

矿物颗粒分选工程

中国金属学会

冶金继续工程教育丛书

冶金工业出版社

卢寿慈 主编

74.403

冶金继续工程教育丛书

矿物颗粒分选工程

卢寿慈 主编

冶金工业出版社

内 容 提 要

本书根据中国金属学会对冶金继续工程教育的要求编写，为选矿工程技术人员继续教育的基本教材。它以选矿过程中分选力和分选规律的分析为核心，分矿粒的形态和性质、矿粒性质的改变、分选过程的物理基础、分选过程的数学模型、分选设备及典型分选工艺实例等六章论述选矿工程，反映了选矿理论的新进展和选矿设备及工艺的新成就。本书也可作为选矿工程专业研究生、本科生、专科生的教学参考书。

冶金继续工程教育丛书

矿物颗粒分选工程

卢寿慈 主编

*

冶金工业出版社出版发行

(北京北河沿大街嵩祝院北巷39号)

新华书店总店科技发行所经销

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 1/32 印张 11 1/4 字数 258 千字

1990年10月第一版 1990年10月第一次印刷

印数00,001~3,000册

ISBN 7-5024-0741-3

TD·126 定价8.60元

序

中国金属学会组织编写了“冶金继续工程教育丛书”，为大家办了一件好事。积极开展继续教育，对于提高冶金科技人员水平，促进冶金工业的发展具有重要意义。希望冶金战线各级领导重视这项工作，努力创造条件，为科技人员在职学习提供方便；同时也殷切希望广大冶金科技工作者坚持学习，不断吸收新知识，学习新技术，为实现四化，振兴中华做出更大贡献。

中国继续工程教育协会理事

冶金工业部副部长



一九八八年十二月

前 言

本书是根据中国金属学会对冶金继续工程教育的要求编写的。编者试图从诸多选矿方法中，探求分选的基本规律，并尽可能从似乎零乱的互不相关的过程中理出一条较为清晰的线索。

书中反映了现代选矿理论的新进展，也反映了选矿设备和工艺的新成就。

本书是选矿工程专业在职科技人员继续教育的基本教材，适用于从事黑色金属、有色金属、煤炭以及非金属等矿业行业的科技人员，也可作为选矿工程专业研究生、本科生和专科生的教学参考书。

本书系中国金属学会选矿学会组织编写，由卢寿慈教授主编。参加编写工作的有祁明镒(1.1.1—1.5.1)，蒋朝澜(1.5.2—2)，卢寿慈(3, 5.1)，吴克明(4)，李云龙(5.2—6)。全书由蒋朝澜教授最后整理定稿。主审为许时教授。

在编写过程中，曾得到翁达、朱立谷、储德应、丁忠浩、张保国、祁超英、郭敬永、王楚固等同志帮助，特此致谢。

本书不当之处，敬请读者批评指正。

41835

目 录

序

前言

绪论	1
1 矿粒的形态及性质	3
1.1 矿粒的几何形状	3
1.2 粒度及表征方法	11
1.3 粒度检测方法	40
1.4 连生体及矿物的单体解离	49
1.5 矿粒的物理性质	58
1.6 矿粒的表面性质	81
2 矿粒性质的改变	100
2.1 矿粒容积性质的改变	100
2.2 矿粒表面性质的改变	116
3 分选过程的物理基础	131
3.1 分选区内的各种作用力	131
3.2 分选介质	142
3.3 矿粒分选的基本规律	148
3.4 分选过程中的粒度因素	166
3.5 微细粒分选	182
4 分选过程的数学模型	198
4.1 分选过程的一般动力学方程	198
4.2 颗粒分选特性的分布	206
4.3 矿物颗粒分选特性的分布密度与速度的关系	217
4.4 分选效果的评价	221
5 分选设备	242

5.1	分选区的几何分类.....	422
5.2	各种分选过程及主要分选设备.....	245
6	典型分选工艺实例	319
6.1	铁矿石的选矿.....	320
6.2	铜矿石的选矿.....	333
6.3	铅锌矿石的选矿.....	339
6.4	锡矿石的选矿.....	344
	主要参考文献	351

绪论

矿物颗粒的分选（选矿）是研究物质分离的科学。随着科学技术的不断发展，处理的对象不再限于矿物资源，处理范围将是没有限定的。所以选矿的广度和深度必将获得不断发展。

本书从矿粒基本性质的阐述入手，对不同性质矿粒的分选过程基本规律、分选过程数学模型作了较充分的讨论，进而概括地描述了分选过程赖以实现的工具——分选设备及典型的分选工艺。

全书共分六章。第1章矿物的形态和性质。它是研究矿物的天然物理性质 ξ (d , ρ , x , θ , σ , α 等)，括号中的符号相应表示粒度，密度，磁化率，润湿性，导电性和放射性。并在有关部分中引入了矿物性质分布函数的概念。第2章矿粒性质的改变。它是研究矿物改性的措施的。

第3章分选过程的物理基础。从分选区内各种作用力和分选介质特性入手，重点研究矿粒分选基本规律。分选遵循的基本条件是分选力大于或等于耗散力，在平衡条件下求得分选过程运动方程式。任何一种分选方法，影响分选的因素除它所根据的主要物理性质外，粒度便是第二个因素。消除粒度对分选的影响，和合理确定分选粒度下限，显然是有意义的。

第4章分选过程的数学模型。它是表明分选过程各参数

间相关关系的数学式，这种关系常不是确定的，具有某种随机性。主要用于过程的分析 and 预测。此外，对矿粒分选特性的分布，分选效果的评价有所阐述。

第5章分选设备，第6章典型分选工艺，为分选具体矿石时采用的工艺设备和工艺流程。

矿物的物理和物理化学性质是能否分选的主要依据，是决定分选的方向的，我们对此作了较详细的讨论，以期能充分地利用矿物的天然性质和人为改变的性质，达到有效分选的目的，这是第1、2章需完成的任务。一定性质的矿物在分选时的受力状态，是决定分选过程进行速度的，同样是十分重要的，这是第3章的主要任务。分选过程各参数间的相关关系的数学表达式（数学模型），把参数间的随机关系变成较确定的规律性关系，以用于过程的分析 and 预测，和将来用于过程模拟和控制，这是第4章的主要任务。

读者在阅读本书时，掌握这一线索，定会有所裨益。

矿粒的形态及性质

1.1 矿粒的几何形状

经破碎、磨碎的产物，就单个矿粒而言，它是不规则的几何形体，就粒群来说，其形状也是各异的。有人对某铜矿选矿厂精矿和尾矿中黄铜矿、斑铜矿单体解离颗粒的形状进行了磨片与显微放大观察，从中清楚地看到所有颗粒都具有各自不规则的形状，而且精矿中矿物颗粒多有尖角，其不规则程度远远超过尾矿颗粒。过去常说“颗粒愈小其形状愈接近于球形”，但通过对白刚玉微粉等的显微照像来看，情况并非如此。矿物颗粒形状的千姿百态是一客观存在。

矿物颗粒的形状，将影响到它在介质中的沉降速度、界面化学行为、流变性质、滤渣的孔隙和滤饼的比阻大小等等。

对矿粒形状的研究是较为复杂的，过去在定性上作了不少工作，但定性工作不能决定颗粒的形状因数，形状因数应该是列入决定颗粒性质的公式中的一个参数，所以后来的工作定量地测定了颗粒的形状并给出了其定义。

颗粒形状的定义是指一个颗粒在轮廓边界或表面上各点的图象。下面介绍颗粒形状的定性与定量描述方法。

1.1.1 矿粒几何形状的定性描述

矿物颗粒形状的定性描述，通常是采用一些定性的术语

来表明某些颗粒形状的性质。常见的术语如下：

针 状	针形体
多 角 状	具有清晰边缘或有粗糙的多面形体
结 晶 状	在流动介质中自由发展的几何形体
枝 状	树枝状结晶
纤 维 状	规则的或不规则的线状体
片 状	板状体
粒 状	具有大致相同量纲的不规则形体
不规则状	无任何对称性的形体
模 状	具有完整的、不规则形体
球 状	圆球形体

颗粒的各种“大小”（指通过颗粒重心，连结颗粒表面上两点间直线距离的大小）之间的数字关系取决于颗粒的形状。但定性描述往往是不够确切的，难以表征颗粒的形状因数，更不利于进行数学处理。因此，测量和寻求出颗粒各种“大小”的无量纲组合数值一直是人们悉心研讨的课题。这些无量纲组合数值统称为形状因素。例如，测得的颗粒各种“大小”和颗粒体积或面积之间的关系被称为体积形状系数或面积形状系数。

1.1.2 矿粒几何形状的定量描述

评价颗粒形状有两种观点：一是颗粒的实际形状并不重要，而需要的是用于比较为目的的数字；另一是应从测定数据中恢复原来的颗粒形状。

对矿物颗粒几何形状进行定量描述通常有下列一些方法：

1 形状系数

形状系数是根据矿粒的两个基本几何特征（面积和体

积) 导出的。首先考虑一个矿粒, 设 d 为矿粒直径, V 为矿粒体积, S 为矿粒表面积。则按定义, 其表面积形状系数、体积形状系数、比表面形状系数分别为:

$$\Phi_s = S/d^2 \quad (1-1)$$

$$\Phi_v = V/d^3 \quad (1-2)$$

$$\Phi_{s,v} = \Phi_s / \Phi_v \quad (1-3)$$

因为单位体积矿粒的比表面积 $S_v = S/V = \Phi_s d^2 / \Phi_v d^3 = \Phi_s / \Phi_v d$, 故有

$$\Phi_{s,v} = S_v \cdot d \quad (1-4)$$

对于球体, $\Phi_s = \pi$, $\Phi_v = \pi/6$, $\Phi_{s,v} = 6$; 对于边长为 d 的立方体, $\Phi_s = 6$, $\Phi_v = 1$; 对于不规则矿粒, Φ_s 、 Φ_v 、 $\Phi_{s,v}$ 随 d 的确定方法不同而变化。

如以比表面积当量径 d_s 和等体积球当量径 d_v 代替 d , 则

$$S_v = 6/d_s = 6/\Phi_c d_v \quad (1-5)$$

$$\Phi_c = 6/S_v d_v = 6V/Sd_v \quad (1-6)$$

式中 Φ_c —— Carman 形状系数或表面系数。

对于球体 $\Phi_c = 1$ 。

当研究对象为颗粒群, 求其形状系数时, 其表面积、体积和粒径均需采用平均值, 即

$$\Phi_s = \overline{S}/(\overline{d})^2 \quad (1-7)$$

$$\Phi_v = \overline{V}/(\overline{d})^3 \quad (1-8)$$

形状系数实际上是表示矿粒形状与球形颗粒不相一致的程度。几种不同几何形状的颗粒的形状系数见表1-1。

表 1-1 颗粒的形状系数

颗粒形状	Φ_s	Φ_v	Φ_{sv}
球形 $l=b=t=d$	π	$\pi/6$	6
圆锥形 $l=b=t=d$	$0.8/\pi$	$\pi/12$	9.7
圆板形 $l=b, t=d$	$3\pi/2$	$\pi/4$	6
$l=b, t=0.5d$	π	$\pi/8$	8
$l=b, t=0.2d$	$7\pi/10$	$\pi/20$	14
$l=b, t=0.1d$	$3\pi/5$	$\pi/40$	24
立方形体 $l=b=t$	6	1	6
方柱体及方板形 $l=b$			
$t=b$	6	1	6
$t=0.5b$	4	0.5	8
$t=0.2b$	2.8	0.2	14
$t=0.1b$	2.4	0.1	24

注：表中 l 、 b 、 t 和 d 分别表示其长、宽、厚三轴径和直径。

2 形状指数

形状指数与形状系数不同，它和具体的物理现象无关。它对颗粒外形本身用各种数学式进行表达，根据使用的目的，先作出理想的图象，然后将理想形状和实际形状的关系指数化。现列举如下：

(1) Zingg指数 F_z

颗粒长短度（长径/短径即 l/b ）和扁平度（短径/厚度即 b/t ）之比，即

$$F_z = \text{长短度/扁平度} = lt/b^2 \quad (1-9)$$

当 $l=b=t$ 时，即立方体的上述各项指数全部等于1。这指数在地质学中早已得到了应用。

(2) 体积充满度 f_v

颗粒的外接立方体体积与颗粒体积之比, 即

$$f_v = lbt/V \quad (1-10)$$

f_v 的倒数可看作为颗粒接近于立方体的程度。在表示研磨料颗粒抗碎裂上采用。

(3) 面积充满度 f_s

又称为外形放大系数, 颗粒面积和最小外接矩形面积之比, 即

$$f_s = S/l'b' \quad (1-11)$$

式中 l' 、 b' ——矩形的长边和短边。

这一指数在粉末冶金方面得到应用。

(4) Schulz指数 K

$$K = Z_s l^2 b - 100 \quad (1-12)$$

其中 $Z_s = 100/V$

这一指数在建材工业中用来评价道路碎石的形状, K 值愈小愈好。

(5) 球形度

分为真球形度 ψ 和实用球形度 ψ_w 。

真球形度为与颗粒等体积的球体表面积和颗粒表面积之比, 即:

$$\psi = S_{\text{球}}/S_{\text{粒}} \quad (1-13)$$

这一指数适用于表面积和体积可计算的颗粒, 在选矿工程中常用。 ψ 值愈小, 表示颗粒形状愈不规则。几种具有规则几何形状的真球形度见图1-1; 几种不同形状的颗粒的真球形度见表1-2。

实用球形度 ψ_w 常用于形状不规则的、表面积测定有困难的颗粒。

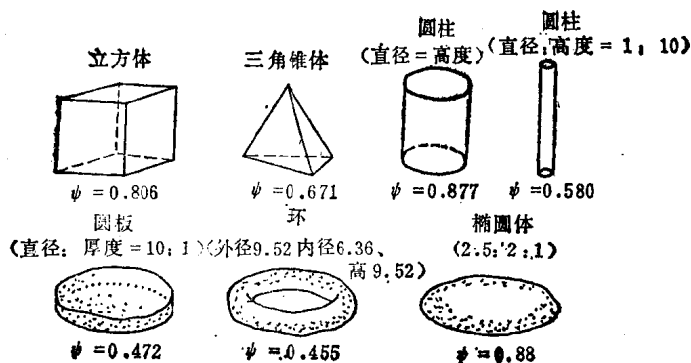


图 1-1 有规则形状的真球形度 ψ

表 1-2 颗粒的真球形度

形状	球形	类球形	多角形	长条形	扁平形
4	1.0	1.0~0.8	0.8~0.65	0.65~0.5	<0.5

$$\psi_w = \frac{\text{面积等于颗粒投影面积的圆的直径}}{\text{颗粒投影图最小外接圆的直径}}$$

(1-14)

式中最小外接圆的直径可用圆形筛目决定。

(6) 圆形度 X

该值又称为轮廓比, 见图1-2。

$$X = \frac{\text{与颗粒投影面积有相同面积的圆的周长}}{\text{颗粒投影轮廓的长度}}$$

(1-15)

圆形度的倒数又称为周长比, 用于沉淀物的水力输送。

(7) 圆角度 M

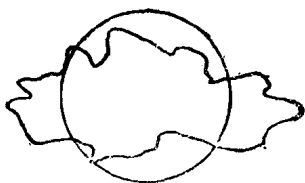


图 1-2 圆形度或轮廓比

表示颗粒棱角磨损程度之值，见图1-3。

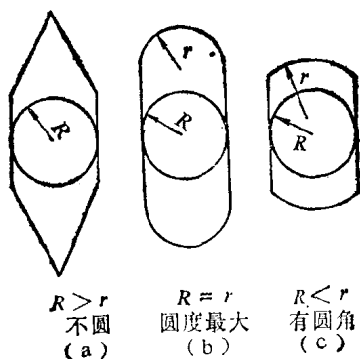


图 1-3 圆角度的类型

$$M = \frac{r_1 + r_2 + r_3 + \dots}{RN} \quad (1-16)$$

式中 r_1 、 r_2 、 r_3 ——为颗粒轮廓相应各个角的曲率半径，非圆角者为零；

R ——最大内接圆半径；

N ——测定角的总数。

就总体而言，随圆角度的增大， r 接近于 R 。圆的圆角度近似于 1。圆角度可用于表示被磨碎颗粒的磨碎度。

(8) 表面指数 z

根据颗粒的投影图测定出投影面积 S 和颗粒的周长 C ，
则

$$z = C^2 / 12.6S \quad (1-17)$$

圆形的表面指数为 1。用于颗粒的水力输送。

3 形状因素

Hausner 建议用最小面积的封闭矩形与颗粒实际形状比较的方法来评价颗粒的形状。设矩形的长度为 a 、宽度为 b ，则可计算出三种形状特性，即形状因素：

$$\text{伸长比 } x = a/b, \quad (1-18)$$

$$\text{庞大率 } y = S/ab, \quad (1-19)$$

$$\text{表面率即表面指数 } z = C^2 / 12.6S, \quad (1-20)$$

一般长形颗粒的伸长比 x 大于 1.5；大多数颗粒的庞大率 y 在 0.7—0.8 之间，若 $y < 0.6$ 时，则表明颗粒有较深的凹形沟或为多豁口状。

4 粗糙度系数

形状系数、形状指数和形状因素都是宏观量。微观地观察，颗粒表面往往是高低不平的，并且有很多微小裂纹或孔洞。粗糙度系数表示颗粒实际表面积与外观看成光滑颗粒的表面积之比，即：

$$\text{粗糙度系数} = \frac{\text{颗粒微观的实际表面积}}{\text{外观看成光滑颗粒的宏观表面积}} > 1 \quad (1-21)$$

颗粒表面实际的粗糙程度直接关系到颗粒间的摩擦、粘附、吸水性以及空隙率等物理化学现象，因此，是一个不容忽视的参数。

5 颗粒形状的其他描述