1 概　　述

冶金、化工、轻工、食品、制药、环境治理、生物制品等过程工业无不包括固液分离。即使不属于过程工业的制造业，由于其产品常系固形物，因此也或多或少地依赖固液分离技术。对湿法冶金来说，固液分离的重要性就更为突出了。从某种意义上讲，一个湿法冶金过程的成功与失败，固液分离往往起决定性的作用。如果采用过滤机、离心机等设备，它在投资中的比重很高，有时会占到50%以上，这其中涉及许多因素，除经济因素外，本书将逐步予以分析。

固液分离的最终目的，从理论上说，应是将固液两相完全分开，获得各自纯净的成分：固体及液体。但在实际上很难做到，理论上的目标也就是人类生产活动追求的目标，为此人们努力奋斗，想尽办法，提供不同的手段，为实现这一目标而努力。作为例子，在本书的最后一章，也介绍了固液分离过程的热力学分析的部分成果，虽然它还远未达到实用的阶段，但理论终将为人类的生产活动指引前进的方向，因此它仍有重要的意义。

1.1 固液分离方法的分类

根据目前的发展，如前所述，固液分离基本上是两种方法，即沉降分离与过滤。也可以认为有第三种分离方法使固液两相均处于运动状态,如水力旋流器分级,流态化洗涤等,严格来说,它只能达到分级的目的，而远未达到分离的要求。

沉降分离基本上可分为两种，即重力沉降与离心沉降，或称为弱沉降分离与强沉降分离。重力沉降系借助自然力，故最为经济，少用能源，也可称其为环境友好工艺。虽系弱沉降分离，但均作为固液分离的首选手段。离心沉降、真空过滤、压滤、离心过滤等都

需要全本请访问 www.ertongbook.com

是较强的分离手段，因需借助外力，要消耗较多的能源，从长远来看,亦不可取。为此,采取辅助措施,降低能源消耗,乃是今后必须努力的方向。这些辅助措施包括：(1)采用联合流程：两种或两种以上的分离手段的合理搭配，优化配置。例如沉降与过滤的组合，旋流器与过滤及沉降分离的组合等。 (2)利用凝聚与絮凝等手段及助剂以提高沉降速度及过滤速度，利用预涂层、助滤剂等改善过滤性能，提高过滤速度。(3)利用电场、磁场等辅助手段促进过滤分离。

固液分离方法的分类可参见图 1-1。

沉降分离 重力沉降——澄清槽（以获取清液为主）
浓缩槽（以获取浓矿浆为主）
脱泥槽（以脱除固体中的细泥为主）
分级箱（将固体分成粗、细两种组分）
离心分离——水力旋流器(浓、稀分流,粗、细分级）
沉降式离心机（液体上清，固体下沉）
过滤 重力过滤——砂滤(以净化水为主）
格筛(粗矿石的过筛）
真空过滤——间歇式(板式、管式）
连续回转式(鼓式、折带式、水平带式）
压滤机——板框式、管式、叶式、带式、螺旋式压榨机
离心式过滤——篮式、筐式(间歇、三足式）
锥形、桶形(沉降式,间歇、连续）
深层过滤（以获取清液为主）

图 1-1 固液分离技术的分类

固液悬浮系中固体是分散相，液体是连续相。从分离过程来看，固体是从高度分散状态向浓缩状态过度。在沉降分离中需要靠固体颗粒的运动，固体浓度越稀，越有利于此一过程的进行。而过滤则相反，在过滤中运动的是液相，所以含液相少即固体浓度高时对分离有利。

沉降分离的影响因素主要是固液之间的重力场的差值，其中包括固体与液体的密度差以及颗粒的大小。从图 1-2 可以看出，

在分离过程中固体是处在浓度、密度和粒度的三维空间上。其可操作范围只能在一定的空间范围内变化。当其接近原点时，处于浓度最高，粒度最小，密度最低，即最不利于分离的条件。当粒度小到 $1\mu m$ 时，受布朗运动的影响，沉降分离已不可能，而粒度大时，因受其他因素如化学反应等要求的影响，粒度也不宜太大，大致在 $1cm$ 以下。就矿石的密度而言，最高的方铅矿为 $7500kg/m^3$，最低则可能接近水的密度 $1000kg/m^3$。至于矿浆浓度，一般稀到 2.5% 以下则应该采用砂滤、压滤机、深层过滤等形式。在低浓度范围，颗粒将处于自由沉降，即处于最有利的分离状态。当颗粒沉降到高密度的密集体时将处于干涉沉降范围，速度变慢，而最终可达到的最高体积浓度约为 60 （颗粒的最紧密排列的空隙率约为 40%）。这个范围大致如图 1-2 所示的沉降作业图中，固体的性质处于 $A、B、C、D、E、F、G、H$ 的空间范围内。

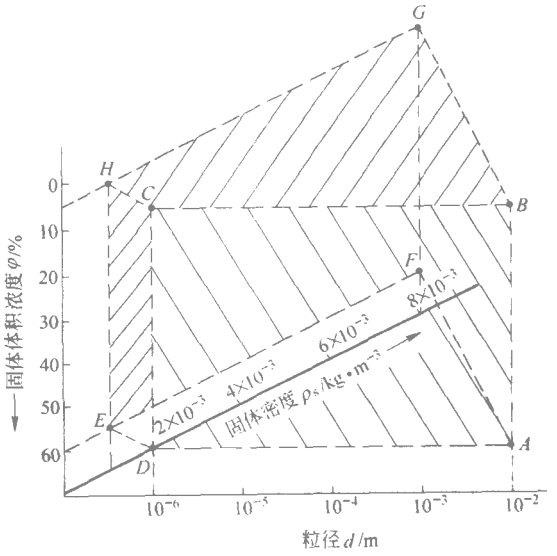


图 1-2　固液沉降分离中固体的状态空间

在沉降分离中，当颗粒直径为 $1cm$，密度为 $7500kg/m^3$，即处

于最有利的条件下时，其分离推动力最大为：

$$(\pi/6)d^3(\rho_S-\rho_L)g \cdot \pi 0.01^3(7500-1000)g/6 \cdot 3.34\times10^{-2}\text{N}$$

或该颗粒的截面上所受的压力，其最大值只能达：

$$3.34\times10^{-2}/(\pi d^2/4) \cdot 425\text{Pa}$$

如果一个 10μm 的颗粒(例如细胞),当其密度只有 1100kg/m³,即 $\Delta\rho$ 只有 100kg/m³ 左右时，其分离推动力只约为上述最大值的千万分之一。为了提高分离的推动力，采用高速离心分离，将分离因数提高到 10000g，虽基本上可以满足要求。但这也只能是达到重力分离的中等推动力。

至于过滤，则是以滤液穿过固体沉积层的速度来衡量其生产能力。因此只有固体含量高，即液体含量低才比较有利。如果采用真空过滤,其最大推动力为 1 大气压,即 10^5Pa。如果滤饼的厚度为 2cm,粒径 1mm,则穿过每个颗粒的压降约为 5000Pa,它远比沉降分离的推动力大很多。但是液体穿过固体的阻力也远大于固体在液体中沉降的阻力。

1.2 固液分离的辅助手段[1]

1.2.1 分离助剂

在沉降分离、过滤、磁性分离的效果不理想时,往往可以加助滤剂以提高效率。这些助滤剂多系刚性、多孔、高渗透性粉粒，加入浆料后以提高过滤性能。其使用的方法如下：

(1) 形成预涂层：以制造一个过滤性能好的基底层，可以过滤极细的或易压缩的滤饼，可用以处理 5% 以上的矿浆。改进的预涂层过滤机可以利用渐进式刮刀将较薄的一层滤饼以及预涂层的上层(它已受到滤饼的渗透)一起刮下,以便预涂层可以更新。

(2) 预涂层过滤机当其不作为普通过滤机使用时，亦可作为澄清机使用。譬如可用以吸滤含微量固体（如 0.1%)的稀悬浮液,类似深层过滤的作用。当然,此种作业,采用过滤机更为有利。

此时先打入助滤剂悬浮液形成预涂层，然后过滤开始。为了提高效率，有时要往助滤剂中混入待分离的主体浆料中的固体颗粒，即所谓体加料助滤剂(Body feed)，以提高滤饼的渗透性。一般滤饼中的助滤剂不再回收，除非大型的生产装置，回收才会有经济效益。

可以用作助滤剂的有硅藻土、膨润土、石棉、纤维、非活性的炭粒、石灰、白灰等。这些多为工业废料，如纸浆、废纤维等。

需要添加的待处理的主体溶液中的固体作为助滤剂的量是需要优化的。其指标通常采用单位质量助滤剂产出的滤液量，如图 1-3 所示。此外也可以用别的指标如最长使用周期、最大液体流速及最小滤饼比阻等。其试验数据最好来源于中间工厂或半工业试验。

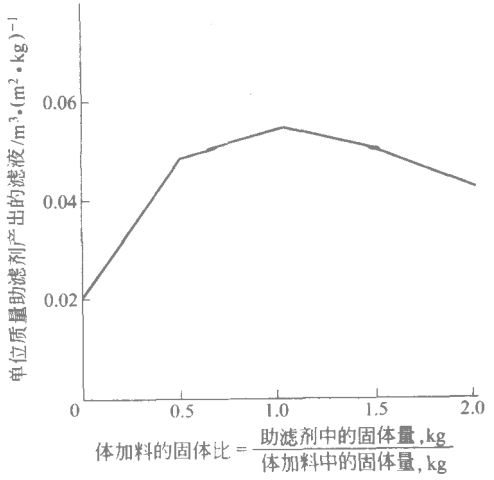


图 1-3　助滤剂中体加料固体颗粒的最适添加量

助滤剂亦可加在悬浮液中促进沉降，例如慢或难沉淀的胶体物质可以用矿粉等粗重粒子促进团聚，形成大颗粒而加速沉降。1980 年澳大利亚 CSIRO）国家实验室曾建立一个 Siroflocs 法用以处理污水，后在英国相继建厂。Siroflocs 法可使用絮凝剂成功地

需要全本请访问 www.ertongbook.com

处理藻类、细菌、胶体、被工业污染的地表水及工业废水等。

1.2.2 磁性分离

粒度在 1～10μm 的粒子有极强的表面吸附电荷功能，具有强磁性。可将其处理成带正电荷的粒子，以便与带负电荷的胶体粒子相碰撞。如果粒子磁化，团聚速度也非常快，进而沉降速度加快。磁性颗粒较易分离，经济实用。高分子聚电解质是另一类高效絮凝剂。

磁力选矿在矿山上已有广泛的应用。在化工、冶金等废水处理中磁性分离也日益扩大其用途。陶瓷类金属球、合金等经磁化后，均可用于促进固液分离。采用磁性离子交换树脂，先进行磁性离子交换，然后磁选以促进分离。专用的离子交换树脂系将带磁性的氧化物的单体共聚在树脂内。已制成的 sirothern、siromag 在树脂中的体积含量为 10%～15% 。使用直径 300mm，宽 150mm 的中试磁鼓，已用于自含水矿浆中分离磁性树脂粒子，矿粉及生物活性污泥等。树脂球径 0.42～1.0mm，工业装置的直径 750mm，宽 2700mm 的磁鼓，处理量可达 $70m^3 \cdot h^{-1}$

近年来，高强度磁性分离器(HGMS)已研制成功。它可以在生产规模用以分离极细的弱磁性颗粒。其使用及操作方法类似深层过滤器。系使浆料通过一个磁场筐，其中装入松散充填的金属丝。筐内借电磁铁产生有序的磁场，待分离阶段完成后，可以去掉磁场，进行反洗，以洗脱已被分离的颗粒。见图 1-4。

HGMS 的优点在于其分离效率高，可操作流速很高，而压降很小。因为，投资较高，所以生产规模大的，才适宜采用。

HGMS 有些诱人的前景，诸如净化高岭土以去除弱磁性杂质；净化热电厂锅炉用水，核工业水的净化，炼钢厂、纸厂、电解用水等的废水处理，如果水中悬浮物不具有磁性，可加带磁性的絮凝剂或共沉淀剂。

利用磁性进行固液分离的开发工作，在美国阿贡(Argonne)国家实验室用于处理含有害金属或放射性物质的废水采用 30～

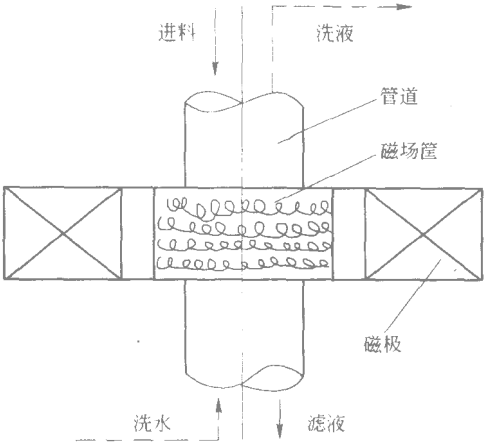


图 1-4 高强磁场分离器(HGMS)示意图[1]

50μm 的磁性颗粒，外包一层吸附剂，可以在酸、碱条件下吸附某些特定的金属或放射性物质。将稀土或磁铁矿颗粒嵌入树脂颗粒内。上述涂层可以是 CMTO、TBP、胺类、磷酸、冠醚、聚乙烯亚胺、钛酸硅盐等。

这类磁化分离装置的流程见图 1-5。有害废水或放射性污染废水先进入预涂层萃取搅拌槽，然后进入磁场分离器（磁选或

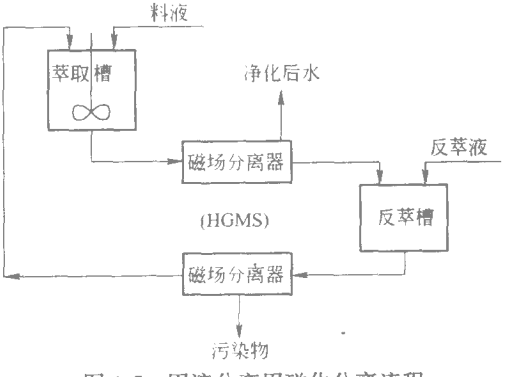


图 1-5 固液分离用磁化分离流程

HGMS)净化后水达标排放。分离掉的污染物进入反萃槽，将污染物从磁性粒子上分离掉，磁性粒子再返回第一步可循环使用。据称此类过程与溶剂萃取或离子交换比较更为简单、高效、经济、紧凑。

1.2.3 电场分离

用直流电促进固液分离的研究在 19世纪即已开始,但是直到最近才取得进展并有望用于生产。关于直流电场的作用，主要是因为它促进悬浮液中的颗粒产生双电层，其作用如下：

流体	颗粒	电场	作用
静止	运动	外加	电泳
静止	运动	产生的	沉降势能
运动	静止	外加	电渗析
运动	静止	产生的	流场
静止	静止	外加	电渗透压

大家熟知的电泳，系电场作用下悬浮粒子在极性溶液中向电极移动，将一个悬浮液置于电泳池中，通过显微镜可以看出颗粒向一个电极方向移动。所有颗粒不论其大小，都以相同的速度运动（因为静电场力及颗粒运动所受阻力都是与颗粒表面积成正比），故其速度可以测出。

第二个效应为：与电泳同时存在的是电渗析。这时液体穿过一个多孔固体表面，这些表面上的固体颗粒是带电荷的，但处于静止状态，此时液体会向前方的电极移动，此电极与上述表面的极性相同。由于带电荷的颗粒是不动的，则可以说电渗析与电泳的方向是相反的。如果强迫住电渗析液体的流动，则建立起来的势能即为电渗透压。

1.2.4 电泳沉降与电渗析脱水

电泳的直接应用，即在悬浮液表面浮置一个电极（通常为负

极），另一个电极在底部。此时电泳作用即会使沉渣变浓。其作用可分三个阶段：第一步，颗粒下沉的速度将是重力与电泳力之和；第二步，沉渣将受重力压缩及电渗析而增浓；第三步，当重力作用已完成后，电渗析仍将继续起作用。

1.2.5 电场过滤

以上电泳及电渗析效应亦可用于促进过滤。把电极置于滤饼的两侧，通常滤饼内的固体颗粒总是带负电荷，则电场置于滤饼上面的是正极。这样粒子会向上移动而脱离溶液。如此电场可促使形成更疏松的滤饼。

电场还可以使过滤的推动力增加一个附加值，以提高滤液流速（包括脱水亦然）。过滤理论系假设水力压差与静电位压差有加和作用。

近期，关于电场过滤的理论与实践有望在商业推广方面取得进展，据说已有两种商品面市。不论如何，电场过滤是一个有待发展的领域。

参 考 文 献

1 Svarovskyl. Solid-liquid Separation, 4th ed. Oxford: Butterworth/Heinemann, 2000, 4～26

2 固体颗粒性质

2.1 固体颗粒的一般物性

湿法冶金中处理的颗粒可分为两类：一类是自然界产出的矿石，经粉碎研磨后得到的矿粉，有宽广的粒度分布和形状分布；另一类是在湿法冶金过程中产出的固体产品或半成品，如结晶体、金属粉末、净化除杂产生的沉淀物以及设备管道内形成的污垢等。密度是这些固形物在固、液分离过程中最具影响力的。

2.1.1 真密度

通常所说的密度指的就是真密度。真密度是指单个颗粒，单位体积所含有的质量。由于固体颗粒内常有孔隙、气泡，而孔隙亦有开口孔、闭口孔之分，所以，其中孔隙内的气体不易排除，因此，要准确测量真密度亦相当困难。在测量真密度时可使用浸液法，用比重瓶，并经抽真空处理，所用浸液应易润湿颗粒表面，必要时可加少量非离子型表面活性剂。比重瓶内先装 2/3 液体，抽气 30min，真空度 2kPa，然后再加满液体，称重，计算可得真密度。若不经排气处理，则测得的为表观密度[1]。

一般而言，天然矿石、结晶、金属粉末等，孔隙率都不太大的情况下，用此法测得的真密度对工程问题而言可足够准确。若颗粒的孔隙率较大则应使用气体容积法或 BET 法（气体吸附法）、压汞法等测量颗粒的孔隙率，然后再利用孔隙率对表观密度进行校正，亦可算出颗粒的真密度。表 2-1 列出了某些天然矿物及合成固体物的真密度。

表 2-1 某些固体物的真密度

名称	化学式	真密度 /kg·m^{-3}	名称	化学式	真密度 /kg·m^{-3}
重晶石	$BaSO_4$	4500	纸		700～1200
霞石	$CaCO_3$	2930	树脂		1100
石灰石		2710	石英砂	SiO_2	2650
氢氧化钙	$Ca(OH)_2$	2200	食盐	NaCl	2160
熟石膏	$CaSO_4$	2960	淀粉		1500
生石膏	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	2320	糖		1600
中国黏土		2200	金红石	TiO_2	4260
氧化铜	CuO	6400	聚合物		1300
赤铁矿	Fe_2O_3	5120	聚乙烯		920
氢氧化高铁	$Fe(OH)_3$	3400～3900	聚四氟乙烯		2300
菱镁矿	$MgCO_3$	3040	聚氯乙烯		1380
氢氧化镁	$Mg(OH)_2$	2400			

2.1.2 堆密度

堆密度又称堆积密度、体积密度或粉体密度，系颗粒物自然堆积状态下单位体积内含有的质量，系工程上常用的一个物性参数。堆密度与颗粒形状、大小、颗粒堆积的松散、密实状态等有较大关系。故测量时应加以注意。假定颗粒内部不含微孔隙，设颗粒堆积体的空隙率为 $\varepsilon(m^3/m^3)$，其真密度为 ρ，堆密度 ρ_p，则二者之间有如下关系：

$$\rho_p = \rho(1-\varepsilon) \tag{2-1}$$

以等体积的球形颗粒为例，如果颗粒成正方阵排列如图 2-1a 所示，从二维平面看，配位数为 4，即每一个颗粒与 4个颗粒为邻；从三维方向看，则配位数为 6。设颗粒群的体积为 V_p，颗粒的直径为 d，颗粒群的质量为 M_s，颗粒群中颗粒本身所占体积为 V_s，当

需要全本请访问 www.ertongbook.com

颗粒数足够大时，

$$V_p=(nd)^3,\ M_s=n^3\pi\rho_s d^3/6,\ V_s=\pi n^3 d^3/6$$

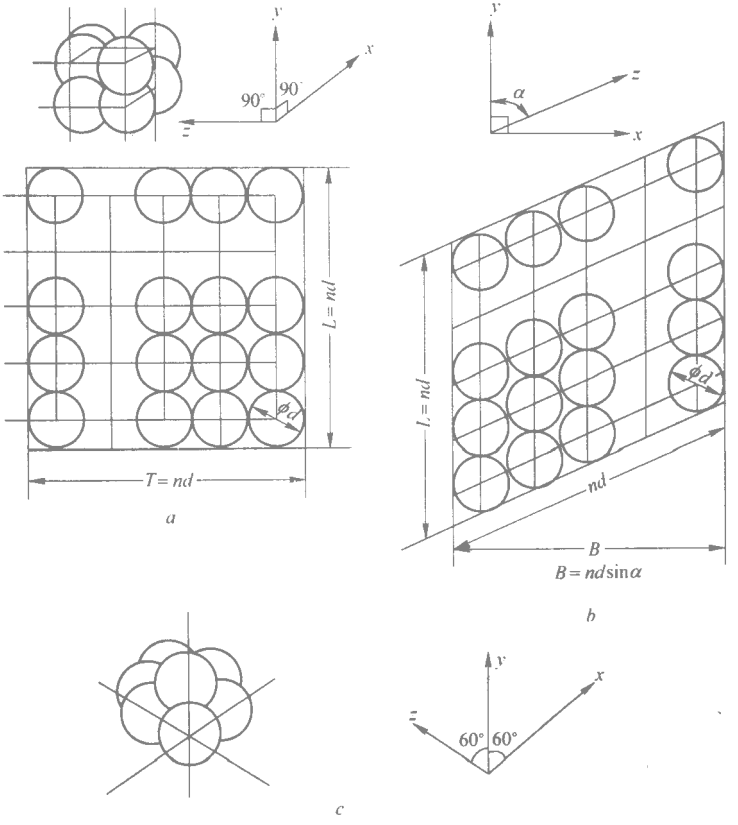


图 2-1　颗粒群的排列形式

a—正方阵排列；*b*—单斜方阵排列；*c*—菱方阵排列

则空隙率为

$$\varepsilon=(V_p-V_s)/V_p=1-V_s/V_p=1-\pi/6=0.4764$$

如果颗粒群呈单斜方阵排列，从二维 y-z 平面图上可以看出，每一个颗粒周围有 6 个颗粒，中间的空隙最小，见图 2-1*b*。如果从

y -x平面上看,颗粒亦呈正方阵排列,与图 2-1a 相同,即配位数为 4。但 此 4 个颗粒中有两个是与单斜平面共用的。因此若从三维立面来看，则每一个颗粒周围应有 $6+2$ 个颗粒相邻，记为配位数 8。若此单斜方排列的立方体，其三维长度分别为 L、B、T ,从图 2-1b 可以看出：

$$L = nd,\ B = nd\sin\alpha,\ T = nd$$

因此该单斜方体颗粒群所占的体积为

$$V_p = L \times B \times T = n^3 d^3 \sin\alpha \qquad (2\text{-}2)$$

而颗粒本身所占的体积 $V_s = \pi n^3 d^3/6$,故空隙率 $\varepsilon = 1 - V_s/V_p = 1 - \pi/6\sin\alpha$

若 $\alpha = 60°$,则 $\varepsilon = 1 - \pi/6\ /0.866 = 0.399$

若三维长度分别为 L, B, T 构成的堆积体，边长仍为 nd 的菱形立方体。从目前的投影面看，取其中任意三个相邻的颗粒，作球心间的连线,均为等边三角形,夹角为 $60°$,见图 2-1c ,其中

$$L = nd(y \text{ 轴}),\ B = nd\sin\alpha\ (x \text{ 轴}),\ T = nd\sin\alpha\ (z \text{ 轴}) \qquad (2\text{-}3)$$

因此该菱形体的体积为

$$V_p = L \times B \times T = (nd)^3(\sin\alpha)^2 \qquad (2\text{-}4)$$

设 $\alpha = 60°$,则

$$V_p = (nd)^3(0.866)^2 = 0.75n^3d^3 \qquad (2\text{-}5)$$

$$\varepsilon = (V_p - V_s)/V_p = 1 - V_s/V_p$$

$$= (1 - n^3\pi d^3/6/0.75n^3d^3) = 0.302$$

对于等体积的球形颗粒随机填充的堆积体，如果已知其平均配位数 n，文献中已给出一些经验式用以计算空隙率 ε。现列举较简单适用的形式如下：

$$\text{Ridgway}: \varepsilon = 1.072 - 0.1193n + 0.00431n^2 \qquad (2\text{-}6)$$

$$\text{Hanghey}: n = 22.47 - 39.39\varepsilon \qquad 0.259 < \varepsilon < 0.5 \qquad (2\text{-}7)$$

$$\text{Rumpf}: n\varepsilon = 3.1 = \pi \qquad 6 < n < 12 \qquad (2\text{-}8)$$

例如式(2-5)所代表的菱方阵排列的堆积体根据图 2-1c 所示,其配位数 $n=10$ 代入式(2-6)~式(2-8)可分别求出 ε 为 0.31,0.3165,0.31,可见其值较式(2-5)求出的略高。因式(2-6)~式(2-8)适于随机填充,故亦属合理。

应注意到以上的关系式与球形颗粒的直径并无关系,其空隙率只与颗粒的配位数有关。实际上对较大的钢球、玻璃球、粗砂粒等在重力作用下充填时其空隙率接近 0.39 甚至更高,而配位数大约为 8。在实际生产中,颗粒多为非球形。随球形度增大,则颗粒愈接近球形,空隙率会减小,反之会增大,如图 2-2 所示[2]。图中表明,紧密堆积(如慢速填充)可得较高的密度,即较低的空隙率。反之若松散堆积(如快速填充)则会导致较小的填充密度,即有较大的空隙率。

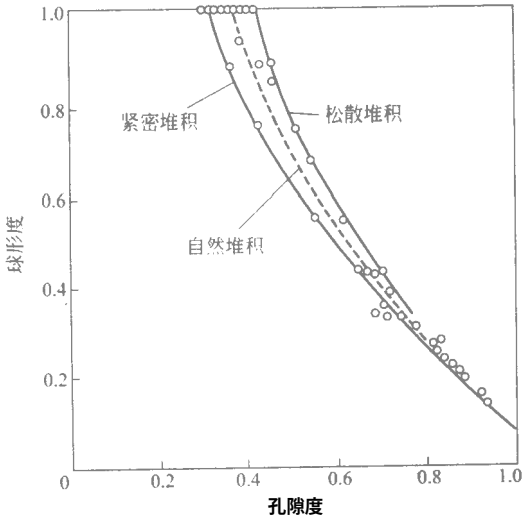
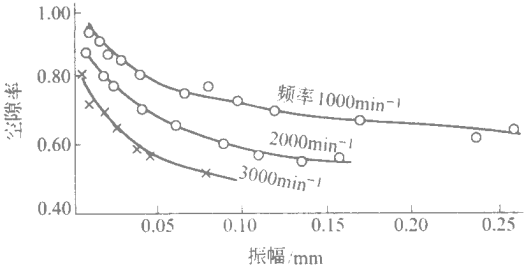


图 2-2 颗粒堆积体的空隙率与球形度之间的关系

自然界的颗粒,特别是经破碎、研磨的矿粉,都具有一定的粒度分布。而堆积体中,大颗粒之间的空隙在理论上应由较小的颗粒填充,而余下的空隙则由更小的颗粒填充。如果第一级最初为

菱方形排列,如此经 5 次以上的填充，最后的堆积体的空隙率可小到 0.039。显然，存在粒度分布的颗粒堆积体一般不会有过大的空隙率。

震动对粉体颗粒的空隙率有较大的影响。根据实验结果 $d=0.05\sim0.5\text{mm}$ 的砂粒在震动作用下，其空隙率与震动频率与振幅的关系如图 2-3 所示[2]。



颗粒堆积体的空隙率与震动的关系

2.2 固体颗粒的形状

颗粒最规则的形状为立方体和球形。对于立方体和球形，只用一个长度变量即可描述其体积和表面积的大小，但自然界的颗粒则远远偏离这两种形体。而对于实际颗粒，则需要使用三维尺寸。即使这样，仍不足以准确描述。因此便演变出多种尺度用以描述颗粒的几何图形。对一个颗粒，基本上可以用长度、宽度和厚度三维尺寸来进行描述。当一个颗粒稳定地落在平面上时，在此平面上的投影可以测出 L、B 两个尺度,如图 2-4a 所示。再旋转 90°可以量其厚度 T。显然,$L\times B\times T$ 只是近似但并不等于该颗粒的体积。

2.2.1 统计平均粒径

如果先测量每个颗粒的 L、B、T 长度,然后再求平均,最后再计算出平均粒径，这也是很难很烦琐的工作。当用显微镜测量颗

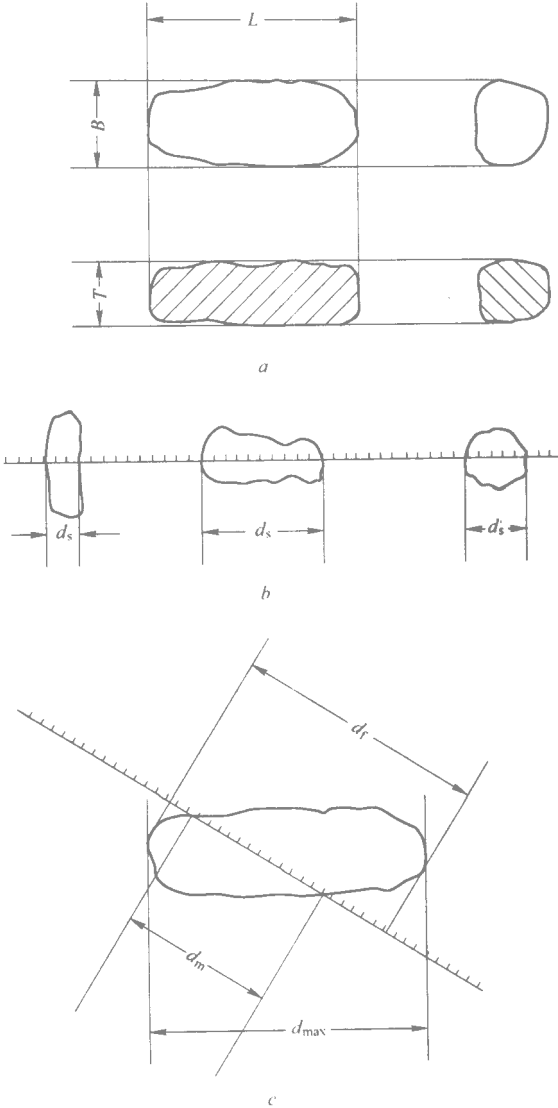


图 2-4 固体颗粒的投影直径及长度

粒尺寸时，显微镜的线性目镜测微标尺可把投影面分成大约面积相等的两个部分，此分界线的长度称为颗粒的统计半径 d_s（或特称之为马丁直径 d_m），见图 2-4c。另一个统计直径称为弗雷特(Firet)直径 d_f，它是与测微标尺平行方向的颗粒长度，见图 2-4c 即测微标尺作平行移动时所能测出的该颗粒的最大长度。显然，不规则的颗粒，其 d_m、d_f 的大小均与其在目镜下的取向有关。当颗粒数很多时，因取向而引起的偏差可以互相抵消，故所得粒径的统计平均值仍能反映粒径的真实大小。尽管显微镜显示的是二维投影面，但因制片时其颗粒三维取向的随机性，故亦能反映其三维统计平均长度（即统计平均直径）。如果颗粒群的投影面上平均外缘周长为 P，则 d_f 与 P 存在如下关系，即 $d_f = P/\pi$，即此一关系不仅适用于圆，也适用于不规则投影面的统计平均值。常见的固体颗粒，其统计平均直径见表 2-2

表 2-2 某些常见颗粒的统计平均直径

颗　粒	尺寸/μm	颗　粒	尺寸/μm
食　盐	100	油中碳粒	1～10
人头发	50～80	黏　土	0.1～1.0
沙　子	50	油　漆	0.2～0.4
肉眼最小可见物	25～50	细　菌	0.4～2.0
可可粉	8～10	病　毒	0.015～0.3
铁　锈	5		

2.2.2 颗粒形状因数

绝大多数粉体的颗粒都不是球形。如上所述，所测得的粒径，只是提供了一个描述颗粒大小的尺度，它并非真正意义上的直径。为了更加准确地标明真实粒度的大小，除了统计直径以外，还需要另外一些辅助的尺度参数。也就是说除直径以外，还需要一个或两个参数才能对该颗粒作出准确的描述，例如

投影面积　　$A_c = \pi d^2/4$

需要全本请访问 www.ertongbook.com