

科學技術用書

粉粒體 工廠設計

高度粉體工廠與控制組合
醫藥食品顏料農藥各分野
新觀念技術入門實務研究

賴耿陽 譯編
復漢出版社印行

中華民國七十八年十月出版

粉粒體工廠設計

原著者：坂下

譯著者：賴耿

出版者：復漢出版社

地址：台南市德光街六五一號
郵政劃撥 〇〇三二五九一三號

發行人：沈岳林

印刷者：國發印刷廠

版權所有
翻印必究

B

平裝二二〇元

本社業經行政院新聞局核准登記局版台業字第〇四〇二號

序

今天已邁入新素材產業興起、尖端技術推展的新產業革命時代。這些新產業分野利用各種技術，粉體技術在基礎部份占很大的比率。

在醫藥、食品、顏料、農藥等分野，以表面改質工學，粒子設計工學爲中心，陸續開發新機能性粒子，而且這些新粉體製程強烈期望製程自動化、CPU化。

粉體工廠設計是組合高度粉體製程技術與控制技術的新技術（fine particulate technology），方法當然異於以往。

本書爲這方面的第一線技術者平易解說順應新潮流的粉體工廠設計和工程系統，適用爲入門書，對實務人士、研究者、學生都很有助益。

1989年8月

編者

目 次

第 1 章 粉體物性與現象	1
1.1 前言	1
1.2 粉體特有的性質	1
1.3 粉體物性的測定法	3
1.3.1 粉體粒度的測定法	3
1.3.2 粉體的力學物性測定法	10
1.3.3 其他的物性測定法	18
1.4 粉體處置上的注意事項	21
1.4.1 把握粉體原料	21
1.4.2 粉體的附着、凝集現象	21
1.4.3 粉體處置環境的影響	22
1.4.4 利用粉體處理控制物性	22
1.5 粉體機器的毛病對策	23
1.5.1 粉體物性與毛病對策	24
1.5.2 粉體的舉動與毛病對策	29
第 2 章 用電腦設計粉體製程	40
2.1 前言	40
2.2 粉體貯藏	41
2.2.1 粉體壓	41
2.2.2 貯槽排出的方法	42
2.2.3 出自孔口的流出速度	45
2.2.4 損失容量	45
2.2.5 以蒙地卡羅法計算粉體裝入容量	47
2.2.6 貯槽形狀與尺寸的決定	48
2.2.7 二斜面接合部的傾斜角	51
2.3 粉體的供給、輸送	53
2.3.1 最近展示機種的傾向	53
2.3.2 選定時須考慮的事項	53

2.3.3	高濃度空氣輸送的設計	56
2.3.4	傾斜式螺旋供料器的能力	57
2.4	粉體處置系統的模擬	57
第3章	粉體機器的配置計劃	62
3.1	前言	62
3.2	計劃前	62
3.2.1	準備項目	62
3.2.2	切記事項	63
3.3	開始計劃	64
3.4	計劃要點	65
3.4.1	依循製程的流程	65
3.4.2	類似的機器成一組	66
3.4.3	減短配管	66
3.4.4	考慮空間的利用	67
3.4.5	消除操作上的不合理	67
3.4.6	要容易維護	67
3.4.7	考慮所處置物品的放置場所和搬送經路	67
3.4.8	考慮機器的搬入、裝設	67
3.4.9	確保機器間的常識性間隙	68
3.4.10	確保緊急時的通路	68
3.4.11	遵守台及階梯設置原則	68
3.4.12	預備未來的增產、增設	69
3.4.13	核查有無遺忘	69
3.5	計劃的變更	69
3.5.1	建設計劃的變更	69
3.5.2	製程變更	69
3.5.3	配管詳細設計導致的變更	69
3.5.4	其他詳細設計所致的變更	70
3.5.5	設計錯誤的修正	70
3.6	推進計劃的方法	70
3.6.1	使用鉛筆和橡皮擦	70
3.6.2	使用紙與糊	70

3.6.3	塑膠模型	70
3.6.4	CAD 系統	70
3.7	如何減低高度	71
3.7.1	選定低形機種（無則新製）	71
3.7.2	找尋較低的廠牌或機種	71
3.7.3	改變機器外形	72
3.7.4	減短連接部份	73
3.7.5	減少一批的量	73
3.7.6	挖坑	73
第 4 章	流程圖的畫法	77
4.1	流程圖的種類與例子	77
4.1.1	流程圖的種類	77
4.1.2	方塊流程圖	77
4.1.3	製程流程圖	78
4.2	P & I 圖的重要性	80
4.3	P & I 圖的畫法	80
4.3.1	圖面構成	80
4.3.2	P & I 圖的分割	88
4.3.3	機器的畫法	89
4.3.4	機器規範的畫法	90
4.3.5	機器編號的取法	91
4.3.6	配管的畫法	91
4.3.7	配管編號的取法	94
4.3.8	配管圖示記號	95
4.3.9	計裝的畫法	96
4.4	P & I 圖的核査	96
4.5	工程的變更處理法	103
4.6	管路圖的畫法	104
4.6.1	何謂等角圖	104
4.6.2	如何畫管路圖	104
4.7	空氣輸送系統的佈置與配管設計	113
4.7.1	粉體輸送用空氣輸送裝置的特色	113

4.7.2	適正的配管設計	113
4.7.3	實際設計時的注意事項	122
4.7.4	配管零件	125
4.7.5	運轉方法的注意事項	126
第 5 章	粉體工廠的自動控制系統	127
5.1	粉體工廠的自動控制系統概論	127
5.1.1	粉體工廠的自動化	127
5.1.2	自動化的目的	127
5.1.3	粉體製程與控制系統	128
5.1.4	粉體製程控制與感測器	129
5.1.5	操作部的選定	135
5.1.6	粉體製程的控制	136
5.2	定量供給系統的選定與自動化	141
5.2.1	容積式供給裝置	142
5.2.2	分批式重量控制的方法	144
5.2.3	重量式連續供給機	148
5.2.4	其他的供給機	154
第 6 章	粉體工廠的成本評價	156
6.1	粉體工廠的成本構成	156
6.2	粉體工廠成本的問題	157
6.2.1	粉體機器的成本數據	157
6.2.2	成本評價的困難	159
6.2.3	計劃的形態	159
6.2.4	成本評價與工程公司的角色	159
6.3	粉體機器的成本數據	160
6.3.1	粉碎裝置	161
6.3.2	袋濾器	162
6.3.3	振動篩	162
6.3.4	混合機	164
6.3.5	供給機	164
6.3.6	輸送機	164
6.4	空送系統的成本評價	165

6.4.1	空送系統與輸送效率	167
6.4.2	空送系統的成本評價	172
6.4.3	帶式輸送機與空送系統經濟性的比較	175
第 7 章	粉體工廠的比例放大	180
7.1	比例放大的觀念	180
7.2	比例放大事例	181
7.2.1	混合裝置的比例放大	181
7.2.2	大型貯槽的問題	183
7.2.3	空送系統的比例放大	183
7.2.4	粉碎速度論與磨粉機比例放大	184
7.2.5	其他的操作	188
7.3	比例放大的問題	188
7.3.1	相似性的界限	188
7.3.2	粉體運動的變化	191
7.3.3	粉體物性的變化	192
7.3.4	控制系統的檢討	192
7.3.5	檢討安全性	193
第 8 章	粉體工廠的工程推進	194
8.1	工程與計劃系統	194
8.1.1	工業化與組織	194
8.1.2	工廠設計須考慮的因子	197
8.1.3	工程步驟的說明	197
8.2	粉體工廠的工程特異性	205
8.2.1	意見溝通	205
8.2.2	粉體製程的安全性	206
8.3	粉體工廠工程的問題	212
8.3.1	保養工程	212
8.3.2	粉體技術者的養成	214
8.3.3	安全管理	215
8.3.4	粉體工廠工程的標準化	217
附錄	數據篇	218

第 1 章 粉體物性與現象

1-1 前言

吾人日常生活中享用各種粉體的恩惠。粉體並非某種物質或材料的固有名詞，泛指固體微粒子的集合體型態。粉體型態不是氣體、液體、固體，而是物質第 4 狀態。在處理材料時，有很方便的特性。

例如砂糖、麵粉、水泥、砂等金屬粉體。粉體幾乎在所有產業當成原料或中間品，出現於某階段的製造工程。最近盛行開發新素材，也利用到粉體，例如新名詞“超微粒子”也是粉體，新陶瓷、超導體材料等的製程都受到粉體的恩惠。

1-2 粉體特有的性質

粉體特有的性質可分為微粒子物性與微粒子集合體的粉體物性。此二特性乃粉體受注目的兩大理由。

表 1.1 是有單純立方格子結晶的固體（原子間距離 $2\text{\AA}$ 時）逐步細化時的固體表面原子數與其對全體所占比率。粒徑約 $20\text{ }\mu\text{m}$ 以下時，表面占全體的原子比率幾可不計，但達 2 nm 時，全體約一半的原子存在於表面。固體表面的原子異於固體內部，在粒子外側無結合鍵，相對增加表面能量，這是物性異於普通固體的原因之一。例如，反應、吸着等表面參與的理化性質在粒子徑減小時，會起大變化。

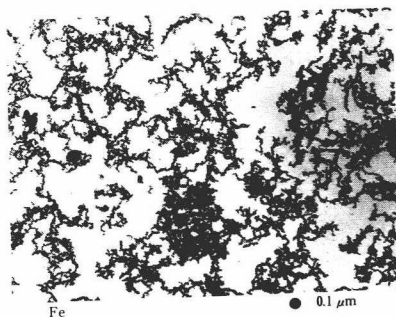
粒子徑更小的話，材料會呈現各種有趣的性質，例如黃金的融點通常約 $1060\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，但將之細化到約 3 nm 時，約 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 就熔化。鐵之類強磁性體是內中有無數磁區的多磁區構造，若微細化到粒子與磁區大小對應的單磁區構造粒子，即可用為磁性記錄材料。

表 1-1 固體細分化所致表面原子率的變化

1 邊的原子數	表面的原子數	全體的原子數	表面占全體的比率 [%]	粒子徑與粉體之例
2	8	8	100	2 nm 20 nm 膠狀氧化矽 200 nm 二氧化鈦
3	26	27	97	
4	56	64	87.5	
5	98	125	78.5	
10	488	1,000	48.8	
100	58,800	1×10^6	5.9	2 μm 輕質碳酸鈣 20 μm , 抹茶, 胡粉
1,000	6×10^5	1×10^9	0.6	
10,000	6×10^8	1×10^{12}	0.06	
100,000	6×10^{10}	1×10^{15}	0.006	

(注) $1 \text{ m} = 10^3 \mu\text{m} = 10^9 \text{ nm}$

固體粒子細化時呈現的微粒子物性具有材料的各種有用性，這是粉體被重視為材料的第一理由。以上的微粒子通常稱為超微粒子。照片



照片 1-1 以氣相法（電弧電漿法）製造的鐵超微粒子電顯照片

1.1 爲超微粒子的電顯照片一例。

其次考察固體微粒子集合體的特性，第一是單位體積（質量）的表面積極大，例如一邊 1 cm 的立方體的粒子 1 個細分化時，若達 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的立方體，全體表面積會達 6 m^2 ， $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 時 60 m^2 ， $0.01\text{ }\mu\text{m}$ 時 600 m^2 。表面積極大會有利於固體表面參與的反應等，在超微粒子表面富活性時，效果更大。

集合體的另一特性是雖屬固體，却會流動，這是由於粉體粒子間各有適度的結合力、引力。所以粉體通常靜止，但加適當的力，就會像液體般流動。若以強力分散它們，會像氣體般擴散。圖 1.1 畫得誇張些，却顯示粉體有類似固—液—氣三態的舉動，在材料加工上非常方便。

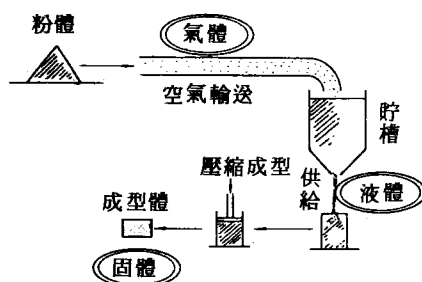


圖 1-1 畫得較誇張的粉體三態

1-3 粉體物性的測定法

爲瞭解粉體的特性，究竟宜測定什麼？這尚無確定性答案。包括經驗上的方法，粉體有很多特性評價法。

1-3-1 粉體粒度的測定法

粉體爲固體微粒子的集合體，最基礎的物性值爲 1 個個粒子的大小（粒子徑）。例如討論粉體反應等表面參與的現象時，常求單位質量的表面積（比表面積），這需要知道粒子徑。討論粉體的流動等力學現象時，也須考慮粒子集合體單位體積的接觸點數、運動單位粒子的質量（體積）等，此時，粒子徑也很重要。

粒子為球形的話，粒子徑可用直徑表示，但通常的粉體呈各種形狀，粒子徑有各種決定法，須先定義，決定出代表性尺寸。其次求粉體粒子徑的分佈（粒度分佈）。粒度分佈是一一測定很多粒子的粒子徑即可，粒度分佈的表示法有圖 1.2 (a) 的積算分佈與 (b) 的頻度分佈。

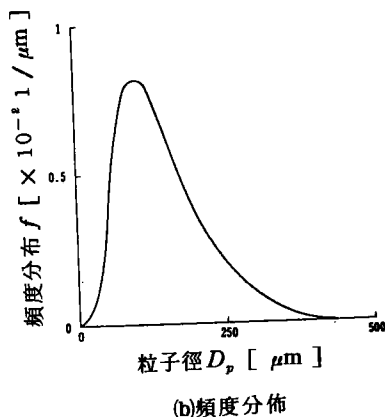
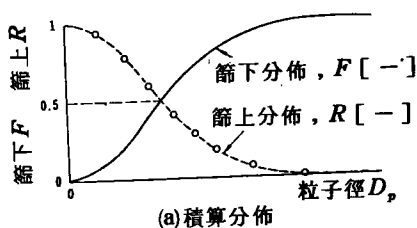


圖 1-2 粒度分布的表示法

(a) 的篩上分佈是指從粒度測定結果，依序求某代表徑以上的粒子數，以所測定的全粒子數除它們時的積算分佈。篩下分佈剛好相反，兩者有下示關係

$$F + R = 1 \quad (1.1)$$

頻度分佈 f 表成下式

$$f = \frac{dF}{dD_p} = -\frac{dR}{dD_p} [1 / \mu\text{m}] \quad (1.2)$$

表 1-2 各種粒度測定法

粒度測定法			媒質 ^{*1}	粒子頻度 檢出 ^{*2}	粒度別 捕集	適用濃度 ^{*3}	粒徑下限 [nm] ^{*4}	粒徑的物理 意義
沈 降 法	重 力	單一粒子法	氣・液	個	否	中・高	500	Stokes 徑 或 aerodyn- amic 徑
		積算法	〃	個・質・面	〃	高	〃	
		增分法	液	質	〃	〃	〃	
	離 心 力	積算法	〃	面・質	〃	〃	50	
		centrifuge 法	氣	個・質	可	中・高	〃	
慣 性 法	多段旋風器法		氣・液	質	〃	〃	500	
	串級式衝擊器法		氣	質・個	〃	〃	300	
	慣性分光計 (INSPEC)		〃	〃	〃	〃	500	
	脈流法 (spart)		〃	個	否	中	200	
	加速法		〃	〃	〃	〃	500	
	低 壓 法	低壓串級式衝擊器	〃	質・個	可	中・高	50	
氣溶膠束法		稀薄氣	個	否	中	〃		
擴 散 法			氣	〃	〃	中・高	3	阻力相當徑
遷 分 析	移 率 分 析 器	積分型	〃	電・個	可	〃	3	
		積算型	〃	個	否	〃	5	
光 散 射 法	光散射計數器		氣・液	個	〃	低・中	100	光散射相當徑 阻力相當徑
	光度計		〃	〃	〃	中・高	〃	
	光繞射法		〃	〃	〃	低・中・高	1,000	
	動光散射 (光子相關) 法		液	〃	〃	中・高	5	
	其他							
凝 結 法			氣	個	否	低・中	3	Kelvin 相當徑
顯微鏡法	電 顯 光 學	電 顯	〃	〃	〃		3	2 次元幾何學 徑
		光 學	〃	〃	〃		1,000	
篩 分 法			氣・液	質・個	可	粒子層	5,000	篩 徑
Coulter 計數器法			液	個	〃	低・中	300	體積等價徑
HDC 法			〃	面	否	高	20	阻力相當徑
FFF 法			〃	〃	〃	〃	10	Stokes 徑

(注) ^{*1}: 區別在氣體中或液體中進行測定, ^{*2}: 區別粒度分佈的頻度為個數基準、面積基準、質量基準。但電 (電氣量) 實質上變換為個數。

^{*3}: 大概是低: $\leq 10^3$, 中: $10^3 \sim 10^4$, 高: $10^4 \sim 10^5$ 個/cm³, ^{*4}: 只是個準繩。

圖 1.2 (a) 中，對應於 $R = 0.5$ 的粒子徑稱為（個數）中位徑或 50% 粒子徑，此種平均粒子徑很常用。

粒度分佈的基準除了上述個數基準外，還有長度、面積、質量（體積）基準。分佈形因所取基準而異，粒度分佈若依循分佈式，其表示就很簡便，通常用對數正規分佈或 Rosin-Rammler 分佈。

表 1.2 為實際的粒度測定法，所得粒子徑的物理意義因測定法而異，須依對象粉體現象，檢討何一測定法較有效。在此介紹若干常用粒度測定法。

(1) 篩分法

標準篩從孔目（篩網目尺寸）大者起依序重疊數段，把試料投入最上段而振盪，秤量殘留於各篩網上的量，求粒度分佈。標準篩由國際標準化機構（ISO）的孔目規格，日本有 JIS 規格。

(2) 沈降法

此方法是由在流體中沈降的粒子速度 v ，求粒子徑 D_p 。以單一球形微粒子在液相中重力沈降的情形為例，粒子的沈降速度 v 可表成下式

$$v = \frac{H}{t} = \frac{(\rho_p - \rho_l)g}{18\mu} \cdot D_p^2 \quad (1.3)$$

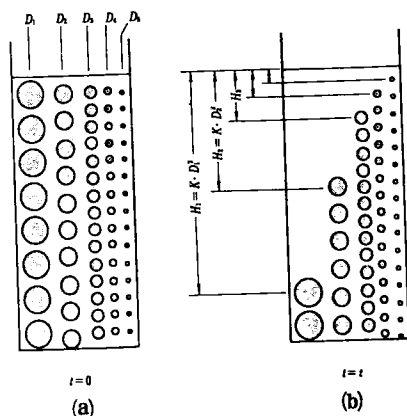


圖 1-3 粒子集合體沈降狀態的模型

ρ_p 、 ρ_l 為粒子、媒液的密度， μ 為其粘度。

圖 1.3 把粒子集合體的沉降狀態模型化，各粒子分別依據式 (1.3) 沉降，因而，測定粒子濃度在一定深度 H 的時間性變化，或粒子濃度在時間 t 因深度所致的變化，即可求粒度分佈。測定粒子濃度的時間性變化時，有測定深度 H 以上或以下之全濃度變化的積算法、測定在 H 之濃度變化的增分法。圖 1.4 為用沉降法的粒度測定裝置例。

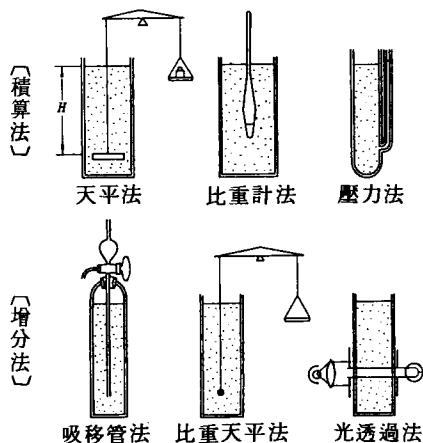


圖 1-4 利用沉降法的粒度測定裝置例

(3) 光散射法

利用粒子所致光的散射、繞射現象，也可測定粒度，在此介紹雷射繞射法。

單色平行光束中的一個粒子會形成光強度分佈如 Airy 式 (1.4) 所示的 Fraunhofer 繞射像

$$I(\theta) = Ek^2 a^4 \left\{ \frac{J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right\}^2 \quad (1.4)$$

θ : 光軸與繞射光的夾角

E : 單位面積的入射光強度

k : $2\pi/\lambda$ (λ : 入射光波長)

a : 粒子半徑 ($= D_p / 2$)

J_1 : 1 次的第一種 Bessel 函數

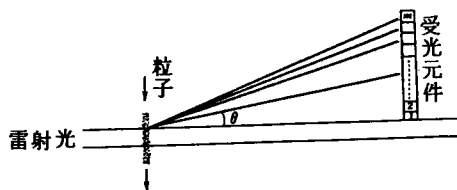


圖 1-5 雷射繞射法的測定原理

若個數密度是光束中很多粒子發出的繞射光互不干涉的程度，由圖 1.5 觀測的各受光元件之繞射光強度分佈可表成下式

$$I_m = NEk^2 \sum_{i=1}^n r_i^4 f_i \left\{ \frac{J_1(z_{i,m})}{z_{i,m}} \right\}^2 \quad (1.5)$$

$$z_{i,m} = kr_i \sin \theta_m$$

N : 測定的粒子總數

r_i : 測定粒度分佈時的區分平均徑

f_i : 個數頻度

對各受光元件套用上式，由連立方程式計算 $f_1 \sim f_n$ 的話，可求得粒度分佈。此方法不適用於 $1 \mu\text{m}$ 以下的粒子，異於沈降法等，瞬時計測存在空間中的粒子大小，其測定極迅速。但在實際測定機內的計算相當複雜而黑盒化，評價測定數據時須加注意。

測定 $1 \mu\text{m}$ 以下的粒子時，可利用光的散射現象等。

(4) 電氣檢知帶法

此方法由 W.H. Coulter 實用化，通常稱為 Coulter 計數器法。圖 1.6 為此裝置的原理，在細孔兩側置電極，經電解液對兩電極間通電流，粒子通過細孔中的話，相當於粒子體積的電解液被置換，兩電極間的電阻起變化，其變化量 (ΔR) 如式 (1.6) 所示，正比於粒子體積 (V)，所以，把電阻變化變換為電壓脈衝，即可由脈衝數計數粒子，也可從脈衝高度測定體積，求粒度分佈。

$$\Delta R = \frac{\rho_0}{S^2} V \quad (1.6)$$

S ：細孔斷面積

ρ_0 ：電解質溶液的固有電阻

此方法也與雷射繞射法同樣簡便，可測定的粒度範圍為細孔徑的 2 ~ 40 %，所以粒度分佈廣的粉體要預先分級後測定，金屬之類電導性良好的粒子在測定時會出問題，須加注意。

(5) 比表面積測定法

粉體的比表面積在討論表面參與的現象時為重要的值，此值常以粉體單位重量的表面積總和 (S_w) 表示。有時以粉體的單位固體體積表示，它們可由粉體的粒度分佈計算求得。在此介紹不需如此繁雜計算的測定法。

① 透過法 討論過濾、固定層反應等粒子充填層時，常用 Kozeny-Carman 式表示壓力損失—流量的關係，透過法即以此式為基礎，此式以比表面積 S_w 之形整理成

$$S_w = \frac{1}{\rho_p} \sqrt{\frac{g \Delta P A t}{k \mu L Q}} \cdot \frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^2} \quad (1.7)$$

ΔP 為粉體層所致的壓力損失， Q 為時間 t 中通過的流體量， A ， L 為粉體層的斷面積與長度， ε 為粉體層的空隙率，試料重量為 W 時，表成下式

$$\varepsilon = 1 - \frac{W}{\rho_p A L} \quad (1.8)$$

k 為與粉體層中流路扭曲等有關的常數，稱為 Kozeny 常數，通常設為 5.0，若形成試料粉體的充填層，式 (1.7) 右邊除了 ΔP 、 Q 、 t 以外，都成常數，若測定壓力損失和流速，可求得比表面積，此方法非常簡便，規定於測定水泥粉末度的 JIS 等，但適用上有若干界限（粒徑 $1 \mu\text{m}$ 以下就須補正）。

② 吸着法 使粉體粒子表面吸着已知吸着占有面積的分子，由其