些模式如何影響塑性變形的發生。但需要注意的是晶格的取向僅限於單個晶體的範圍，而工程應用中涉及的大多數材料並非單一晶體結構，而是由大量獨立的晶體組成。此類材料被稱為多晶體，其特點是系統由許多單獨的晶體組成。雖然每個晶體內部的晶格取向相同（例如 FCC 結構），但各晶體間的取向會有所差異。這些晶體間的界面稱為晶界，它們在材料的強化機制中發揮重要作用。

(三) 差排、滑移與強化

1. 差排在滑移中的作用

前節中我們提到基於原子間作用力關係計算的理論強度，往往大幅高於實際測得的材料強度。差排為此提供一種合理解釋。差排使得晶體中的滑移能夠在遠低於理論計算值的剪切應力下發生。此機制核心在於差排可透過晶格逐步移動，而不是一次性滑移整個晶體平面。此種逐步移動過程涉及晶格中原子鍵結的斷裂和重建，從而降低滑移所需的能量和應力。

2. 多晶體中的變形

如上所述，一個晶體中的晶格不太可能與相鄰晶體中的晶格完全對齊。兩個晶體間將由晶界分隔，如圖 11 示意所示。

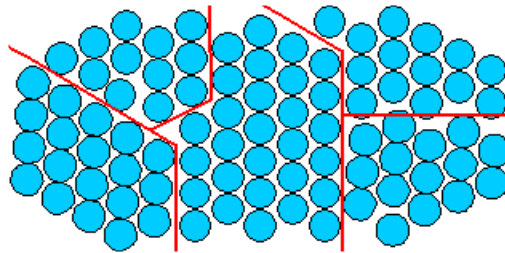


圖 11、晶界分隔的相鄰晶體

晶粒的取向對實現滑移有著重要影響。例如，晶粒 A 的取向可能與施加的應力較為一致，因此滑移容易發生；而在晶粒 B 中，由於取向不利於滑移，實現滑移則更為困難。因此，同時在兩個晶粒中實現滑移的難度通常高於僅在單一晶粒中實現滑移的情況。隨晶粒尺寸減小，滑移所需的應力增加。當晶粒平均直徑為 d 時，材料的降伏強度 σ_y 會隨晶粒尺寸減小而增大。此種現象可用經驗公式 Hall-Petch 方程式描述，其表達式為：

$$\sigma_y = \sigma_0 + k/\sqrt{d}$$

其中， σ_0 是內在降服強度， k 是 Hall-Petch 常數， d 是晶粒的平均直徑。此公式表明，減小晶粒尺寸是提高材料強度的有效途徑之一。由上述內容可

以得出結論，較小的晶粒尺寸會顯著提高材料的降伏強度，從而增強材料強度。因此，晶粒尺寸成為影響材料性能的一個至關重要的參數。基於此原理，許多材料加工技術已被開發和應用，旨在精確控制晶粒尺寸，以滿足特定的工程需求。例如，熱處理、冷加工、快速冷卻及添加微量元素等方法，都是常見的晶粒尺寸調控技術。這些技術的有效運用不僅提升材料強度，還可改善材料的綜合性能。

3. 差排與強化

(1) 差排的影響

材料中的差排已被證明可使原子平面在顯著低於理論剪切應力的條件下逐步滑移。這是因為差排的逐步移動降低同時滑移整個原子平面所需的能量。具有大量滑移系統的晶格結構(例如面心立方晶格 FCC 或體心立方晶格 BCC)，在統計上更有可能包含相對於施加負荷方向具有有利取向的滑移系統。因此，此類晶格結構更容易實現滑移並進行塑性變形。相比之下，六方密排晶格 HCP 擁有較少的滑移系統，導致其滑移和塑性變形能力受限，從而呈現較高的脆性特性。

隨晶格中差排數量的增加，材料強度可能會降低，因為滑移的發生變得更加容易。然而，實際情況卻更為複雜且不同。理論上，若能製造完全無差排的材料，其強度將非常高，但這在現實中幾乎無法實現。當差排數量適度增加時，材料強度可能略有下降，因差排促進滑移的初始發生。然而，隨差排數量進一步增加，差排間的相互作用開始顯著影響材料性能。這些相互作用會阻礙差排的進一步移動，使得滑移變得更加困難，從而導致材料的強度顯著提高。

此現象是加工硬化(也稱形變硬化)的基礎機制之一。在材料經歷初始降伏後，差排數量迅速增加，並且差排間的相互作用變得更加顯著，阻礙滑移的進一步進行，從而提高材料強度。因此，材料強度更多地取決於差排移動的難易程度，而非差排的絕對數量。這解釋為什麼加工硬化能顯著增強材料的抗變形能力。

因此，可透過阻礙差排的移動實現材料強化，這是提高材料強度的核心原理。以下是幾種常見的方法實現此目標：

- I. 減小晶粒尺寸：晶界會阻礙差排的移動，減小晶粒尺寸能增加晶界數量，從而提高材料強度。此效果可透過 Hall-Petch 方程式描述。
- II. 生成更多差排，使其相互作用並彼此阻礙：差排間的相互作用會增加滑移難度，因此，透過冷加工等方式引入更多差排，可有效提升材料強度（加工硬化機制）。
- III. 在晶格中引入小原子作為屏障：小原子（例如溶質原子）會嵌入晶格，形成局部應變區，阻礙差排的滑移，這是固溶強化的機制。
- IV. 引入較大的原子以產生晶格應變：較大的原子（例如合金化元素）會引起更大的晶格畸變，進一步增加差排移動的阻力，從而提高材料強度。

(2) 差排的阻礙與倍增

晶格中的小原子或顆粒可阻礙差排移動，並導致差排的倍增。

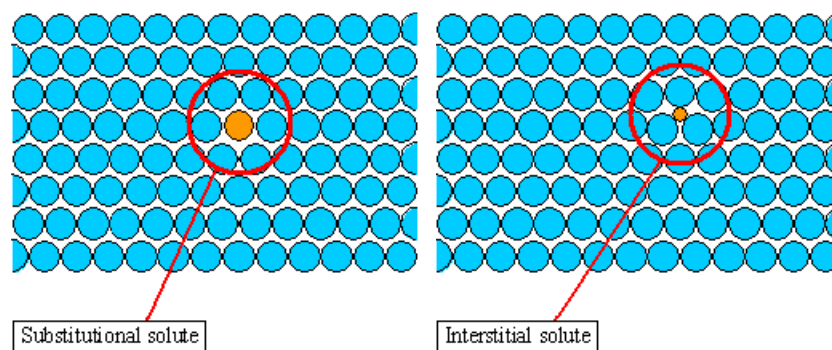


圖 12、晶格中的小原子或顆粒

(3) 差排的相互作用

刃差排 (Edge dislocations) 在晶格中會導致局部的應變分布。在滑移平面上方，由於額外原子的存在，晶格結構產生壓縮應變 (Compressive strain)；相對地，在滑移平面下方，由於原子數量的不足，則形成拉伸應變 (Tensile strain)。這些應變共同作用於差排周圍，形成一個應力場 (Stress field)，對材料的力學行為產生重要影響。

當兩個具有相反符號的刃差排相遇時，其各自產生的壓縮與拉伸應變會相互抵消，導致晶格恢復到未畸變的狀態。這一過程被稱為差排滅

(Dislocation annihilation)，它可有效降低晶體內的總應變能，從而影響材料的機械性能。

差排湮滅是塑性變形過程中的關鍵機制，能夠幫助材料在變形過程中釋放內部儲存的彈性能量，並減少差排密度。該機制對於差排運動 (Dislocation motion) 的行為與材料強度的演化具有深遠影響。隨著塑性變形的進行，差排相互作用與湮滅的頻率增加，使材料在加工硬化階段逐漸達到穩定的內部結構，進而影響材料的延展性與強度表現。在工程應用中，透過控制差排湮滅機制，例如藉由退火處理 (Annealing) 促進差排的移動與消除，可有效調整材料的強度與韌性，實現對材料性能的精確調控。

(四) 資料來源

- 03 : Materials Science - Engineering LibreTexts
https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Materials_Science
- 05 : Mechanics of Materials
<https://ocw.mit.edu/courses/3-11-mechanics-of-materials-fall-1999/pages/syllabus/>

Chapter 3

合金與相變化

Section 3-1 合金和強化

Section 3-2 強化和非平衡條件

Section 3-3 金屬-鐵合金

Section 3-4 金屬熱處理

Section 3-1 合金和強化

(一) 本單元之學習成果

在學習完本單元內容時，你應該能夠：

1. 描述為什麼使用合金，並能夠定義用於描述它們的術語。
2. 解釋置換固溶體和間隙固溶體間的區別，並能夠舉例且描述何時形成。
3. 繪製平衡相圖，並能夠標註存在的各條線和區域。
4. 使用槓桿原理確定兩相區域中存在的相的成分和質量分數。
5. 描述在從液相冷卻給定成分的合金時發生的微結構變化，並能夠繪製簡單的微結構。

(二) 本單元之重要性

許多純金屬具有低強度和高延展性，以至於它們的工程價值非常小。若將這些金屬合金化(將金屬元素與一個或多個其他元素混合)，則可顯著提高其強度、耐腐蝕性、耐磨性，然而，卻也可能導致延展性和韌性的降低，並且會影響加工和焊接金屬的能力。透過了解這些變化的發生方式，我們可透過合金化處理控制材料性能。

(三) 工程材料的主要類別

1. 重要定義

- 合金：一種金屬與一個或多個其他金屬或非金屬混合 (例如二元、三元等)。
- 成分：合金中的一個元素。
- 相：具有統一物理和化學特性的材料區域。

- 溶劑：具較高濃度（主原子）的元素或化合物。
- 溶質：具較低濃度的元素或化合物。
- 固溶體：溶質原子與溶劑原子混合形成均勻成分的單相區域。
- 成分：合金或相中每個成分的質量。
- 組成：相的數量、每個相的質量和成分的總和。
- 相圖：所有溫度和成分組合的平衡組成。
- 共晶點：液相與兩個固相平衡的組成點。

2. 透過原子的替換進行合金化

合金是由兩種或更多不同類型的原子所組成的混合物（即包含兩個或更多成分）。在金屬合金中，這種混合可能涉及兩種金屬元素的結合，或者金屬與非金屬元素的結合。當溶質原子（即低濃度元素）取代溶劑原子（即高濃度元素）在晶格中的位置時，形成置換固溶體（Substitutional solid solution），如圖 13 (a)所示。

為使溶質原子能夠成功取代溶劑原子並形成均勻的固溶體，溶質與溶劑元素須在幾個關鍵性質上相似，這些條件被稱為 Hume-Rothery 規則（Hume-Rothery Rules）。根據這些規則，溶質和溶劑原子應滿足以下條件：

- 直徑相近：溶質與溶劑原子的半徑差異應小於 15%，過大的尺寸差異會導致晶格畸變，阻礙固溶體的形成。
- 擁有相同的晶體結構：溶質與溶劑元素應具有相同或相近的晶體結構，以確保晶格的穩定性並降低晶格錯配應力。
- 擁有相同的電負性：溶質和溶劑原子的電負度應接近，以防止過大的電荷轉移，避免形成化合物而非固溶體。
- 擁有相似的價電子數：溶質原子與溶劑原子的價電子數應接近，以維持合金的化學平衡與穩定性，確保良好的固溶度。

當這些條件滿足時，溶質原子能夠在溶劑晶格中均勻分布，形成穩定的合金結構。若不滿足這些條件，則可能會導致相分離 (Phase separation)，或者生成具有不同機械與物理性質的中間相 (Intermetallic compounds)。

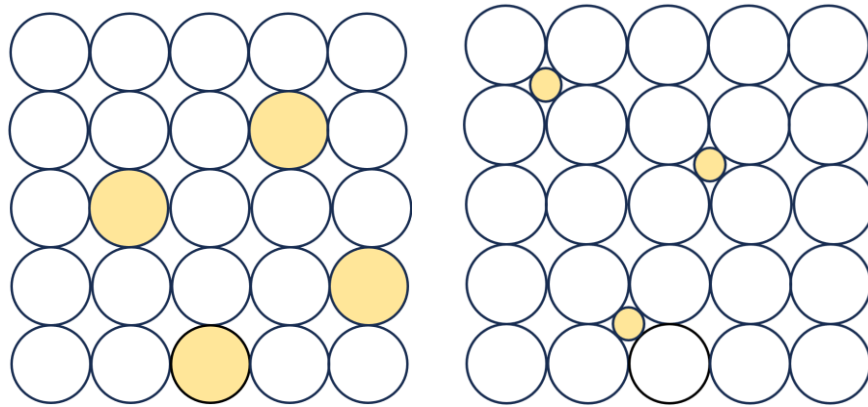


圖 13、(a)透過溶劑原子的替換進行合金化；
(b)透過將溶質原子添加到溶劑原子間的空隙進行合金化

3. 透過將小原子添加到晶格空位中進行合金化

另一種溶質原子取代溶劑原子的方法如圖 13 (b)所示，當溶質原子 (或離子) 尺寸足夠小，能夠佔據溶劑原子間的空隙時，這些空隙被稱為間隙位置 (Interstitial sites)。通常溶質原子的直徑須小於溶劑原子直徑的 60%，才能進入晶格間隙並形成間隙固溶體 (Interstitial solid solution)。這意味在常見的金屬中，只有某些小尺寸原子能夠作為溶質，並有效地填充晶格間隙。

典型的間隙溶質元素包括 B、C、Cl、H、N、O、P 和 S。其中，最廣泛應用的例子是碳 (C) 原子，它能夠佔據鐵 (Fe) 晶格中的間隙位置，形成各種碳鋼與合金鋼，顯著改變其機械性能。然而，雖然某些氣體元素 (如氫、氧、氮) 也可進入間隙位置，但通常會被避免用作溶質，因為它們可能導致不利的材料問題。例如，氫脆 (Hydrogen embrittlement) 現象會降低材料的延展性和強度，導致脆性破壞，影響工程應用的可靠性。當所有可用的間隙位置被溶質原子完全填充時，材料達到溶解度極限 (Solubility limit)，此時進一步添加溶質可能導致析出相的形成，影響材料的微觀結構與整體性能。因此，間隙固溶體的設計需要綜合考慮溶質濃度、溶解度及對材料性質的影響，以確保其在強化材料時的有效性與穩定性。

4. 相

從上述定義我們知道相是具有統一物理和化學特性的材料區域。

- 範例：水和冰是兩種不同的相，因為儘管它們具有相同的化學特性（都是 H_2O ），但它們具有不同的物理結構（水是液體，而冰是固體）。

5. 固溶體和完全固體溶解度

固溶體(Solid solution)是指溶質原子與溶劑原子在晶格中均勻混合，形成具有一致成分的單相區域 (Single-phase region)。在固溶體中，溶質原子以特定方式整合進溶劑的晶體結構中，而不會形成新的相或結構不連續性。

完全溶解度 (Complete solubility) 指的是溶質原子在任意比例下，均可無限制地溶解於溶劑中，形成單一均勻的固溶體。在這種情況下，不論溶質與溶劑的成分如何變化，都不會出現第二相 (Second phase)，即整個系統保持單相結構。一個典型的完全固溶度範例是銅 (Cu) 和鎳 (Ni) 的合金系統。由於 Cu 和 Ni 具有相似的原子尺寸、晶體結構、電負度以及價電子數，因此在整個組成範圍內，它們可形成完全固溶體，不會產生分離的相或不均勻的微觀結構。然而，在大多數金屬系統中，完全溶解度較為罕見，因為溶質與溶劑原子通常在尺寸、電負度及晶體結構等方面存在差異，這些因素可能會導致有限溶解度 (Limited solubility)，並在某些條件下形成第二相，例如析出相或共晶結構。對於材料設計而言，理解固溶體的行為對於調控合金的機械性質、電學性質及熱學性質至關重要。例如，在固溶強化機制中，溶質原子的加入可以有效提高材料的強度和硬度，同時保持良好的延展性。

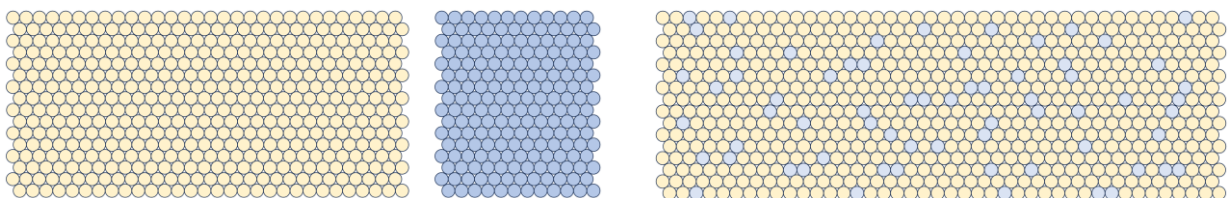


圖 14、(a)溶劑 Cu 和溶質 Ni；(b)形成具有完全溶解度的固溶體

6. 限定 (部分) 固體溶解度

部分固體溶解度 (Partial solid solubility) 的概念在日常生活中相當常見。例如，當我們在室溫下將糖加入水中時，起初糖會完全溶解於水中，形成均勻的糖漿溶液。然而，當糖的添加量超過 65 wt.% 時，溶解度達到其極限，過量的糖將無法進一步溶解，而是在溶液底部形成固體糖沉澱。

在溶質含量低於 65 wt.% 時，糖和水形成單一相 (Single phase) 的均勻溶液，這種情況稱為完全混溶 (Complete miscibility)。然而，當糖含量超過該溶解度極限時，溶液將分離成兩個相：一個為飽和溶液，另一個為未溶解的固態糖，這樣的系統即為部分溶解系統 (Partially soluble system)。值得注意的是，溶解度極限 (Solubility limit) 是溫度的函數，即溶解度通常隨溫度的升高而增加，如圖 15 所示。在較高溫度下，溶劑的分子運動加劇，為溶質分子提供更多的溶解空間，使得更多的溶質得以溶解。因此，在溫度升高時，糖的溶解度將高於 65 wt.%。

此概念同樣適用於固態合金系統，如某些金屬合金在高溫下具有較高的固態溶解度，而在冷卻時會析出第二相。例如，銅-鋅合金 (黃銅) 在特定溫度下可以形成單一相，但當冷卻至室溫時，超過溶解度極限的鋅將以第二相形式析出。

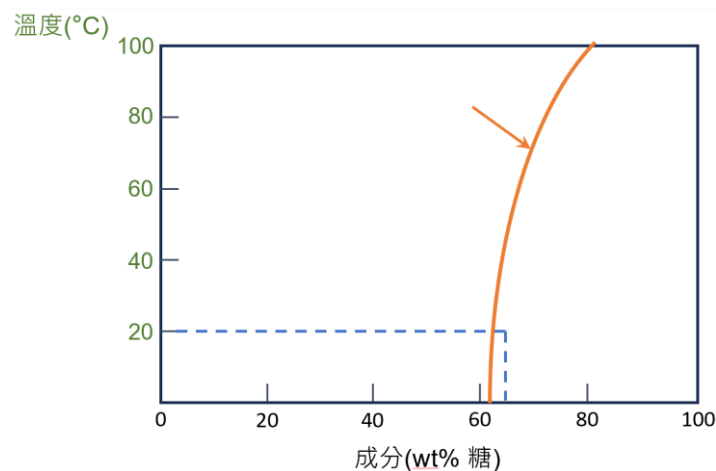


圖 15、糖/水之相圖

(四) 平衡相圖

圖 15 顯示每個成分和溫度 (0-100°C) 下存在的相。對於水和糖，我們稱這是一個平衡相圖。平衡意味我們給任何相變化在圖上的特定坐標處發生的時間。Cu 和 Ni 形成完全固溶度的合金，正如接下來所描述的。

1. 完全固溶度的平衡圖

從 100%Cu 的成分開始，當金屬從熔點以上冷卻到環境溫度時，可畫出冷卻曲線作為時間的函數 (圖 16 (a))。注意在狀態變化期間的潛熱。接下來考慮一個 50%Cu 和 50%Ni 的合金，可畫出另一條冷卻曲線。50/50 合金的凝固 (結晶) 發生在一定範圍的溫度內 (圖 16 (b))。最後考慮純 Ni (圖 16 (c))。Ni 在比純 Cu 更高的溫度下凝固 (或熔化)。冷卻曲線如下所示。

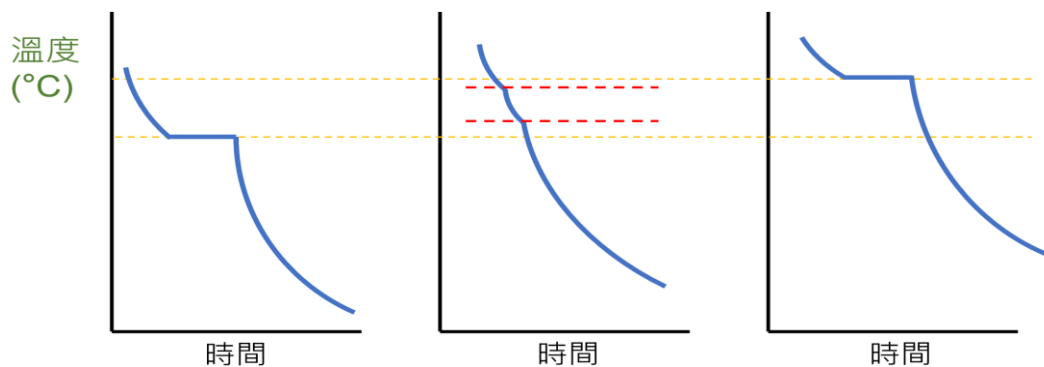


圖 16、(a)100%Cu (b)50%Cu，50%Ni (c)100%Ni

如果為每個成分畫出冷卻曲線，那麼可構建平衡相圖。如圖 17 所示。

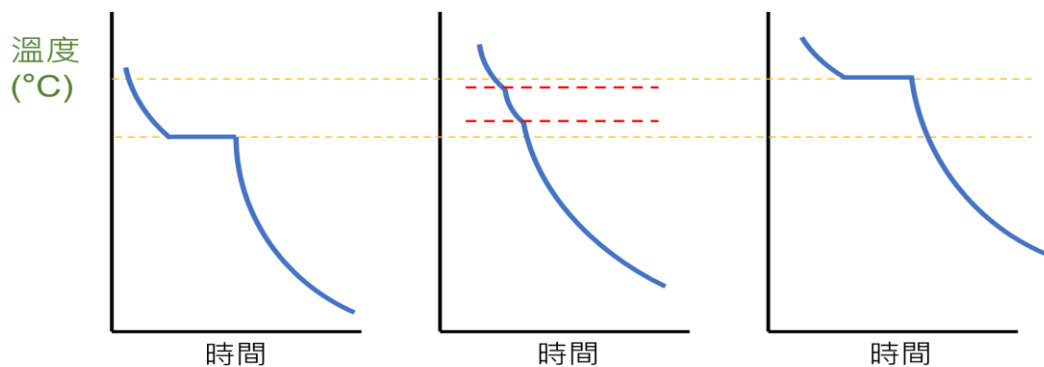


圖 17、Cu-Ni 合金系統的平衡相圖

2. 限定固溶度的平衡相圖

若溶質在固態中的溶解度低於在液態溶劑中的溶解度，溶液的凝固溫度會隨溶質比例增加而降低。如 NaCl (鹽) 水溶液中。混有鹽的水在比純水更低的溫度下凝固。顯示此行為的金屬合金系統是鉛-錫系統。現在構建鉛-錫系統的冷卻曲線及平衡相圖。

冷卻曲線：

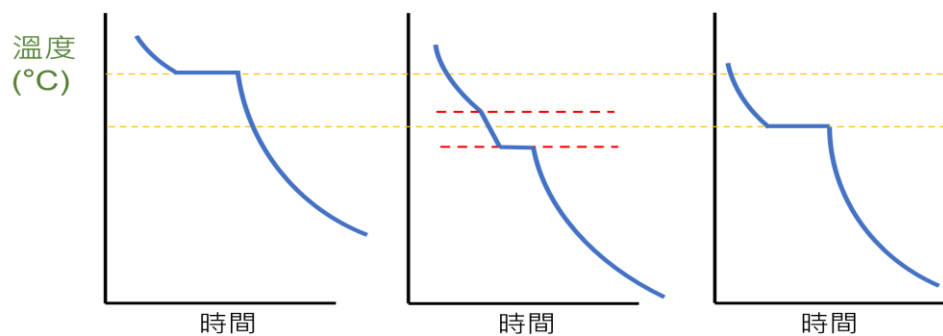


圖 18、(a)100%鉛；(b)50%鉛，50%錫；(c)100%錫之冷卻溫度圖

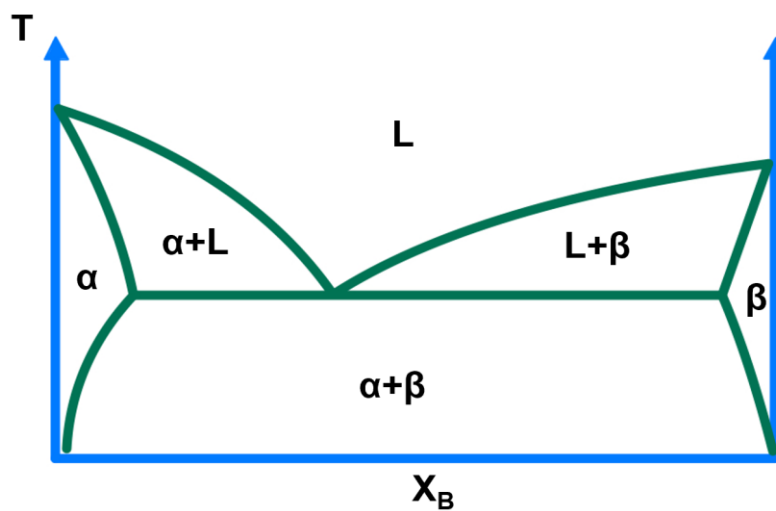


圖 19、共晶系統(如鉛-錫)的平衡相圖

3. 慢速冷卻 15%錫，85%鉛合金時形成的微結構

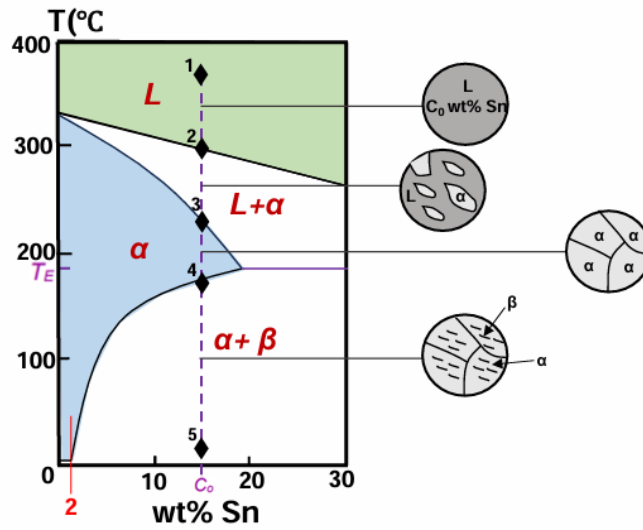


圖 20、共晶系統(如鉛-錫)的平衡相圖

4. 慢速冷卻共晶鉛-錫合金時的微結構

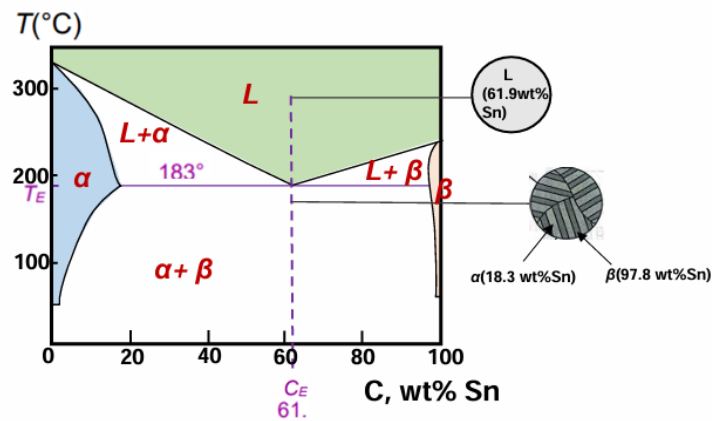


圖 21、慢速冷卻共晶鉛-錫合金時的微結構

(五) 確定雙相區域中每相的量

通常合金中的不同固相物質將具有不同的特性合金的機械性能將取決於各相的相對量。可使用槓桿定理確定存在相的量。

1. 平衡成分

假設有一雙相區域(在本例中由液相和固相組成)。在任何給定溫度(T)，雙相區域中的液體將具有由液-雙相邊界處的成分給出的成分，雙相區域中的固體將具有由雙相-固相邊界處的成分給出的成分。因為雙相區域中的相的成分已經定義，所以它們的質量也是如此。

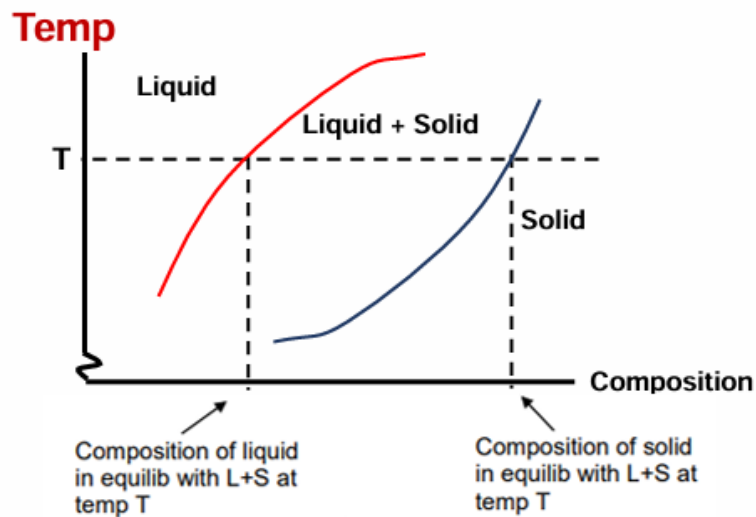


圖 22、L 及 S 相之平衡比例

2. 槓桿定理

作為槓桿定理的例子，我們將找出 Cu-Ni 合金雙相區域中存在的固相和液相的相對質量比例。

設總質量 M 、液相質量 M_L 、固相質量 M_S 、Ni 的質量 M_N

根據質量平衡：

$$M = M_L + M_S$$

現在，對包含 $X\%Ni$ 的任意合金成分，可寫作：

$$\frac{M_N}{M} = \frac{X}{100}$$

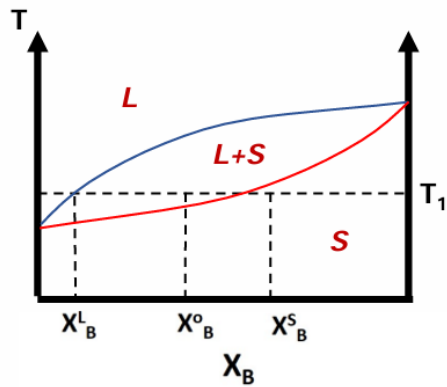


圖 23、L 及 S 相之兩相平衡圖

結合(1)和(2)：

$$M_N = \frac{X}{100} (M_L + M_S)$$

對 Ni 的獨立質量平衡：

$$M_N = \left(\frac{x_L}{100}\right)M_L + \left(\frac{x_S}{100}\right)M_S$$

消除 M_N 並重新排列，可應用槓桿定理，寫作：

$$(X - x_L)M_L = (x_S - X)M_S$$

由於在雙相區域中，我們可以說 $M_L + M_S = 1$ (即 100%)，那麼：

$$M_L = \frac{x_S - X}{x_S - x_L}$$

$$M_S = \frac{X - x_L}{x_S - x_L}$$

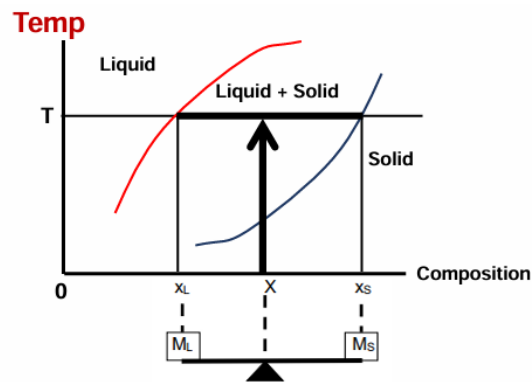


圖 24、L 及 S 相之兩相平衡圖

- 槓桿定理範例

含 40% 錫的鉛-錫合金。(a) 在 150°C 時存在哪些相？(b) 這些相的成分是什麼？(c) 這些相的相對質量比例是多少？

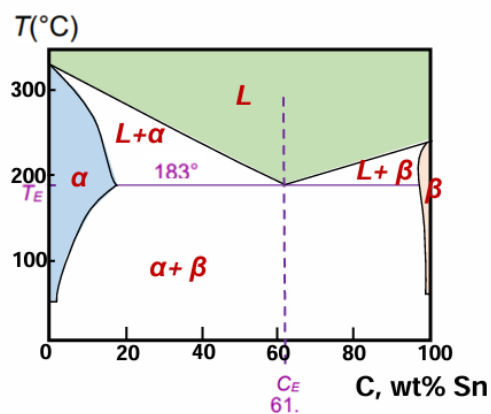


圖 25、鉛-錫合金之平衡圖

(六) 資料來源

- 03 : Materials Science - Engineering LibreTexts
https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Materials_Science

Section 3-2 強化和非平衡條件

(一) 本單元之學習成果

在學習完本單元內容時，你應該能夠：

1. 描述什麼是固溶強化，解釋強化機制，並用實際例子進行說明。
2. 認識合金的非平衡冷卻，並舉例說明。
3. 解釋什麼是過飽和固溶體，並描述其形成方式。
4. 描述為實現析出強化所需的熱處理，並能夠用 Al-Cu 合金系統進行說明。
5. 解釋時間-溫度-轉變圖，並用這一點協助指定各種合金的熱處理。

(二) 本單元之重要性

本章節涵蓋常用於金屬強化的兩種重要方法。首先是透過固溶強化，其次是透過析出強化，這是非平衡熱處理的一項範例。

(三) 固溶強化

差排在晶格中施加應變場 (Strain field)，如圖 26 所示。於差排上方，原子間距縮短，形成壓縮應變場 (Compressive strain field)；相反地，在差排下方，原子間距增大，產生拉伸應變場 (Tensile strain field)。這些應變場影響晶體的局部結構，使其在機械性能和擴散行為方面產生顯著影響。

應變場的存在使得溶質原子在晶格中的行為類似於被吸引的磁鐵。溶質原子會傾向於透過晶格擴散 (Lattice diffusion) 向差排處聚集，以降低局部的應變能，並減少整體的晶格變形 (Lattice distortion)。這種現象在材料科學中被稱為柯肯達爾效應 (Kirkendall effect)，它反映溶質原子與基體原子間的擴散差異，並對材料的機械性能、強度與硬化行為產生深遠影響。

這種應變場對溶質原子的吸引作用是材料強化機制的重要基礎之一。如在固溶強化 (Solid solution strengthening) 過程中，溶質原子偏向於占據差排周圍的特定位置，以穩定晶格並減少應變能，從而提高材料的整體強度。此外，溶質原子聚集於差排周圍也會影響差排的運動，抑制其滑移並增強材料的耐變形能力。

理解應變場與溶質擴散之間的關係，對於材料的微觀結構控制與機械性能優化至關重要，並可應用於合金設計、熱處理製程以及微結構工程等領域。

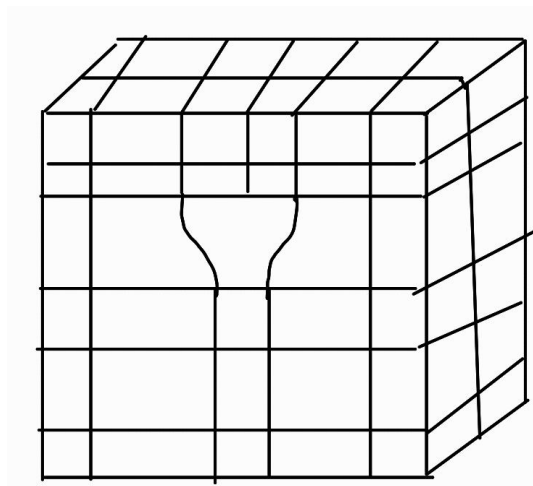


圖 26、差排存在引起的應變場

溶質原子在差排周圍的應變場內受到吸引，其聚集位置取決於溶質原子與溶劑原子間的相對大小。當溶質原子尺寸小於溶劑原子時，這些較小的溶質原子會在晶格中產生拉伸應變 (Tensile strain)，如圖 27 (i)所示。由於較小的溶質原子會使周圍晶格膨脹，因此它們傾向於擴散並聚集在差排周圍的壓縮應變區域，即滑移面上方，以降低整體的晶格應變能 (Lattice strain energy)。

相反地，當溶質原子尺寸大於溶劑原子時，較大的溶質原子會在周圍晶格中引入壓縮應變 (Compressive strain)，如圖 27 (ii)所示。由於較大的溶質原子會對其周圍的晶格產生額外的壓縮效應，因此它們傾向於聚集在差排應變場的拉伸區域，即滑移面下方，以同樣達到減少總應變能的目的。這種溶質-差排相互作用機制在材料強化過程中扮演重要角色，因為溶質原子與差排的相互作用可以有效地抑制差排運動，從而提高材料的強度和耐變形能力。此現象在固溶強化 (Solid solution strengthening) 中尤為重要，透過選擇適當尺寸的溶質原子，能夠優化材料的機械性能，並延緩塑性變形的發生。此外，此機制對材料的擴散

行為、應力遷移和加工性能也具有深遠影響，在合金設計和熱處理製程中應予以充分考量。

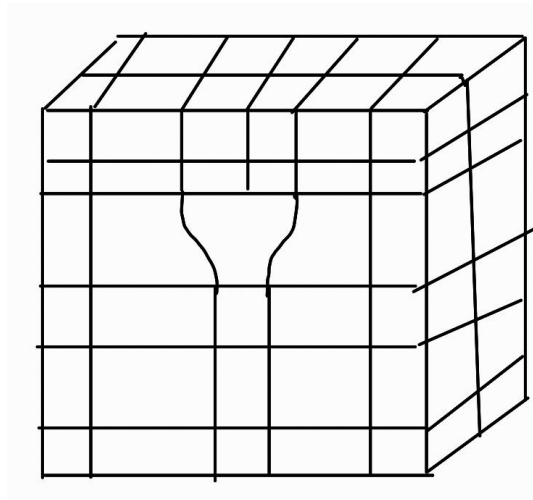


圖 27、(i-a)較小的溶質原子施加拉伸晶格應變並聚集到差排的壓縮應變場(i-b)；
(ii-a)較大的溶質原子施加壓縮晶格應變並聚集到差排的拉伸應變場(ii-b)

無論哪種情況，在溶質原子聚集到差排處後，需要更多的能量移動差排。因此，材料得到強化。

1. 在 Cu 基合金中固溶強化的例子

元素(晶格形式)	與 Cu 的%尺寸差異	室溫最大溶解度(質量%)
Be (HCP)	-11.7	1
Si (鑽石)	-8.6	~4
Ni (FCC)	-2.6	100
Zn (HCP)	+7.0	37 (二相>37%)
Al (FCC)	+11.9	9
Sn (多晶型)	+23	1

(*) (溶質的原子半徑-Cu 的原子半徑)×100/(Cu 的原子半徑)。

(**) 在不同溫度下具有不同的穩定晶格形式。

2. 實用的 Cu 基合金

Cu 基合金的特性是優異的電導率和熱導率、合理的強度和延展性、相對容易加工、良好的耐腐蝕性以及在某些情況下作為軸承的良好性能。銅-鋅合金稱為黃銅，銅-錫合金稱為青銅（但有些合金也稱為青銅）。以下是一些簡單的例子：

- 70%Cu 30%Zn，→彈殼黃銅，因其延展性好且易於冷加工（彈殼是通過深拉制成的）。
- 60%Cu 40%Zn→常見的鑄造合金：低熔點但脆。
- 80%Cu 20%Ni→冷凝管（耐腐蝕）。
- 75%Cu 25%Ni（“Monel”）→硬幣（耐腐蝕性，顏色）。
- 60-55%Cu 40-45%Ni→電阻線。
- 95-93%Cu 5-7%Al→熱交換器。

下面的圖表顯示通過與所示元素合金化可提高 Cu 的強度。

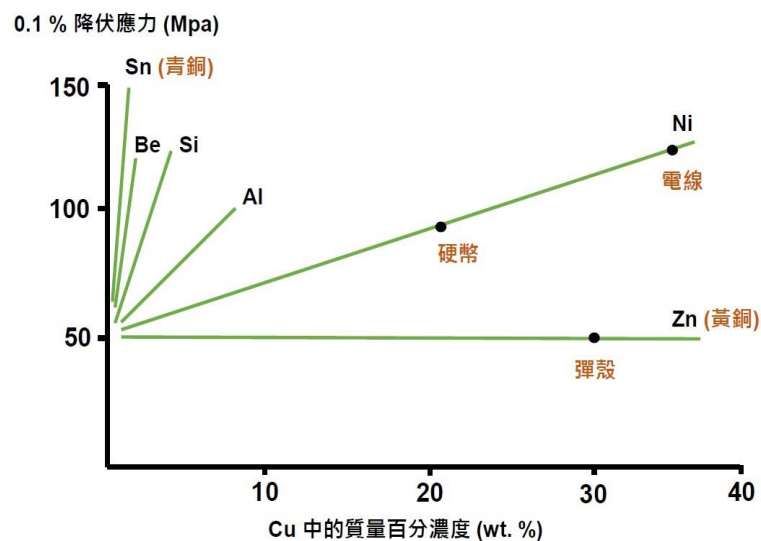


圖 28、0.1% 抗拉強度 (MPa) 隨 Cu 合金中溶質質量百分比的變化

(四) 析出強化

增加合金強度的另一種方法是透過析出強化。差排運動受到第二相固體相的阻礙，理想情況下是均勻分散在原始相內的小顆粒（析出物）。這是一個非平衡過程，意味我們不允許所有平衡反應發生。例如，從單相區快速冷卻可能不會給原子足夠的時間擴散，從而形成平衡相。在這些條件下，可能形成過飽和溶液，即溶液內溶解的溶質原子在平衡條件下會擴散形成第二相。

1. Al-Cu 合金的析出強化

為實現析出強化，需發生以下反應：

- 溶液處理合金（即加熱，使所有溶質原子溶解形成單相固溶體）。
- 快速冷卻（淬火）合金，形成過飽和溶液。
- 再加熱合金至中間溫度並保持（時效），以允許原子擴散並形成析出物。
- 將合金冷卻至室溫（冷卻速度現在通常不再重要）。

我們考慮 Al-Cu 合金系統的平衡相圖作為此過程的起點。在圖 29 的富 Al 端，形成兩個固相。 α 是 Cu 在 Al 中的固溶體（即富 Al）和 θ 是 CuAl_2 固體（不是化合物，而是具有這種組成的固體）。

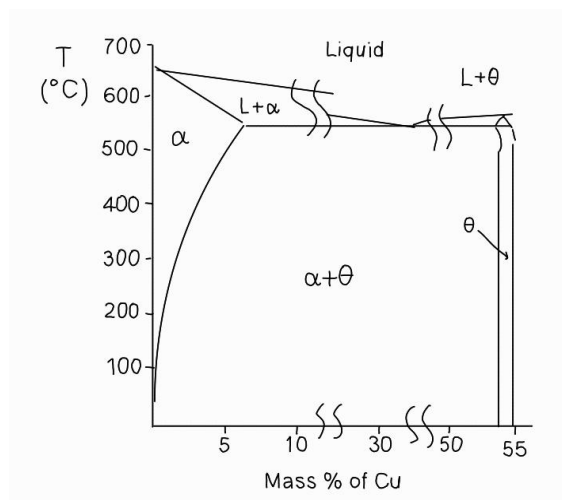


圖 29、Al-Cu 合金系統的相平衡圖

含 96%Al · 4%Cu 的合金在從熔融狀態冷卻時將經歷以下反應：

- L →
- L + α →
- α →

兩相合金在室溫下相當柔軟。θ相在α晶粒邊界處形成大析出物。這在溫度與時間圖示意如下。

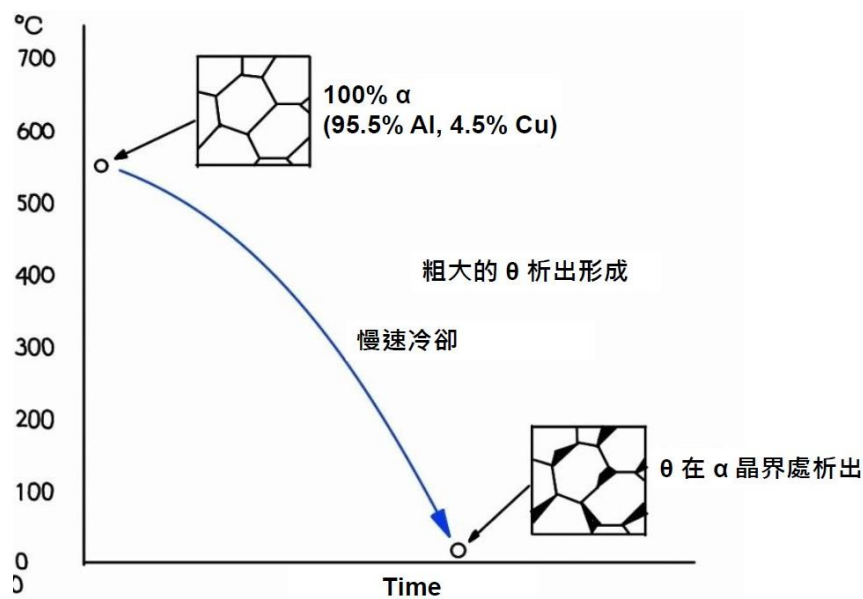


圖 30、含 96%Al-4%Cu 合金的慢速冷卻與時間-顯微結構圖

若從單相α區的冷卻速度很快 (即從 550°C 快速冷卻)，則沒有足夠的時間使 Cu 擴散並與 Al 結合形成 CuAl_2 。在這些條件下，形成 Cu 在 Al 固體中的過飽和固溶體。這是一個柔軟的單相但不穩定的合金 (若放置足夠長的時間， CuAl_2 會析出)。我們現在將合金加熱到 150-200°C 範圍內並保持一定時間 (時效)。在時效期間， CuAl_2 作為細分散相 (作為一系列亞穩相中的最後一個) 析出在 α 相中。合金比淬火時更硬且延展性較差。析出物的形式 (關乎機械性能) 可以在一定範圍內控制。

如圖 31 所示：

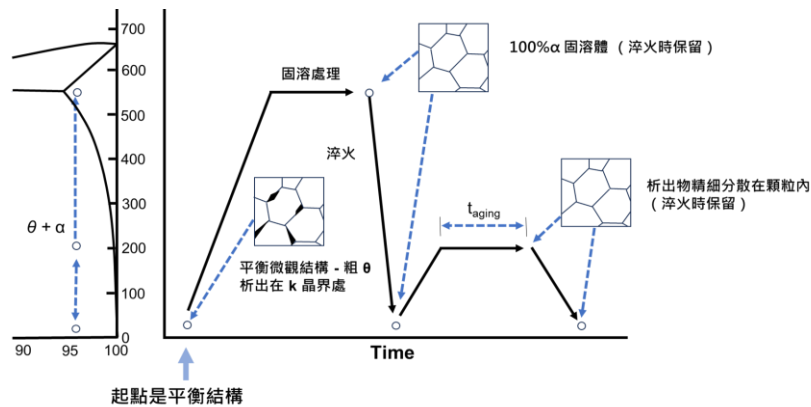


圖 31、含 96%Al · 4%Cu 合金的析出強化溫度與時間圖

2. 溫度和時間在析出形成中的作用

要實現析出強化，第二相須在第一相中溶解度隨溫度增加而增加。這使過飽和溶液成為可能——這是析出強化的基本前提。然而，第二相的形成需要成核和擴散。成核是相的初始形成——即實際上當它形成時，成核速度越快，溫度越遠離第二相在平衡中停止存在的溫度。對於我們正在考慮的 96%Al-4%Cu 合金，這是 500°C。溫度越高，擴散速度越快。因此，第二相的形成本質上是成核和擴散間的競賽。第二相的形成速率(D)可使用的阿瑞尼斯速率定律進行建模，如下式：

$$D = D_0 \cdot \exp(-Q/RT)$$

其中 Q 是過程所需的活化能，R 是氣體常數，T 是溫度 (以 K 為單位)。

96%Al · 4%Cu 合金中， θ 相 (CuAl_2) 的形成速率隨溫度變化如圖 32 所示。

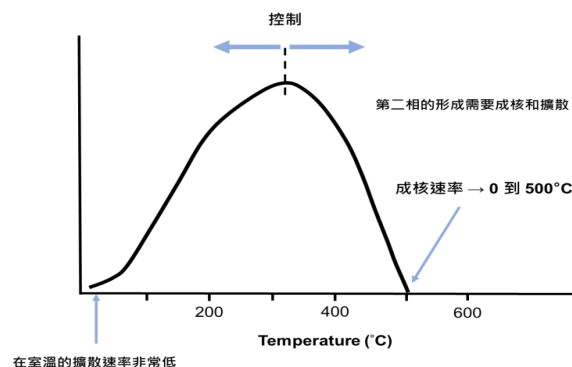


圖 32、含 96%Al · 4%Cu 合金的析出強化溫度與時間圖

- θ 相形成速率隨溫度變化

使用時間-溫度-轉變(TTT)圖為一種方便的方法。此圖顯示在溫度與時間軸上形成的相，如圖 33 所示。

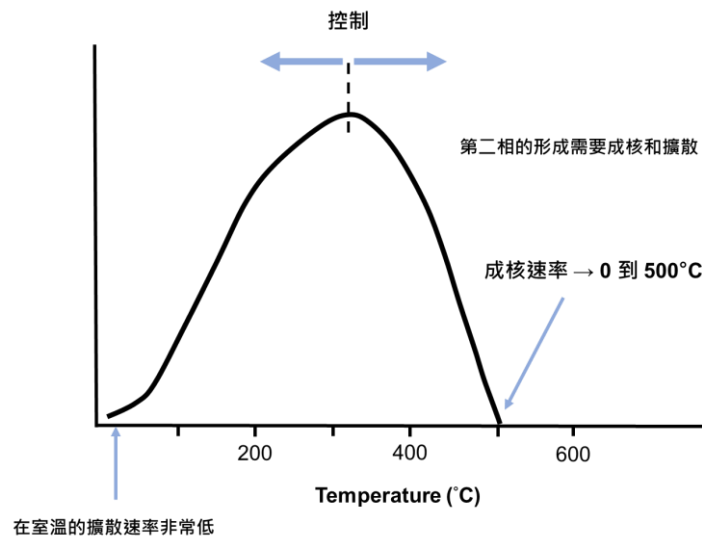


圖 33、含 96%Al、4%Cu 合金的析出強化溫度與時間圖

(五) 參考來源

- 03 : Materials Science
https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Materials_Science
- 05 : Mechanics of Materials
<https://ocw.mit.edu/courses/3-11-mechanics-of-materials-fall-1999/pages/syllabus/>

Section 3-3 金屬-鐵合金

(一) 本單元之學習成果

在學習完本單元內容時，你應該能夠：

1. 描述什麼是固溶強化，解釋強化機制，並用實際例子進行說明。
2. 認識合金的非平衡冷卻，並舉例說明。
3. 解釋什麼是過飽和固溶體，並描述其形成方式。
4. 描述為實現析出強化所需的熱處理，並能夠用 Al-Cu 合金系統進行說明。
5. 解釋時間-溫度-轉變圖，並用這一點協助指定各種合金的熱處理。

(二) 本單元之重要性

鋼一直是 (可能仍然是) 最重要的工程材料。幾乎無法想像沒有鋼的生活。我們周圍到處都可看到鋼的應用。作為工程師，我們需要能夠利用這種最具多樣性的材料。



圖 34、(a)建築廣泛使用之低碳鋼；(b)用於軸承之高碳鋼 (找尋免費開源素材)

(三) 含鐵合金的分類

含鐵的合金通常根據碳含量進行分類，此外也取決於除碳以外是否還存在其他合金元素。由於碳原子比鐵原子小得多，因此可形成間隙固溶體。若鐵合金中

碳的含量介於 0.04%到 1.7%間，則稱為鋼。若合金中的碳含量超過 1.7%，則稱為鑄鐵。鋼可進一步細分，根據含有其他合金元素 (除碳外) 的比例進行區分。當碳是唯一顯著的合金元素時，我們稱其為低合金鋼 (或簡單稱為碳鋼)。普通碳鋼只含有鐵和碳。若合金中還有顯著比例的其他合金元素，則稱其為合金鋼 (或高合金鋼)。圖 35 展示根據碳含量進一步細分低合金鋼。

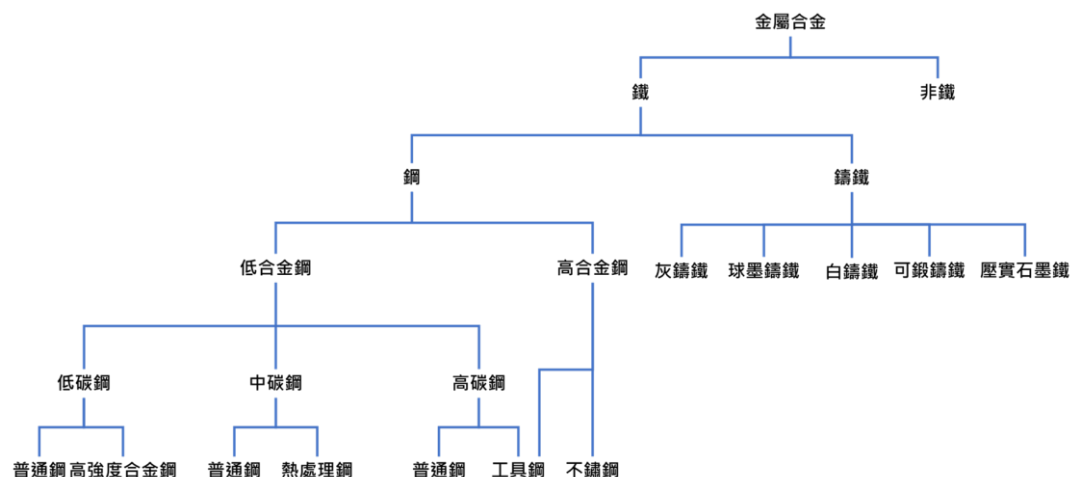


圖 35、鐵合金的分類

- 低碳鋼 (軟鋼)：碳含量在 0.04%-0.3%之間。
- 中碳鋼：碳含量在 0.3%-0.7%之間。
- 高碳鋼：碳含量在 0.7%-1.7%之間。
- 如果碳含量在 1.7%-4%之間，則稱為鑄鐵。
- 若碳含量超過 4%，則合金太脆，不適合工程使用。

低合金鋼可含有最多 6%的鉻 (Cr)、鎳 (Ni) 等。不銹鋼則含有 18%的鉻和 8%的鎳。鑄鐵則根據是否含有其他合金元素進行分類。白口鑄鐵僅含有碳和鐵，而灰口鑄鐵還可含有矽 (Si)、鎂 (Mg) 和鈾 (Cerium)。

鐵合金的機械性質在很大程度上取決於合金中碳的含量，及合金中是否含有其他合金元素和加工歷史。

(四) Fe-C 合金的微觀結構

鐵碳合金的材料性能有著非常廣泛的範圍，因為可能存在各種不同的微觀結構。為理解不同的微觀結構及其如何影響機械性能，需要熟悉鐵的不同形式。

1. 純鐵的形式

為了實際應用，我們將純鐵定義為含碳量低於 0.03% 的鐵。根據溫度不同，純鐵存在三種形式。肥粒鐵 (或 α -鐵) 具有體心立方 (BCC) 晶體結構，並在低於 910°C 的溫度下存在。肥粒鐵具有磁性。沃斯田鐵 (或 γ -鐵) 具有面心立方 (FCC) 晶體結構，存在於中間溫度範圍 (910°C < T < 1391°C)，且無磁性。最後， δ -肥粒鐵具有 BCC 晶體結構，是鐵的高溫形式，存在於 1391°C < T < 1536°C 的範圍內 (即熔點)。主要的是前兩種形式。

2. Fe-C 合金

α 、 γ 和 δ (如上所述) 這些術語也用來描述 C 在 Fe 中的間隙固溶體。肥粒鐵和沃斯田鐵用來描述 α 和 γ ，但這些不是純鐵形式，而是 Fe-C 合金，C 作為間隙溶質原子存在於溶劑原子的間隙中。名稱保留下來是因為合金中的晶體結構相同：肥粒鐵仍具有 BCC 結構，而沃斯田鐵仍具有 FCC 結構 (注意，由於其物理結構不同，這些是不同的相)。除肥粒鐵和沃斯田鐵，Fe-C 合金中還可以形成第三相，即 Fe_3C (稱為雪明碳鐵)。它的固定碳含量為 6.7%，是一種硬且脆的化合物。鋼的機械性能在很大程度上取決於雪明碳鐵在微觀結構中的存在量。

3. Fe-C (嚴格來說是 Fe- Fe_3C) 平衡相圖

鋼和鑄鐵的平衡微觀結構和由此產生的機械性能可透過 Fe-C 平衡相圖得出。這個圖比之前介紹的鋁銅合金要複雜一些，這是因為 Fe-C 合金在不同溫度下會有不同的相，如上所述。Fe-C 相圖中僅加入額外的層次容納這些。圖 36 顯示相圖。共晶點在 4.3%C 和 1,130°C 的溫度下。然而，這個共晶合金因碳含量過高而在實際用途中太脆。對於鋼材加工，我們關注的是 0.04% < C < 1.7% 的區間。在單相 γ 區和雙相區之間，定義了一個「類共晶

點」。α+Fe₃C 區域被稱為共析點。共析成分存在於約 0.8%C，該成分相對於此共析點的特性主要決定鋼的性能。在共析點，固體與兩個其他固體相平衡（此處，γ與α和 Fe₃C 平衡）。

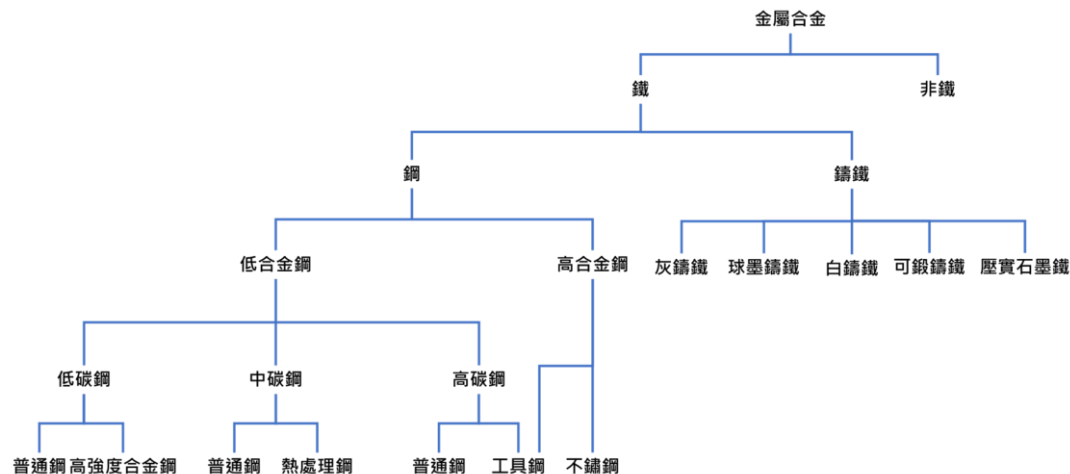
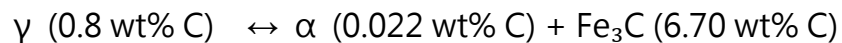


圖 36、共晶和共析點的 Fe-C 平衡相圖

4. 共析組成和微觀結構

雪明碳鐵 (Fe₃C) 硬且脆，但與之相比，肥粒鐵 (α) 則相對柔軟且有延展性。然而，在描述碳鋼中的不同微觀結構之前，我們需要定義一個結構：波來鐵。波來鐵是共析結構，由交替的肥粒鐵和雪明碳鐵層組成。共析組成的合金在平衡條件下從 γ 相冷卻時，會完全轉變為波來鐵。在此共析成分中，存在於 723°C 以下的兩個固相完全在波來鐵結構中。共析反應表示為：



上圖括號中的數字表示每個相的碳重量百分比，可逆箭頭表示加熱肥粒鐵和雪明碳鐵可以逆向進行。圖 37 顯示冷卻共析鋼時形成的微觀結構。

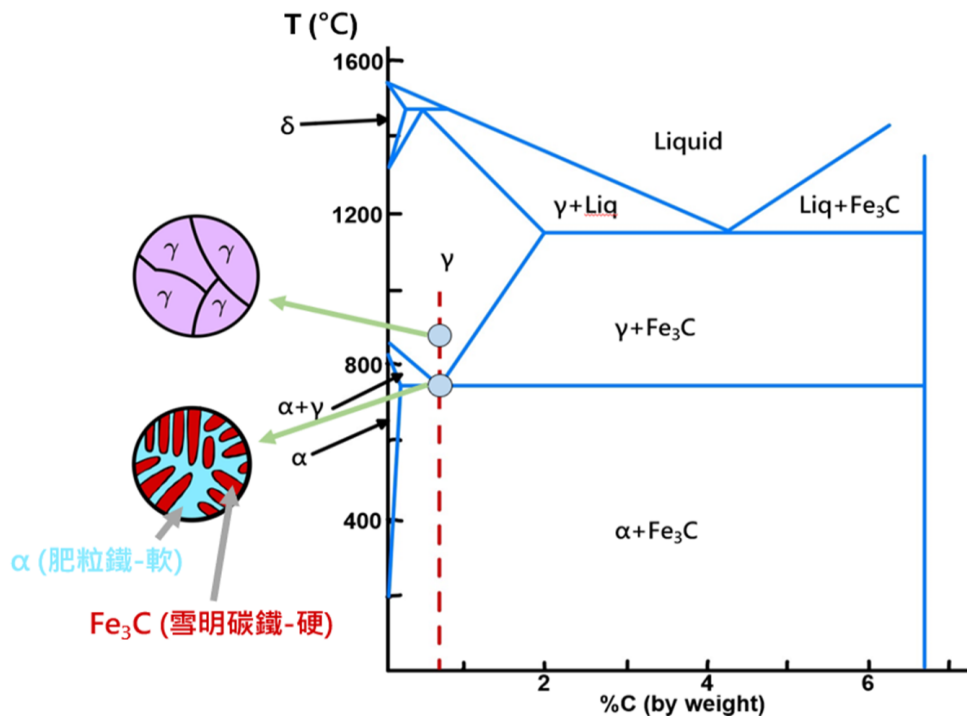


圖 37、顯示共析鋼冷卻時形成的微觀結構的 Fe-C 平衡相圖

波來鐵由 α 和 Fe_3C 在共析溫度下同時沉澱形成。這不是一個單一相，而是兩相的特定排列。圖 38 顯示波來鐵的形成和其微觀結構的照片。

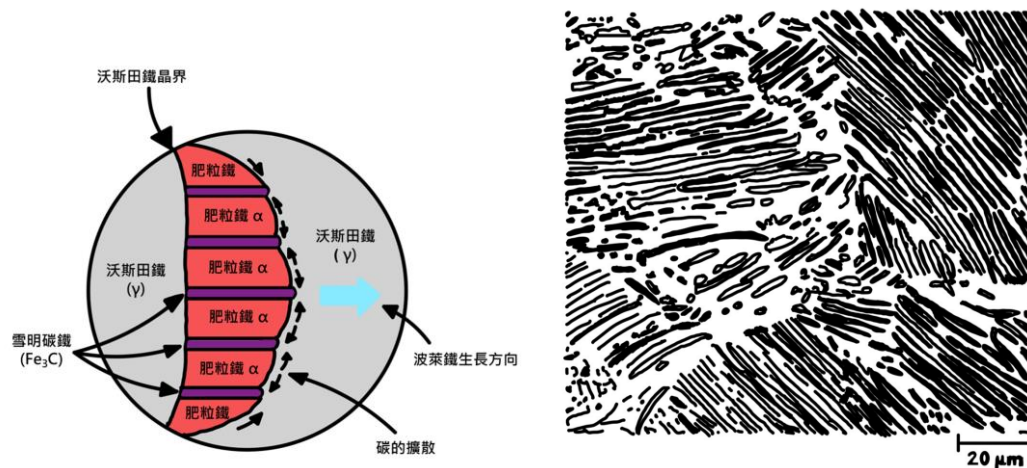


圖 38、顯示共析鋼冷卻時形成的微觀結構的 Fe-C 平衡相圖

5. 亞共析和過共析組成

含碳量低於共析組成的合金稱為亞共析鋼，含碳量高於共析組成的合金稱為過共析鋼。在共析溫度下冷卻，亞共析鋼將冷卻形成肥粒鐵和波來

鐵的微觀結構。過共析鋼將冷卻形成雪明碳鐵和波來鐵的微觀結構。在這兩種情況下， γ 向波來鐵的轉變發生在共析溫度。在亞共析鋼的冷卻過程中， γ 通過雙相區 ($\alpha + \gamma$) 冷卻到共析溫度。這種反應前形成的肥粒鐵稱為初析肥粒鐵，可表示為 α_p 以區別於波來鐵中的 α 。同樣，過共析鋼的 γ 通過雙相區 ($\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$) 冷卻到共析溫度。這種反應前形成的雪明碳鐵稱為初析雪明碳鐵，表示為 $(\text{Fe}_3\text{C})_p$ 。

亞共析反應： $\gamma \leftrightarrow \alpha_p + \gamma \leftrightarrow \alpha_p + (\alpha + \text{Fe}_3\text{C})$ 共析波來鐵

過共析反應： $\gamma \leftrightarrow \gamma + (\text{Fe}_3\text{C})_p \leftrightarrow (\text{Fe}_3\text{C})_p + (\alpha + \text{Fe}_3\text{C})$ 共析波來鐵

初析的 α_p 和 $(\text{Fe}_3\text{C})_p$ 在共析反應中保持穩定。未轉變的 γ 在共析溫度下轉變為 $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ ，即共析波來鐵。

不同合金中肥粒鐵、雪明碳鐵和波來鐵的比例可透過槓桿定則確定。與先前一樣，槓桿的支點放在已知的成分處，槓桿臂延伸到相應的相界。當確定波來鐵的比例時，共析成分 (0.8% C) 可視為相界，計算在共析溫度下進行。在從共析溫度冷卻時， α 與 Fe_3C 的比例會略微下降 (由於單相 α 的邊界並不完全垂直)，但波來鐵的結構是穩定的，因此在冷卻到室溫時基本上保持相同的比例。

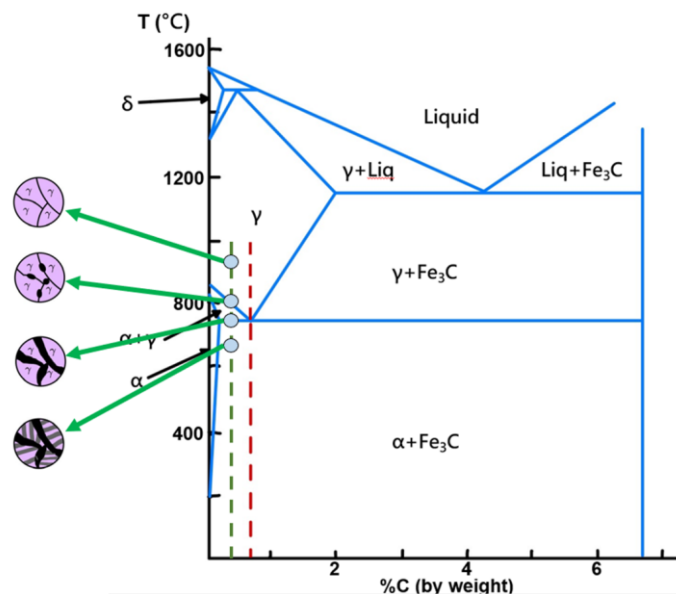


圖 39、在緩慢冷卻亞共析鋼過程中獲得的顯微結構

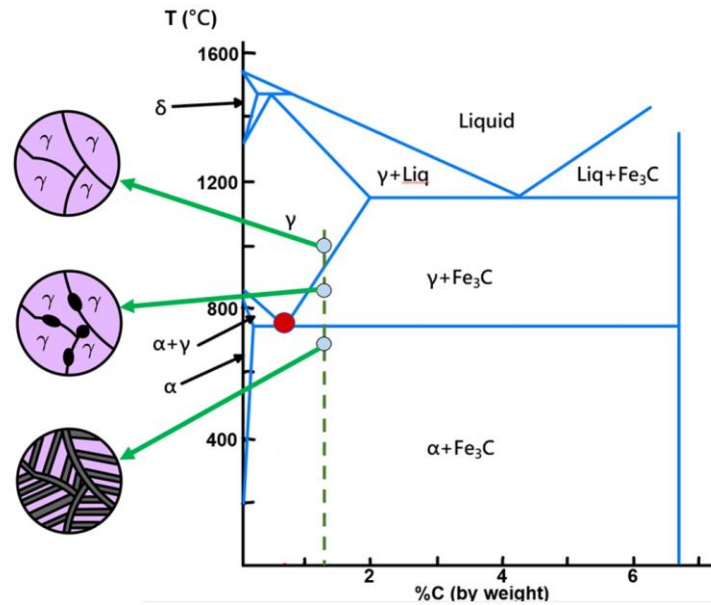


圖 40、在緩慢冷卻超共析鋼過程中獲得的顯微結構

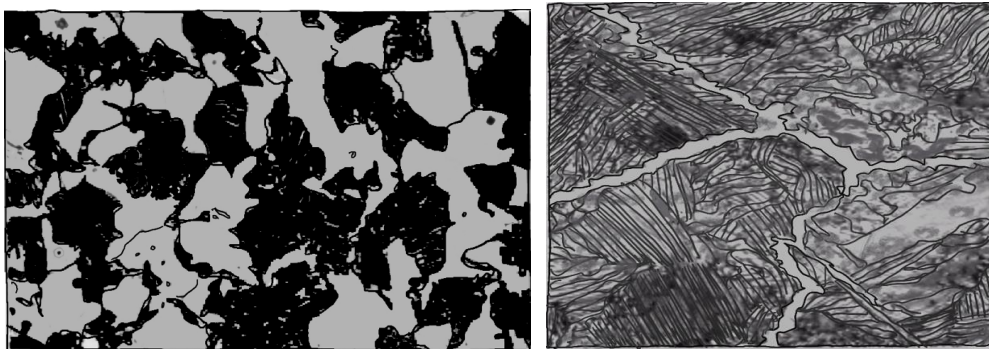


圖 41、(a)亞共析鋼的顯微結構；(b)過共析鋼的顯微結構示意圖

(五) 鑄鐵

含碳量超過 1.7% 的鐵-碳合金被稱為鑄鐵。由於較高的碳含量，鑄鐵比鋼更脆。鑄鐵有多種類型。白口鑄鐵只有碳作為唯一的合金元素，所有的碳都以波來鐵和雪明碳鐵的顯微結構中存在的雪明碳鐵形式存在。這使其具有極高的硬度但低韌性。白口鑄鐵具有出色的耐磨性。灰口和球墨鑄鐵含有碳以外的其他合金元素。添加 2% 的硅+鎂+鉍可導致石墨化，使碳以片狀或球狀形式存在於基體中。片狀石墨在灰口鑄鐵中，球狀石墨在球墨鑄鐵中。片狀石墨強度極低且易形成內部裂紋，導致灰口鑄鐵非常脆。球狀石墨具有更高的強度，並在合適的熱處理下能具有合理的延展性。

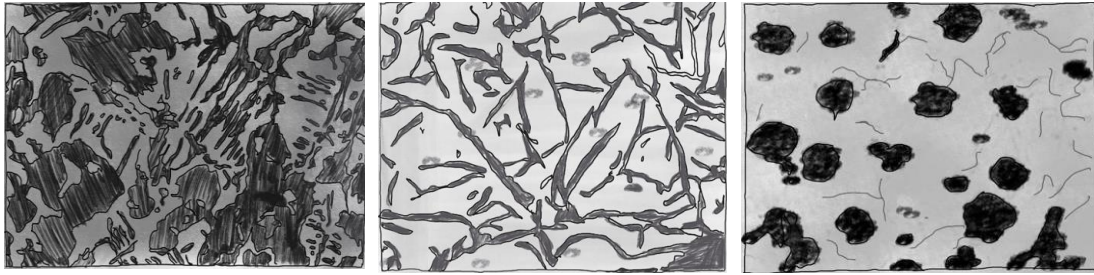


圖 42、(a)白口鑄鐵；(b)灰口鑄鐵；(c)球墨鑄鐵 之示意圖

(六) 範例問題

將 1.5% C 鋼從液態慢慢冷卻到 720°C。計算在此溫度下，肥粒鐵、雪明碳鐵和波來鐵的比例。

解決方法：在課堂中詳細講解。使用槓桿法則

步驟 1：將槓桿的支點放在 1.5%C 和 720°C 處。

步驟 2：將槓桿的臂（連接線）延伸到各相邊界（肥粒鐵和雪明碳鐵）。

步驟 3：平衡槓桿。

(七) 參考來源

- 03 : Materials Science
https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Materials_Science
- 05 : Mechanics of Materials
<https://ocw.mit.edu/courses/3-11-mechanics-of-materials-fall-1999/pages/syllabus/>

Section 3-4 金屬熱處理

(一) 本單元之學習成果

在學習完本單元內容時，你應該能夠：

1. 解釋為什麼需要不同的熱處理。
2. 定義以下術語：退火、加工退火、正火、淬火和回火。
3. 描述一些鋼材的非平衡形式，並討論這些形式的主要微觀結構特徵和機械性能。
4. 解釋時間-溫度轉換圖(TTT)並能夠用它來分析不同熱處理所產生的微觀結構。

(二) 本單元之重要性

熱處理將顯著影響微觀結構，從而影響最終合金的性能。作為工程師，我們需理解為什麼需實施熱處理？它們對微觀結構和性能有什麼影響？及如何利用它們來控制上述影響和熱處理的侷限性。

(三) 非平衡相和結構

在前述章節中，我們研究在慢冷或平衡條件下發生的相變。平衡轉換是由原子的擴散驅動。然而，若冷卻速度太快無法進行正常的碳原子擴散，則會形成其他結構或相。可能有很多種情況，但我們將重點集中在以下幾個方面：i)細波來鐵，ii)變韌鐵，iii)麻田散鐵和 iv)回火麻田散鐵。每一種相或結構都賦予最終鋼材不同的機械性能。熱處理的目標是獲得特定的微觀結構，以提供所需的機械性能。

1. 粗波來鐵和細波來鐵

完全退火，即非常緩慢的爐內冷卻，會導致形成粗波來鐵，即平衡結構。

正火，即更快的空氣冷卻，會導致形成更細的波來鐵結構。這是因為原子擴散的時間較少，所以它們擴散的距離較短，形成更細的結構。細波來鐵比粗波來鐵具有更高的鋼材強度，但延展性較低。

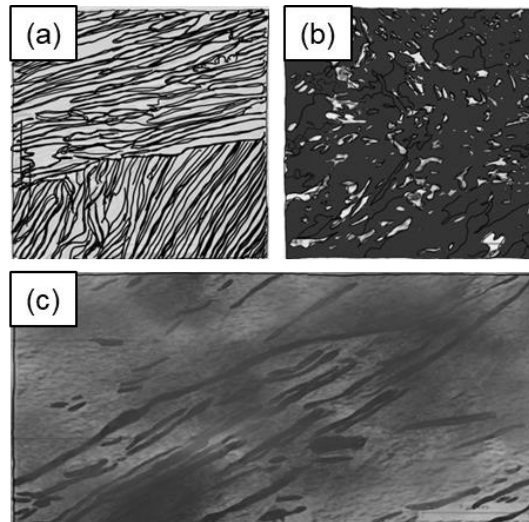


圖 43、(a)粗波來鐵；(b)細波來鐵；(c)變韌鐵之示意圖

請注意，在圖 43(b)中，黑色區域表示波來鐵層狀結構在此比例下太小而無法解析的區域，而在圖 1(c)中，比例尺較小。

2. 變韌鐵

變韌鐵透過沃斯田鐵轉變形成。像波來鐵一樣，它由兩個相組成，肥粒鐵和碳化物。然而，變韌鐵的結構非常精細，只能透過電子顯微鏡解析。變韌鐵以針狀或板狀形式出現，取決於轉變溫度。它在比波來鐵更低的溫度下形成。圖 43(c)顯示一顆由麻田散鐵包圍的變韌鐵晶粒。晶粒由非常細長的肥粒鐵中碳化物區域組成。

3. 麻田散鐵

若淬火，如在水中非常快速冷卻，則原子將沒有時間通過結構進行擴散。若純鐵從 γ 區域 ($>910^{\circ}\text{C}$) 非常快速地冷卻 (如， $\sim 105^{\circ}\text{C/s}$ ，這只有在非常薄的截面中才可能)，則鐵原子將沒有時間從 γ -鐵 (面心立方，FCC) 轉變為 α -鐵 (體心立方，BCC)，因此 γ -鐵 (FCC) 將在冷卻到 $<550^{\circ}\text{C}$ 時保持穩定。低於 550°C ， γ -鐵變得非常不穩定，以至於晶體內的小區域通過位

移而非擴散轉變為一種扭曲的 BCC 形式，稱為體心四方(BCT)結構。這種單相結構稱為麻田散鐵。同樣的基本轉變也會在鋼中發生，儘管轉變溫度取決於碳含量。圖 44(a)顯示麻田散鐵的結構，即被未能轉變的殘留 γ 包圍的麻田散鐵針狀結構。麻田散鐵非常硬且強，但非常脆。

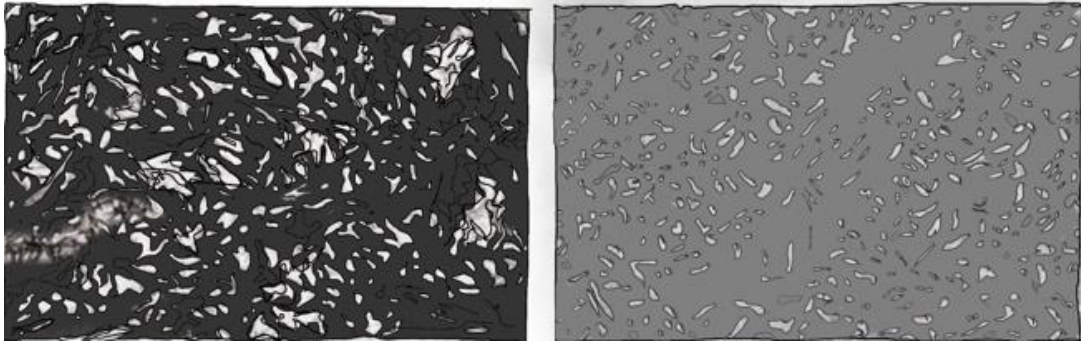


圖 44、(a)麻田散鐵；(b)回火麻田散鐵之示意圖

4. 回火麻田散鐵

為恢復一些延展性，麻田散鐵結構可進行回火，即重新加熱到一定溫度並保持，以允許一些原子擴散和應力釋放的發生。回火溫度範圍在 250°C - 650°C 之間（但請注意，通常會避免 300°C - 500°C 的範圍，因為雜質會導致脆化）。得到的結構稱為回火麻田散鐵，具有更好的強度和延展性平衡。在圖 44(b)中，小顆粒是看似較暗的肥粒鐵基體中明顯的碳化物相。

（四）熱處理

熱處理涉及非平衡過程，並用於改變微觀結構以獲得所需的機械性能。在此我們將考慮對共析鋼的熱處理，並利用時間-溫度轉換圖(TTT)。

1. 回火共析鋼

由於熱處理使用非平衡過程，我們無法透過使用平衡相圖和槓桿法則推導最終的顯微結構。需使用另一種方法。時間-溫度轉變圖（TTT 圖）顯示在不同熱時效下形成的相或結構。這些圖是透過大量相同的樣品、將樣品超冷至不同溫度，然後等溫保持並測量形成的相和時間來獲得的。可透過電子顯微鏡或在一定延遲時間後進行快速冷卻進行常規檢查。

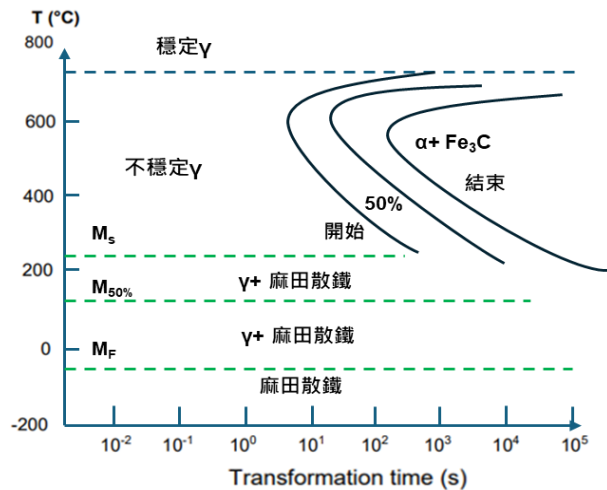


圖 45、共析鋼的 TTT 圖

2. TTT 圖中顯示的各種熱處理

完全退火、正火、油淬 (相當快的冷卻) 和水淬 (非常快速的冷卻) 的處理顯示於圖 46。一旦形成粗或細波來鐵或變韌鐵結構，這些結構就非常穩定，除非重新加熱回到穩定的 γ 區域，否則不會轉變成其他任何東西。麻田散鐵的形成是因為抑制原子擴散。然而，若麻田散鐵受熱到能夠進行原子的擴散，則會形成肥粒鐵和碳化物相。在室溫下擴散速率非常慢，許多鋼材幾乎可無限期保持其麻田散鐵結構。

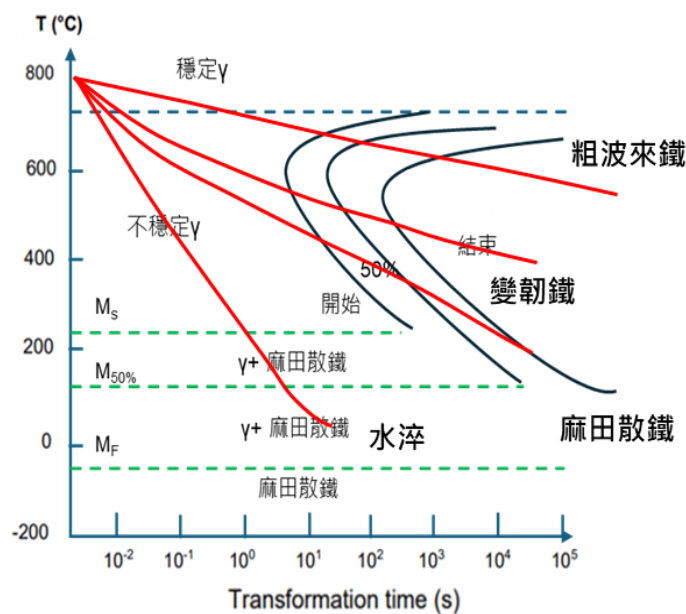


圖 46、TTT 圖上的熱處理

鋼轉變為麻田散鐵的能力取決於碳含量。碳的存在會降低 M_s 和 M_f 溫度。更多的碳會導致更多的晶格扭曲，因此麻田散鐵會隨著碳含量的增加而變得更硬脆。然而，若碳含量超過 0.7%，那麼 M_f 溫度會降至環境溫度以下，且麻田散鐵的轉變無法完成。因此，合金硬度在超過 0.7% 的碳含量後不會增加太多。

M_s 和 M_f 溫度隨碳含量變化的情況顯示在圖 47 中。另一個降低碳含量的影響是，這會將 TTT 圖的“鼻端”向左移動。意味要形成麻田散鐵，需更快的冷卻速率（即要避免形成波來鐵的轉變）。實際上，麻田散鐵的形成需要最低 0.4% 的碳含量，才能使冷卻速率達到可行。

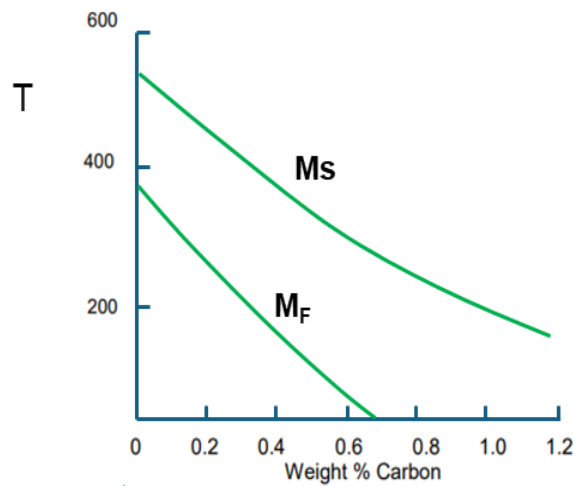


圖 47、 M_s 和 M_f 溫度隨碳含量的變化

3. 鋼的淬火和回火

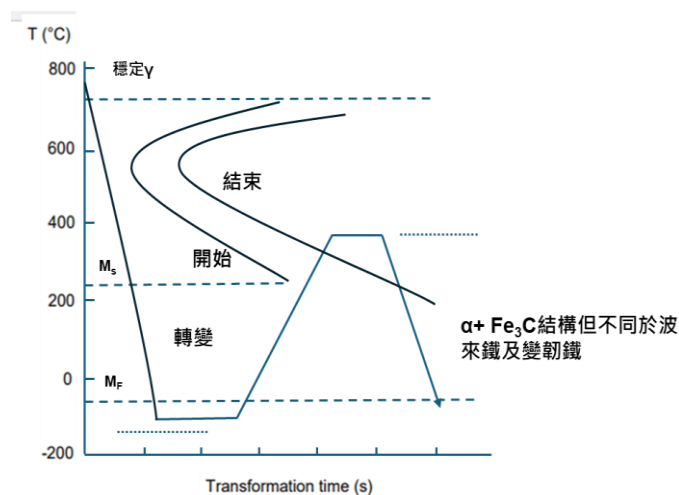


圖 48、TTT 圖中的鋼的淬火與回火

(五) 機械性質

一般來說，隨鋼中碳含量增加，鋼的強度和硬度會提高，但延展性和韌性會降低。

- 低碳鋼：具有低強度但良好的延展性和韌性，且可焊接。它是一種良好的通用鋼材，廣泛用於建築。這種鋼材的用量最大且成本最低。通常是經過退火、正火或冷加工處理。
- 中碳鋼：具有中等的強度和韌性。它常用於螺帽、螺栓、齒輪和軸，並且經常經熱處理以達到所需的性質。
- 高碳鋼：具有高強度和硬度但低韌性。它用於彈簧、滾珠和滾子軸承，幾乎總是以熱處理的形式供應。

關於鋼材分類的註釋：鋼材通常由汽車工程師協會 (SAE) 或美國鋼鐵學會 (AISI) 等組織進行分類。現在普遍的格式是應用四位數字代碼，其中第一位表示主要的合金元素，第二位表示次要合金元素，第三和第四位則指示碳的百分含量。例如，1030 代表含有 0.3% 碳的普通碳鋼。

(六) 參考來源

- 03 : Materials Science
https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Materials_Science
- 05 : Mechanics of Materials
<https://ocw.mit.edu/courses/3-11-mechanics-of-materials-fall-1999/pages/syllabus/>

Chapter 4

陶瓷、高分子與化合物

Section 4-1 陶瓷

Section 4-2 聚合物-結構和拉伸性能

Section 4-3 化合物

Section 4-1 陶瓷

(一) 本單元之學習成果

在學習完本單元內容時，你應該能夠：

1. 描述陶瓷是什麼，並能舉出高性能陶瓷在工程應用中的例子。
2. 描述它們呈現的晶體結構類型。
3. 透過引用它們的晶體結構和原子間鍵合特徵以解釋陶瓷材料的機械行為。
4. 描述陶瓷材料的製造方法並解釋其如何影響其最終的機械行為。
5. 描述陶瓷材料的優缺點，了解它們的優勢和局限性。

(二) 本單元之重要性

陶瓷是一類具有獨特性質的材料，作為工程師，我們希望能有效利用它們的特性以開發具備優異性能之元件。儘管陶瓷材料的韌性相對較低，其具有高硬度、優異的高溫和耐腐蝕性、且是熱和電的絕緣體等特徵，仍使其能被應用於多種領域。

如： Si_3N_4 軸承、太空梭瓷片、防彈衣等。

(三) 什麼是陶瓷？

陶瓷是非金屬的無機固體材料，它們已被人類使用了數千年。所謂的傳統陶瓷包括基於黏土製作的磚、瓦、瓷器、管道和陶器。作為工程師，我們主要須關注的是高性能陶瓷在工業上的應用價值，包括金屬氧化物，如 Al_2O_3 、 MgO 、 ZrO_2 ，和共價非金屬化合物，如 SiC 、 SiO_2 、 Si_3N_4 、金剛石、石墨。陶瓷材料中的鍵合是由其離子性程度描述的，例如，此範圍可從 MgO 的 73% 離子性到 SiC 僅 12% 的離子性（即主要是共價鍵）。

(四) 晶體結構

陶瓷形成高度有序的 (結晶) 結構，通常比金屬的結構更複雜，因為它們至少由兩種不同的元素組成。帶正電的陽離子與帶負電的陰離子鍵合形成晶體結構。例如， MgO 的結構類似於 NaCl ： Mg^{++} 離子 (陽離子) 與 O^- 離子 (陰離子) 交替形成面心立方 (Face center cubic, FCC) 晶格，且其整體電荷為平衡。在最簡單的結構中，每個陰離子對應一個陽離子。當離子價數不同時，即正電荷 $\neq$ 負電荷，我們將有不同數量的陰離子和陽離子。

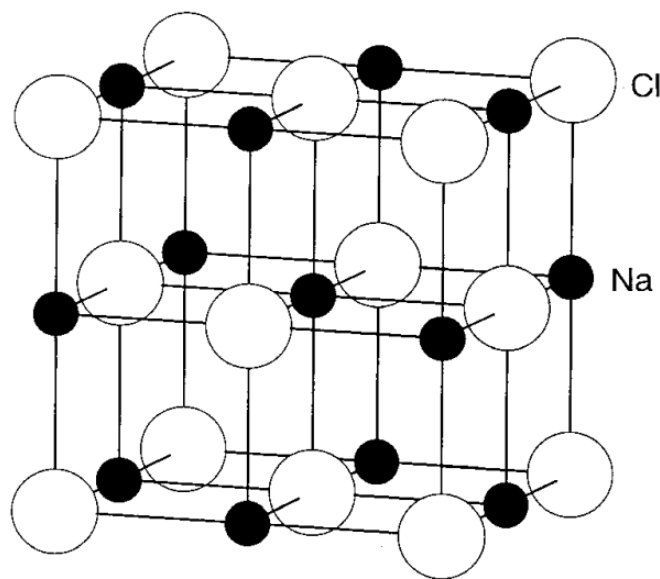


圖 49、一個 NaCl 的單位晶胞。其晶格是面心立方

玻璃具有許多與陶瓷相同的特性，但它們是非晶態的，即材料內部並未呈現有序的結晶結構排列特徵。

(五) 陶瓷的機械行為

- 楊氏模量：離子鍵比金屬鍵的剛性更高，因此陶瓷具有較高的楊氏模數。
- 強度：離子鍵的鍵結能比金屬鍵更高、需要更多能量才能使其斷裂，因此陶瓷的降伏強度比大多數金屬高。然而，陶瓷在拉伸中很少降服 (它們通常較容易破裂)。此外，陶瓷抵抗壓縮之能力比起受拉伸時更強 (裂紋因壓縮而閉合)。

- 延展性：陶瓷材料中進行晶面之滑移比在金屬中更困難，這是由於具備相同極性的離子在滑移之過程會產生排斥力、使滑移所需的剪應力變高，因此陶瓷對晶面滑移的抵抗力高，然而延展性卻非常低。
- 韌性：內部缺陷容易導致材料內部之應力集中，因此陶瓷的斷裂強度通常很低。事實上，陶瓷的低韌性是它們主要的缺點，現今研究正努力試圖開發具有更高韌性的陶瓷材料。

（六）測量陶瓷的「拉伸」性質

由於陶瓷材料各項性質間的綜合作用影響，一般難以對其進行拉伸測試、且在測試樣本製作上也深具挑戰，甚至在成功製作樣本後也常因夾持問題(易破裂)而難以進行準確量測。此外，由於陶瓷材料的破壞應變非常小，量測時對樣本是否對準則變得非常重要，實驗誤差也因此較高。由於上述原因，針對陶瓷材料的強度測試、更以三點或四點彎曲測試進行分析。陶瓷材料的斷裂通常出現在樣本的下半部拉伸面。由此測試可確定其彎曲強度。

（七）其他特性

- 硬度：陶瓷具有高硬度（陶瓷顆粒經常用作磨料）。
- 潛變阻力：陶瓷內會發生潛變，但此行為發生之溫度通常比金屬更高。
- 疲勞阻力：陶瓷材料的疲勞現象通常具有二步驟，包含裂紋的產生和裂紋生長到臨界長度。由於在陶瓷中的晶面滑移比在金屬中更困難，亞臨界裂紋生長的可能性較小。如果載荷足夠高，則斷裂會立即發生。
- 物理性質：
 - (1) 密度：範圍約介於 $2.5-6.0 \text{ mg/m}^3$ ，相當於較輕的金屬。
 - (2) 熱導率和電導率：良好的絕緣體（因為沒有自由電子）。
 - (3) 熔點：範圍約在 $1,900-2,800^\circ\text{C}$ ，比金屬高（由於陶瓷的鍵能較高）。
 - (4) 耐腐蝕性：極佳（金屬氧化物陶瓷材料多為金屬或合金材料的腐蝕產物）。

(八) 現代陶瓷的製造

與金屬和許多高分子聚合物不同，陶瓷不能透過熔化材料、並倒入模具成型。一般工業上的做法為將陶瓷顆粒與結合劑/潤滑劑（通常是水）混合，然後在一定壓力下加壓成型，如以單軸粉末壓製成型或以成本更昂貴的熱等靜壓粉末壓製成型技術進行，待完成粉末壓製後，對樣本進行燒結（加熱以使相鄰顆粒間的晶界合併）處理，而此過程往往會在結構中留下球形孔隙，這些孔隙為導致陶瓷材料呈現較低韌性值的主要原因。

(九) 應用

一般來說，陶瓷是硬而脆的材料，由於缺乏延展性（即斷裂應變小），其韌性非常有限。在某些情況下，可以實現較高的強度和剛性，但這取決於材料的成分和孔隙率等性質。某些陶瓷被考慮用於熱防護的原因在於它們能夠承受極高的溫度。即使在這些高溫下，原子之間的鍵依然非常穩固。這種強鍵結也意味著陶瓷通常具有很高的耐磨性。

這裡提及陶瓷的多種典型應用。首先是玻璃的應用，玻璃用於窗戶、鏡片以及纖維中。玻璃纖維是一種非常穩定的纖維，在拉伸和壓縮下都具有很高的機械性能。在高應變速率下，玻璃通常比在準靜態負載下具有更高的強度。

陶瓷的另一個例子是黏土，瓷器和磚塊是這類陶瓷的知名例子。在土木工程應用中，不僅使用磚塊，還有水泥和石灰，它們也是陶瓷應用的一部分。

其他例子包括：由於陶瓷的高耐磨性，使其適用於切削工具和磨料材料；由於高抗刺穿性，用於裝甲加強；玻璃纖維的高抗衝擊性也使其廣泛應用。前述的高耐熱性（1600–1700°C）則使陶瓷被用於引擎部件和熱防護系統，例如太空梭的防熱系統。圖 50 展示了陶瓷應用的一些選擇。



圖 50、陶瓷材料應用範例

主要應用陶瓷的一些關鍵特性 (如：高楊氏模量、硬度、耐磨性、電/熱絕緣性和耐腐蝕性)。因此包括：

- (1) 磨料：將陶瓷顆粒黏附於研磨砂紙上。
- (2) 切削工具：特別是在形成金屬基複合材料時之應用，如碳化鎢。
- (3) 裝甲：防彈衣和車輛裝甲 (如：BN、B4C)。其高硬度可以抵抗子彈轟擊。
- (4) 絕緣：電絕緣應用，如：高壓電線路、火星塞；熱絕緣，如：太空梭上的隔熱瓦片。
- (5) 奈米顆粒：常添加於軟質材料中，使材料硬度提高而不使其過度脆化。
- (6) 固態氧化物燃料電池：絕緣、耐腐蝕。

(十) 參考資料

- 01：Introduction to Aerospace Structures and Materials
<https://open.umn.edu/opentextbooks/textbooks/introduction-to-aerospace-structures-and-materials>
- 04：Inorganic Chemistry
[https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Inorganic_Chemistry/Inorganic_Chemistry_\(Saito\)](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Inorganic_Chemistry/Inorganic_Chemistry_(Saito))

Section 4-2 聚合物-結構和拉伸性能

(一) 本單元之學習成果

在學習完本單元內容時，你應該能夠：

1. 熟悉三種主要的高分子聚合物類別，並能夠舉例描述它們在受熱作用之響應和分子結構方面的差異。
2. 可描述常見聚合物類型中的原子間和分子間鍵合的性質。
3. 可解釋聚合物的強度和剛度與鍵長和側鏈性質的關聯性。
4. 認識脆性、塑性和彈性拉伸行為，並能夠在應力-應變曲線中識別拉伸模數、降服強度和延展性。

(二) 本單元之重要性

聚合物的應用在過去的幾十年中顯著增長。作為工程師，我們需要對聚合物的性質有基本的認識，並了解它們的優勢和侷限性、更有效率地使用聚合物可為現代設計提供很大的好處，然而，作為地球公民的一員，我們也非常熟悉應用聚合物代替金屬（設計幾乎不變或完全不變）所引起的問題，如塑料餐具就是一個顯著的例子。為實現上述應用中所需的材料性能，可採用各種不同的聚合物類型。此外，了解聚合物結晶度相當重要，因為結晶聚合物的機械性質不同於非晶聚合物，一般而言，聚合物晶體比聚合物的非晶區域更為堅硬。例如，高強度纖維可以由聚乙烯生產，而它更常見於購物袋和塑膠杯等應用，其中低成本和易於製造是選擇材料的關鍵考慮因素。

(三) 聚合物的分類

聚合物（或塑料）可以分為三種主要材料類型：熱塑性塑料、彈性體（或橡膠）和熱固性塑料。這些聚合物類型間的主要差異在於它們的結構和存在的原子間鍵合。



圖 51、聚合物的典型應用

(四) 結構

1. 鏈結構

聚合物由長分子 (即大分子) 組成，這些分子包含由共價鍵連接的原子鏈。聚合物是透過稱為聚合 (Polymerisation) 的過程產生的，在此過程中，許多單體 (Monomer) 分子相互進行化學反應形成聚合物。

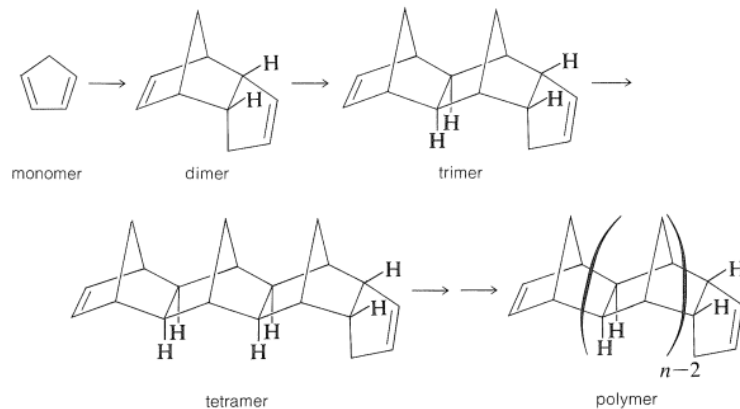


圖 52、聚合物之形成過程

舉例來說，單體乙烯 (C_2H_4) 可以聚合成聚乙烯 (PE)。該過程在高溫和高壓下，因催化劑的作用而進行反應。在乙烯的聚合過程中，碳原子間的雙鍵被打斷，並與另一個相同的分子形成新的鍵結，即新的鍵結被添加到原有高分子鏈結當中。此作用又稱為加成聚合反應 (Addition polymerisation)，透過此反應可以產生非常長的鏈結。商用聚合物每鏈有 103 到 105 個單體。由於碳原子的價電子位置，生成的聚合物鏈通常並不是直的。

2. 鏈長

聚合物的機械性能和流動性能 (對加工很重要) 與其於聚合過程中形成的鏈長高度相關，鏈長一般以聚合物的分子量表示。聚合物的分子量是鏈中的單體數乘以單體的分子量，例如，PE 單體 (C_2H_4) 的分子量為 $(12 \times 2) + (4 \times 1) = 28$ 。如果 104 個單體聚合成一條鏈，其分子量為： $28 \times 104 = 280,000$ 。由於並非所有鏈的長度都相同，聚合物的分子量通常表示為具有不同長度之聚合物的數量平均值。數量平均分子量由 $\overline{M}_n$ 表示：

$$\overline{M}_n = \frac{\sum N_i M_i}{\sum N_i}$$

3. 鏈或網絡結構

聚合物可以形成線性鏈、支鏈或三維網絡。熱塑性塑料具有線性或支鏈。PE 即為線性鏈的典型範例。熱塑性塑料在加熱時會熔化，如果一條鏈生長與另一條鏈連接，即形成交聯，而交聯可防止聚合物鏈被熔化。彈性體具有少量交聯因而保有彈性，但熱固性塑料因形成許多交聯，除了阻止熔化外，還因此使增結構剛性增加。線性、支鏈和網絡結構如下圖 53 所示：

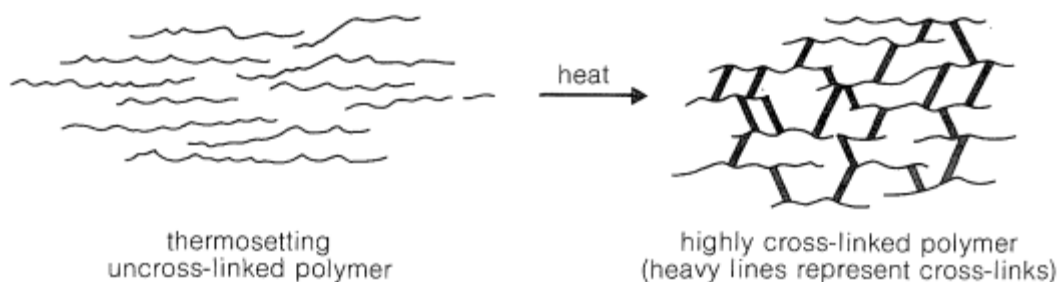


圖 53、聚合物材料交鏈情形示意圖

未交聯之熱固性聚合物轉化為高度交聯之聚合物示意圖。圖示中之交聯類似於二維網絡，但實際上為三維網絡。

4. 排列

一般將聚合物視為塑料形式的材料：例如水瓶或百葉窗等具有一定結構功能的固體材料。聚合物與許多其他固體材料不同。例如，金屬具有晶體結構，原子形成一層層規則重複的圖案。而聚合物則通常呈現出一定程度的非晶結構。可以將其比作裝滿熟意大利麵的濾器，長長的麵條鏈隨機地互相纏繞，這就是非晶聚合物分子如何排列的方式。

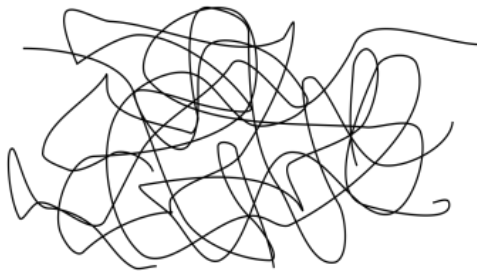


圖 54、聚合物材料之非晶結構形式

聚合物能夠形成更有序的結構。如果它們的長鏈彼此平行排列，分子之間可以更緊密地靠近，鏈間分子間吸引力也會更強。這樣會降低系統的能量，因此，這種更具結晶性的結構在理論上是更穩定的、更受偏好的。

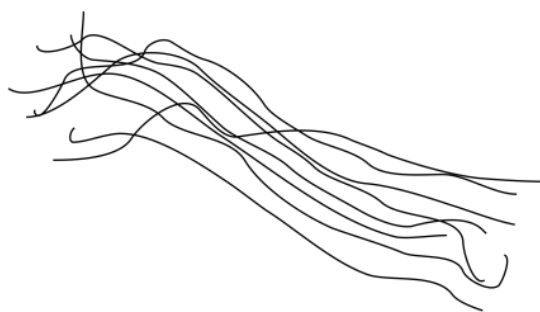


圖 55、聚合物材料之有序結構示意圖

那麼，為什麼這種有序排列並非總是發生呢？想像一個聚合物從完全熔融狀態冷卻的過程，在熔融狀態下結構顯然是非晶的。隨著冷卻，材料逐漸變得不像液體，並逐漸變硬。對於小分子而言，這種轉變相對較為突然，因為分子只需在分子間吸引力增強的引導下，稍微旋轉或側移到正確位置即可。

但對於聚合物來說，這種轉變則更加緩慢，因為那些長鏈需要相互滑動並解開纏結才能平行排列。

在某個時間點，分子間已經沒有足夠的能量繼續進行這種有序排列，因此，許多聚合物成為半結晶的，具有稱為片晶的區域，這些區域中部分鏈段彼此平行排列，但同時也存在大範圍無定形區域，這些區域的分子排列更隨機。



圖 56、聚合物材料之有序結構示意圖

因此，一個聚合物樣品可能有 80% 是非晶的，僅有 20% 的鏈長在結晶片晶中排列。即便如此，這些結晶區域對聚合物的性能產生強烈影響。由於這些緊密鏈之間更強的分子間吸引力，鏈之間滑動的能力大大降低。結果是一種更強且更堅硬的材料，這對於用作可靠的結構材料非常重要。

PE 的線性鏈和義大利麵條類似。在聚合過程中，它們可以在三維空間中纏結，結構為幾乎無序。然而，某些熱塑性塑料（如 PE）的結構可為高度有序。例如，高密度聚乙烯（HDPE）可以高達 80% 結晶。這是透過線性鏈重複折疊，使鏈間能形成規則的排列。此類聚合物稱為半結晶（Semi-crystalline），因為它們包含結晶區和非晶區。長支鏈和網絡結構會防止材料內部形成結晶區，因此這些聚合物多表現非晶態特徵。

5. 鍵合

聚合物鏈中存在強健的共價（因此是方向性的）C-C 鍵。然而，在線性或支鏈間，只存在較弱的凡德瓦爾鍵（van der Waals bonds）或氫鍵（Hydrogen bonds）。這些較弱的次級鍵在加熱時容易斷裂，因此熱塑性塑料可以熔化。在網絡聚合物（彈性體和熱固性塑料）中，存在凡德瓦爾鍵和共價鍵將分子連接在一起。這些鍵在加熱時不容易斷裂，賦予材料熱固性特性。因此，聚合物的性質由共價鍵和次級吸引力的存在和影響決定。

(五) 本單元之重要性

熱塑性塑料由線性或支鏈組成。這些鏈上存在共價鍵，但鏈間只存在次級的凡德瓦爾鍵。這些較弱的鍵在比共價鍵更低的溫度下斷裂，因此熱塑性塑料在加熱時會軟化、且可熔化成黏稠的液體。如上所述，它們可以是半結晶或非晶的。熱塑性塑料通常被大批量生產為顆粒，然後由最終使用者模塑成部件。

1. 半結晶熱塑性塑料的例子包括聚乙烯、聚丙烯和聚四氟乙烯。下表顯示這些聚合物的重複單元、關鍵性質和典型用途。

(I) 聚乙烯 (PE)	(II) 聚丙烯 (PP)	(III) 聚四氟乙烯 (PTFE)
便宜、易於成型、堅韌。	與 PE 一樣，但具有更高的剛度和抗紫外線能力。抗疲勞性。	優異的耐高溫、耐化學性和不黏附性能。
管材、薄膜、瓶子、包裝、瓦斯/水管	家居用品、纖維、繩子、玩具、體育館座椅	不沾鍋、潤滑劑、化學容器、管道、軸承

2. 非晶熱塑性塑料的例子包括聚苯乙烯、聚氯乙烯和聚甲基丙烯酸甲酯。

(I) 聚苯乙烯 (PS)	(II) 聚氯乙烯 (PVC)	(III) 聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA)
光學透明、便宜、易於成型，但易碎。膨脹形成泡沫。	便宜，堅硬但易碎。可發泡、塑化。	優異的光學性能(透明)、防水。
BIC 原子筆、食品容器。包裝 (展開形式)、電絕緣。	窗框和床單。人造皮革 (增塑)、管道、纖維。	透明板材和模製品、飛機圓頂、窗戶、層壓板、手術器械。

3. 熱固性塑料

熱固性塑料是由兩種化學物質反應形成的高度交聯聚合物。反應有時需要加熱。熱固性塑料是剛性聚合物（由於網絡鏈之間的強交聯），因此它們在加熱時不會軟化。因此，熱固性塑料不會熔化（因此得名），一旦形成就不能重新成型。交聯防止任何有序的鏈排列，因此熱固性塑料是非晶態的。熱固性塑料有專業用途，例如環氧樹脂用作纖維複合材料的基體材料和黏合劑，酚醛樹脂用於電氣和馬達外殼，聚酯後也可用於複合材料和汽車車身部件。

4. 彈性體（橡膠）

彈性體在鏈間只有少量交聯，因而賦予其高度彈性。隨交聯數量增加，彈性體將展現更高的剛性和脆性。它們在加熱時不會軟化的特性使其常出現在較高溫之應用場合。聚異戊二烯（天然橡膠）是從橡膠樹的樹液中採集的，但也可以透過聚合反應合成。此外，還可用於合成聚丁二烯（汽車輪胎）和聚氯丁二烯（耐油密封件）。

（六）聚合物的拉伸性能

對於金屬，其剛性與金屬鍵的鍵強相關，因此可透過解析其強度與抵抗塑性變形能力之關聯性，了解材料阻止差排移動的能力。然而，在聚合物中，強度和剛性的基於不同的概念進行分析。

1. 聚合物中強度和剛度的起源

首先考慮熱塑性塑料，熔體中的鏈纏結在固化時「凍結」在材料內部。鏈越長，鏈上的側鏈越大、且纏結越多。當施加力時，鏈會傾向於解纏結（如義大利麵條變直）並發生鏈滑移。因此，熱塑性塑料的特點是剛度低、且強度相對較低。然而，隨著施加的力增加，鏈本身可能會變直並最終被拉伸。如果鏈與鏈高度對齊（例如光纖中的 PE 鏈），則聚合物的強度和剛性主要由 C-C 鍵的強度和剛性控制。

熱固性塑料中的交聯賦予這些聚合物更高的剛性，但代價是其通常展現較低的韌性（即熱固性塑料比熱塑性塑料更脆）。彈性體剛性可為非常低，但可以保持彈性（可逆的應力-應變行為）並產生非常大的應變。

2. 拉伸應力應變行為

聚合物的長鏈結構使其行為與其他材料有所不同。這些鏈能夠進行構象改變：鏈上的每個鍵都可以旋轉，使聚合物鏈轉變為稍微不同的形狀。這種能力賦予「軟材料」極大的靈活性。鏈的構象可以隨著應力的變化而調整，讓鏈變為提供更低能量排列的新形狀。當應力去除後，鏈最終滑回到原始的構象，恢復到其平衡形狀。

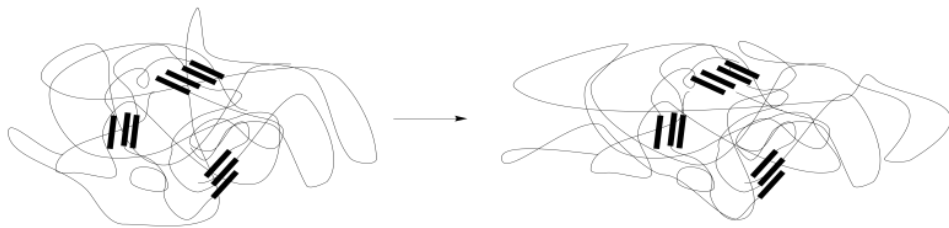


圖 57、聚合物材料中受拉伸應力作用前後之長鏈結構變化示意圖

物理或化學交聯的存在有助於材料恢復其原始形狀，這些交聯點充當「錨點」，防止鏈條偏離太遠。在微相分離材料的硬相互作用中可以看到這些交聯，如圖 57 所示，儘管它們也可能出現在均相材料中。

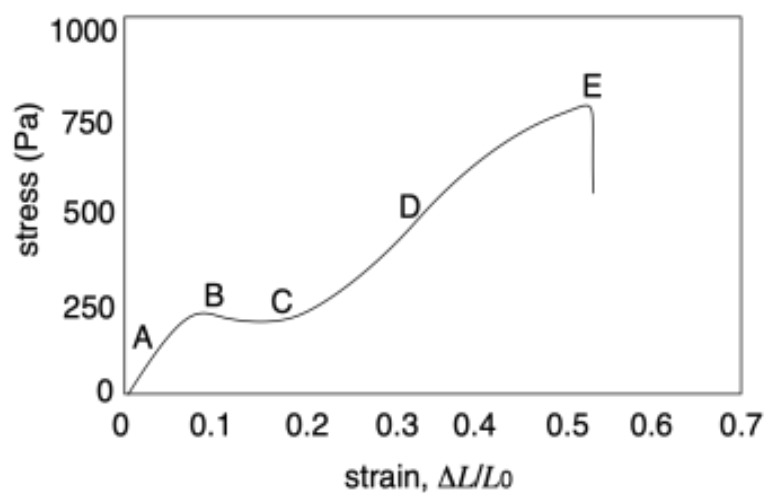


圖 58、聚合物材料受拉伸應力作用之應力-應變曲線圖

在上方的應力-應變曲線中，我們看到的不僅僅是線性彈性區。在點(B)處，線性關係突然消失。在這個特定情況下，應力甚至會下降。圖 58 中的這一特徵稱為「降服點」。材料所承受的應力和相應的應變已經足夠克服材料的天然彈性行為。如前所述，氫鍵等物理交聯有助於加強聚合物樣品的彈性行為。然而，如果這些交聯作用在某一點被克服，鏈條將更容易相互滑動。

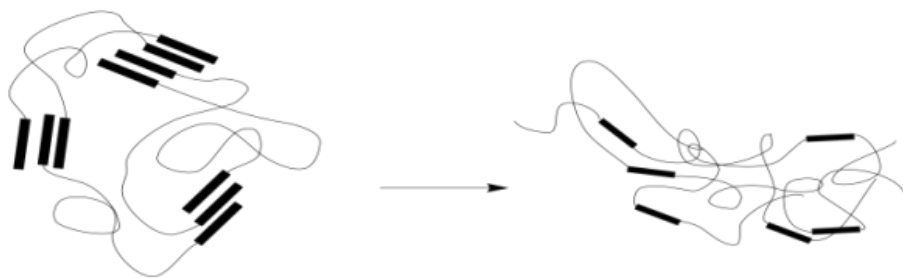


圖 59、聚合物材料受拉伸應力作用而降伏後之鏈結構變形示意圖

因此，材料失去了一部分彈性。當應力釋放後，材料會恢復，但鏈條會處於新的構象平衡狀態。然而，這個平衡將與之前的不同。新的物理交聯會隨著分子群與鄰近分子形成相互作用而產生，這些新形成的交聯可能不會是原來的交聯。因此，材料會稍微穩定在一個不同的形狀。你可能見過這種情況，當橡皮筋被拉得太遠、太頻繁或時間太長，鏈條失去舊的相互作用並捨取了在延展形狀下更容易形成的新相互作用。

在示圖 58 表的點(C)處，曲線的斜率開始增加。同樣的應力變化導致的應變變化越來越小；材料變得更為剛硬。這種現象稱為「應變硬化」。這種特徵並不總是會出現，但如果發生了，可能的解釋是什麼？在聚合物中，可能的解釋在於材料體積在拉伸過程中應保持不變。如果樣品變長，這意味著它也會變窄。

隨著材料變窄，聚合物鏈條被進一步拉伸和排列，使得鏈之間的相互作用增強，從而使材料更難進一步變形。這就是應變硬化的現象，它增強了材料的剛性，並在極限負載下提供更大的穩定性。

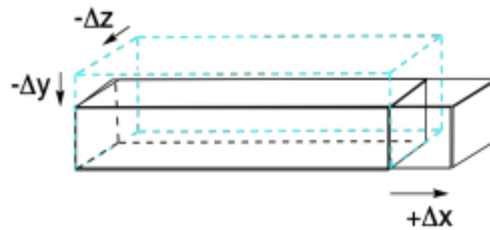


圖 60、聚合物材料受拉伸應力作用之變形示意圖

由於橫截面變窄，鏈條被壓縮在一起。在某一時刻，物理交聯開始在相鄰的鏈之間出現。這些交聯並非出現在平衡位置，與原始樣品中那樣的纏繞狀態不同。相反，這些交聯發生在鏈條被拉伸並平行排列的狀態下，距離比正常情況更接近。

這種交聯的形成使鏈條之間的接觸更緊密，增強了材料內部的相互作用，從而提高了材料的強度和剛性。隨著交聯增多，鏈條變得更加堅固，並阻止了進一步的滑動和變形，這就是應變硬化的原因之一。這種情況下，材料會比最初的平衡構象更堅硬，這為聚合物材料在高應力條件下提供了更大的耐受力。



圖 61、聚合物材料受拉伸應力作用，長鏈結構接觸緊密化之示意圖

我們可以在點 (D) 觀察到相反的情況，此時曲線的斜率下降而不是上升。這種現象稱為「應變軟化」。同樣，並非所有樣品都會出現這一現象。當應變軟化發生時，原因較為簡單。在這種情況下，鏈條之間的相互作用已被克服，沒有其他力量阻止進一步的變形。隨著鏈條開始彼此解纏，拉開它們變得更加容易，從而促進了樣品的延展或拉伸。

應變軟化的現象顯示出鏈條之間的束縛減少，使得聚合物在拉伸過程中表現出更大的延展性。這種效應可以導致材料在特定應變範圍內變得更為柔軟，且更易於進一步變形，因為內部的結構抵抗已減弱。



圖 62、聚合物材料之應變軟化示意圖

最終，在斷裂點（E）處，樣品中的某些鏈條開始在局部位置失去相互接觸，這導致樣品的破裂。隨著鏈條之間的相互作用完全斷裂，材料無法再承受任何應力，從而導致整體結構的崩潰和樣品的最終失效。

（七）參考資料

- 01 : Introduction to Aerospace Structures and Materials
<https://open.umn.edu/opentextbooks/textbooks/introduction-to-aerospace-structures-and-materials>
- 06 : Basic Principles of Organic Chemistry
[https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Organic_Chemistry/Basic_Principles_of_Organic_Chemistry_\(Roberts_and_Caserio\)](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Organic_Chemistry/Basic_Principles_of_Organic_Chemistry_(Roberts_and_Caserio))
- 07 : Polymer Chemistry
[https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Organic_Chemistry/Polymer_Chemistry_\(Schaller\)](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Organic_Chemistry/Polymer_Chemistry_(Schaller))

Section 4-3 化合物

(一) 本單元之學習成果

在學習完本單元內容時，你應該能夠：

1. 描述什麼是複合材料，並能舉例說明其應用。
2. 解釋如何對複合材料進行分類，並能定義基體、增強材（分散相）和纖維體積含有率的含義。
3. 解釋什麼是臨界纖維長度，並能計算出該值。
4. 對於連續纖維的聚合物基體複合材料，能夠計算平行於纖維和橫向纖維的複合材料模量，並能定性描述如何根據纖維和基體相的個體行為估算複合材料的拉伸行為。

(二) 本單元之重要性

在學習金屬、金屬合金、陶瓷和聚合物的性質與結構後，你可能會認為，針對任何特定應用，必定能從這些材料類別中找到最佳材料。然而情況並非如此。通常，最佳材料是具有這些材料類別所提供的多種特性組合的材料。例如，我們可能需要陶瓷的硬度，但不希望它發生脆性斷裂，因此可以指定將陶瓷顆粒混合到金屬中製成複合材料。或我們可能需要一種用於耐衝撞的結構材料，並且希望它具有輕量化的特性，在此情況下，我們可能會選擇使用碳纖維來增強環氧樹脂聚合物。

(三) 本單元之重要性

1. 定義

複合材料，顧名思義，是由不同材料組成的材料。更準確的描述或定義如下：複合材料是工程材料，其中兩種或多種具有不同物理或化學性質且結

構上互補的物質結合在一起，以產生單一組分無法具備的結構或功能特性。

複合材料的一個例子是纖維增強聚合物複合材料，它由兩種明確且互補的材料組成，即纖維和聚合物。纖維的功能是增強聚合物，為材料提供強度和剛性，從而承受主要負載。聚合物的作用則是支撐纖維，並通過剪切將負載傳遞至纖維和從纖維傳遞出來。這一點在圖 1 中有所說明。

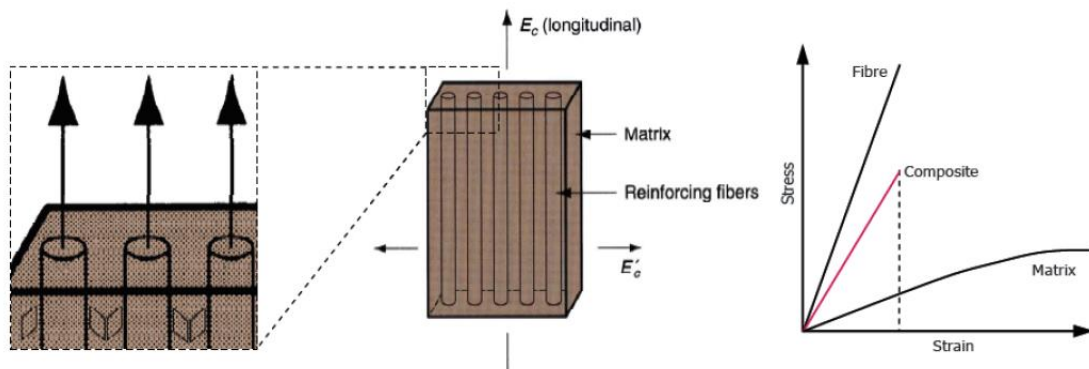


圖 63、聚合物材料之應變軟化示意圖

由纖維複合材料製成的產品和組件是通過特定工藝製造的，例如纖維纏繞、層壓固化和壓模成型，這些工藝將在下一章中討論。

複合材料由連續相（基體）組成，基體的作用是将施加的負載傳遞給分散相（增強材）並保護它。基體可以是金屬、陶瓷或聚合物。增強材料通常是陶瓷（如碳），其形式可以是顆粒、薄片、短纖維或長纖維。由長且連續的纖維構成的層壓材料可採用多層不同方向排列的層壓片，這些層壓片可能是編織而成。不同複合材料的可能性僅受我們想像力的限制...以及能夠製造這些部件的能力！

2. 複合材料的分類

複合材料可根據其基體或所使用的增強材形式進行分類。

根據「基體」分類：

- 金屬基複合材料（Metal Matrix Composites, MMCs）
- 基體材料為金屬，通常用於提高強度、剛性和耐高溫性能。

- 陶瓷基複合材料 (Ceramic Matrix Composites, CMCs)
- 基體材料為陶瓷，常用於高溫應用中，提高韌性和抗裂性。
- 聚合物基複合材料 (Polymer Matrix Composites, PMCs)
- 基體材料為聚合物，廣泛應用於輕量化和耐腐蝕性需求。

根據「增強材料形式」分類：

- 顆粒增強複合材料 (Particulate Reinforced Composites)
- 使用顆粒增強基體，顆粒可以是球形、細長形或片狀，尺寸範圍從毫米、微米到納米。
- 纖維增強複合材料 (Fibre Reinforced Composites)
- 使用纖維增強基體，纖維可為短纖維、中長纖維或連續纖維。
- 結構複合材料 (Structural Composites)
- 結構複合材料可結合上述增強材料形式，可能包含多層的複合材料、蜂窩結構或散裝材料片層。

我們在此將採用基體分類法。

3. 陶瓷基複合材料

金屬基複合材料的一個例子是使用碳化鎢顆粒 (陶瓷) 增強鈷基體 (金屬)。這種 WC/Co 複合材料被稱為「硬質合金」，並用於製造切削工具。硬但脆的 WC 顆粒為較具延展性的鈷基體增添硬度。陶瓷-金屬複合材料也被稱為「金屬陶瓷」(cermet)。此類應用中，顆粒的體積分率通常約為 10-15%。

典型的金屬基體材料包括：鋁、鋁鎂合金、鎂、銅、鈷、鈦和超合金。典型的增強材料有：石墨、氧化鋁、碳化矽、硼和碳化鎢。相比於聚合物基複合材料 (PMCs)，金屬基複合材料的優點包括：更高的彈性模量、韌性、延展性及更好的高溫性能。相對缺點是：密度更高、加工難度和成本更高。典型應用包括：衛星和航太結構、高溫引擎部件。

4. 陶瓷基複合材料

典型的陶瓷基體材料包括：碳化矽、氮化矽和氧化鋁。典型的增強材料有：碳和氧化鋁。其優點包括：對高溫 and 腐蝕性環境具有極佳的耐受性。缺點則是生產成本高，並且比金屬基複合材料(MMCs)更脆。典型應用包括：噴氣式和汽車引擎部件、切削工具、深海採礦設備。

5. 聚合物基複合材料

典型的聚合物基體材料包括：尼龍、聚丙烯、環氧樹脂、酚醛樹脂和聚酯。典型的增強材料有：玻璃纖維、碳纖維、硼纖維和芳綸纖維(如 Kevlar)。其優點包括：易於加工、低密度、具有高比強度和高比剛度等特性。缺點是：耐高溫性能較差。典型應用包括：飛機和車輛結構、船體及運動器材。聚合物基複合材料的一個例子是，在汽車輪胎中使用碳顆粒(炭黑) 增強橡膠基體。

6. 複合材料類型比較

以下表格總結我們討論的三種類型複合材料，並對其優缺點進行比較。

類型	金屬基複合材料 (MMCs)	陶瓷基複合材料 (CMCs)	聚合物基複合材料 (PMCs)
典型基體材料	Al、Al-Li 合金、Mg、Cu、Co、Ti、超合金	SiC、SiN、Al ₂ O ₃	尼龍、PP、環氧樹脂、酚醛樹脂、聚酯
典型增強材料	C、Al ₂ O ₃ 、SiC、B、WC	C、Al ₂ O ₃	C、玻璃纖維、硼纖維、Kevlar、超高分子量聚乙烯 (UHMWPE)
優點	相比 PMCs：更高的模量、韌性、延展性及更好的高溫性能	對高溫 and 腐蝕性環境有極佳的抗性	易於加工，低密度，因此具有高比強度和高比剛度
缺點	相比 PMCs：密度更高，加工難度和成本更高	生產成本昂貴，比 MMCs 更脆	耐高溫性能差
典型應用	衛星和航太結構、高溫引擎部件	噴氣式和汽車引擎部件、切削工具和模具	飛機和汽車結構、船體、運動器材

(四) 聚合物基複合材料的性能

聚合物基複合材料可透過加入短纖維或連續纖維增強其強度和剛性。此處我們考慮兩個性能問題：短纖維的長度及連續且排列整齊的纖維可增強 PMCs 的剛性和強度。

1. 短纖維增強複合材料的臨界纖維長度

短纖維可在螺桿擠出成型前，透過擠出機螺桿輕鬆添加到熱塑性塑料中，形成短纖維複合材料。然而，纖維應該有多長呢？考慮纖維為圓形橫截面，嵌入一個彈性模量較低的基體中。

在短纖維增強複合材料中，纖維的臨界長度 (Critical Fibre Length) 對複合材料的力學性能有很大影響。纖維長度須足夠長，才能有效承載應力並將負載轉移到基體中。若纖維過短，將無法提供足夠的強度和剛性以增強材料的性能。

若纖維與基體間具有良好的黏結，施加的拉伸力會透過纖維與基體間黏結的剪應力 (τ) 傳遞給纖維。若纖維非常短，黏結會在纖維斷裂前失效，導致纖維從基體中脫落。若纖維足夠長，黏結可傳遞足夠的力使纖維斷裂。二者之間存在一個臨界長度，在該長度下，纖維會在黏結失效時斷裂，這被稱為臨界纖維長度。

臨界纖維長度是指纖維的長度恰好能夠在黏結破壞的同時斷裂，意味黏結可傳遞足夠的應力到纖維中，但不至於在黏結失效前發生斷裂。若纖維長度大於這個臨界長度，纖維會在黏結失效前承載超過其斷裂強度的應力並斷裂。

如果纖維-基體界面的剪切強度為 τ_B ，那麼對於直徑為 D 的纖維：

$$\delta F_s = \pi D \tau_B \delta x \quad (1)$$

當我們從纖維的一端到其中心積分纖維長度 x 時：

$$F_s = \pi D x \tau_B \quad (2)$$

現在，纖維斷裂所需的力由下式給出：

$$F_f = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \sigma_f \quad (3)$$

臨界纖維半長 x_c 是 $F_s = F_f$ 時的長度。因此：

$$\pi D x_c \tau_B = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \sigma_f$$

從中：

$$x_c = \frac{D}{4} \cdot \frac{\sigma_f}{\tau_B} \text{ or } l_c = 2x_c = \frac{D}{2} \cdot \frac{\sigma_f}{\tau_B} \quad (4)$$

臨界纖維長度 l_c 的典型值為：碳纖維在環氧基體中的臨界纖維長度約為 0.2 mm，玻璃纖維在聚酯基體中的臨界纖維長度約為 0.5 mm，玻璃纖維在聚丙烯基體中的臨界纖維長度約為 1.8 mm。只要纖維的長度足夠，它們就能有效增強基體的剛性、強度和韌性。意味纖維長度大於或等於臨界纖維長度時，複合材料可實現預期的力學性能增強效果。

2. 連續纖維增強複合材料的纖維體積分率

纖維增強複合材料的性能很大程度上取決於纖維和基體相的相對比例，這通常用複合材料中的纖維體積分率 (V_f) 表示。理論上， V_f 的值可從 0% 到 100%。然而在實際應用中，纖維間須有一些基體將它們黏合在一起，並且纖維的圓形橫截面會留出空隙。因此，對完全排列的纖維，最大纖維體積分率通常在 0.6 到 0.65 之間。對於短纖維複合材料， V_f 通常要低得多。

如果纖維是連續且直徑恆定的，那麼纖維占據的面積分率 (A_f) 等於體積分率 (V_f)，即 $A_f = V_f$ 。若基體的面積分率和體積分率分別為 A_m 和 V_m ，則有以下關係：

$$A_f + A_m = 1 \text{ 和 } V_f + V_m = 1 \quad (5)$$

因此

$$V_f = \frac{V_f}{V_f + V_m} = \frac{A_f}{A_f + A_m} \quad (6)$$

3. 複合材料的剛性 (纖維平行於施加應力)

我們考慮一種情況，即複合材料被連續纖維增強，且所有纖維都與施加的應力方向平行。若纖維的截面積為 A_F ，基體的截面積為 A_M (這裡指的是實際面積，而不是面積分率)。

若纖維和基體間的界面不降服，則纖維和基體經歷相同的應變 (等應變情況)。因此：

$$\varepsilon_f = \varepsilon_m = \varepsilon \quad (7)$$

合力是纖維相和基體相中的力的總和。因此：

$$\sigma \cdot A = \sigma_f \cdot A_F + \sigma_m \cdot A_M \quad (8)$$

我們知道： $A_F = V_f A$ 和 $A_M = (1 - V_f) A$

$$\sigma \cdot A = V_f \sigma_f A + (1 - V_f) \cdot \sigma_m A \quad (9)$$

若纖維和基體都表現出線性彈性行為，楊氏模量分別為 E_f 和 E_m ，則：

$$\sigma_f = E_f \cdot \varepsilon \text{ 和 } \sigma_m = E_m \cdot \varepsilon \quad (10)$$

代入式(9)並化簡得到複合模量的預測， E_c ：

$$E_c = V_f \cdot E_f + (1 - V_f) \cdot E_m \quad (11)$$

請注意，複合材料的彈性模量 E_c 隨纖維體積分率 V_f 呈線性變化，這被稱為混合定則 (Rule of Mixtures)。混合定則不僅可用來計算複合材料的彈性模量，還可以應用於其他材料性質的估算，例如密度和熱導率。

4. 複合材料剛性 (纖維垂直於施加應力)

當纖維垂直於施加的應力方向時，這是一個等應力載荷的例子，也就是說，纖維和基體都承受相同的應力。以複合模量與 E_f 和 E_m 間的關係推導作為練習，但結果是：

$$\frac{1}{E_c} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{(1-V_f)}{E_m} \quad (12)$$

式(12)表示對具有連續纖維增強的複合材料模量預測的下限，其由纖維垂直於施加應力的情況得到，式(11)則表示纖維平行於施加應力時複合材料模量的上限。

5. 複合材料的應力-應變行為

預測複合材料的強度比預測其楊氏模量更加複雜。當強度高但脆性的纖維用來增強延展性較好但強度較低的聚合物基體時，可根據纖維和基體各自的行為估算複合材料的行為。

從纖維增強聚合物複合材料的應力-應變圖可看出，其行為由其組成成分決定。層板的剛性是聚合物和纖維剛性的函數，一般可透過第混合定則進行估算。然而，雖然層板的剛性可以直接與每個組成成分的剛性和體積含量相關，但斷裂應變僅由纖維的斷裂應變決定。一旦纖維失效，剩餘的聚合物強度過低，無法承受負載。

需要注意這裡給出的「複合材料」的定義，因為該定義表明任何滿足此定義的工程結構材料都可視為「複合材料」。目前，人們常使用「複合材料」一詞僅指一種特定類型的複合材料，即由碳纖維和聚合物構成的材料。然而，應注意到這是一種不準確的用法。

為了說明複合材料定義的意義，另一個例子是混合材料，例如纖維金屬層壓材料，見下圖 64。這些結構材料由交替的金屬和複合層組成，結合了每個組成材料的優勢，同時彌補了彼此的缺點。

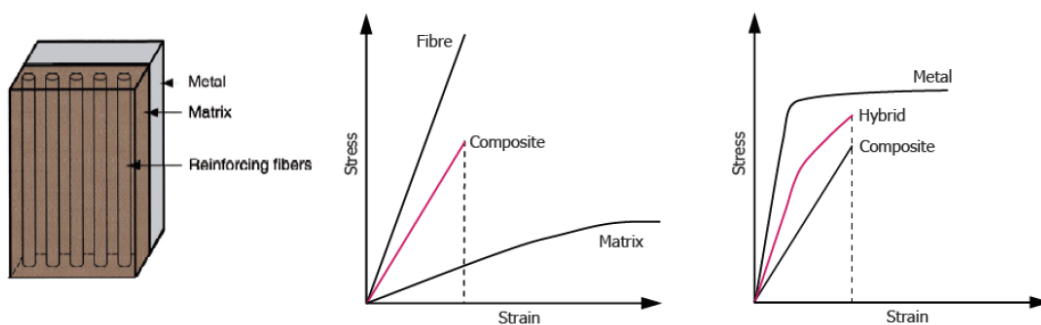


圖 64、纖維金屬增強聚合物複合材料層之範例，及成分和層板的相關應力應變行為

在加載過程的第一階段，複合材料的應力-應變 ($\sigma-\varepsilon$) 反應是線性的，主要受纖維剛性的支配。此時，纖維和基體共同承受應力，複合材料的剛性由纖維的剛性主導。

當基體降服時 (第二階段)，複合材料的剛性會降低，因為基體不再能夠承受更多的應力，而主要是纖維承擔應力負載。當纖維達到其臨界失效應變時，複合材料將發生斷裂並失效。雖然定量預測複合材料的強度超出本課程的範疇，但此過程的定性描述表明，複合材料的應力-應變行為受纖維和基體各自性質的強烈影響。纖維的剛性和基體的延展性共同決定了複合材料的整體力學性能。

一般而言，纖維增強聚合物以其高比特性著稱。它們的強度和剛度與重量的比率相當可觀。然而，大多數複合材料在破壞前都表現出彈性行為，而不顯示任何延展性行為。儘管這些材料通常具有非常高的強度和剛度，但這一特性限制了它們的韌性。

由於高方向性 (纖維取向)，這些材料可以根據特定的負載應用 (如梁、纜索、柱) 進行設計。然而，在承受雙軸負載的應用中，需要多種取向來應對不同方向的應力。

(五) 結構複合材料

纖維在施加拉伸應力的方向上排列時，能夠提供最優的性能提升。理論上，對於某些元件來說這是相對容易實現的，例如一個用來傳遞拉伸力的連桿。但在實際操作中這並不簡單，部分原因是這些元件必須具備施加負載的機制 (例如用於螺栓的孔)，而纖維不能直接在這些地方被切斷。相反，纖維應當在這些區域被平滑地引導繞過。

通常，需要將纖維手工鋪設在模具中，並與熱固性單體和固化劑一起使用，然後加熱使其成型。然而，這種過程成本昂貴，因為手工鋪設纖維需要大量的勞動力和時間，同時也增加製造過程的複雜性。儘管如此，這種方法能夠最大程度地保持纖維的結構完整性，從而在最關鍵的負載方向上提供最佳的強度和剛性。

在其他結構中，應力分析可預測不同位置的拉伸應力方向，然後可將纖維排列與這些方向對應。例如，在一個傳遞扭矩的管子中，兩組 $\pm 45^\circ$ 度的螺旋纖維可用來加強結構。某些元件可透過將纖維與構成基體的聚合物一起進入擠壓模具製造。層壓複合材料提供最好的性能，典型應用包括飛機結構（尤其是軍用飛機，但現在也越來越多地應用於民用飛機）、高性能運動車（例如 Aston Martin Vanquish）以及一級方程式賽車。層壓材料的一個問題是，雖然在增強材料所在的平面內強度和韌性都非常好，但在平面外的強度則較弱。此外，平面外應力可能導致裂縫在層壓材料的層之間擴展，因為這些地方比較脆弱。此種現象被稱為分層，是層壓結構中常見的問題。為提高抗分層能力，可使用編織纖維，並且可在平面外方向縫合纖維，以進一步增強抗斷裂性。

聚合物基複合材料具有優異的比特性（如比強度和比剛度）。此外，已開發出具有優異疲勞性能的複合材料，並廣泛應用於飛機結構中。

（六）結構材料要求

可以為所考慮的工程材料列出一系列需求。將這些材料需求與結構需求（例如結構強度和剛性）進行比較，會發現二者之間有很大重疊。然而，這裡需要注意：二者之間存在顯著差異。

某些結構需求在材料需求中也有提及，如高強度、高剛性、低重量、耐久性和成本。儘管如此，需要記住的是，為滿足結構需求，可以改變結構的幾何形狀。例如，要增加結構的剛性，可以選擇剛性較高的材料，和/或設計更具剛性的結構形狀，但無法改變材料的剛性（如其楊氏模量）。同樣，密度也是材料的常數。而強度和耐久性等特性則可以通過（略微）改變材料的成分（如使用不同的合金）或處理條件（如調整硬化）來改變。

除了這些需求外，還有一些與製造性質相關的需求。材料的可製造性或加工性質與製造方面密切相關。製造飛機時，具有良好加工性的材料非常重要。例如，鋁合金具有良好的可製造性，但鈦合金則較差。鋁合金易於成形和加工（如鑽孔、銑削），而鈦合金加工困難。在複合材料中，玻璃纖維和碳纖維增強複合材料具有良好的加工性，但芳綸（Kevlar）纖維增強複合材料因其非常堅韌的芳綸纖維而難以進行切削操作。

為了強調製造方面在材料需求中的重要性，還需考慮某些製程對於一種材料來說相對容易，但對於其他材料來說則不可能。例如，對於製造翼樑或加強筋，金屬材料可以使用擠壓和機械加工工藝，但這些工藝無法應用於纖維增強複合材料。因此，適當的材料選擇需要考慮可用的生產工藝。

此外，某些物理特性（如導電性和熱膨脹係數 CTE）對操作性能的特定方面也很重要。例如，鋁合金的導電性使其易於形成飛機機身的法拉第籠（以保護飛機免受雷擊）。對於複合材料來說，這更具挑戰性，通常需要額外的導電條或網格來提供雷擊保護。在這方面，CTE 也很重要，因為飛機在 $+80^{\circ}\text{C}$ （機場高溫）和 -60°C （巡航高度）之間操作。應用材料的 CTE 差異大可能導致額外問題，如上一章所述的熱應力問題。

因此，需求的滿足應從結構層面和材料層面來達成。一旦滿足了主要的材料需求，其餘差異可以在結構層面上解決。例如，不同材料的 CTE 差異可能在結構中引發熱應力。這種情況無法僅通過改變材料來解決，但可以通過結構設計方案（如選擇不同的接合方式、直接接觸或使用中間層隔離）來解決這些具體問題。

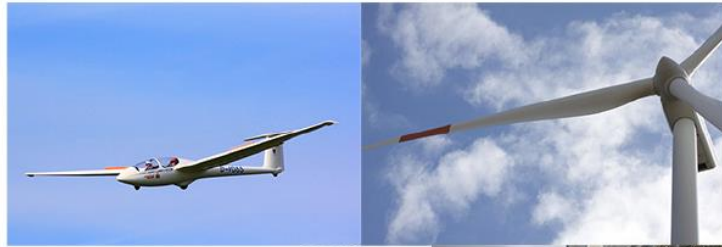
（七）典型應用

典型應用如下圖 65 所示。風力渦輪葉片通常由玻璃纖維複合材料製成。其他應用包括滑翔機、壓力罐和容器。

碳纖維複合材料因其高剛性而常用於汽車和航太結構。碳纖維複合材料在帆船中的一個知名應用是船桅。此外，(摩托)自行車也由碳纖維複合材料製成，因為車架的剛性和硬度在設計中非常重要。同樣，一些運動器材也使用這些材料。

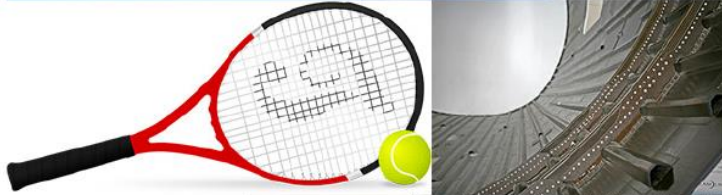
Glass fibre composites

- Wind turbine blades
- Sail planes
- Pressure tanks & vessels



Carbon fibre composites

- Automotive components
- Aerospace components
- Sailboats
- (motor) bikes
- Sport equipment



Aramid/kevlar composites

- Armor & bullet proof products
- Impact and penetration resistant products



Fibre Metal Laminates

- Upper fuselage skin panels
- Impact resistant leading edges
- Critical joint straps
- Lower wing panels



圖 65、複合材料的典型應用範例

纖維金屬層壓材料 (FML) 的典型應用主要在航太領域。這些材料專為高強度和高斷裂韌性而開發，能提高機身和機翼主要結構的抗損傷能力，以保持結構完整性。目前，FML 材料 Glare 已用於 Airbus A380 的上機身蒙皮材料和抗撞擊的尾翼前緣。同樣，該材料也被用作 Airbus A340 機身的高抗損傷接合材料 (加強帶)。

(八) 參考資料

- 01 : Introduction to Aerospace Structures and Materials
<https://open.umn.edu/opentextbooks/textbooks/introduction-to-aerospace-structures-and-materials>



Open TextBook

工程材料性質基礎

Fundamentals of Engineering Materials Properties

楊侑倫、尤尚邦、林哲宇、林懷恩/編

