

高等学校教学用书

重力选矿

张鸿起 刘 顺 王振生 编

煤炭工业出版社

内 容 提 要

本书系统地叙述了重力选矿基本理论、重力选矿结果的统计规律和假定性质。同时还详细介绍了重介质选矿、跳汰选矿和溜槽与筛床选矿的工艺原理及其机械设各。本书可作矿业学院选矿工程专业教材,也可供从事选矿工作的工程技术人员阅读、参考。

责任编辑:黄 维

高 等 学 校 教 学 用 书

重 力 选 矿

张鸿起 刘顺 王振生 编

煤炭工业出版社 出版

(北京安德里内和年里北街1号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

开本 $787 \times 1092\text{mm}^{1/4}$, 印张 16 $^{1/4}$,

字数 392千字 印数 1—2,720

1987年10月第1版 1987年10月第1次印刷

ISBN 7-5020-0021-6/TD·22

统一书号 15035·2934 定价 2.75元

前 言

本书是根据1983年选矿工程专业《重力选矿》课程教学大纲编写的。

我国重力选矿发展有着悠久的历史，建国三十多年来有关重力选矿的理论研究和生产实践又有了很大的发展。本书在编写过程中，吸取了现代的理论研究成果：悬浮液的流变特性、重力选矿结果的统计规律、跳汰的概率-统计理论模型、跳汰的运动方程等，加强了重力选矿的基础理论；并系统地介绍了重力选矿各种基本方法的工作原理及其先进的机械设备。内容是比较丰富的。

参加本书编写的有：王振生（第三章）、刘顺（第五章）、张鸿起（第一、二、四、六、七）。张鸿起为本书主编。在编写过程中承蒙淮南矿业学院、黑龙江矿业学院等兄弟院校提出了宝贵的意见。在此致以衷心的感谢。

由于编者水平所限，书中难免存在缺点和错误，恳切希望读者批评指正。

编 者

一九八六年五月

目 录

第一章 绪 论	1
第一节 重力选矿研究的对象及其应用范围	1
第二节 重力选矿发展概况	2
第二章 重力选矿的基本理论	5
第一节 物体在介质中的重力与运动阻力	5
第二节 球体在静止介质中的自由沉降规律	16
第三节 矿粒在定常流中的自由沉降规律	25
第四节 等沉现象和等沉比	33
第五节 物体在离心力场中的运动规律	45
第六节 物体的干扰沉降规律	37
第七节 粒群在上升水流中的分层规律	43
第八节 粗粒在细粒悬浮体中的沉降规律	16
第三章 原煤性质	35
第一节 原煤粒度组成的研究方法	35
第二节 原煤密度组成的研究方法	58
第三节 可选性曲线	65
第四节 可选性曲线间的关系及用途	71
第五节 平均低曲线	75
第六节 原煤可选性分类	81
第四章 重力选矿结果的统计规律	83
第一节 重力选矿中矿粒在产物中的统计规律	83
第二节 分配曲线的特性参数	87
第三节 分配曲线的特性	92
第四节 分配曲线直线化	95
第五节 重力选矿效果的评定	97
第五章 重介质选矿	101
第一节 概 述	101
第二节 重介质的性质与分类	103
第三节 重介分选机	111
第四节 重介旋流器	135
第五节 悬浮液的净化回收	149
第六节 悬浮液密度自动控制	159
第七节 重介选矿工艺流程	162
第六章 跳汰选矿	165
第一节 概 述	165
第二节 跳汰选矿原理	167
第三节 无活态跳汰机	185

第四节	跳汰机的入料性质与操作工艺	212
第五节	跳汰流程	217
第七章	溜槽与摇床选矿	220
第一节	水流沿斜面流动的运动规律	220
第二节	矿粒在斜面流中的分层规律	229
第三节	溜槽选煤	238
第四节	斜槽分选机	241
第五节	摇床选煤	244
主要参考书		258

第一章 绪 论

第一节 重力选矿研究的对象及其应用范围

选矿的目的在于从原矿中把有用矿物（或有用成分）分离出来加以富集，构成组分单一的人造富矿（或化合物）。这项工作要靠矿物本身的某方面性质来完成。如根据矿物的密度不同而进行分离的方法叫做重力选矿。许多金属矿物的密度比脉石高，这时经过选别得到的重产物为精矿，轻产物为尾矿。而煤炭则和金属矿物不同，煤炭中可燃物质的密度低于煤炭中矿物质的密度，所以煤的密度愈小，灰分愈低。选煤是把有用矿物富集到轻产物中，作为精煤，而脉石等矿物进入到重产物中，成为尾煤。

重力选矿与其它选矿方法一样，矿物的分离是在运动过程中逐步完成的。也就是说，应该使性质不同的矿粒在重力选矿设备中具有不同的运动状况——运动的方向、速度、加速度和运动轨迹等，从而达到矿物分离的目的。同时，一切重力选矿过程都必须在某种介质中进行，所用的介质有：空气、水、重液和重悬浮液。其中用的最多的是水，在缺水的干旱地区或处理某些特殊的原料时可用空气，此时称为风力重力选矿。重液是密度大于水的液体或高密度盐类的水溶液，矿物在其中可以严格地按密度分开，但是由于这类液体价格昂贵，故只限于在实验室使用。重悬浮液是由密度较高的固体微粒与水组成的混合物，其综合密度高于轻产物的密度，而低于重产物的密度，故可起到同重液一样的作用。采用重悬浮液作介质的选矿方法称作重介质选矿。随着分选介质密度的增高，性质不同的矿粒在运动状况上的差别也增大，在一定范围内分选效果亦愈好。

对于重力选矿来说，介质的作用是很重要的。物体在介质中的运动不仅受重力的作用，而且还承受介质作用于它的浮力和阻力。使不同密度和粒度的颗粒产生不同的运动速度和轨迹，彼此分离。在这里介质即是传递能量的媒介，同时还负有使颗粒松散和运输产物的作用。

介质的作用是外界因素，使矿物分离的根本原因还是它们自身性质的差别，就是颗粒的密度、粒度和形状。密度和粒度共同决定着颗粒的重量，是推动颗粒在介质中运动的基本作用力。在选矿过程中，使矿粒基本按密度差分离的作业，是矿石分选作业。但是，当矿物间密度差别不大时，亦可按颗粒在介质中沉降速度不同，达到按粒度分离，这种作业称为分级作业。此外，矿粒的形状也影响其在介质中的运动速度，因而也是分离过程的一项重要重要因素。

介质在分选过程中常处于运动状态，主要的运动形式有：等速的上升流动、等速的下降流动、垂直交变的流动、沿斜面的稳定流动和非稳定流动、回转运动等。根据介质的运动形式，分选原理的不同，重力选矿可分如下几种工艺方法。各工艺方法及其应用范围见表1-1。

其中，分级作业和洗矿作业属按粒度分离的作业，但洗矿作业处理的对象是被粘土胶结的矿石，兼有碎散的作用。其它各工艺方法属于分选性质的作业。

表 1-1 重力选矿工艺方法应用范围

选别工艺方法	粒 度, mm		密 度, kg/m ³	
	最 小	最 大	最 低	最 高
分 级	0.074	50	1200	4200
重介质选矿	0.100	300	1200	8000
跳汰选矿	0.074	250	1200	15600
摇床选矿	0.074	38	1200	15600
溜槽选矿	6.000	100	1200	2530
洗 矿	0.000	300	1200	15600

利用重力选矿法分选矿石的难易程度, 主要由待分离矿物的密度差决定, 可简单地用下式近似地评定

$$E = \frac{\delta_2 - \rho}{\delta_1 - \rho} \quad (1-1)$$

式中 E ——矿石的可选性评定系数;

δ_1 、 δ_2 和 ρ ——分别为轻产物、重产物和介质的密度。单位为 kg/m³。

可选性评定系数 E 值大者, 分选容易, 即使矿粒间的粒度差别较大, 也能较好地按密度加以分选。反之, 则比较困难, 而且在入选前往往需要将矿粒分级, 以减少因粒度差别, 而影响按密度进行分选。矿石的可选性按 E 值大小可分成五个等级。如表 1-2 所示。

表 1-2 矿物按密度分离的难易度

E 值	>2.5	2.5~1.75	1.75~1.5	1.5~1.25	<1.25
难 易 度	极 容 易	容 易	中 等	困 难	极 困 难

重力选矿是目前最重要的选矿方法之一。广泛地应用于处理矿物密度差较大的原料。它是选别金、钨、锡矿石的传统方法, 在处理煤炭、稀有金属(钽、铌、锆、铈、钼等)矿物的矿石中应用也很普遍。在我国洗煤厂中, 重力选矿法担负着处理75~80%的原煤任务, 是最主要的选煤方法。重力选矿法也被用来选别铁、锰矿石, 同时也用于处理某些非金属矿石, 如石棉、金钢石、高岭土等。对于那些主要以浮选法处理的有色金属(铜、铅、锌等)矿石, 也可用重力选矿法进行预先选别, 除去粗粒脉石或围岩, 使有色金属达到初步富集。重力选矿方法除对微细粒级选别效果较差外, 能够有效地处理各种不同粒度的原料。重力选矿设备结构较简单、生产处理量大、作业成本低廉, 故在条件适宜时均优先予以应用。

第二节 重力选矿发展概况

一、重力选矿的历史发展及现状

重力选矿是一种应用最早的选矿方法。很早以前, 古代人们就开始利用重力选矿的方法, 在河溪中用兽皮淘洗自然金属。在14~15世纪时就已出现, 直到现在仍保留其主要特征的重力选矿设备。

在十八世纪产业革命以后, 随着生产的发展, 重力选矿技术也日趋完善。1830~1840

年在德国哈兹矿区出现了机械式的活塞跳汰机，1892年发明了一台空气驱动的无活塞跳汰机——著名的鲍姆式跳汰机，十九世纪末制成了现代型式的机械摇床。直到本世纪初浮选法广泛应用以前，重力选矿法一直是主要的选矿方法。

分选效率最高的重力选矿方法——重介质选矿，1858年就开始在工业中使用。当时只能在氯化钙溶液中选煤，由于溶液损耗大，所以没有得到推广。1917年又出现了水砂悬浮液选煤法，1926年苏联工程师列普诺夫（Е.А.Спелонов）提出了使用稳定悬浮液的重介选矿法，从此之后，重介质选矿才开始广泛使用。由于重介质选矿具有分选效率高、处理量大和适合于处理难选矿物等优点，重介质选矿在不少国家中得到了迅速发展。

重力选矿的理论研究工作，是在重力选矿设备机械化以后才开始的。根据流体力学的观点，十八世纪初牛顿提出的球体在介质中沉降的阻力平方公式，1851年英国物理学家斯托克斯（G.G.Stokes）发表的粘性阻力公式，为早期的重力选矿理论研究工作提供了理论基础。最初的理论研究工作，从研究单个颗粒在介质中的运动规律开始的，这些观点研究结果发现与实际生产情况不符。因为重力选矿过程，不是单个颗粒在介质中的运动，而是粒群在介质中的运动。随后才开始研究矿粒粒群在介质中的干扰沉降规律。在这方面，苏联学者利亚申柯（П.В.Лященко）做了广泛的研究工作，提出了跳汰是在上升水流中“按悬浮体的相对密度分层”学说。并且在1935年编著了世界上第一本重力选矿教科书。以后德国人麦依尔（E.W.Мауер，1947年）又从床层位能降的角度，提出了跳汰能量理论模型，阐释了跳汰分层过程。1959年苏联维诺格拉多夫（Н.Н.Виноградов）提出而近年来得到了广泛承认的“概率-统计模型”，它把跳汰过程看成是各种物理性质的颗粒运动的群态运动，具有概率性质。但是，由于重力选矿过程本身影响因素较多，直到现在有关跳汰及其它重力选矿过程的理论研究，不同学派还是各持不同的观点。今后，应当集中来寻找出一条能把各种理论统一起来的途径，最终能比较客观地解决重力选矿设备及工艺参数问题。

从本世纪四十年代在荷兰出现水力旋流器后，为利用回轮流强化选别过程迈出了一步。该设备现已广泛用于细粒矿物的分级和分选过程中。虽然其理论研究还很不够，但这是当前重力选矿发展的主要方向之一。

随着现代科学技术的发展，现在已开始使用示踪原子、现代的测试技术，直接观察颗粒的运动，研究矿粒在重力选矿过程中的运动规律。为适应生产自动化和设备大型化的需要，开展了以数理统计方法，概括选矿过程规律性的研究，编制工艺参数和设备参数间的数学模型，为工艺生产的自动控制和设备设计提供可靠依据。

近年来，由于采矿机械化程度的提高，愈来愈多的贫矿和微细散布矿石的被开发利用，重力选矿生产面临着提高设备处理能力和强化对微细粒级回收的任务。设备制造正向着大型化、离心化和多层化方向发展。传动方式也采取了多种多样的复合运动。在这方面我国已经取得了许多重要成就。

二、重力选矿在我国的发展和成就

在我国重力选矿已有悠久的历史。约在4000年前就开始了冶炼铜。殷墟出土的司母戊鼎重达1400斤，可见当时冶金技术的高超。战国时代（公元前403~221年）铁的用途得到推广。为了给冶金生产提供矿产原料，所以采矿、选矿技术也相当发达。到了明朝，我国的采矿、冶金和金属加工业，无论在生产规模、产量上，或是在技术工艺方面，都居当时

世界前列。1637年明朝著名科学家宋应星编著了《天工开物》颇为详尽地总结了历代劳动人民的工农业生产经验，在我国历史上第一次系统地论述了采矿工程及洗选矿石等情况，记载了很多有关应用重力选矿分选的实例。例如：用风车分选谷物，用水力分级方法提取瓷土，淘洗铁砂和锡砂矿石等。这些记述反映了我国古代重力选矿的发达。

我国最早跳汰选煤厂建于1917年，溜槽选煤厂建于1923年。在1945年以前，我国仅有十一座炼焦煤选煤厂和五座动力煤选煤厂，而且这些选煤厂都掌握在帝国主义者手中，成为帝国主义掠夺我国资源和剥削劳动人民的工具。因此，生产技术十分落后，劳动条件极为恶劣，生产极不正常。

解放后，矿物原料生产被置于优先发展地位，先后在我国重要的钨、锡、煤炭等基地建立起来多座大、中型选矿厂和选煤厂。随着我国尖端技术工业的建立，同时还新建了一批处理稀有金属矿砂的重力选矿厂。六十年代期间，开始用重力选矿法处理鲕状赤铁矿矿石，并在铅、锌有色金属选矿厂建起了重介质选矿车间，同期重介质选煤厂也得到了发展。并又以现代的重力选矿技术改造了我国古老的选金工业，在吉林、黑龙江等省漫长的河滩上建立了多条浮动的采金船。由于国外出现石油危机，用煤取代石油的趋势与日俱增。煤炭日益成为主要能源。我国煤炭资源丰富，煤种齐全，1983年煤炭产量达到7.15亿吨，占世界第三位，比1949年增长了21倍。随着煤炭产量的增长，选煤工业也得到了迅速发展，1983年原煤入选量为解放初期的117倍。为了进一步搞好煤炭的洗选加工，搞好节能，国务院在1982年转发了“关于发展煤炭洗选加工合理利用能源”的节能第五号指令。要求今后逐步变烧原煤为烧加工商品煤。给选煤事业提出了光荣而艰巨的任务。另外，重力选矿法在化工、建材等部门也得到了广泛的应用。

在新技术新设备研究方面也取得了重大成就。如处理难选的钨钛磁铁矿石，获得了成功的应用，重介质选煤新工艺得到了推广，并研制成功了斜轮及立轮重介分选机、三产品重介旋流器，电磁风阀筛下空气室跳汰机，四层平面摇床等。同时为装备大型选煤厂而研制的十种大型设备，已进入试制样机和试生产阶段。

在实现我国四个现代化，重力选矿肩负着为国家提供优质能源和多种优质矿物原料的任务。从当前情况看，我国的选矿工业还属于年轻的工业，存在着发展不平衡，综合利用不完善以及自动化水平低等不少问题。还必须加紧努力、认真学习、广泛吸收国际上的先进技术，以便尽快地将我国选矿工业的科学技术推进到一个新的水平。

第二章 重力选矿的基本理论

在重力选矿各种工艺方法的分选过程中,入选物料是处在运动状态,按照各颗粒的不同特性,而达到彼此分离的,因此,有必要了解物体在介质中运动的各种规律。本章主要研究重力选矿的基本理论——物体和介质的特性及其与运动规律间的关系。

第一节 物体在介质中的重力与运动阻力

一、物体的性质

与重力选矿过程有关的物料性质,主要有矿粒的密度、粒度及其形状。

(一) 物料的密度

物料的密度是指单位体积物料的质量。在重力选矿中物料的密度以符号“ ρ ”表示,其单位为 kg/m^3 或 g/cm^3 。

物料的重度:物料的重度是指单位体积物料的重量。重度以符号“ γ ”表示,其单位是 N/m^3 。因此,密度与重度在物理意义上及数值上都是不相同的。根据牛顿第二定律,它们具有下列关系

$$\gamma = \rho \cdot g \quad \text{N/m}^3 \quad (2-1)$$

为了表示物质相对密度的大小,习惯上取得测物质的重量与同体积纯水的重量作对比,得出的比值叫做比重。比重是一个无因次的物理量。其数值与物质密度值相等。

常见的各种纯矿物的密度及其它物理性质,见表2-1。

在重力选矿实践中,所遇到的矿粒多数不是纯矿物,而是几种矿物的连生体。连生体的密度很不稳定,需要时,需实际测定。测定值与其真值误差应小于1%。在重力选矿中,物质的密度可以作为物质的质量指标。例如,密度低的煤炭,它的灰分一般也较低。

(二) 物料的几何性质

不同的粒度和形状的物料,对重力选矿过程有很大的影响。

1. 粒度

物料的粒度表示其外形尺寸。表示和测定物料粒度的方法有下列几种:

(1) 直接测量矿粒的外形尺寸。物料一般都具有不规则的形状,通常只能用几个尺寸表示它的大小。在实践中,最好用一个尺寸来表示物料块的大小。这个尺寸一般称为物料块的《直径》。球形物料的直径,当然就是球的直径。立方体物料块的直径,一般用立方体的边长。形状不规则的物料块,往往采用其主要尺寸来表示,这些主要尺寸可以从物料块上直接测量出来。例如,六面体可以测量出长度 l 、宽度 b 和厚度 h 三个尺寸*。矿粒直径可以全部采用这三种尺寸或其中的几种。如

(1) $d = b$ 物料的直径等于六面体的宽度;

(2) $d = \frac{l + b}{2}$ 直径等于六面体的长度和宽度的算术平均值;

* 长度 l 、宽度 b 和厚度 h 相当于六面体的最大、中间和最小的尺寸。

表 2-1 部分常见矿物的化学成分和物理性质

矿物名称	化 学 成 分	硬 度	密 度	形状及构造
重晶石	BaSO ₄	3~3.5	4.3~4.5	片粒状
铝矾土	Al ₂ O ₃ ·2H ₂ O	2~3	2.25	土状块
石墨	C	1~2	2.1~2.2	致密土状
白云石	Ca·Mg(CO ₃) ₂	3.5~4	2.8~2.9	致密土状
金	Au	2.5~3	19.3~19.6	树枝状结晶
方解石	CaCO ₃	3	2.7	土状结晶
高岭土	H ₂ Al ₂ Si ₂ O ₇ ·H ₂ O	2~2.5	2.6	土状
石英	SiO ₂	7	2.6	致密结晶
刚玉	Al ₂ O ₃	9	3.95~4.1	粒状结晶
褐铁矿	Fe(OH) ₃ ·H ₂ O	5~5.5	3.6~4.0	致密粒状
磁铁矿	Fe ₃ O ₄	5.5~6.5	4.9~5.2	粒状结晶
赤铁矿	Fe ₂ O ₃	5.5~6.5	4.9~5.3	致密粒状
正长石	KAlSi ₃ O ₈	6~6.5	2.5~2.6	块状
黄铁矿	FeS ₂	6~6.5	4.95~5.1	粒状结晶
磁黄铁矿	Fe _{1-x} S _x	3.5~4.5	4.5	致密粒状
斜长石	HNaAlSi ₃ O ₈ ·CaAlSi ₃ O ₈	5~7	2.6~2.7	块状结晶
方铅矿	PbS	2.5	7.4~7.6	粒状结晶
天然硫	S	1.5~2.5	2~2.1	土状结晶
煤	C+O+N+H		1.2~1.8	柱状
萤石	CaF ₂	4	3~3.3	结晶
闪锌矿	ZnS	3.5~4	3.9~4.2	粒状结晶
金钢石	C	10	3.5	浑圆状结晶
钛铁矿	FeTiO ₃	5~6	4.5~6	片状结晶
白铁矿	FeS ₂	6~6.5	4.6~4.9	针状结晶
锡石	SnO ₂	6~7	6.8~7.1	粒状结晶

(3) $d = \frac{l+b+t}{3}$ 直径等于四面体的长度、宽度和厚度的算术平均值,

(4) $d = \sqrt[3]{lbt}$ 直径等于四面体的长度、宽度和厚度的几何平均值。

以上确定形状不规则物料块直径的方法,仅适用于研究单个粗矿粒的粒度。

2) 用显微镜测量矿粒的大小,取其平均值表示矿粒的直径。这种方法适用于测量粒度从40μm到1/10μm的细粒。

3) 用筛分析的方法(筛比不超过1.5)测定矿粒能够通过的最小筛孔直径(d_i)与不能通过的最大筛孔直径(d_{i-1}),然后取平均值表示矿粒的近似粒度。该粒群的粒度用 d_{si} 表示

$$d_{si} = \frac{d_i + d_{i-1}}{2} \quad (2-2)$$

式中 d_i 及 d_{i-1} ——两相邻筛孔直径。

该法适用于粒度大于0.04mm的物料。

4) 用与矿粒相当的球形物体的直径表示。根据用途的不同,可以取体积等于矿粒体积的球体直径,表示矿粒的粒度,也可以取表面积等于矿粒表面积的球体直径,表示矿粒

的粒度。在重力选矿过程中，粒度的影响主要表现在矿粒的体积（或重量）方面，因此，常用前者来表示。用这种方法表示的矿粒的粒度大小，一般称为体积当量直径，或简称当量直径，以符号“ d_v ”表示。矿粒的体积当量直径 d_v 等于

$$d_v = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}} \quad (2-3a)$$

式中 V ——矿粒的体积。

如已知矿粒的重量 G 及密度 δ ，则

$$d_v = \sqrt[3]{\frac{6G}{\pi\delta g}} \quad (2-3b)$$

式中 $G = V\delta g$ 。

测定某矿粒群的平均体积当量直径的计算公式如下

$$d_v = \sqrt[3]{\frac{6\Sigma G}{\pi\delta g n}} \quad (2-3c)$$

式中 $G, \Sigma G$ ——矿粒，矿粒粒群的总重量， N ，

n ——矿粒的数目。

5) 根据矿粒在水中或空气中的沉降速度，按一定的公式（见本章第三节）计算矿粒的粒度（直径）。由于矿粒在水（或空气）中的沉降速度，不仅取决于它的粒度，与其密度和形状也有关系，所以用这种方法计算出来的粒度与上述根据矿粒外形尺寸测得的粒度，有完全不同的物理概念，前者称为重力粒度，后者称为几何粒度。

2. 物料的形状

在重力选矿过程中遇到的矿粒形状是多种多样的，一般可分成球形、浑圆形、多角形、长方形及扁平形等。粒度和密度相同而形状不同的矿粒，在介质中的运动速度也不相同。在各种形状的物体中，以球体的外形最规整，各个方向完全对称，表面积最小。因此，通常取球形作为衡量矿粒形状的标准。矿粒的形状，在数量上可用同体积球体表面积与矿粒表面积的比值来表示。这个比值称为矿粒的球形系数 α

$$\alpha = \frac{S_s}{S_{\alpha}} \quad (2-4)$$

式中 S_s ——球体的表面积；

S_{α} ——矿粒的表面积。

α 值愈小表示颗粒形状愈不规则。各种形状物体的球形系数近似值见表2-2。

表 2-2 各种形状物体的球形系数近似值

形 状	球 形	浑 圆 形	多 角 形	长 方 形	扁 平 形
球形系数 α	1.0	0.3~1.0	0.65~0.8	0.5~0.65	<0.5

某些矿粒的大致形状如下：金刚石——浑圆形；钨锰铁矿——长方形；金——长方形和扁平形；石英——多角形和长方形；锡石——多角形和长方形；黄铁矿——浑圆形和多角形；煤——多角形和长方形；铬铁矿——浑圆形和多角形；方铅矿——浑圆形和多角形。

形；闪锌矿——浑圆形和多角形；白钨矿——长方形。

二、介质的性质

在重力选矿过程中所用的介质有：水、空气、重液（高密度的有机液体及盐类的水溶液）和悬浮液（密度高的固体细粒与水或空气的混合物）。水、空气和重液是均质介质，介质中没有物理的相界面，悬浮液则是非均质介质。非均质介质和均质介质在物理性质上的区别，将在后面讨论，这里只研究与重力选矿有关的均质介质的性质——介质的密度和粘度。

1. 均质介质的密度

均质介质的密度是指单位体积的介质质量。介质的密度用符号“ ρ ”表示，其单位是 kg/m^3 或 g/cm^3 。均质介质的密度：可用称量已知体积的介质质量的方法求得，或者用误差小于1%的密度计来测定。

由于水的膨胀系数很小，在选矿实践中可以把纯水的密度，看成是不随温度改变的常数。纯水的密度为 1000kg/m^3 。空气的密度则随外界的温度和压力而变，在通常条件下，空气的密度为 1.29kg/m^3 。

2. 均质介质的粘度

介质在运动时，介质内部各流层间产生切应力或内摩擦的特性称为粘度。

任何介质分子间都有内摩擦，介质分子间发生相对运动时，内摩擦显示对运动的介质或物料的阻力。牛顿研究了这个问题并得出了用于均质介质的内摩擦定律。根据牛顿定律，两个流动介质层间的摩擦力和介质的性质有关，与介质层间的相对运动速度及两层间的接触面积成正比，而与介质层间的法向压力的大小无关。由于在整个运动的介质中，两相邻介质层间的流速变化是连续的，因此，可以用沿运动的法线方向的流速梯度，来量度相邻介质层间的相对运动速度。牛顿的内摩擦定律可以用下列关系式表示

$$F = \mu S \frac{dv}{dy} \quad (2-5)$$

$$\text{或} \quad \tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (2-6)$$

式中 $\frac{dv}{dy}$ ——法向流速梯度， $1/\text{s}$ ；

S ——摩擦表面积， m^2 或 cm^2 ；

F ——内摩擦力， N ；

τ ——单位表面的摩擦力，又称切应力；

μ ——牛顿流体的动力粘滞性系数或绝对粘度。

粘滞系数与介质的性质以及温度、压强有关。流体的粘度 μ 随温度的增高而明显减小，随压强的增加而稍有增大。但气体的粘度 μ 随温度增高而增大。粘度的单位是帕斯卡·秒， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

液体的粘度还可以用动力粘度 μ 和液体密度 ρ 的比值来表示，称为运动粘滞性系数（简称为运动粘度），以符号 ν 表示

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2-7)$$

ν 的单位是 m^2/s , cm^2/s 。

动力粘度与运动粘度单位制换算关系如下

$$\begin{aligned} 1\text{P} &\approx 0.1 \quad \text{Pa}\cdot\text{s} \\ 1\text{St} &= 10^{-4} \quad \text{m}^2/\text{s} \end{aligned}$$

水在一般工程气压之下的运动粘度与温度的关系, 可用下列经验公式计算

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \quad (2-8)$$

式中 t ——水的摄氏温度 $^{\circ}\text{C}$ 。

均质介质的粘度可以使用各种类型的粘度计来测定。最常用的仪器是毛细管粘度计。根据泊谔叶公式, 液体通过毛细管, 当 $Re < 1200$ 时, 各参数间具有下列关系

$$V = \frac{\pi r^4 P}{8l\mu} t \quad (2-9)$$

或

$$\mu = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot P}{8l \cdot V} t \quad (2-10)$$

式中 V ——在 t 秒内流出的液体体积, ml ;

t ——流出全部液体所需的时间, s ;

P ——作用于毛细管液体出口处的静压强, 等于液面至管口的重力压强 $P = \rho gh$,
 Pa ;

r ——毛细管的半径, cm ;

l ——毛细管的长度, cm ;

μ ——液体的动力粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

将测定的各有关参数分别代入上式, 可求得介质的动力粘度。也可在相同的条件下 (保持 r 、 l 、 P 及 V 不变) 分别测定待测液体及另一种已知动力粘度液体的流出时间, 按上式的比例关系求出待测液体的动力粘度。

图2-1为毛细管粘度计的构造图。毛细管粘度计由粗玻璃管——圆筒形容器1, 直径为1.5~2.5mm的毛细管2, 装在粗玻璃管中的稳定隔板3及搅拌器4组成。隔板3的作用是防止介质在粗管中随搅拌器一起旋转。5为由毛细管流出的介质的接受容器, 6为带动搅拌器4转动的电动机。

测量介质粘度时, 将介质放在粗玻璃管1中, 开动电动机使搅拌器4搅拌, 待介质搅拌均匀后测定一定体积的介质流出毛细管所需的时间, 按照前述公式计算介质的粘度。

三、物体在介质中运动的受力分析

物体在介质中运动时, 作用于物体上的力有两个——重力和阻力。

1. 物体在介质中的重力

在重力场中, 物体所受的地心引力称为重力。人们常把重力叫做该物体的重量。因此, 重力的大小以物体在重力场中的“重量”来表示。

在介质中, 根据阿基米德原理物体所受的重力等于该物体在真空中的绝对重量与同体积介质的重量之差

$$G_0 = V(\delta - \rho)g \quad \text{N} \quad (2-11)$$

$$\begin{aligned}
 \text{或} \quad G_0 &= V \cdot \delta \cdot \frac{\delta - \rho}{\delta} \cdot g \\
 \therefore m &= V \cdot \delta \\
 \therefore G_0 &= m \cdot \frac{\delta - \rho}{\delta} \cdot g \quad \text{N}
 \end{aligned}$$

式中 V ——物体的体积, m^3 或 cm^3 ;

$\delta \cdot \rho$ ——物体及介质的密度;

g ——重力加速度, m/s^2 或 cm/s^2 ;

m ——物体的质量, kg 或 g 。

从上式可以看出, 物体在介质中的重力, 等于物体的质量与加速度 $\left(\frac{\delta - \rho}{\delta}\right) \cdot g$ 的乘积。后者称为物体在介质中的重力加速度, 以符号“ g_0 ”表示

$$g_0 = \left(\frac{\delta - \rho}{\delta}\right)g \quad \text{m/s}^2 \text{或} \text{cm/s}^2 \quad (2-13)$$

这时将公式(2-13)代入式(2-12), 则

$$G_0 = m \cdot g_0$$

由公式(2-13)可知, 物体在介质中的重力加速度 g_0 与重力加速度 g 不同, g_0 的大小及方向随物体的密度 δ 及介质的密度 ρ 而变, 与物体的粒度无关。

当 $\delta > \rho$ 时, g_0 为正值, g_0 方向与 g 相同, 物体将在介质中沉降;

当 $\delta < \rho$ 时, g_0 为负值, g_0 方向与 g 相反, 物体将在介质中上浮;

当 $\delta = \rho$ 时, $g_0 = 0$, 物体将悬浮于介质中。

密度不同的物体, 在同一介质中的重力加速度也不相同。如果 $\delta_2 > \delta_1$, 则 $g_{02} > g_{01}$, 而且

$$g_{02} - g_{01} = \rho \left(\frac{1}{\delta_1} - \frac{1}{\delta_2} \right) g \quad (2-14)$$

这样, 两种密度不同的物体在介质中的重力加速度 g_0 之差, 将随着两种物体的密度差 $(\delta_2 - \delta_1)$ 的增加而加大, 同时也随着介质密度的增加而增加。因此, 在重力选矿过程中, 当介质密度小于矿物密度时, 分选效率一般是随物料密度差 $(\delta_2 - \delta_1)$ 及所用介质密度的增高而提高。

2. 物体在介质中运动时所受的阻力

物体在介质中运动时, 作用于物体上并与物体运动方向相反的外力, 称为物体运动时的阻力。

在重力选矿过程中, 物体在介质中运动时所受的阻力有两种: 即介质作用于物体上的阻力——介质阻力, 及物体与周围其它物体之间或物体与器壁间相互摩擦、撞击而产生的阻力——机械阻力。

物体在介质中沉降时, 如果介质是很宽广的空间, 物体只受介质阻力而完全不受机械阻力的作用, 这种沉降称为自由沉降; 物体在介质中沉降, 如果是在有限的介质空间里, 很多颗粒拥挤在一起, 即物体既受介质阻力又受机械阻力的作用, 这种沉降则称为干扰沉降。干扰沉降是选矿实践中最常见的沉降形式, 如个别颗粒在粒群中的沉降。而理想的自

由沉降条件是, 单个物体在无限的介质中(无限边际)沉降, 实际上是不存在的。通常所谓的自由沉降是指介质中其它物料的含量很少, 在总容量中颗粒占有的体积不及 3 % 时, 颗粒间的干扰现象变得很小, 此时即可视为是自由沉降。

介质阻力是流体力学中的问题。机械阻力情况复杂, 到现在还无法用解析方法计算, 至于它对物体运动的影响将在以后讨论。现在仅研究有关介质阻力的问题。

介质阻力是物体与介质间发生相对运动时产生的。当物体与介质间作等速直线运动时, 介质作用于物体表面的力由两部分组成, 即法向压力 $P \cdot ds$ 及切向力 $\tau \cdot ds$ 见图 2-2。介质对物体的总作用力是这两部分的合力。合力是空间力系, 它的方向与物体的形状及其运动状态有关。在一般情况下, 它的方向与物体、介质间相对运动的方向斜交, 介质对运动物体的阻力, 只是该合力在运动方向上的一个分力。

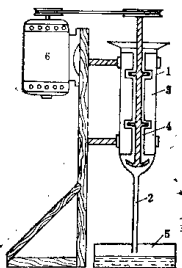


图 2-1 带搅拌器的毛细管粘度计
1—圆筒形容器; 2—毛细管; 3—稳定隔板; 4—搅拌器; 5—接受容器; 6—电动机

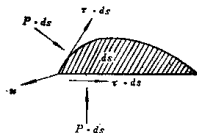


图 2-2 介质对物体的作用力

切向力是介质在物体表面绕流(滑过)时, 由于介质内部分子间的摩擦而引起的。切向力差不多全部发生在边界层内部。由切向力所引起的阻力称为切向力阻力或摩擦阻力。

法向压力与介质在物体周围的分布及流动状况有关。物体与介质间发生相对运动时, 往往由于边界层分离的结果, 在物体尾部出现旋涡(见图 2-4b), 使尾部的压力下降。此时由于物体前后所承受的法向压力不同, 物体前面的压力高、尾部压力低, 因而对物体运动产生阻力。在不发生边界层分离的情况下, 由于物体周围介质流速的变化, 使物体表面各点所承受的法向压力不同, 这样也将产生对物体运动的阻力。物体周围介质的分布及流动状况在很大程度上取决于物体的形状。因此, 这种阻力一般称为形状阻力。

物体在介质中运动时, 这两种阻力同时发生。但是, 在不同的情况下, 每一种阻力所占的比重是极不相同的, 在某些情况下可能是切应力阻力占主要地位, 而在另外一些情况下则形状阻力起主要作用。例如, 薄板以不同的取向在介质中运动时所受的介质阻力完全不同, 如薄板 A 平行于运动方向, 如图 2-3a 所示, 这时薄板几乎只受切应力阻力作用, 而形状阻力非常小; 若薄板 A 垂直于运动方向, 如图 2-3b 所示, 这时薄板主要受形状阻力作

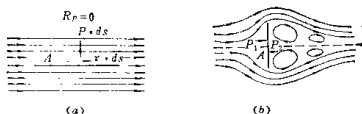


图 2-3 平板运动方向

a—平板平行于运动方向，b—平板垂直于运动方向

用，而切应力阻力几乎等于零。

这些阻力的大小，主要取决于介质和物体间运动的雷诺数 R 和物体的形状。阻力是雷诺数及物体形状的函数。当雷诺数较小，即流速低、物体的粒度小、介质的粘度大，以及物体形状容易使介质流过时，如图2-4a所示，切应力阻力占优势；反之，如雷诺数大，即流速高、物体的粒度大、介质的粘度小、以及物体形状阻碍介质绕流，物体所受阻力则以形状阻力为主，如图2-4b所示。

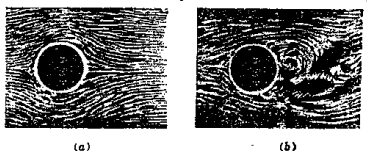


图 2-4 介质绕流球体的流态

a—层流，b—紊流

四、特殊条件下的阻力公式

关于介质对运动物体阻力的计算公式，很多学者长期进行了研究，得出了一些适合于某一特定条件下的阻力公式。这些公式主要有以下几种：

1. 牛顿阻力平方公式

在1729年牛顿研究了平板在介质中运动时的阻力，得出了有名的阻力平方定律。牛顿把介质假定为无粘性的理想流体，而不考虑切应力阻力（摩擦阻力）的作用，并把介质作用于平板上的阻力看成是介质分子与平板间发生弹性碰撞的结果。根据动量定理，介质对平板作用的阻力 R 应等于单位时间内介质动量的增量，即

$$R = \frac{mv}{t}$$

而

$$m = \rho s v t$$

∴

$$R = \rho s v^2 \quad \text{N} \quad (2-15)$$

式中 v ——平板与介质间的相对速度，m/s；

s ——平板垂直于运动方向的投影面积，m²。