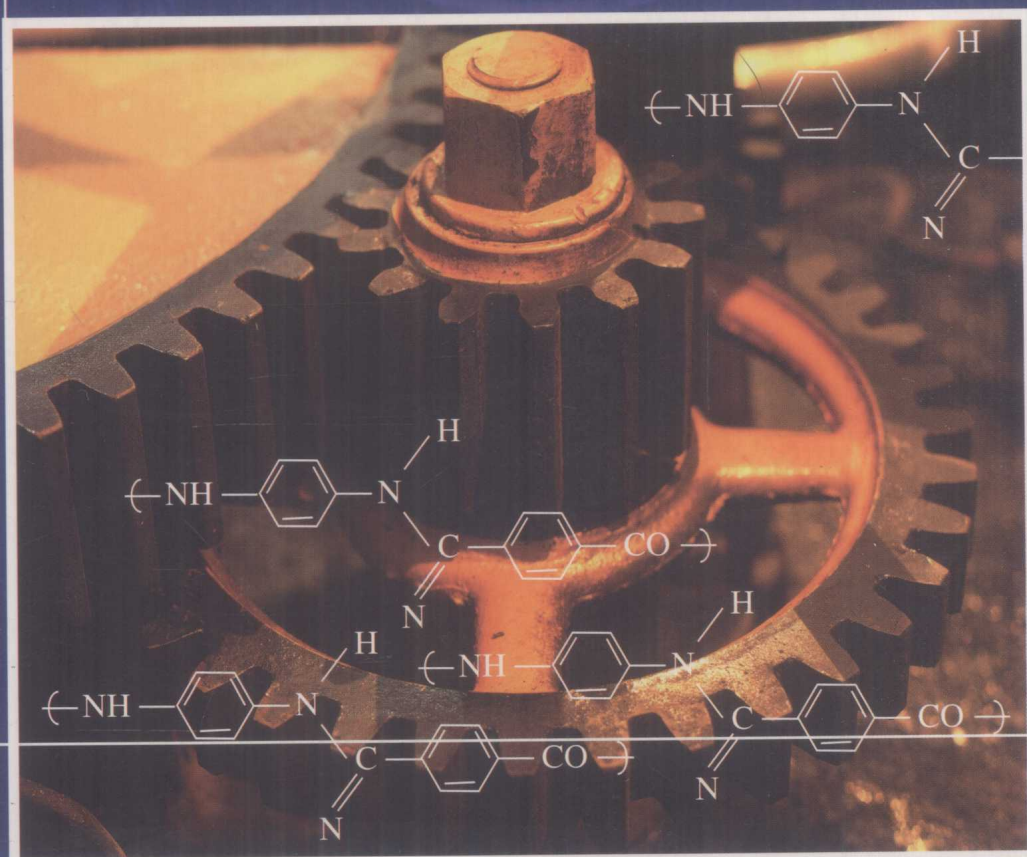


第三版

# 高分子材料科學

(高分子材料機械性質)

林建中◎編著



**MATERIAL SCIENCE OF POLYMERS**  
**MECHANICAL PROPERTIES OF**  
**POLYMERIC MATERIALS** Third Edition

第三版

# 高分子材料科學

(高分子材料機械性質)

林建中◎編著

**MATERIAL SCIENCE OF POLYMERS**  
**MECHANICAL PROPERTIES OF**  
**POLYMERIC MATERIALS** Third Edition

國家圖書館出版品預行編目資料

高分子材料科學：高分子材料機械性質 /  
林建中編著. -- 第三版. -- 臺北縣中和市：  
新文京開發, 2007 (民 96)  
面；公分

ISBN 978-986-150-600-5 (平裝)

1.工程材料 2.高分子化學 3.高分子物理

440.2

96004923

高分子材料科學：  
高分子材料機械性質 (第三版)

(書號：B005e3)

---

編著者	林建中
出版者	新文京開發出版股份有限公司
地址	台北縣中和市中山路二段 362 號 8 樓 (9 樓)
電話	(02) 2244-8188 (代表號)
F A X	(02) 2244-8189
郵撥	1958730-2
初版	西元 1999 年 2 月 1 日
二版	西元 2001 年 4 月 30 日
三版	西元 2007 年 3 月 25 日

---

有著作權 不准翻印

建議售價：490 元

法律顧問：蕭雄淋律師

ISBN 978-986-150-600-5

# 著者簡介

---

## ❖ 出生

1927 年出生於台灣嘉義市

## ❖ 學歷

國立台灣大學工學士

日本同志社大學工學碩士

德國慕尼黑工業大學工學博士

## ❖ 經歷

台灣省工業試驗所技正

經濟部聯合工業研究所研究師

國立台灣大學化工系教授兼系主任

德國慕尼黑工業大學研究教授

美國 Louisiana State University 化工系教授

美國 New Jersey Institute of Technology 化工系教授

國立交通大學應用化學系教授

國立交通大學材料科學與工程研究所教授兼所長

## ❖ 名譽

美國名人傳記學會 (abi) 終身會員 (FABI)

國際名人傳記協會 (ibc) 終身會員 (LFIBA) 及

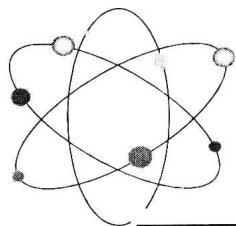
該會副總裁 (DDG)

## ❖ 現任

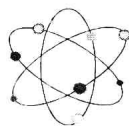
靈罔力科技顧問公司董事長

國立台灣大學前瞻性高分子

奈米科技研究中心顧問



# 席言

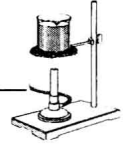


人類正迎向 21 世紀，世界的高分子科學也隨之高度發展，高分子教材的水準也需提升。筆者終身從事於高分子科學之教育與研究，利用寒暑假公暇之餘有充分的時間，得整理過去多種教學著作，其中「高分子材料科學」一書，也需修訂，經熟考之後增列副名為「高分子材料機械性質」，增加高分子固體組合應力狀態下的變形學理，以符合高分子材料機械性質三次元新理論之趨勢。另外本書中增加中英文習題以利教學之便，適合於高分子科學相關科系之教科書。依筆者 30 多年教學經驗，高分子教育必具備「高分子化學」和「高分子物理」的雙方知識，才能培養高分子教育的基礎。期望本書能配合筆者另外著作「高分子化學原理」（歐亞書局）一併成為國內高分子科學叢書之一，對高分子科學盡一點貢獻，倘若受各方之繼續支持與受護，實無任盼望之至。最後將參考之外國著書介紹於後：

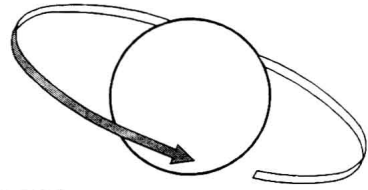
1. "Introduction to Polymer Science and Technology" H. S. Kaufman and J. J. Falcetta, (An SPE Textbook)(1977).
2. "Introduction to Polymers", R. J. Young, Chapman and Hall, London, New York (1981).
3. "Mechanical Properties of Polymers and Composites", (In Two Volumes), L. E. Nielsen, Marcel Dekker, Inc, New York (1974).
4. "Composite Materials: Engineering and Science", F. L. Matthews and R. D. Rawlings, Chapman Hall (London, Tokyo, N. Y. etc.)(1994).

本書編寫過程力求嚴謹，並經過再三審校，期望能以最完善的面目問世。若有疑義、疏漏之處，敬祈各方先進不吝惠賜指正，以便將來再版時得以修訂，是所企盼，不勝感激！

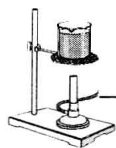
編著者 謹識



# 目 錄



<b>第一章</b>	<b>高分子材料的工程性質</b>	
	(Engineering Properties of Polymer Materials) .....	1
<b>1-1</b>	<b>機械的性質(Mechanical Properties)</b> .....	1
1-1-1	緒 論(introduction).....	1
1-1-2	應力－應變曲線(Stress-Strain Curves) .....	3
1-1-3	泊松比(Poisson's Ratio) .....	8
1-1-4	韌 性(Toughness) .....	11
1-1-5	疲 勞(Fatigue) .....	13
1-1-6	硬 度(Hardness) .....	14
1-1-7	結 論(Conclusion) .....	15
<b>1-2</b>	<b>熱的性質(Thermal Properties)</b> .....	19
1-2-1	緒 論(Introduction).....	19
1-2-2	熱膨脹(Thermal Expansion) .....	20
1-2-3	熱容量(Heat Capacity).....	22
1-2-4	熱傳導率(Thermal Conductivity).....	22
1-2-5	融熔範圍，玻璃轉移溫度及軟化點 (Melting range, Glass transition temperature and Softening point) .....	26
	習 題.....	32



## 第二章 高分子材料性能通論

(General Characteristics of High Polymer Materials)..... 35

### 2-1 高分子本質與型式

(Nature and Type of Polymers) ..... 35

2-1-1 結晶性聚體(Crystalline Polymers) ..... 36

2-1-2 橡膠與合成彈性體  
(Rubber and Synthetic Elastomers)..... 42

2-1-3 熱塑性塑膠(Thermoplastics) ..... 42

2-1-4 熱固性塑膠(Thermosetting Plastics) ..... 43

2-1-5 纖維及定向薄膜(Fiber and Oriented Film)..... 44

### 2-2 破壞之模型及主要機械參數

(Modes of Failure and Significant Mechanical Parameters)..... 45

2-2-1 溫度的影響(Effects of Temperature)..... 45

2-2-2 靜態強度之考慮  
(Static Strength Consideration)..... 48

2-2-3 挺性之檢討(Stiffness Consideration)..... 49

2-2-4 應變之檢討(Strain Consideration) ..... 49

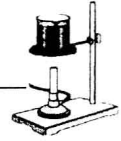
2-2-5 衝擊負荷之影響(Effects of Impact Loading) . 51

2-2-6 時間之影響(Effect of Time) ..... 51

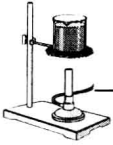
2-2-7 反覆負荷之影響  
(Effects of Repeated Loading)..... 52

習 題 ..... 53





<b>第三章 固態高分子之黏彈性</b>	
(Viscoelasticity of Solid Polymers).....	55
<b>3-1 機械模式(Mechanical Models)</b> .....	55
3-1-1 蠕變行為之預示(Predicted Creep Behavior) ..	58
3-1-2 應力鬆弛之預示	
(Predicted Stress Relaxation).....	63
3-1-3 動態負荷—內部摩擦	
(Dynamic Loading-Internal Friction).....	66
<b>3-2 模式預測和實驗觀察之比較</b>	
(Comparison of Predicted and	
Observed Behavior).....	72
3-2-1 蠕變現象(Creep Phenomena).....	72
3-2-2 應力鬆弛現象及黏彈性行為範圍 .....	76
3-2-3 動態行為(Dynamic Behavior).....	80
3-2-4 鬆弛現象的動態方法	
(Dynamic Method for Relaxation Studies) .....	91
<b>3-3 時間—溫度重疊和 WLF 方程式</b>	
(Time-Tempera-ture Correspondence and	
The WLF Equation).....	96
<b>習 題</b> .....	101



## 第四章 固態高分子之彈性與變形

(Elasticity and Deformation of Solid Polymers) .. 107

### 4-1 橡膠似材料之彈性

(Elasticity of Rubberlike Materials)..... 107

4-1-1 彈性之統計學處理(Stastical Treatment) ..... 108

4-1-2 彈性體之應力—應變行為

(Stress-Strain Behavior) ..... 113

4-1-3 彈性之熱力學處理

(Thermodynamic Treatment)..... 115

### 4-2 向同性固體在應力組合狀態下之應力—

應變關係(Stress-Strain Relation for Isotropic

Solids under Combined State of Stress) ..... 120

4-2-1 應力(Stress)..... 121

4-2-2 應變(Strain)..... 122

4-2-3 應力與應變之關係

(Relationship between Stress and Strain)..... 126

習題 ..... 131

## 第五章 高分子塑性及降服理論

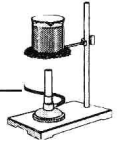
(Plasticity and Theories of Yielding of Polymers)

..... 135

### 5-1 應力—應變曲線之理想化

(Idealization of Stress-Strain Curves)..... 135

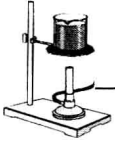
5-2 負荷表面(Loading Surface)..... 137



<b>5-3</b>	Tresca 氏降服規律(Tresca Yield Criteria) .....	138
<b>5-4</b>	von Mises 氏降服規律(von Mises Criteria) ..	139
<b>5-5</b>	壓力依賴降服行為 (Pressure-Dependent Yield Behavior).....	141
<b>5-6</b>	裂痕規律及正規應力降服 (Craze Criteria and Normal Stress Yielding)..	145
5-6-1	裂痕降服(Craze Yielding) .....	145
5-6-2	裂痕規律(Craze Criteria) .....	147
習 題	.....	150

## 第六章 高分子之破壞現象

	(Fracture Phenomena in Polymers) .....	153
<b>6-1</b>	斷裂及脆性破壞之理論 (Theories of Rupture and Brittle Fracture) .....	153
6-1-1	破 壞(Fracture).....	153
6-1-2	延性—脆性轉移 (Ductile-Brittle Transitions) .....	155
6-1-3	脆性破壞和缺陷 (Brittle Fracture and Flaws).....	158
<b>6-2</b>	線性彈性破壞力學 (Linear Elastic Fracture Mechanics) .....	164
6-2-1	破壞韌性(Fracture Toughness) .....	164
6-2-2	敲裂生長(Crack Propagation) .....	168
6-2-3	疲 勞(Fatigue) .....	171



6-2-4 環境破壞(Environmental Fracture).....	173
6-2-5 分子破壞程序(Molecular Failure Processes)	176
6-2-6 橡膠材料之撒裂(Tearing of Rubbers) .....	179
習 題 .....	182

## 第七章 高分子複合材料

(Polymer Composite Materials) .....	185
-------------------------------------	-----

### 7-1 複合材料概念

(Concept of Composite Materials).....	185
---------------------------------------	-----

### 7-2 纖維強化材(Reinforcing Fibers) .....

7-2-1 碳化矽纖維(Silicon Carbide).....	192
7-2-2 氧化鋁纖維(Aluminum Oxide).....	192
7-2-3 石墨纖維(Graphite) .....	194
7-2-4 硼纖維(Boron) .....	198
7-2-5 金屬纖維(Metallic Fibers) .....	199
7-2-6 有機纖維(Organic Fibers).....	200
7-2-7 玻璃纖維(Glass Fibers).....	204

### 7-3 高分子複合材料之機械性質

(Mechanical Properties of Polymer

Composite Materials) .....	206
----------------------------	-----

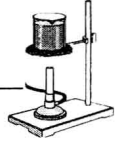
#### 7-3-1 拉伸強度及壓縮強度

(Tensile Strength and Compressive Strength) 206

#### 7-3-2 彈性模數(Modulus of Elasticity) .....

#### 7-3-3 衝擊強度(Impact Strength).....

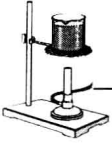
215	219
-----	-----



<b>7-4 夾層板之應力與挺性理論</b>	
(Stress and Stiffness of a Laminate).....	223
7-4-1 夾層板之挺性(Stiffness of Laminates) .....	223
7-4-2 夾層板的強度(Strength of Laminates).....	231
<b>習 題</b> .....	236

## 第八章 高分子流變學

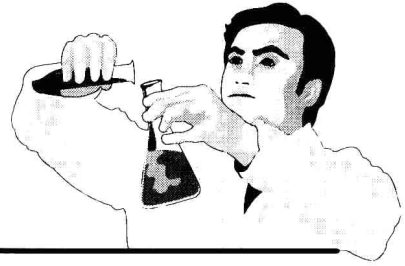
(Rheology of Polymers).....	241
<b>8-1 導 論</b> (Introduction) .....	241
<b>8-2 黏度之測定法</b> (Viscosity Measurements).....	247
8-2-1 毛細管型流變儀(Capillary Rheometer).....	247
8-2-2 秤錘—液杯型流變儀	
(Bob-and-Cup Rheometer) .....	252
8-2-3 圓錐—平板流變儀	
(Cone-and-Plate Rheometer) .....	254
8-2-4 圓盤—平板型流變儀	
(Disk-Plate Rheometer) .....	255
<b>8-3 溫度，分子量及壓力的影響</b>	
(Influence of Temperature, Molecular Weight	
and Pressure).....	257
8-3-1 溫度的影響(Temperature Dependency).....	257
8-3-2 分子量的影響	
(Molecular Weight Dependency).....	260
8-3-3 壓力的影響(Pressure Dependency).....	261



<b>8-4</b>	<b>擬塑性流動之乘幂法則模式</b> (The Power-law Model for Pseudo Plastic Flow).....	262
<b>8-5</b>	<b>聚體融體之特殊流動性質</b> (Special Flow Characteristics of Molten Polymers).....	265
<b>8-6</b>	<b>擬塑流體之真正流動曲線</b> (True Flow Curves for Pseudoplastic Fluids).	267
	<b>習題</b> .....	270
<b>附錄一</b>	<b>國際單位表</b> The International System of Units (SI).....	273
<b>附錄二</b>	<b>單位換算表</b> Survey of Conversion Factors .....	277
<b>附錄三</b>	<b>重要高分子材料之符號及中譯</b> Code Symbols For The Most Important Polymers.....	289
<b>附錄四</b>	<b>習題詳解</b> .....	297

# 第一章

---



## 高分子材料的工程性質

(Engineering Properties of  
Polymer Materials)

---

### 1-1

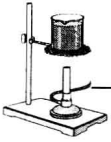
### 機械的性質

(Mechanical Properties)

---

#### 1-1-1 緒論(introduction)

高分子材料為材料科學三大材料（即金屬、陶瓷、高分子）中的一種。所謂高分子(macromolecules)或聚合物(polymers)名詞的原意是“許多的單位”。因此，高分子材料(polymeric materials)就是許多單位的化學結合在一起而形成的固態材料。高分子材料原來在自然界存



在，包括澱粉，纖維甚至與生命有密切關係的蛋白質以及 DNA 等物質。目前有許多高分子材料經人工合成加工後形成為各種形狀(shapes)做為人類生活上的必需用器。此等人造高分子材料，從應用上可分為塑膠(plastics)、彈性體(elastomers)以及纖維(fibers)三種產品。

一般材料的機械性質(mechanical properties)往往以**彈性模數**(modulus of elasticity)、**強度**(strength)、**展延性**(ductility)、**硬度**(hardness)和**韌性**(toughness)等數值表示之。此種材料的機械性質符號，單位等列舉於表 1-1。表 1-1 中所列舉各種機械性質可代表材料的機械性質。然而高分子材料的機械性質將在下面各節中記述之。

表 1-1 材料的機械性質(Mechanical Properties of Materials)<sup>註</sup>

性 質	符 號	定 義 (或評語)	單 位	
			標 準	英 制
應 力	$s$	Force/unit area ( $F/A$ )	pascal*( $N^+/m^2$ )	psi* $lb_f/in.^2$
應 變	$e$	Fractional deformation( $\Delta L/L$ )	—	—
彈性模數	$E$	Stress/elastic strain	pascal	psi
強 度		Stress at failure		
降 伏	$S_y$	Resistance to initial plastic deformation	pascal	psi
極限強度	$S_u$	Maximum strength (based on original dimensions)	pascal	psi
展 延 性		Plastic strain at failure		
伸 長 率	$e_f$	$(L_f - L_0)/L_0$	§	§
面積縮小	$R$ of $A$	$(A_0 - A_f)/A_0$	§	§
韌 性		Energy for failure by fracture	joules	ft-lb



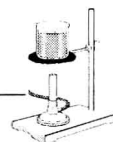


表 1-1 (續)

性 質	符 號	定 義 (或評語)	單 位	
			標	英 制
硬 度 †		Resistance to plastic indentation	Empirical units	

【註一】 \* 1 pascal(Pa) = 1 newton/m<sup>2</sup> = 0.145 × 10<sup>-3</sup> psi; 1000 psi = 6.894 MPa

+ 1kg 質量的加荷產生一種力量( $F$ )為 9.8 newtons( $N$ )重力

† 硬度有三種不同表示法：

(1) Brinell(BHN)硬度

(2) Rockwell(R)硬度

(3) Vicker(DPH)硬度

§ 沒有單位；以原始( $o$ )或終結(破壞)( $f$ )點做為基準。(通常以%表示之)

## 1-1-2 應力—應變曲線(Stress-Strain Curves)

一種材料經 Instron 試驗機測定，則可得應力—應變曲線圖做為材料機械性質之判斷，如圖 1-1 所示例子。