

工業專科學校適用

單元操作

(下)

楊偉方 編著

新興圖書公司

工業專科學校適用

單元操作

(下)

楊偉方 編著

新興圖書公司

單元操作 (下) 楊偉方 編著

出版：新興圖書公司

發行：時代圖書有限公司

香港九龍彌敦道 500 號一樓
3-308884

印刷：毅昌印刷公司

版權所有 * 不准翻印 1979年4月版

下 冊 目 錄

第十一章 固體之特性與輸送

11-1 固體之物理性質·····	1
11-2 羣體粒子之特性·····	4
11-3 粒徑分析·····	12
11-4 固體物料之輸送·····	18

第十二章 固體之減積、造粒與篩選

12-1 減積設備·····	30
12-2 減積之操作因素·····	43
12-3 減積理論·····	45
12-4 造 粒·····	49
12-5 篩 選·····	51

第十三章 混 合

13-1 固體與固體之混合·····	61
13-2 固體與液體之混合·····	66
13-3 液體與液體之混合·····	71
13-4 液體與氣體之混合·····	77
13-5 乳化與膠體化·····	78
13-6 混合之功率耗用·····	80
13-7 混合效度·····	87

第十四章 機械分離

(一) 過濾.....	93
14-1 濾機之選用.....	93
14-2 濾媒之選擇.....	105
14-3 過濾原理.....	107
(二) 離析.....	113
14-4 離析原理.....	114
14-5 離析裝置.....	116
(三) 浮選.....	119
14-6 浮選藥劑.....	119
14-7 浮選裝置.....	121
(四) 沈析.....	124
14-8 沈析裝置.....	125
(五) 集塵與氣體淨化.....	128
14-9 集塵與氣體淨化裝置.....	129

第十五章 結 晶

15-1 晶體之幾何性.....	143
15-2 結晶原理.....	146
15-3 結晶設備.....	154
15-4 結晶之計算.....	158
15-5 分級結晶.....	164
15-6 晶體之結塊.....	166

第十六章 蒸 餾

16-1 蒸餾之方法.....	171
16-2 精餾裝置之設計.....	184

16-3	二成份系蒸餾之計算	189
16-4	多成份系蒸餾之計算	206
16-5	蒸餾塔之板效率	211

第十七章 萃 取

17-1	萃取裝置	217
17-2	萃取操作法	222
17-3	萃取劑之選擇	224
17-4	固液萃取之圖解法	226
17-5	液液萃取之圖解法	232
17-6	萃取速度	239

第十八章 吸收與氣提

18-1	吸收裝置	245
18-2	填充塔徑之計算	249
18-3	填充塔高之計算	255
18-4	填充塔內氣流之壓力降	263
18-5	氣 提	265
18-6	反應吸收	266

第十九章 調濕與涼水

19-1	各項定義	271
19-2	濕度表	273
19-3	濕度之測定	281
19-4	調 濕	283
19-5	涼 水	286

19-6 塔內氣液之接觸操作.....	289
---------------------	-----

第二十章 乾 燥

20-1 乾燥特性.....	303
----------------	-----

20-2 乾燥裝置.....	308
----------------	-----

20-3 逐批式乾燥機之乾燥計算.....	319
-----------------------	-----

20-4 連續式乾燥機之乾燥計算.....	321
-----------------------	-----

附錄(一) 標準篩.....	329
----------------	-----

附錄(二) 平衡水份.....	330
-----------------	-----

固體之特性與輸送

固體是一種具有一定體積，一定形狀的物體，並且有抵抗外來之剪切（Shearing）、壓軋（Compression）、扭轉（Torsion）與張力（Tension）等力之剛性（Rigidity）。因此固體與具有流動性之流體，性質全然不同，其活動性較液體為小，結構常較液體緊密。

工程上流體之處理與輸送，因其具有流動性而方便，但是固體即因粒徑之可大可小，形狀之形形色色，與種種不同之剛性，對於處理與輸送諸多不便，必須另以特殊設備來操作。

11-1 固體之物理性質

一般固體成塊狀、粒狀、粉末狀、以及結晶形或無定形存在，其物理性質依構成分子及其結構而異，茲將化工單元操作上重要之物理性質分列如下：

1. 硬 度 (Hardness)

硬度為固體物料堅硬之程度，對於金屬或可塑體，可視為受壓而低陷之（Indentation）之抗力。對於礦石即可視為受力刮傷（Scratching）之抗力，以表11-1所示之莫氏指數（Mohs index）作標準來表示。莫氏指數較大者硬度較大，莫氏指數較小者硬度較小，則以金剛石為10，滑石為1作標準。硬度不明之物料，以表上所列之各標準硬度之礦石互括而測知，並以硬度之莫氏指數表示。如指甲之硬度為2.5，牙齒為3.0，普通玻璃為5.8。

由硬度之大小，可將物料分成硬質物料、中等硬質物料、及軟質物料等三種，一般莫氏指數 7 ~ 10 稱為硬質物料，4 ~ 6 稱為中等硬質物料，1 ~ 3 稱為軟質物料。物料之硬度與其減積 (Size reduction) 操作關係密切，較硬之物料減積較難，反之，較軟之物料減積較易。

表 11-1. 硬度之莫氏指數

名 稱	莫 氏 指 數
滑 石 (Talc)	1
石 膏 (Gypsum)	2
方解石 (Calcite)	3
螢 石 (Fluorite)	4
磷灰石 (Apatite)	5
長 石 (Feldspar)	6
石 英 (Quartz)	7
黃 玉 (Topaz)	8
碳化矽 (Corundum)	9
金剛石 (Diamond)	10

2. 彈性體與可塑體 (Elastics and Plastics)

固體在彈性限度內所受之應力與其應變 (Strain) 成正比，且有恢復之性質者稱為彈性體。如圖 11-1 所示，彈性體受外力而變形，成 OB 之直線關係，但是外力消失時，恢復原形，則所謂 Hook 定律。固體物料受應力達 Y 點，如圖所示之降覆點 (yield Point) 後，失去彈性之性質，曲線由 Y 經 C 伸長 (Elongation) 達 D 而後破裂。在 YCD 曲線之狀態下，物體受外力而變形，但是除去外力時，不恢復成原來形狀，而致永久變形。此種受力變形而力消失後不能恢復原形者，稱為可塑體。

3. 脆性與韌性 (Brittleness and Toughness)

脆性為固體物料所能承受衝擊力之特性，脆弱物料經不起外

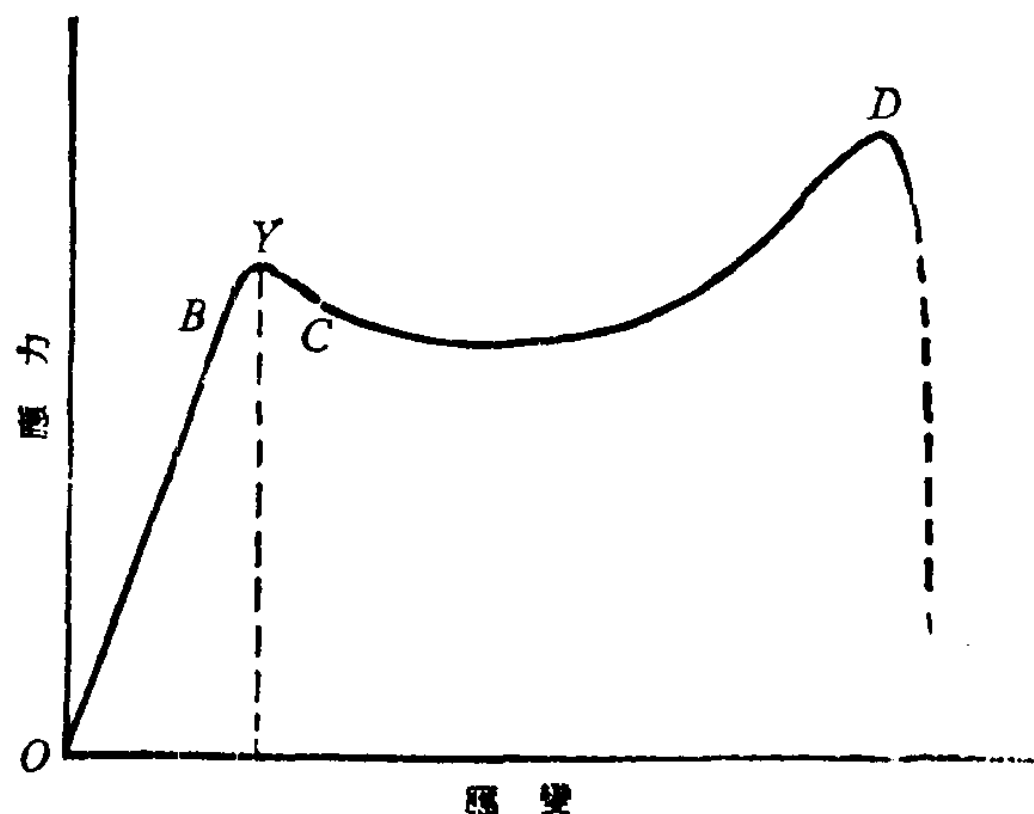


圖 11-1. 應力與應變之關係

力之衝擊，易於碎裂而至於粉碎成細小粉粒。韌性為脆性之反面，具有韌性之物料能够抵抗衝擊力而不易破裂。如圖11-1所示，一般降覆點低之物料較軟，降覆點高之物料較硬，而伸長越短越脆，伸長較長者為韌，降覆點高伸長又長之物料為既堅又韌。

4. 固體粒子之幾何性

a. 比表面積之比 (Ratio of specific surface)

比表面積為單位質量固體粒子所具有之表面積，對於圓球而言，比表面積， s_p 為

$$s_p = \frac{\pi D^2}{\rho_s \cdot \frac{\pi D^3}{6}} = \frac{6}{\rho_s D} \quad (11-1)$$

然而非球形固體粒子，由於形狀之不規則，無法直接計算其比表面積，則採用間接方法，以比表面積之比來計算。比表面積之比乃固體粒子之比表面積與同一直徑之圓球之比表面積之比。如固體粒子所具有之體積以 $V = a D^3$ 表示，表面積以 $A = 6b D^2$ 表示時，比表面積之比應為

$$\lambda = \frac{s'_p}{s_p} = \frac{6b D^2}{\rho_s a D^3} = \frac{b}{a} \quad (11-2)$$

則固體粒子之比表面積之比，視粒子形狀而定，各種形狀有其特定之 a 值與 b 值。對於圓球而言 $a = \frac{\pi}{6}$ ， $b = \frac{\pi}{6}$ ，因此比表面積之比 $\lambda = \frac{b}{a}$ 又稱為形狀因數 (Shape factor)。

b. 球度 (Sphericity)

非球形固體粒子之形狀極為複雜，為便於統一固體粒子在流體中之運動現象，對各種形狀之特性以球度 ψ 表示。則球度為具有與粒子相等體積之球之表面積，對該粒子之表面積之比。

$$\lambda = \frac{\text{該粒子之比表面積}}{\text{同樣直徑之球之比表面積}}$$

$$\lambda = \frac{\text{粒子之表面/粒子之質量}}{\text{同直徑之球之表面積/同直徑之球之質量}}$$

$$\psi = \frac{\text{具有與該粒子同樣體積之球之表面積}}{\text{該粒子之表面積}}$$

$$\therefore \lambda = \left(\frac{\frac{\pi D_s^2}{\psi}}{\frac{\pi D_s^2 \rho_s}{6}} \right) \left(\frac{\frac{\pi D^3 \rho_s}{6}}{\pi D^2} \right) = \frac{D}{D_s} \cdot \frac{1}{\psi} \quad (11-3)$$

5. 固體粒子之吸着性

基於固體表面原子或分子之吸力使表面具有活性。而呈吸着性吸着包括物理吸附 (Physical absorption) 與化學吸附 (Chemisorption)。如活性炭之可以自氣流中吸着許多有機物，或自溶液中吸着色素。又如矽膠之可以自氣流中吸着水份，以及離子交換樹脂之淨水，交換金屬離子等。化學工程上常利用固體粒子之吸着性，作分離，精製，脫色與脫臭等作業。

11-2 羣體粒子之特性

1. 體積密度 (Bulk density)

粉粒狀物料常成羣體存在，由於形狀之限制，羣體之體積中，除了固體粒子本身所具有之體積外，尚含有許多空隙部份無法填充之體積。致羣體單位質量所具有之體積，較其粒子本身所具有之體積為大。羣體單位體積所含物料之質量，稱為體積密度，較羣體之構成粒子小。如石英之密度 2.65g/cm^3 ，而一般石英砂重 2.65g 所佔有

之體積為 2cm^3 ，即體積密度只有 $1.325\text{g}/\text{cm}^3$ 。

2. 床體之孔性 (Porosity of beds)

羣體粉粒所成之形態，稱為床體。由於羣粉粒具有小於固體密度之體積密度，顯示床體內有許多空隙未被固體所填滿。其空隙所佔之比例以孔性表示。則孔性為單位床體體積所具有空隙之體積。孔性之大小視粉粒球度而異，並隨粉粒直徑與床直徑之比而變，如圖11-2與圖11-3所示，孔性隨球度之減小而增加，隨粒徑與床體直徑比值

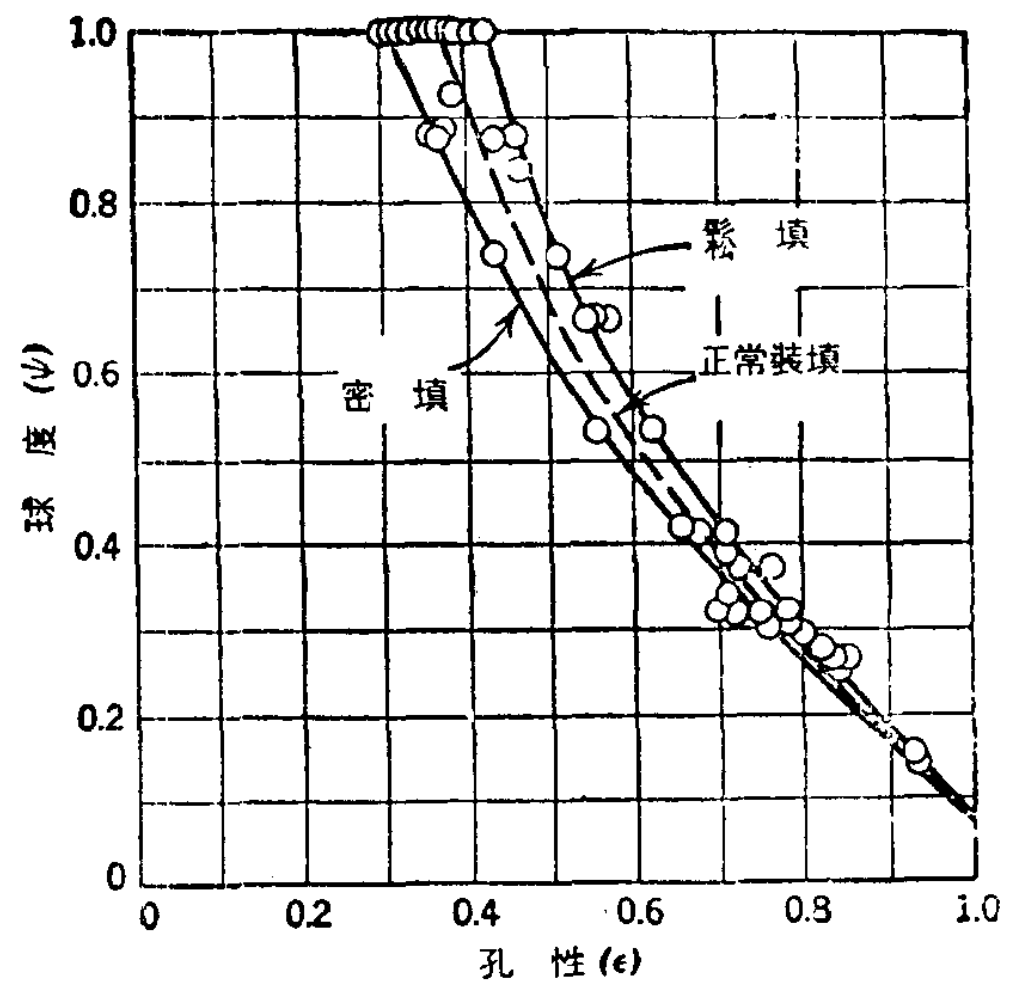


圖 11-2. 孔性與球度之關係

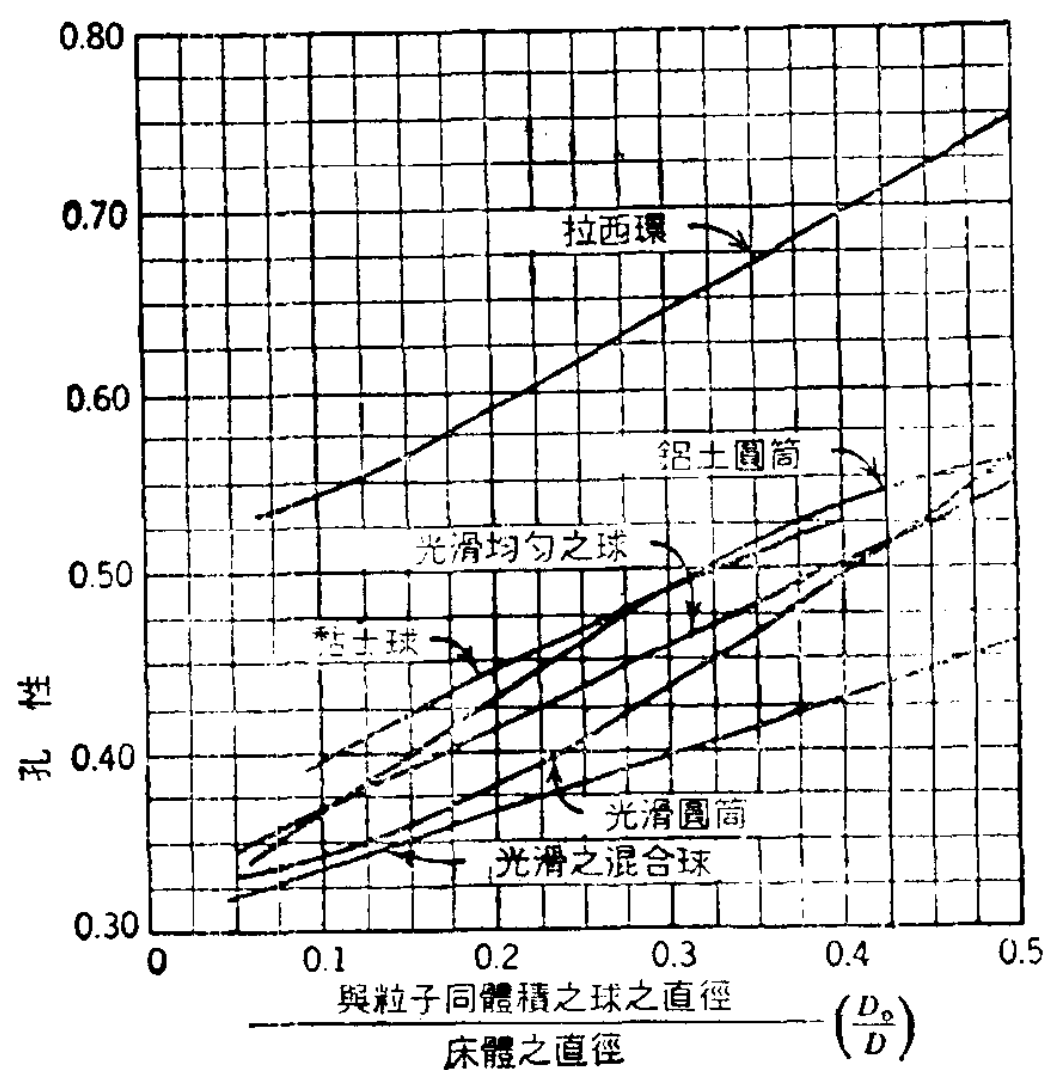


圖 11-3. 孔性與直徑比之關係

之增加而增大。

3. 平均粒徑

羣體粉粒之直徑常不一致，尤其經過粉碎機粉碎所得之物料，大小與形狀參差不齊，故直徑之大小得以平均數值表示。設 $N_1, N_2, N_3, \dots$ 等為具有直徑 $D_1, D_2, D_3, \dots$ 等之粉粒數，而 $x_1, x_2, x_3, \dots$ 為各該直徑在羣體中之質量分率，則平均直徑有下列多種表示法。

a. 真正算術平均直徑 (True arithmetic average diameter)

$$D_a = \frac{N_1 D_1 + N_2 D_2 + N_3 D_3 + \dots + N_n D_n}{N_1 + N_2 + N_3 + \dots + N_n} = \sum_{i=1}^n \frac{N_i D_i}{N_i}$$

而

$$\begin{aligned} \sum N_i &= \frac{M}{\rho_s} \left[\frac{x_1}{a_1 D_1^3} + \frac{x_2}{a_2 D_2^3} + \frac{x_3}{a_3 D_3^3} + \dots + \frac{x_n}{a_n D_n^3} \right] \\ &= \frac{M}{\rho_s} \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{a_i D_i^3} \\ \therefore D_a &= \frac{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{a_i D_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{a_i D_i^3}} \end{aligned} \quad (11-4)$$

式中 M 為粉粒物料之總質量， a 為粒子之特性常數， ρ_s 為固體之密度， D_a 為真正算術平均直徑。

b. 平均表面直徑 (Mean surface diameter)

$$\begin{aligned} D_{sm} &= \sqrt{\frac{N_1 \cdot 6b_1 D_1^2 + N_2 \cdot 6b_2 D_2^2 + N_3 \cdot 6b_3 D_3^2 + \dots + N_n \cdot 6b_n D_n^2}{6b(N_1 + N_2 + N_3 + \dots + N_n)}} \\ &= \sqrt{\frac{\sum b_i N_i D_i^2}{b \sum N_i}} \\ \therefore D_{sm} &= \sqrt{\frac{\sum \frac{b_i x_i}{a_i D_i}}{b \sum \frac{x_i}{a_i D_i^3}}} \end{aligned} \quad (11-5)$$

式中 b 為粒子之特性常數， D_{sm} 為平均表面直徑。

c. 平均體積直徑或平均質量直徑 (Mean volume diameter or mean mass diameter)。

$$\begin{aligned}
 D_v &= \sqrt[3]{\frac{N_1 a_1 D_1^3 + N_2 a_2 D_2^3 + N_3 a_3 D_3^3 + \dots + N_n a_n D_n^3}{a (N_1 + N_2 + N_3 + \dots + N_n)}} \\
 &= \sqrt[3]{\frac{\sum N_i a_i D_i^3}{a \sum N_i}} \\
 \therefore D_v &= \sqrt[3]{\frac{\sum x_i}{a \sum \frac{x_i}{a_i D_i^3}}} \quad (11-6)
 \end{aligned}$$

d. 體積—表面平均直徑 (Volume Surface-diameter)

$$D_{vs} = 6 \lambda / s_p, p_s = 1 / \sum \frac{x_i}{D_i} \quad (11-7)$$

式中 s_p 為粒子之比表面積， D_{vs} 為體積表面平均直徑。

e. 平均直徑 (Average diameter)

平均直徑 D_{av} 乃羣體粉粒中大顆粒直徑 D_1 與小顆粒直徑 D_2 之算術平均值，即 $D_{av} = \frac{1}{2} (D_1 + D_2)$ ，常用以表示篩分分析之平均粒徑。

4. 羣體粉粒之比表面積

設平均直徑為 $(D_{av})_1, (D_{av})_2, (D_{av})_3, \dots, (D_{av})_n$ 之粉粒狀物料，分別具有質量 $m_1, m_2, m_3, \dots, m_n$ 及比表面積之比 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$ ，則羣體粉粒之總表面積 A 與比表面積 s_p 為

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{6\lambda_1 m_1}{\rho_s (D_{av})_1} + \frac{6\lambda_2 m_2}{\rho_s (D_{av})_2} + \frac{6\lambda_3 m_3}{\rho_s (D_{av})_3} + \dots \\
 &\quad + \frac{6\lambda_n m_n}{\rho_s (D_{av})_n} \quad (11-8)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 s_p &= \frac{6}{\rho_s} \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i m_i}{(D_{av})_i} \bigg/ \sum_{i=1}^n m_i \\
 \therefore s_p &= \frac{6}{\rho_s} \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i x_i}{(D_{av})_i} \quad (11-9)
 \end{aligned}$$

圖 11-4 表示石英、方解石、閃鋅礦、方鉛礦與硫鐵礦等之比表面積與篩分平均直徑 D_{av} 之關係

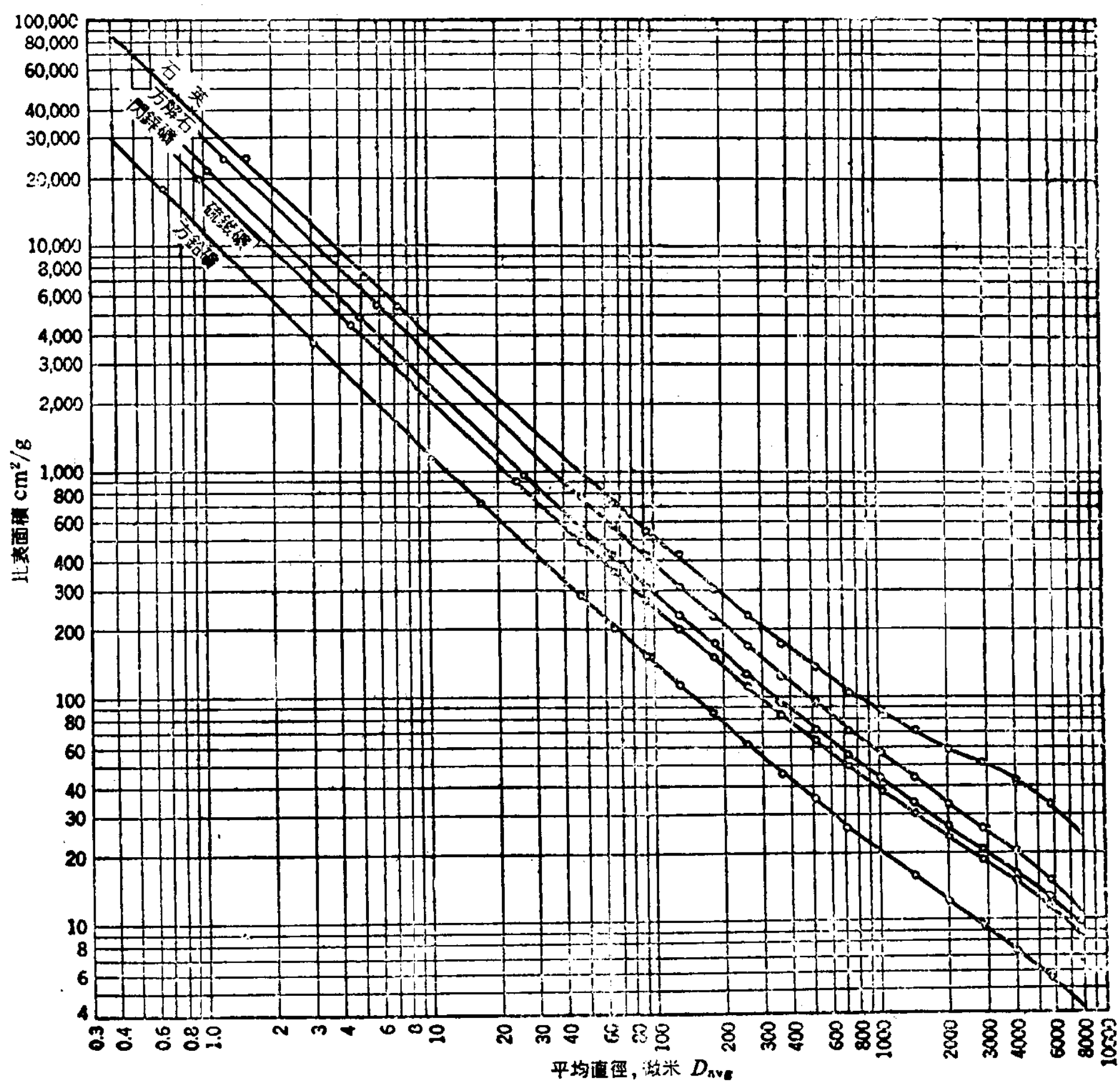


圖 11-4. 比表面積與平均直徑

圖11-5係由圖11-4實測值算出之石英、方解石、閃鋅礦、硫鐵礦、方鉛礦等之比表面積之比與篩分平均直徑 D_{avg} 之關係

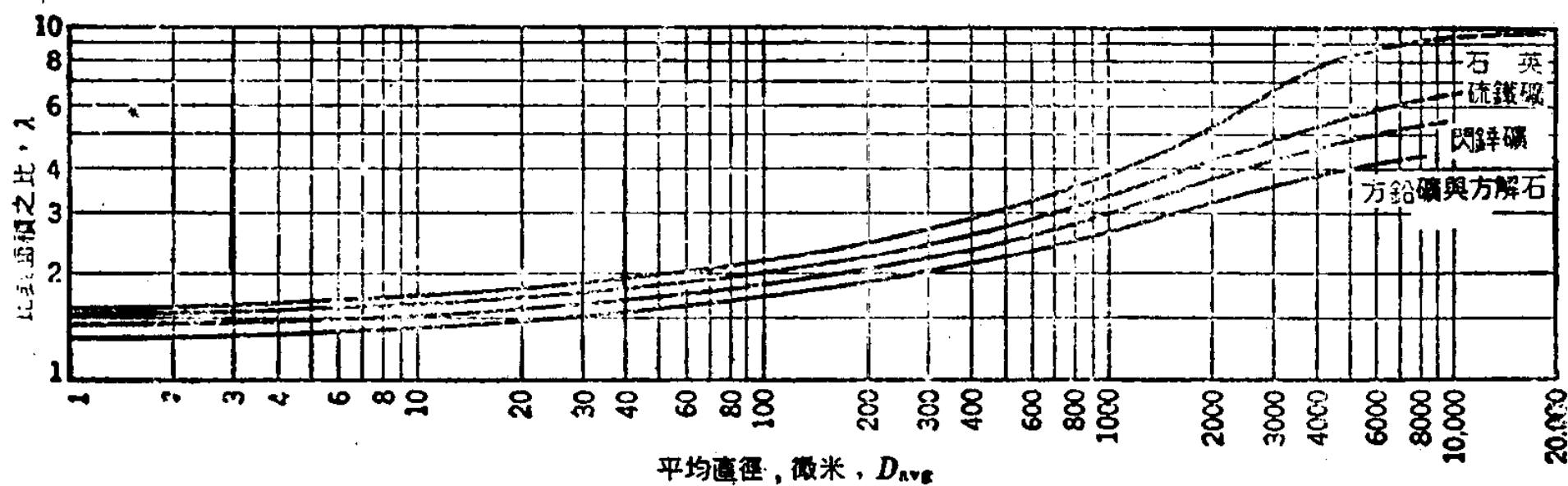


圖 11-5. 比表面積之比與物料平均直徑之關係

5. 羣體粉粒之貯藏性

羣體粉粒存放於平板或貯藏容器中時，有粉粒之偏析及架橋兩種現象發生，乃粉粒體之貯藏特性。此特性對於粉粒體之貯運作業非常重要。

a. 粉粒偏析

將粉粒物料由貯槽上部放入時，該粉粒物料將以放入點為中心，形成一圓錐形，如圖 11-6 所示。倉 (Bin) 之傾斜面與水平面所成之角度 α_r 稱為靜止角 (Angle of repose) 而漏斗 (Hopper) 之傾斜面與水平面所成之角度 α_s 稱為滑溜角 (Angle of slide)，此乃粉粒間之聯鎖力 (Interlocking force)，產生顆粒摩擦而不能滑動所形成，其角度之大小，視粉粒物料之黏着性，圓滑及粒徑大小而定。一般粉粒以不黏而圓滑者角度較小，而黏着性高，粒面粗糙，與粒徑微小者角度較大。表 11-2 列出各物料之靜止角及最大操作角 α_{max} (Maximum operating angle)。

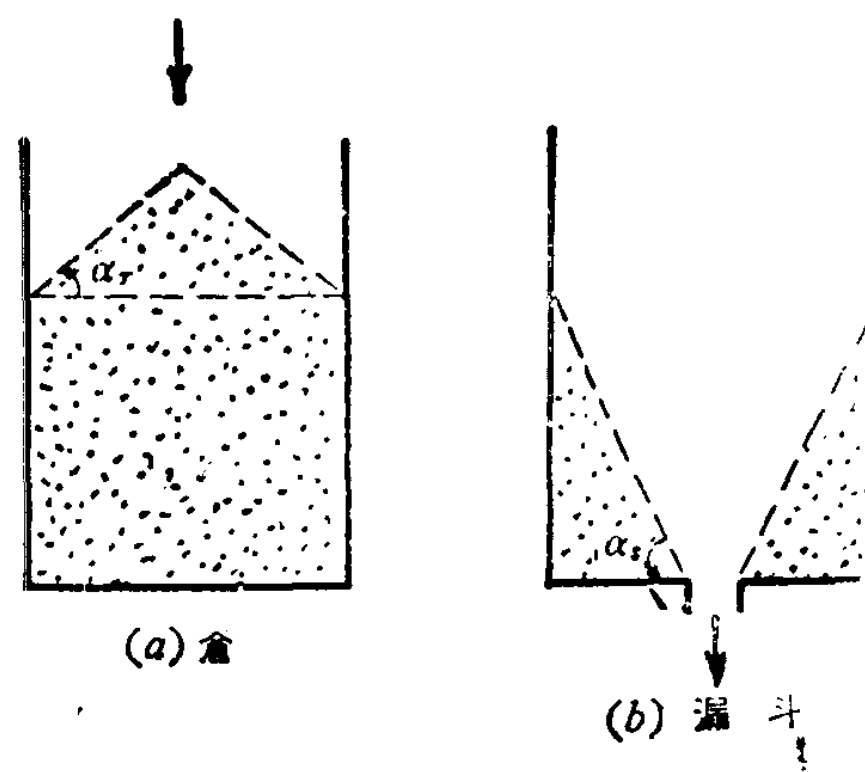


圖 11-6.

粉粒間之聯鎖力構成粉粒間之摩擦，其摩擦係數為內摩擦角 α_m (Angle of internal friction) 之正切，對於絕對均一之粉粒 α_m 幾近 α_r ，而實際上 $\alpha_r < \alpha_m$ ，依 Mohr 應力圖，得作用壓力 p_v 與其垂直壓力 p_L 之比例值 K' 對摩擦角之關係為

$$K' = \frac{p_L}{p_v} = \frac{1 - \sin \alpha_m}{1 + \sin \alpha_m} \quad (11-10)$$

K' 為物料之特性，依粉粒之形狀，聯鎖程度，黏着性，與裝

表 11-2. 各物料之靜止角及最大操作角

物 料	體積密度 $\rho_s(\text{kg/m}^3)$	靜止角 α_r°	最大操作角 α_{max}
水和氧化鋁粉	216	34	24
硫酸鋁顆粒	865	32	15
粉碎焦碳	480	28	13
研磨石膏	896	40	27
鐵礦	3770	40	28
粉碎之鹼性硫酸鋁	2950	45	32
片狀苯二甲酐	674	24	10
卜特蘭水泥	1520	39	28
粉碎岩鹽	1200	25	11
肥皂片	160	30	18
碳酸氫鈉	690	42	27
木片	353	36	25

填度 (Degree of packing) 而定，與粒徑大小幾乎無關。除非粒徑過小而不能自由流動 (Free-flowing)。對於凝聚性物料 K' 近乎零。而自由流動性粉粒， K' 值為 0.35 與 0.6 之間，則 α_m 角相當於 15~30 度。

b. 架橋 (Bridge, Arch)

粉粒貯存於倉或漏斗中時，常因粉粒對容器橫向壓力 (Lateral pressure) 之摩擦力以及粉粒間之聯鎖力等作用，形成架橋現象，減少物料對倉底之壓力，並使得粉粒物料不易自倉或漏斗底部之出口滑漏下來。如圖 11-7 所示，設有半徑為 r 之圓筒形倉，裝填深度為 Z_r 之粉粒，今取深度為 Z 處之物料微分厚度 dZ 作力量平衡，如上下之作用力分別為 F_r 與 $F_r + dF_r$ ，而壓力 $P_r = F_r / \pi r^2$ ，則 $dF_r = \pi r^2 dP_r$ 。但是 dF_r 應為重力 dF_g 與摩擦力 dF_f 之差：

$$dF_r = dF_g - dF_f \quad (11-11)$$