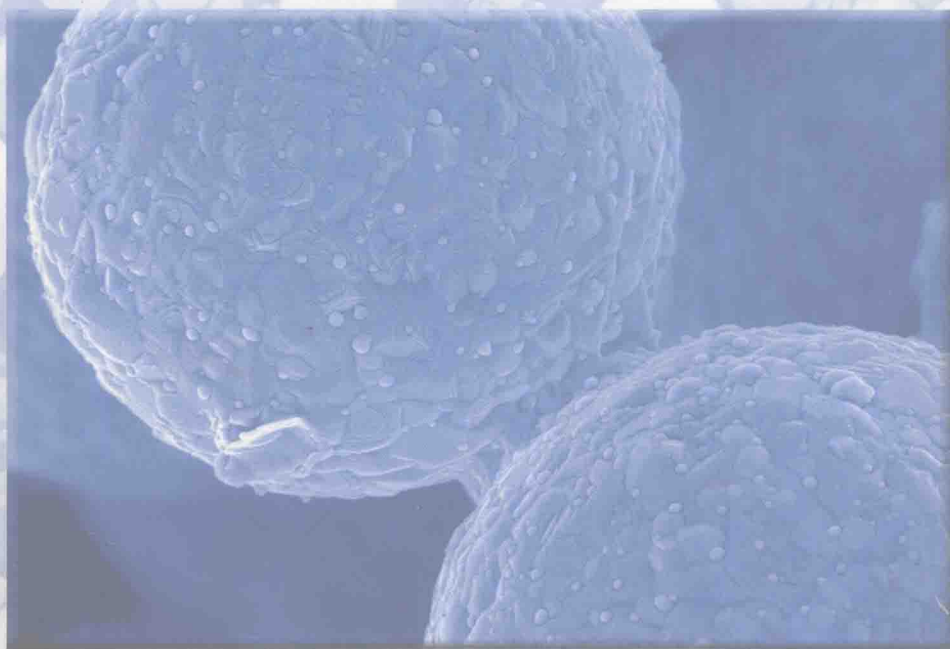


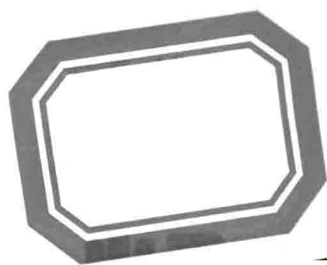
粉末冶金學

(再版)

黃坤祥 著



中華民國粉末冶金協會



粉末冶金學

(再版)

黃坤祥 著

中華民國粉末冶金協會

版權所有・翻印必究

粉末冶金學

初 版／中華民國九十年一月

再 版／中華民國九十二年九月

定 價／平裝本新台幣 550 元

作 者／黃坤祥

發行人／中華民國粉末冶金協會

發行所／中華民國粉末冶金協會

310 新竹縣竹東鎮中興路 4 段 195 號 53 館 114 室

電話：(03)5827091 傳真：(03)5822336

劃撥帳號／05123008 中華民國粉末冶金協會

排版印刷／英杰企業有限公司

106 台北市復興南路 2 段 293-3 號 10 樓之 1

電話：(02)2732-1234 傳真：(02)2732-9531

ISBN 957-97731-5-7 (平裝)

謹將此書獻給引領我進入粉末冶金領域
的兩位導師

Fritz V. Lenel (1907-2003) 及

Randall M. German 教授

作者序

粉末冶金工業在國內興起已有三十餘年之歷史，早期主要以製作自潤軸承供應內銷為主，而如今已能製作汽車零件外銷至歐美各大汽車廠，且金屬粉末射出成形、熱壓等新技術也已由實驗室進入業者之量產工廠，在技術之提升及市場規模上均已不可同日而語。隨著粉末冶金技術之高科技化，從事此行業人員之增加，國內在此方面之基礎訓練益形重要，但適合國人之粉末冶金專業書籍卻仍付之闕如。作者因而有了撰寫教材之構想，並於2001年首次出版本教科書。

本書在原理及製程方面大致上可分為粉末製造（第二章）、粉末測試（第三章）、成形（第四、五章）、燒結（第六、七章）、加工（第八章）及特殊製程（第九章），若以學校之教學而言，這幾章已適合一學期之課程。此外，由於國內之鐵系、銅系、超硬合金、鎢、鉬高溫金屬及磁性材料等產業較為普遍，所以又另外分出六章作詳細之介紹。最後一章則為實驗部分，可供學校及業界人士作為實驗課程之參考。而每一章本文之後亦設計了作業供讀者及學生自己演練，這些作業均為作者在台灣大學材料系任教之“粉末冶金學”及“燒結理論”兩門課之歷屆期中、期末考題，這些題目均為開放式考試(open book)之題目，其目的在於加強讀者之印象，所以著重在分析、計算而不在於強記。

此次再版距離頭版僅兩年半，在這段時間內粉末冶金的基礎學理及應用上之變化不大，所以本次再版之內容與第一版大致相同。此次在改寫及試閱過程中承蒙不少專家學者及同學之協助，特別是李木榮博士在詳閱第一版後之建議及陸永忠、郭建奕、王宣勝、史國俊對第一版之訂正，黃宏勝、吳明偉、林岳儒、楊智貴、邱秀慧、李皓蘭等在製圖、照相及打字上之幫忙，在此誠摯地向他們致謝。

由於粉末冶金科技含括的範圍相當廣，本書在撰稿過程中雖已儘可能地加入新的資訊，但無可避免的，在內容上仍不免有漏失及錯誤之處，尚請各位先進不吝告知、指正。

黃坤祥

2003年9月

謹識於臺灣大學材料系

電話：(02) 2363-3126

傳真：(02) 2363-4562

e-mail: kshwang@ccms.ntu.edu.tw

粉末冶金常用之單位

項 目	單 位
粉末粒度	μm
比表面積	m^2/g
視密度	g/cm^3
流動性	$\text{s}/50\text{g}$
質量	kg, g
燒結密度	g/cm^3
敲擊密度	g/cm^3
生胚密度	g/cm^3
氣氛流量	cm^3/s
表面粗度	μm
升溫速率	$^{\circ}\text{C}/\text{s}, \text{K}/\text{s}$
成形壓力	MPa
生胚強度	MPa
壓環強度	MPa
降伏強度	MPa
拉伸強度	MPa
彎曲強度	MPa
衝擊值	J
楊氏係數	GPa
力	N
溫度	$\text{K}, ^{\circ}\text{C}$
矯頑磁力	$\text{A}/\text{m}, \text{Oe}$
磁束密度	Tesla, G

粉末冶金常用常數及單位換算

重力加速度 = 9.8 m/s^2

電子質量 = $9.11 \times 10^{-28} \text{ g}$

氣體常數 = $8.314 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$

大氣壓 = 1.01 N/m^2

波茲曼(Boltzmann)常數 = $1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

亞佛加德羅(Avogadro)常數 = 6.022×10^{23} 個分子

電子荷電量 = $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$

原子質量 = $1.661 \times 10^{-24} \text{ g}$

普郎克(Planck)常數 = $6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

標準狀態下之氣體體積 = 0.0224 m^3

壓力、應力及強度之轉換

$1 \text{ torr} = 1000 \text{ micron } (\mu\text{m})$

$1 \text{ Pa} = 0.0075 \text{ torr} = 0.0075 \text{ mmHg}$

$1 \text{ Pa} = 10 \text{ dyne/cm}^2 = 1 \text{ N/m}^2$

$1 \text{ kPa} = 0.145 \text{ psi}$

$1 \text{ MPa} = 9.87 \text{ bar} = 9.87 \text{ 大氣壓} = 10^6 \text{ Pa}$

$1 \text{ MPa} = 145 \text{ psi}$

$1 \text{ GPa} = 10^3 \text{ MPa} = 10^9 \text{ Pa}$

$1 \text{ 大氣壓} = 1.013 \text{ bar} = 0.101 \text{ MPa} = 760 \text{ mmHg}$
 $= 760 \text{ torr} = 760,000 \mu\text{mHg}$

能量轉換

$1 \text{ J} = 9.48 \times 10^{-4} \text{ Btu}$

$1 \text{ J} = 10^7 \text{ erg}$

$1 \text{ J} = 0.737 \text{ ft} \cdot \text{lb}$

$1 \text{ J} = 0.239 \text{ cal}$

$1 \text{ J} = 6.24 \times 10^{18} \text{ eV}$

$1 \text{ J} = 1 \text{ W} \cdot \text{s (watt second)}$

$1 \text{ J} = 1 \text{ V} \cdot \text{C (volt coulomb)}$

熱容量轉換

$1 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)} = 2.39 \times 10^{-4} \text{ btu/(lb} \cdot \text{°F)}$

$1 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)} = 2.39 \times 10^{-4} \text{ cal/(g} \cdot \text{°C)}$

功率轉換

$1 \text{ W} = 0.737 \text{ ft} \cdot \text{lb/s}$

$1 \text{ W} = 1.34 \times 10^{-3} \text{ hp}$

$1 \text{ Btu/s} = 1054.4 \text{ W}$

$1 \text{ hp} = 745.7 \text{ W}$

黏度轉換

$1 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 1 \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$

$1 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 10 \text{ p(poise)}$

$1 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 10^3 \text{ cp(centipoise)}$

磁性轉換

$1 \text{ T} = 10^4 \text{ G(gauss)} = 1 \text{ weber/m}^2$

$1 \text{ A/m} = 0.01257 \text{ Oe}$

力之轉換

$1 \text{ N} = 10^5 \text{ dyne}$

$1 \text{ N} = 0.225 \text{ lb force}$

目錄

作者序	v
目 錄	vii
粉末冶金常用單位	xiv
粉末冶金常用常數及單位換算	xv
第一章 緒論	1
1-1 基本製程	1
1-2 粉末冶金產品之特性	2
1-3 粉末冶金未來之發展	7
第二章 粉末之製造	11
2-1 前言	11
2-2 製程	11
2-2-1 氣噴霧法	12
2-2-2 水噴霧法	16
2-2-3 還原法	19
2-2-4 離心式法	21
2-2-5 機械法	24
2-2-6 電解法	26
2-2-7 化學分解法	28
2-2-8 奈米級粉末之製造	30
2-3 粉末之標準代號	33
第三章 粉末特性之分析	39
3-1 前言	39
3-2 粉末特性之種類	39
3-3 粒度分析	41
3-3-1 篩分法	41
3-3-2 顯微觀測法	44
3-3-3 雷射光散射法	44
3-3-4 沈降法	47
3-3-5 電感帶法	49

3-3-6	費修亞篩粒度分析法	50
3-4	粒度分佈圖	52
3-5	粉末之形狀	55
3-6	表面積	56
3-6-1	費修亞篩粒度分析法	56
3-6-2	B.E.T.法	56
3-7	密度	58
3-7-1	真實密度	58
3-7-2	視密度	60
3-7-3	敲擊密度	61
3-8	安息角	62
3-9	流動性	62
3-10	生胚強度	63
3-11	壓縮性	64
3-12	化學成分	65
3-13	粉末與安全	65
3-14	總結	66
第四章	粉末成形前之處理	71
4-1	前言	71
4-2	分級	71
4-3	合批	72
4-4	混合	74
4-5	球磨	79
4-6	造粒	79
4-7	添加潤滑劑	85
第五章	粉末之加壓成形	97
5-1	前言	97
5-2	粉末成形機構	97
5-3	成形步驟	99
5-3-1	充填	99
5-3-2	成形	103
5-4	基本原理	108
5-4-1	成形	108
5-4-2	脫模力	112
5-5	成形時之考慮事項	113
5-5-1	噸數	113
5-5-2	段差	115
5-5-3	零件設計	115
5-6	成形時常遇見之困難	118
5-6-1	魚鱗紋	118
5-6-2	裂縫	120
5-6-3	崩角	122

5-7	模具設計	122
5-7-1	中模及其承受之應力	123
5-7-2	模具材料	124
5-8	溫壓成形	126
5-9	胚體之測試	128
5-10	成形機	129
第六章	燒結原理	137
6-1	前言	137
6-2	燒結之驅動力	138
6-3	初期燒結	140
6-4	中期燒結	145
6-5	後期燒結	146
6-6	燒結圖	147
6-7	液相燒結法	148
6-7-1	液相燒結之驅動力	150
6-7-2	液相燒結階段	152
6-8	特殊燒結法	155
6-8-1	體心立方相燒結	155
6-8-2	活化燒結	156
6-8-3	反應燒結	158
第七章	燒結製程	167
7-1	前言	167
7-2	脫脂	167
7-3	燒結氣氛	168
7-3-1	氫氣	169
7-3-2	裂解氨	169
7-3-3	氮氣	170
7-3-4	氮氫混合氣	171
7-3-5	吸熱型氣氛	171
7-3-6	放熱型氣氛	172
7-3-7	氣氛流量之計算	172
7-4	金屬之氧化及還原反應	174
7-5	氣氛之控制	176
7-5-1	水分	176
7-5-2	二氧化碳	179
7-6	燒結爐	180
7-6-1	網帶式爐	180
7-6-2	推式爐	181
7-6-3	動樑式爐	183
7-6-4	駝峰式爐	183
7-6-5	真空爐	184
7-7	加熱體	188

7-8	盛放物	190
7-9	熱電偶	192
7-10	特殊材料之燒結	192
7-10-1	混合粉／預合金粉之燒結	192
7-10-2	不銹鋼之燒結	194
7-10-3	鋁之燒結	194
7-10-4	黃銅之燒結	195
7-10-5	青銅之燒結	196
第八章	燒結體之後處理	201
8-1	前言	201
8-2	精整	201
8-3	再壓再燒	207
8-4	熱處理	208
8-4-1	全硬化	208
8-4-2	滲碳	210
8-4-3	氮化	212
8-4-4	滲碳氮化	213
8-5	滲油	213
8-6	機械加工	214
8-7	滲銅處理	215
8-8	接合	217
8-9	振動研磨	218
8-10	噴砂	220
8-11	樹脂含浸	220
8-12	黑化	223
8-13	電鍍	226
8-14	磷酸鹽皮膜處理	226
8-15	超音波洗淨	226
第九章	特殊粉末冶金製程	231
9-1	前言	231
9-2	冷均壓	231
9-3	熱均壓	234
9-4	擬熱均壓製程	237
9-5	熱壓	238
9-6	粉末鍛造	239
9-7	噴覆成形	240
9-8	粉末軋延	243
9-8-1	製程	243
9-8-2	基本原理	245
9-9	鬆裝燒結	246
9-10	金屬粉末射出成形	246
9-10-1	基本技術	247

9-10-2	機械及物理性質	255
9-10-3	金屬射出成形之優缺點	256
9-10-4	設計上之考量	258
第十章	鐵系材料	265
10-1	前言	265
10-2	合金元素之功能	265
10-2-1	銅	265
10-2-2	鎳	268
10-2-3	錳	269
10-2-4	鉻	270
10-2-5	鉬	272
10-2-6	矽	274
10-2-7	硫	274
10-2-8	磷	274
10-2-9	碳	275
10-3	結構用合金鋼之成分及機械性質	275
10-4	不銹鋼	277
10-4-1	不銹鋼之成分及組織	277
10-4-2	不銹鋼之物理及機械特性	280
10-4-3	燒結氣氛之影響	284
10-4-4	不銹鋼試片之後處理	285
10-4-5	加工性	286
10-5	軟磁材料	288
10-6	高速鋼	288
10-7	超合金	291
第十一章	非鐵材料	297
11-1	前言	297
11-2	青銅	297
11-2-1	粉末之選擇	297
11-2-2	燒結	299
11-2-3	自潤軸承之安裝	302
11-2-4	過濾器	303
11-3	黃銅	305
11-4	純銅	307
11-5	鋁	308
11-6	鈦	312
第十二章	鉬鎢之粉末冶金製程	317
12-1	前言	317
12-2	鉬及其合金	317
12-2-1	鉬粉之製造	318
12-2-2	鉬之成形	323

12-2-3	鉬之燒結	324
12-2-4	燒結鉬之後續加工	326
12-2-5	鉬之物理及機械性質	327
12-2-6	鉬之用途	329
12-3	鎢及鎢合金	331
12-3-1	鎢粉之製造	331
12-3-2	鎢粉之成形及燒結	334
12-3-3	鎢之物理及機械性質	335
12-3-4	鎢之用途	336
第十三章	重合金及熔滲材料	341
13-1	前言	341
13-2	重合金	341
13-3	鎢鉬／銀銅複合材料	343
13-3-1	應用	343
13-3-2	製程	346
13-4	銀／氧化鎢(Ag-CdO)合金	351
第十四章	超硬合金、鑽石刀具及摩擦材料	355
14-1	前言	355
14-2	超硬合金之歷史及特性	355
14-2-1	粉末之製作	356
14-2-2	成形	360
14-2-3	燒結	360
14-2-4	碳化鎢之機械性質	365
14-3	鑽石刀具	367
14-3-1	混粉	369
14-3-2	成形及燒結	370
14-3-3	焊接	370
14-4	摩擦材料	371
14-4-1	基本條件	371
14-4-2	摩擦材料之組成	371
14-4-3	製程	372
第十五章	磁性材料	375
15-1	前言	375
15-2	軟磁材料	376
15-2-1	鐵系軟磁	377
15-2-2	製程與材料對鐵系燒結軟磁磁性之影響	381
15-2-3	鐵氧磁體軟磁	385
15-3	硬磁	387
15-3-1	鋁鎳鈷	388
15-3-2	稀土磁石	389
15-3-3	鐵氧磁體硬磁	392

第十六章 粉末及成品之測試方法	395
16-1 前言	395
16-2 粉末之流動性及視密度	395
16-3 由費修亞篩法量測粉末粒度	397
16-4 生胚強度之測試	399
16-5 生胚及燒結體密度	402
16-6 金相實驗	405
16-7 燒結成品之孔隙分析	407
16-8 多孔材料之滲透性	409
16-9 燒結成品之硬度	410
16-10 強度	410
16-11 抗腐蝕性	412
16-12 成分分析	412
16-13 品管	413
附錄一 硬度對照表	417
附錄二 標準常態分配表	419
附錄三 各國之粉末及胚體測試標準	420
附錄四 真空常用單位換算表	421
附錄五 常用模具材料成分及美、日標準對照表	422
附錄六 與粉末冶金產品相關之測試標準	423
習題解答	425
中文索引	427
英文索引	437

1-1 基本製程

粉末冶金之基本製程如圖 1-1 所示，其第一個步驟乃粉末之混合，然後為加壓成形，使鬆散之粉末具有最後產品之形狀，但成形之後，粉末間仍無足夠之結合力，所以絕大多數之成形胚體均須經過燒結之步驟才能達到所需之機械性質，而燒結後之胚體仍常施以機械加工、電鍍、熱處理等才能完全滿足客戶之需求[1-3]。本書將先就製程之每一步驟作詳

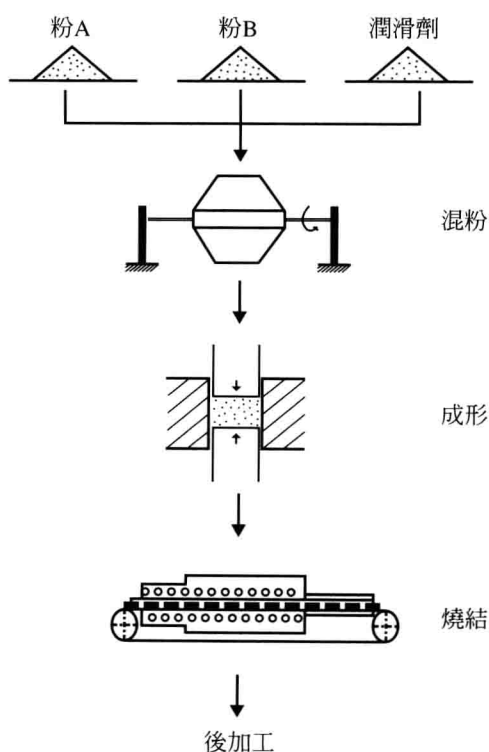


圖 1-1 粉末冶金之基本製程

細之說明，然後再配合國內目前之產業型態，針對不同之材料做重點之介紹。目前國內主要之粉末冶金產品及材料有下列各項：

- (1) 鐵系機械零件
- (2) 銅系軸承零件
- (3) 碳化鎢超硬合金
- (4) 鐵氧磁體
- (5) 高熔點金屬

其中鐵系零件大多用於汽、機車、冷氣機、縫紉機、電動工具、手工具、氣動工具等，而銅系零件則以含油軸承及鎖件為主，碳化鎢超硬合金則多用於車刀、沖壓模具、粉末冶金模具等，鐵氧磁體分為軟磁、硬磁，多用於電源供應器，汽車供電系統及機電系統中，而其他較特殊之產業則有電接觸點、重合金配重塊、散熱體如鎢、鉬產品等，如圖 1-2 所示。

1-2 粉末冶金產品之特性

目前機械零件之製造方法相當多，如鍛造、沖壓、機械加工、壓鑄、精密鑄造等，均各有其優缺點，與這些製程相較之下，粉末冶金製程因其具有下列多種特性及優勢，因此多年來一直穩定地持續成長。

- (1) 多孔性：如軸承、過濾器、消音器等工件中必須具有相當數量之孔隙，軸承之孔隙可用以貯存潤滑油，使機器運轉時潤滑油能因受熱釋出以潤滑轉動軸，減少磨耗及噪音，而冷卻時潤滑油則藉毛細力之原理又回存至孔隙中（見第 303 頁）。而過濾器則是利用不同大小之孔隙度過濾雜質，且金屬基之過濾器可藉燃燒或清洗之方法去除已堵塞之雜質後再重覆使用。近年來筆記型電腦中多已採用熱導管(heat pipe)將中央處理器(CPU)之熱排除。如圖 1-3 所示，熱導管中之水因 CPU 發熱體之熱而蒸發，而 CPU 則因水之蒸發而降溫，所蒸發之水蒸氣經由中間之通道到達熱導管之另一端（凝結端），並因該處溫度較低而凝結成水。此水藉導管中燒結體所含孔隙之毛細力被吸回至原來之熱端，如此不斷蒸發、冷卻形成一循環。這些均是粉末冶金產品所擁有之特性。
- (2) 可製作高熔點金屬：由於鎢、鉬等元素之熔點高，無法找到適合

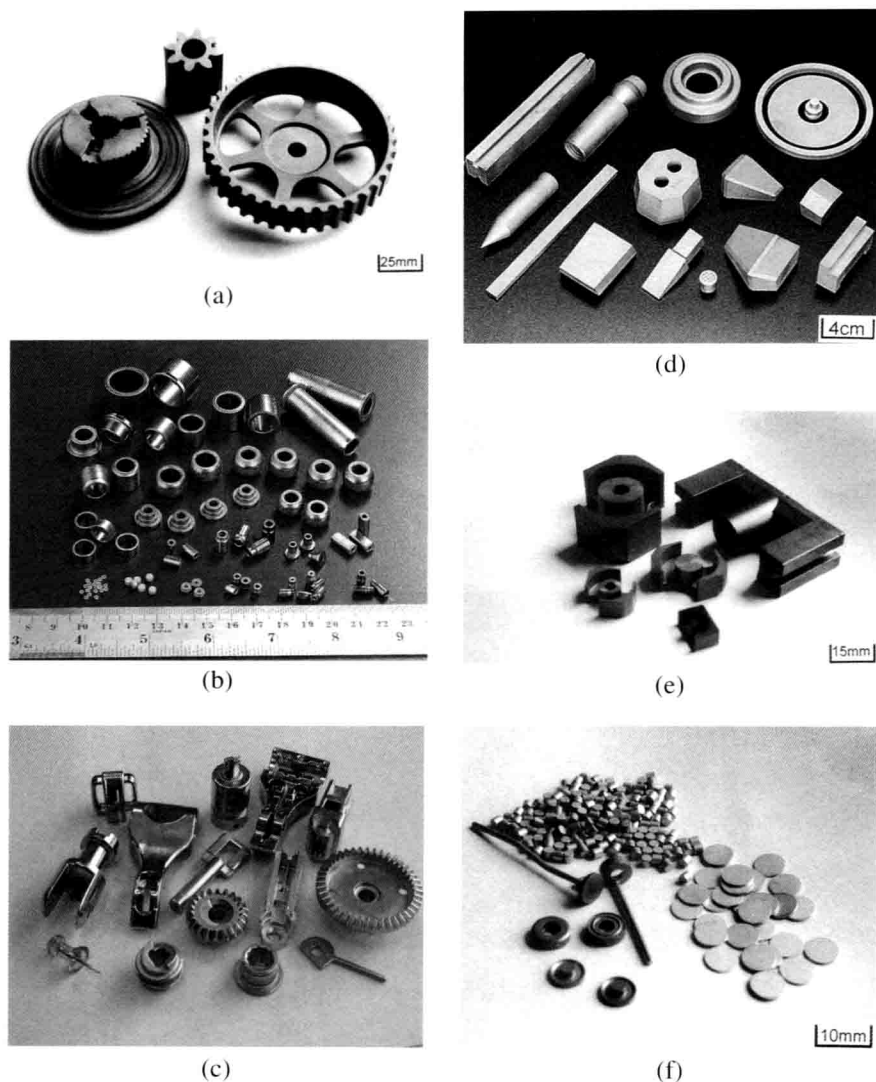


圖 1-2 常見之粉末冶金零件(a)汽車引擎內之定時齒輪等(b)含油青銅軸承(台灣保來得公司提供)(c)金屬粉末射出成形零件(台耀科技公司提供)(d)碳化鎢刀具(春保公司提供)(e)鐵氧磁體(f)純鉬製成之磁控管及散熱體元件

之坩鍋以熔煉這些金屬，所以一般多採粉末冶金法，以化學方式先製成粉末，再藉成形、燒結之方式將粉末緻密化。圖 1-4 為一般燈泡中鎢絲之外觀。