

粉 粒 体 输 送 装 置

日本工学博士

狩野 武 著

赖耿阳 译著

复 汉 出 版 社

科學技術用書

粉粒體 輸送裝置

日本工學博士
狩野 武 著
賴耿陽 譯著

復漢出版社印行

粉粒體輸送裝置／目次

第一章 粉粒體的物性..... 1

1.1 粒子徑及粒子徑分佈.....	1
1.1.1 粒子徑的定義.....	1
1.1.2 單一粒子徑.....	2
1.1.3 平均粒子徑.....	2
1.1.4 粒子的大小與測定方法.....	4
1.1.5 實用的粒子徑計算方法.....	5
1.1.6 粒子徑分佈的表示法.....	10
1.1.7 篩.....	12
1.2 密度與比重.....	16
1.2.1 定義.....	16
1.2.2 真密度的測定方法.....	16
1.2.3 容積密度，容積比重.....	18
1.2.4 粉粒體的空間率.....	19
1.3 比表面積與形狀係數、粗糙度係數.....	20
1.4 粉粒體的水分.....	22
1.4.1 水分的存在方式.....	22
1.4.2 水分量的表示法.....	24
1.4.3 水分的測定方法.....	24
1.5 摩擦角.....	25
1.5.1 摩擦角的種類.....	25
1.5.2 靜止角 ϕ_s	25
1.5.3 內部摩擦角 ϕ_i	29
1.5.4 壁面摩擦角 ϕ_w ，滑動角 ϕ_d	29
1.6 附着性.....	31
1.6.1 附着性的原因.....	31
1.6.2 附着的基本力.....	32
1.6.3 附着力的測定方法.....	33
1.6.4 附着力的測定值例.....	34
1.6.5 H. Rumpf 對管壁微粉末附着的研究.....	36

1.7 粉粒體粒子的破碎	38
1.7.1 破碎方式	38
1.7.2 破碎的理論	40
1.8 粉塵爆炸	45
1.8.1 粉塵爆炸的機構與種類	45
1.8.2 粉塵爆炸的性質	48
1.8.3 防止粉塵爆炸的對策	54
1.9 粉體的附着凝集	55
1.10 Carr 的粉粒體特性綜合測定裝置	55

第二章 空氣的流動 57

2.1 空氣的組成與物理性質	57
2.1.1 空氣的組成與諸數值	57
2.1.2 空氣的比重 γ_a , 比重量 ρ_a	57
2.1.3 標準空氣	59
2.1.4 標準大氣	59
2.1.5 空氣的粘性係數 μ , 動粘性係數 ν	59
2.1.6 工學單位與絕對單位的關係	60
2.2 流量, 連續律	61
2.2.1 流量	61
2.2.2 連續律	61
2.3 柏努力 (Bernoulli) 定理	61
2.4 靜壓與動壓	62
2.5 管內的壓力損失	62
2.5.1 圓形斷面的管	62
2.5.2 圓形以外的斷面的管	63
2.6 管路的壓力損失	64
2.6.1 管的出入口	64
2.6.2 管路斷面積改變時	66
2.7 彎頭, 分岐, 合流管的壓力損失	66
2.8 肘管的壓力損失	68
2.9 圓管內的流體的速度分佈	70
2.9.1 層流的場合	70
2.9.2 亂流的場合	70

第三章 粉粒體輸送裝置的種類與特色..... 72

3.1 輸送裝置的種類與比較.....	72
3.2 空氣輸送裝置的種類與一般特色.....	74
3.2.1 空氣輸送裝置的種類.....	75
發展過程.....	74
3.2.2 空氣輸送裝置的特色.....	77
3.3 吸引式空氣輸送裝置.....	78
3.4 壓送式空氣輸送裝置.....	79
3.5 Gattys 空氣輸送裝置.....	81
3.6 都市廢棄物的輸送.....	83
3.7 其他二三輸送裝置.....	83

第四章 空氣輸送的理論與研究..... 86

4.1 概說.....	86
4.2 粒子的終速度與浮游速度.....	86
4.2.1 定義與計算式.....	86
4.2.2 終速度的簡易計算法.....	91
4.3 筆直短輸送管中的壓力損失.....	92
4.3.1 壓力損失的表示式.....	92
4.3.2 次元解析.....	93
4.3.3 定常輸送中壓力損失的理論式.....	94
4.3.4 理論式中係數的決定.....	96
4.4 粒子的速度與輸送空氣速度之比 ϕ	97
4.5 輸送所需的最小空氣速度.....	100
4.6 流體含有粉粒體時壓力損失的一般式.....	101
4.7 加速所致的壓力損失.....	103
4.8 定常輸送區間的壓力損失最小的空氣速度.....	104
4.9 筆直長輸送管中的壓力損失.....	106
4.10 輸送管中粉粒體的流動狀態.....	109
4.10.1 輸送空氣速度與流動狀態的關係	

.....	109	4.10.2 流動狀態與輸送 壓力的關係.....	111
4.11 輸送管中空氣的速度分佈.....			113
4.12 輸送管中的粒子分佈與速度.....			114
4.12.1 水平直管中的粒 子分佈.....	114	4.12.3 輸送中粒子的速 度.....	115
4.12.2 彎頭中的粒子分			116
4.13 混合流的比重量與壓力損失的關係.....			119
4.14 以能量論解析壓力損失.....			120
4.15 輸送管的閉鎖界限.....			121
4.16 吹穿粒子層必要的空氣壓力.....			123
4.17 彎頭的壓力損失.....			125
4.18 連續肘管的壓力損失.....			128
第五章 輸送裝置的計劃.....			130
5.1 調查事項.....			130
5.2 計劃的順序.....			135
5.3 空氣輸送裝置的概算計劃方法.....			136
5.4 輸送方式的經濟比較.....			142
第六章 空氣源機械.....			146
6.1 種類.....			146
6.2 選定上的要點.....			147
6.3 往復動式空氣壓縮機.....			150
6.4 往復動式真空泵.....			162
6.5 螺旋形壓縮機.....			163
6.6 魯氏鼓風機.....			166
6.7 輪機鼓風機.....			167
6.8 液封形旋轉真空泵.....			174
6.9 噴射器.....			175
6.10 噪音對策.....			177

第七章 粉粒體供給器..... 180

- 7.1 供給器的意義..... 180
- 7.2 選定上的注意事項..... 180
- 7.3 供給器的種類..... 182
- 7.4 供給器的選定基準..... 187
- 7.5 吸引嘴..... 187
- 7.6 旋轉供給器..... 192
- 7.7 奇尼永泵式供給器..... 201
- 7.8 鼓風箱式輸送裝置..... 201
- 7.9 噴射器式供給機..... 209
- 7.10 供給機方式的選定..... 210

第八章 輸送管及配管用機器..... 211

- 8.1 計劃上的注意事項..... 211
- 8.2 輸送管的材料..... 214
- 8.3 空氣管及排氣管..... 214
- 8.4 可撓管..... 220
- 8.5 管接頭..... 220
- 8.6 彎頭..... 225
- 8.7 輸送管的摩耗..... 226
- 8.8 耐摩耗材料的二三例..... 229
- 8.9 配管架台..... 235
- 8.10 擋板、變換閥..... 236
- 8.11 金屬材料在高溫度的容許應力..... 246

第九章 分離捕集器..... 247

- 9.1 分離捕集器的種類和特色..... 247
- 9.2 靜止空氣中的粒子沈降..... 248
- 9.3 在靜止空氣中沿水平方向放出的粒子的運動..... 253
- 9.4 水平氣流中粒子的沈降..... 257

9.5 沈降槽.....	257
9.6 旋風器式分離捕集器.....	259
9.6.1 概要.....	259
9.6.2 旋風器的壓力損失.....	262
9.6.3 旋風器的捕集效果.....	264
9.6.4 旋風器各部份的尺寸比例.....	268
9.7 袋濾器.....	270
9.7.1 概要.....	270
9.7.2 袋濾器的壓力損失.....	271
9.7.3 袋濾器用濾布的種類與選定上的注意事項.....	275
9.7.4 袋濾器的形式.....	278
9.8 衝撞捕集的原理.....	280
9.9 洗淨式捕集器.....	284
9.10 文氏管清潔器.....	286
第十章 機械性輸送裝置.....	291
10.1 機械性輸送裝置的種類與選定上的注意事項.....	291
10.2 螺旋運送器.....	293
10.3 皮帶運送機.....	298
10.4 箱形運送機.....	308
10.5 箕斗升降機.....	315
第十一章 貯槽.....	326
11.1 貯槽的目的與種類.....	326
11.2 計劃上的注意事項.....	329
11.3 貯槽的容積.....	333
11.4 經濟的直徑與高度之比.....	334
11.5 施加於貯槽的荷重和容許應力.....	336
11.6 貯槽內粉粒體的壓力.....	338
11.7 積雪所致的荷重 $P_s(k,)$	345
11.8 風壓所致的荷重 $P_w(kg,)$	347

11.9	地震所致的荷重 P_e (kg)	348
11.10	貯槽本體的板厚	352
11.11	腳、構架的強度計算	355
11.12	基礎及土質	358
11.13	直接基礎	359
11.14	樁基礎	361
11.15	混凝土工事	365
11.16	偏析現象	370
11.17	從貯槽排出	371
11.18	架橋現象	373
11.19	粉粒體高度查知器	378

第十二章 空氣輸送裝置的實例 382

12.1	吸引式空氣輸送裝置	382
12.1.1	碼頭卸貨裝置	382
12.1.2	啤酒工廠輸送裝置	385
12.1.3	集中式集塵裝置	386
12.1.4	火力發電廠的灰 爐處理裝置	386
12.1.5	高溫粉粒體輸送 裝置	390
12.1.6	氣流乾燥裝置	390
12.2	壓送式空氣輸送裝置	391
12.2.1	旋轉供給器低壓 壓送式	394
12.2.2	旋轉供給器高壓	391
12.2.3	鼓風箱式	395
12.2.4	空氣滑板	399
尾語		402

1. 粉粒體的物性

1.1 粒子徑及粒子徑分佈

1.1.1 粒子徑的定義

以工業規模處理的粉粒體粒子有各種大小，亦即如表 1-1 所示，從碳黑的 Å 單位微粒子乃至紙漿原料的火柴盒大小的木材片、礦山或煤礦處理的礦石或煤炭，形狀也不一。

粉粒體粒子為球形而大小均勻的話，取其直徑表示粒子徑即可，但大小或形狀不一時，須以某法決定的代表性長度為平均直徑。

表 1-1 粉粒體粒子的大小

粒子徑 $d_p(\mu)$	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	10^0	10^1	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6
一般分類	煙	煙塵	雲霧	塵埃	雨滴							
測定法	電子顯微鏡 超離心分離	光學顯微鏡	風扇	液體沈澱法	篩分							
分離 捕集法		電氣集塵	旋風器 (離心分離)	篩分								
篩目 (英) mesh				325 200 100 60 32 20 10 4								
對應的 波長	X 線	紫外線	可見光線	紅外線	無線電							
沉降速度 計算式 (標準 大氣中)	Brown運動		Cunningham 的修正		Stokes 公式		Allen 公式		Newton 公式			
實 例	香煙煙 氯化鉀 石灰 奶粉 碳黑 礦工業塵 各種金屬製煉煙灰 砂 米麥 靜止空氣中的不純分 纖維原料 食物粉末 雨滴 油煙 SO ₂ 霧											

因而粒子徑有 1 個粒子代表長度的單一粒子徑與各種大小粒子群代表長度的平均粒子徑。

粉粒體有流體或固體所無的各種物性，計畫裝置時，要充分把握它

們的物性，以總合性觀點推進計畫，在粉粒體的物性中，粒子徑為最基本的性狀。

粒子徑的測定方法、計算方法等的詳細可參閱專門書，本書只以實用的觀點敘述實際方法的概要。

1.1.2 單一粒子徑

通常粉粒體粒子成非幾何學形狀，放置於平面上時，以安定的形態靜止，如圖 1-1 所示，三方向的尺寸為長徑（以面內 2 平行線夾投影像時的最大距離） l 、短徑（垂直長徑的方向的最大距離） b 、厚度 h 。

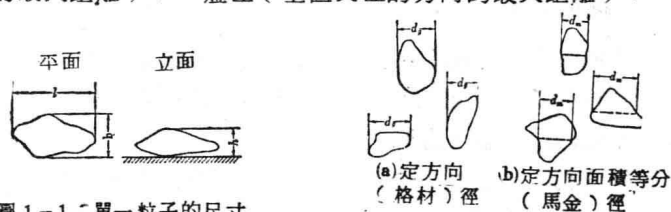


圖 1-1 單一粒子的尺寸

圖 1-2 單一粒子徑的測定法

此時，單一粒子徑的各種表示方法如表 1-2 所示。

這些表示方法中，實際上常用長軸徑、二軸平均徑、圓相當徑、定方向徑等，微粒子也常用從重力沈降法的測定值在理論上算出的 Stokes 徑。

定方向徑如圖 1-2 (a) 所示為以任意方向的二平行線夾粒子投影像時的 2 平行線間之距離，定方向面積等分徑如 (b) 所示，乃一定方向的線將投影像面積二等分時切斷的長度。

1.1.3 平均粒子徑

求由各種大小的粒子形成的粉粒體的平均粒子徑時，可先求單一粒子的適當粒徑而平均之。

同一試料的粉粒體以表 1-3 的各種計算方法求平均粒子徑時，一般如圖 1-3 所示，成為 $d_3 < d_2 < d_1 < d_v < d_m < d_n < d_s$ 之序，各值大不相同。

實際上應依裝置的內容——亦即對粉粒體施行何種物理、化學處理，選定最妥當的粒徑計算方法，表 1-4 為主要物理、化學現象與各場

表 1-2 單一粒子徑的表示方法

名 稱	別 名	計 算 式
長 軸 徑	長 徑	l
短 軸 徑	短 徑	b
二 軸 平 均 徑		$(l + b) / 2$
三 軸 平 均 徑	算 術 平 均 徑	$(l + b + h) / 3$
調 和 平 均 徑		$3 \left(\frac{1}{l} + \frac{1}{b} + \frac{1}{h} \right)^{-1}$
表 面 積 平 均 徑		$\frac{(2lb + 2bh + 2hl)^{1/2}}{6}$
立 體 積 平 均 徑	布來尼格爾徑	$3lbh(lb + bh + hl)^{-1}$
外接矩形相當徑	古 德 曼 徑	$(lb)^{1/2}$
正方形相當徑	黑 烏 德 徑	$f^{1/2}$
圓 相 當 徑	幾 何 平 均 徑	$(4f/\pi)^{1/2}$
直方體相當徑	淺 野 徑	$(lbh)^{1/3}$
圓筒體相當徑		$(fh)^{1/3}$
立方體相當徑	安 德 德 善 徑	$v^{1/3}$
球 相 當 徑		$(6v/\pi)^{1/3}$
定 方 向 徑	格 林 徑	d_g
定方向面積等分徑	馬 金 徑	d_m
Stokes 徑		$\sqrt{\frac{18\mu u_t}{\gamma_s - \gamma}}$

(註) f : 投影面積, v : 粒子體積, μ : 流體粘性係數,

u_t : 粒子終速度, γ_s : 粒子真比重量, γ : 流體比重量

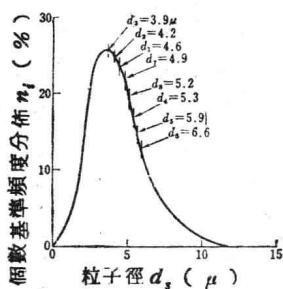


圖 1-3 各種平均粒子徑比較例
剛鋁石粉 # 4000 (全
粒子個數 2000 個)

表 1-3 平均粒子徑計算方法

名 稱	計 算 式	物 理 意 義
算 術 平 均 徑	$d_1 = \Sigma nd / \Sigma n$	各單一粒徑的算術平均值
幾 何 平 均 徑	$d_2 = (d'_1 d'_2 \dots d'_n)^{1/n}$	n 個粒徑之積的 n 乘根
調 和 平 均 徑	$d_3 = \Sigma n / \Sigma (n/d)$	各粒徑的調和平均值
面積長度平均徑	$d_4 = \Sigma nd^2 / \Sigma nd$	表面積的合計被直徑之合計除者
體面積平均徑	$d_5 = \Sigma nd^3 / \Sigma nd^2$	全粒子體積被全表面積除者
重量平均徑	$d_n = \Sigma nd^4 / \Sigma nd^3$	將全重量視為個數等於總個數的粒子粒徑
平均表面積徑	$d_7 = [\Sigma nd^2 / \Sigma n]^{1/2}$	全表面積被全個數除而取平方根
平均體積徑	$d_8 = [\Sigma nd^3 / \Sigma n]^{1/3}$	全體積被全個數除而取立方根
比表面積徑	$d = 6 / \gamma_s \cdot S$	由比表面積 S 計算的粒徑
中 立 數 徑	d_{med}	粒徑分佈的累積值為 50% 的粒徑
衆 數 徑	d_{mod}	粒徑分佈中最大頻率的粒徑

表 1-4 粉粒體的物理・化學現象與適切平均粒子徑計算方法的關係

記 號	名 稱	物 理、化 學 現 象
d_1	算 術 平 均 徑	蒸發，各種大小之比較
d_4	面 積 長 度 平 均 徑	吸 着
d_5	體 面 積 平 均 徑	物質移動，反應，粒子充填層的流體阻力，充填材的強度
d_n	重 量 平 均 徑	空氣輸送，重量效率，燃燒，平衡
d_7	面 積 平 均 徑	吸 收
d_8	平 均 體 積 徑	光的散亂，噴散的質量分佈之比較
d	比 表 面 積 徑	蒸發，分子擴散
d_{med}	中 位 數 徑	分離，分級裝置的性能表示

合最適當平均粒子徑計算方法的關係。

1.1.4 粒子的大小與測定方法

工業上處理的粉粒體有很多種類，粒子的大小、形狀、物理性質互

表 1-5 粒子的大小與測定方法的適用範圍

方 法	測定範圍 (μ)	方 法	測定範圍 (μ)
篩 分 法	> 40	吸着法 (氣相)	10 ~ 0.001
顯微鏡法 (光學)	500 ~ 0.5	“ (液相)	10 ~ 0.001
“ (電子)	10 ~ 0.001	濕 潤 熱 法	10 ~ 0.001
細 孔 通 過 法	500 ~ 0.5	透 過 法	100 ~ 0.5
沈 降 法 (液相)	500 ~ 0.5	反 應 速 度 法	50 ~ 0.1
風 篩 法 (氣相)	100 ~ 1	散亂法 (光線)	10 ~ 0.001
離 心 力 法	5 ~ 0.01	“ (X線)	0.05 ~ 0.001
擴 散 法	0.5 ~ 0.001		

異。

有各種方法可測定粒子的大小，依各場合的條件與必要的測定值精度而有不同的方法，詳情可參考各種專門書，表 1 - 5 為各種粒子的大小所採用的方法。

1.1.5 實用的粒子徑計算方法

測定粉粒體粒子徑時，先依粒子的大小與現象的種類，兼慮測定的難易，所需時間，必要的精度等，從表 1 - 5 選用適切的方法；這些方法在測定上需要時間和熟練或昂貴的器具，故應避免超出必要以上的勞力和經費。

計畫粉粒體處理裝置時，知道粒子大概的大小即可，若已決定測定方法或計算方法，這些方法的差異所致粒子徑的不同常可藉裝置的計畫方法修正。

所以實用上常以簡易的方法求粒子徑，以圖業務的迅速化，這樣的測定誤差通常較小，復原性也大。

下面說明主要的方法。

(a) 大粒子的場合

這是對粒子的大小可 1 粒粒揀起者——例如大豆、小麥、米、丸粒等所用的方法。

用上盤式天平測定從試料任意採集的 n 個 (約 200 粒以上，愈多愈

好)的粒子總重量 W_m ，設粒子的真比重為 γ_s ，則平均粒子徑 d_s 為

$$W_{s,n} = n \cdot \frac{\pi}{6} d_s^3 \gamma_s$$

所以

$$d_s = \sqrt[3]{6W_{s,n} / (\pi \gamma_s n)} \quad (1.1)$$

亦即為將各粒子視為等體積球時的平均直徑。

(b) 微細粒子的場合

粒子細而不能1粒粒揀取的粉體——例如水泥、礬土(alumina)、白土、合成樹脂粉末等要用求調和平均徑的方法。

在一定量粉體中，設

直徑 d_1 的粒子為全體量的	X_1
" d_2 " "	X_2
.....	
直徑 d_m " "	X_m

則全體粒子的平均粒子徑 d_s 為

$$d_s = \frac{1}{\sum_{i=1}^m (X_i / d_i)} \quad (1.2)$$

或簡單設為算術平均粒子徑，而由下式計算也差不多。

$$d_s = \sum_{i=1}^m X_i d_i \quad (1.3)$$

此時須知全體粒子的粒度分佈，以下示方法求得。

(1) 利用篩分的方法

以孔目大小分別為 $d'_1, d'_2, \dots, d'_{m+1}$ 的 $m+1$ 個篩將一定量粉體(實際上約50 g以上)分級時，設

通過 d'_1 孔目而在 d'_2 孔目停止的粒子的平均粒子徑 d_1 ，比率 X_1
 " d'_2 " d'_3 " d_2 ，" X_2

 " d'_m " d'_{m+1} " d_m ，" X_m

則成

$$d_1 = \sqrt{d'_1 d'_2}, \quad d_2 = \sqrt{d'_2 d'_3}, \quad \dots \dots d_m = \sqrt{d'_m d'_{m+1}} \quad (1.4)$$

從 (1.4) 式計算的 $d_1, d_2, \dots \dots d_m$ 值與篩分所得各粒子群重量比率 $X_1, X_2, \dots \dots X_m$ ，以式 (1.2) 或 (1.3) 可計算平均粒子徑 d_s 。

此方法可在較短時間求得結果，而且測定時的個人誤差少，所得平均粒子徑之值接近含有率最多的粒子之大小，所以在計畫機械性處理粉體的裝置——特別是空氣輸送裝置時很合理。

(2) 對粒子群照相的方法

先將粉末薄撒於 Preperat 玻璃上，攝取顯微鏡照片，照片約可表示 250 粒，若插入與粒子同倍率的尺度刻度，則更便利，以幻燈器擴大投影此軟片，以下示方法求平均粒子徑。

畫面上所有粒子 n 個都視同旋轉橢圓體，用複印於畫面的尺度刻度，測定各粒子的長徑 d''_{ix} 與短徑 d''_{iy} (其中 $i = 1, 2, \dots \dots n$)。

將這些粒子視同球時的相當粒子徑 d''_i 由下式

$$\pi d''_{ix} d''_{iy} / 6 = \pi d_i'^3 / 6$$

得

$$d''_i = \sqrt[3]{d''_{ix} d''_{iy}^2} \quad (1.5)$$

或簡單取二軸平均徑、定方向徑等為 d''_i 。

以如此求得的 d''_i 大小區分各粒子，求各區分內的個數 n_i ($i = 1, 2, \dots \dots m$, m 為區分之數)。

對應於各區分上限與下限刻度之大小的實際長為 $d'_1, d'_2, \dots \dots d'_{m+1}$ 時，各區分內粒子的平均粒子徑 $d_1, d_2, \dots \dots d_m$ 為

$$d_1 = \sqrt{d'_1 d'_2}, \quad d_2 = \sqrt{d'_2 d'_3}, \quad \dots \dots d_m = \sqrt{d'_m d'_{m+1}} \quad (1.6)$$

各區分內的粉體重量 W_i 為

$$W_i = n_i \gamma_s \pi d_i^3 / 6 \quad (1.7)$$

各區分內粉體重量相對於畫面粒子總重量 $\sum_{i=1}^m W_i$ 的比率 $X_1, X_2, \dots, X_m$ 為

$$\begin{aligned} X_1 &= W_1 / \sum_{i=1}^m W_i \\ X_2 &= W_2 / \sum_{i=1}^m W_i \\ &\dots\dots\dots \\ X_m &= W_m / \sum_{i=1}^m W_i \end{aligned} \quad (1.8)$$

用以式 (1.6) (1.8) 計算的值，可由式 (1.2) 或 (1.3) 求粒子全體的平均粒徑 d_s 。

此方法稍費事，但在求旋轉橢圓體或細長形微細粉末平均粉子徑時較合理。

圖 1-4 的礬土及白土藉篩分所得的粒度分佈與 (1.2) 及 (1.3) 式計算的平均粒子徑之值如表 1-6 所示。

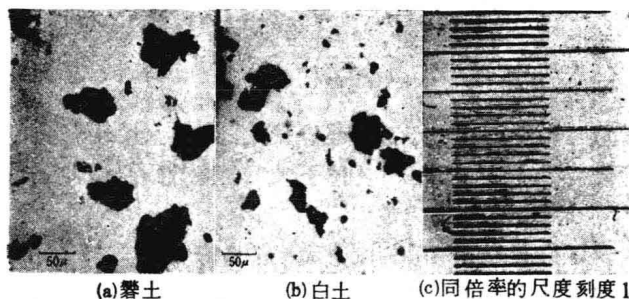


圖 1-4 粒子的顯微鏡照片

圖 1-5 為大、中、小粒三種類磨光砂的顯微鏡照片，以照片中刻