



云南省普通高等学校“十二五”规划教材

重力选矿技术

李值民 张 燕 张惠芬 主编



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press



云南省普通高等学校“十二五”规划教材

重力选矿技术

李值民 张 燕 张惠芬 主编

冶金工业出版社

2013

内 容 提 要

本书共分为7章, 主要内容包括: 重力选矿的理论基础、重力选矿方法和重力选矿设备、重力选矿工艺实践、重力选矿试验实例、中小型重力选矿厂的设计和选矿技术检测等内容。为便于读者自学、加深理解和学用结合, 各章均有本章内容简介和复习与思考题。

本书可作为高职高专选矿技术专业教学用书, 也可作为职业院校、企业员工培训等相关专业的教学用书或工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

重力选矿技术/李值民, 张燕, 张惠芬主编. —北京:
冶金工业出版社, 2013. 2

云南省普通高等学校“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5024-6067-9

I. ①重… II. ①李… ②张… ③张… III. ①重力
选矿—高等学校—教材 IV. ①TD922

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 013294 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcs@cnmip.com.cn

责任编辑 郭冬艳 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6067-9

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 三河市双峰印刷装订有限公司印刷

2013 年 2 月第 1 版, 2013 年 2 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 11 印张; 262 千字; 164 页

28.00 元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿邮箱:tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)



前 言

为了适应我国金属矿物分选技术的快速发展以及满足现代金属矿企业对选矿技术高素质技能型人才的需求和专业调整的需要,作者本着基础理论深刻性、基础知识系统性、设备工艺实践性、技术成果创新性、内容重在实用性的原则,编写了本教材。

本书力求反映国内外金属矿选矿技术的最新成就,并在对照国家职业资格标准、行业技术标准、行业技术规范的基础上,简要阐述了重力选矿方法和重力选矿设备的基本知识,用典型案例介绍了不同重矿物的选别方法及生产工艺,内容具有较强的针对性、指导性和实用性。该教材内容简练、重点突出,可作为普通高等学校选矿专业以及相关职业院校、企业员工培训的教学用书或工程技术人员的参考书。

本书由云南锡业职业技术学院和云南锡业集团(控股)有限责任公司共同组织编写。内容共分为7章,第1章、第2章由李值民、张燕、张惠芬、王淑雪编写,第3章由朱宁、马正堂、李慧萍编写,第4章由李值民、黄朝、张燕编写,第5章由高乔林、仇云华编写,第6章由颜华编写,第7章由马正堂、袁经中、张惠芬编写。全书由李值民、张燕、张惠芬整理定稿并担任主编。

本书在编写过程中,编者参考了大量的文献资料,在此,谨向文献作者致以诚挚的谢意。由于作者水平所限,书中不足之处,敬请读者批评指正。

编 者
2012年1月

目 录

1 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 选矿专业术语	1
1.3 重力选矿技术进步及发展趋势	3
复习与思考题	4
2 重选理论基础	6
2.1 颗粒在介质中的垂直运动	6
2.1.1 介质的性质	6
2.1.2 物体在介质中运动受力分析	7
2.1.3 颗粒在流体中的沉降	9
2.1.4 颗粒在介质中的沉降运动与等降比	15
2.2 物料在垂直交变介质流中按密度分层	17
2.2.1 分层过程	17
2.2.2 静力学体系学说及按密度分层的位能学说	17
2.2.3 动力学体系学说	18
2.3 斜面流分选原理	19
2.3.1 斜面水流运动特性	20
2.3.2 粗粒群在厚层紊流斜面流中的松散分层	22
2.3.3 细粒群在薄层弱紊流斜面流中的松散分层	23
2.3.4 细颗粒在层流斜面流中的松散分层	25
2.4 回转流分选原理	26
2.4.1 概述	26
2.4.2 颗粒在厚层回转流中的径向运动	26
2.4.3 薄层回转流的流动特性及颗粒分选	27
2.4.4 螺旋回转斜面流分选原理	28
复习与思考题	29
3 重选方法和设备	31
3.1 洗矿	31
3.1.1 概述	31
3.1.2 洗矿设备	32

3.2 分级脱泥	34
3.2.1 分泥斗的构造、规格和工作原理	34
3.2.2 分级箱的构造及工作原理	35
3.2.3 分级箱的操作	36
3.2.4 水力旋流器	36
3.2.5 倾斜板浓密箱	38
3.3 跳汰选矿	39
3.3.1 概述	39
3.3.2 跳汰机分类及隔膜跳汰机简介	40
3.3.3 影响跳汰机选矿指标的主要因素	42
3.3.4 跳汰机操作、维护、管理基本要求	43
3.4 重介质选矿	44
3.4.1 概述	44
3.4.2 圆锥形重介质分选机	45
3.4.3 重介质振动溜槽	45
3.4.4 重介质旋流器	46
3.5 螺旋溜槽	46
3.5.1 概述	46
3.5.2 螺旋溜槽工作原理	47
3.5.3 螺旋溜槽技术性能	48
3.5.4 影响螺旋溜槽选矿指标的主要因素	50
3.5.5 螺旋溜槽的操作维护基本要求	51
3.6 摇床选矿	51
3.6.1 概述	51
3.6.2 摇床分选原理	52
3.6.3 摇床的差动性运动特性	55
3.6.4 摇床类型	57
3.6.5 摇床的工艺操作参数	66
3.6.6 摇床维护与检修	67
3.7 离心选矿机	67
3.7.1 概述	67
3.7.2 离心选矿机构造	67
3.7.3 离心选矿机工作原理	69
3.7.4 影响离心机选别效果的参数	69
3.7.5 离心选矿机的操作	69
3.8 皮带溜槽	70
3.9 带式振动选矿机	71
3.9.1 工作原理	71
3.9.2 选别指标	71

3.9.3 设备工作参数	72
3.10 辅助设备	72
3.10.1 砂泵	72
3.10.2 陶瓷过滤机	77
复习与思考题	78
4 重选工艺的实践	79
4.1 锡矿石的选矿	79
4.1.1 残坡积砂锡矿和氧化脉锡矿的选矿	79
4.1.2 锡石硫化矿选矿	82
4.1.3 锡矿泥重选	85
4.1.4 锡粗精矿精选	88
4.2 处理粗、细不均匀嵌布的钨矿石重选流程	93
4.2.1 钨矿石的一般性质	93
4.2.2 黑钨矿石的重选流程	94
4.3 钛矿的重选	96
4.4 稀土砂矿的重选	97
4.5 稀散金属矿的重选	97
4.6 含金冲积砂矿的重选	98
4.7 铝土矿的重选	99
4.8 铁矿的重选	100
4.9 锰矿的重选	100
复习与思考题	101
5 重力选矿试验实例	102
5.1 概述	102
5.2 试验程序	102
5.3 试验案例	103
5.3.1 试料制备	103
5.3.2 原矿性质分析	103
5.3.3 选矿试验研究	108
5.3.4 试验流程评述	119
5.3.5 建议原则流程	119
5.3.6 结论	119
复习与思考题	121
6 重力选矿厂的设计	122
6.1 选矿厂设计	122
6.1.1 设计的目的	122

6.1.2 设计的基本要求	122
6.1.3 设计工作步骤	123
6.1.4 设计内容和深度	123
6.2 设计前期工作	123
6.2.1 项目建议书	124
6.2.2 可行性研究	124
6.2.3 厂址选择	125
6.2.4 选矿试验	125
6.3 确定工作制度及规模	126
6.4 工艺流程设计	126
6.4.1 依据和应考虑的因素	126
6.4.2 工艺流程制定	127
6.4.3 工艺流程计算	130
6.5 设备选择与计算	135
6.5.1 工艺设备选择与计算的目的和要求	135
6.5.2 工艺设备选择与计算的依据及原则	136
6.6 重选厂布置和设备配置	137
6.6.1 破碎厂房配置	138
6.6.2 主厂房设备配置	140
6.7 尾矿设施 and 环境保护	142
6.7.1 尾矿设施	142
6.7.2 环境保护	142
6.8 设计概算及技术经济指标	143
6.8.1 设计概算	143
6.8.2 精矿成本	144
6.8.3 技术经济指标	145
复习与思考题	147
7 选矿技术检测	148
7.1 概述	148
7.1.1 技术检测的重要性	148
7.1.2 检验部门的任务	148
7.1.3 检测误差	149
7.2 计量	149
7.2.1 概述	149
7.2.2 矿量计量装置	150
7.2.3 云锡矿浆计量取样器	150
7.3 取样	151
7.3.1 概述	151

7.3.2 最小试样量的确定	152
7.3.3 取样方法与设备工具	152
7.4 制样	153
7.4.1 概述	153
7.4.2 试样分类	153
7.4.3 制样操作要求	154
7.5 工艺过程检测	154
7.5.1 概述	154
7.5.2 工艺操作条件和指标检测内容	154
7.5.3 矿浆浓粒度及密度的人工测定	155
7.6 选矿金属平衡	157
7.6.1 概述	157
7.6.2 选矿金属平衡编制计算	158
7.6.3 影响金属平衡的调查分析	160
7.7 数质量流程测定	161
7.7.1 概述	161
7.7.2 数质量流程测定有关问题	162
7.7.3 数质量流程计算实例	162
复习与思考题	163
参考文献	164

1 绪 论

本章内容简介

重力选矿是最重要的选矿方法之一。本章主要介绍了重力选矿法分矿矿石难易程度的判据、选矿的相关专业术语以及重力选矿的发展历史和趋势。

1.1 概述

重力选矿又称为重选，是利用不同物料颗粒间的密度差异进行分离的过程。重力选矿需要在介质中进行，所用的介质有水、重介质和空气，其中最常用的介质是水。

矿物分离的根本原因是它们自身的性质差别，这就是颗粒的密度、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因素。

利用重选方法对物料进行分选的难易程度可简易地用待分离物料的密度差判定：

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

式中 E ——矿石可选性评定系数；

δ_1, δ_2, ρ ——轻物料、重物料和介质的密度。

矿石的可选性按 E 值大小可分成五个等级，如表 1-1 所示。

表 1-1 物料按密度分选的难易程度

E	>2.5	$2.5 \sim 1.75$	$1.75 \sim 1.5$	$1.5 \sim 1.25$	<1.25
重选难易程度	极易选	易选	可选	难选	极难选

介质在选别过程中通常是处于运动状态的，主要的运动形式有：等速的上升运动、沿斜面的稳定流动、垂直的或沿斜面的非稳定流动、回转运动等。

根据介质的运动形式和作业的目的不同，重选可分为以下几种工艺方法：分级、重介质分选、跳汰分选、摇床分选、溜槽分选、离心机分选和洗选。

重选法主要用于锡、钨、锰、铬、贵金属及稀有金属（钽、铌、钍、钨、钽）矿石的选别，也是选煤的主要方法。

1.2 选矿专业术语

选矿的专业术语有：

- (1) 原矿。所处理的给入物料。
- (2) 精矿。经分选后富集了有价成分的最终分选产品。
- (3) 中矿。分选过程中产出的中间产品，需要进一步处理。
- (4) 尾矿。经过分选后可丢弃的物料。

(5) 品位。给料或产品中有价成分的质量分数。给矿品位以 α 表示, 精矿品位以 β 表示, 尾矿品位以 θ 表示。

(6) 产率。产品对给料计的质量分数, 通常以 γ 表示。计算方法有两种:

1) 产品重量计算法:

$$\gamma = \frac{Q_1}{Q_2} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中 γ ——精矿产率, %;

Q_1 ——产品重量;

Q_2 ——原矿重量。

2) 品位计算法:

$$\gamma = \frac{\alpha - \theta}{\beta - \theta} \times 100\% \quad (1-3)$$

式中 γ ——精矿产率, %;

α ——原矿或给矿品位, %;

β ——精矿品位, %;

θ ——尾矿品位, %。

(7) 回收率。精矿中有价成分质量含量与给矿中有价成分质量含量之比, 回收率以 ε 表示。

1) 实际回收率计算式:

$$\varepsilon_{\text{实}} = \frac{\text{精矿量} \times \text{精矿品位}}{\text{原矿量} \times \text{原矿品位}} \times 100\% = \frac{Q_2 \times \beta}{Q_1 \times \alpha} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中 $\varepsilon_{\text{实}}$ ——实际回收率, %;

Q_1 ——原矿量, t;

Q_2 ——精矿量, t;

β ——精矿品位, %;

α ——原矿品位, %。

2) 理论回收率计算式:

$$\varepsilon_{\text{论}} = \frac{\text{精矿品位} \times (\text{原矿品位} - \text{尾矿品位})}{\text{原矿品位} \times (\text{精矿品位} - \text{尾矿品位})} \times 100\% = \frac{\beta \times (\alpha - \theta)}{\alpha \times (\beta - \theta)} \times 100\% \quad (1-5)$$

在选矿生产中, 实际回收率与理论回收率相差不能太大, 而此差值叫金属平衡差值。差值为 $(-1 \sim +2)\%$ 。

(8) 粒级回收率。精矿中已回收的某粒级金属率与原矿中该粒级金属率之比, 以 E_d 表示:

1) 计算式 1:

$$E_d = \frac{\text{精矿的回收率} \times \text{精矿中该粒级的金属分布率}}{\text{原矿的回收率} \times \text{原矿中该粒级的金属分布率}} \times 100\% \quad (1-6)$$

2) 计算式 2:

$$E_d = \frac{\text{精矿回收率} \times \text{精矿中该粒级的金属分布率}}{\sum_{i=1}^n (\text{某产品的回收率} \times \text{该产品中该粒级的金属分布率})} \quad (1-7)$$

(9) 富集比。精矿品位对给矿品位的比值。

(10) 选矿比。选得一吨精矿产品所需给料的吨数, 以 K 表示。

(11) 矿浆浓度与密度的计算式:

$$R = \frac{\delta(\Delta - 1)}{\Delta(\delta - 1)} \times 100\% \quad (1-8)$$

式中 δ ——矿石密度, kg/m^3 ;

Δ ——矿浆密度, kg/m^3 ;

R ——质量百分浓度, %。

(12) 选矿作业成本。选矿作业成本是指统计期内处理一吨矿石所需的费用。这些费用包括:

- 1) 辅助材料费 (包含定额材料和其他材料)、浮选药剂、介质;
- 2) 水和动力费;
- 3) 选厂工人工资;
- 4) 提取福利金;
- 5) 车间经费 (制造费用)。

计算式为:

$$\text{选矿作业成本} = \frac{\text{选矿生产中成本 (上述五项费用总和)}}{\text{原矿处理量}} \quad (\text{元/吨}) \quad (1-9)$$

(13) 工厂成本。选矿工厂成本是指选矿厂生产精矿中一吨金属含量所需要的费用。这些费用包括:

- 1) 原料费; 2) 材料费; 3) 水、动力费; 4) 工资; 5) 提取福利金; 6) 废品损失率; 7) 车间经费; 8) 企业管理费。

计算式:

$$\text{选矿工厂成本} = \frac{\text{统计期内总成本 (上述八项费用总和)}}{\text{产品金属量}} \quad (\text{元/吨}) \quad (1-10)$$

当知道原矿价格 (元/吨)、选矿作业成本 (元/吨)、企业管理费 (元/吨)、原矿品位和选矿回收率时, 可按下式计算选矿工厂成本:

$$\text{选矿工厂成本} = \frac{\text{原矿价} + \text{作业成本} + \text{厂管费}}{\text{原矿品位} \times \text{回收率}} \quad (\text{元/吨金属}) \quad (1-11)$$

1.3 重力选矿技术进步及发展趋势

近半个世纪以来, 国内外重力选矿技术有长足进步, 其主要表现为:

(1) 重视原矿准备作业, 加强洗矿, 脱泥分级以及采用重介质预选等作业, 提高入选矿物质。

(2) 大力发展高效、低耗、大型化的重力粗选设备, 提高处理能力, 节能降耗。

(3) 加强细粒锡石回收, 矿泥重选新设备及锡石浮选有较大发展。

(4) 发展多种选矿方法联合和选冶联合工艺, 产出多种产品, 提高主要有价矿物和伴生金属的回收。

(5) 重视节能降耗、尾矿处理、综合回收、环保等问题。

近 30 年来, 我国重力选矿技术进步取得了卓越成绩。

(1) 研制重选新设备, 推动技术创新。20 世纪 80 年代, 北京矿冶研究总院, 成功研制出锯齿波跳汰机。该设备具有效率高, 用水少等特点。

云锡研究设计院, 研制出新型摇床头装置。该床头, 在保持摇床头运动曲线的同时, 对床头结构进行了重大改进, 使之具有轻巧、易于安装、调节方便等特点。

新疆有色金属研究院, 研制出 $\phi 1200\text{mm}$ 旋转螺旋溜槽, 沿矿流运动相反方向旋转 15r/min , 并加少量清洗水以提高富集比, 目前在云锡生产上获得应用。

1995 年, 云锡研究设计院研制出振摆螺旋溜槽。该设备沿水平方向整机回转摆动, 有利于床层松散、分层。与不加振动相比, 其锡作业回收率约高 20%。

1996 年, 云锡研究设计院, 研制出一种新型节能设备——转盘选矿机。该设备于 1998 年荣获中国有色工业局科技进步发明二等奖。目前在锡尾矿利用方面获得应用。

2010 年, 转盘选矿机发明者又研制出带式振动选矿机, 在给矿锡品位 $0.5\% \sim 0.6\%$ 时, 精矿锡品位可达 $5\% \sim 6\%$ 以上, 锡回收率 60%。富集比 10 倍以上, 处理能力是皮带溜槽的 8 倍, 是刻槽床的 2 倍, 是细粒锡石回收的有效设备, 可能在锡矿泥选矿和尾矿选别等方面发挥积极作用。

(2) 选矿设备与 PLC 程控技术相结合, 组成集成式创新。我国独创的离心选矿机及其为主体组成的锡矿泥选别工艺, 曾处于世界领先地位。由于给矿、断矿、冲矿三个动作的执行机构存在问题, 导致该设备停止使用。随着技术的发展, 采用 PLC 程控技术, 实行时间程序控制, 使离心选矿机焕发青春, 再次在生产上获得应用, 并将在老尾矿开发利用方面发挥积极作用。

(3) 采用联合工艺, 组成精选流程。云锡个旧矿区, 原矿锡品位越来越低, 锡石结晶粒度越来越细, 杂质含量越来越高, 具有“贫、细、杂”的特征。现生产流程一般只能产出锡品位 10% 左右的粗精矿, 需要通过精选提高锡精矿品位。近年来进行了系统的精选流程研究, 提出浮重磁多种选矿方法相结合的新工艺。通过浮选除去硫化物, 磁选除铁, 为重选作业提供优质原料, 从而提高锡精矿品位, 精选系统锡回收率高达 82%, 富中矿锡回收率达 16%, 总回收率达 98% 以上。

(4) 引进新设备, 提高装配水平。为了提高碎、磨系统效率, 云锡各选厂在碎矿系统引进新型碎矿机, 在磨矿系统引进大型磨矿机, 实行多碎、少磨、节能降耗的方针, 并为选别作业提供较好的粒度条件, 有利于提高分选效率。

(5) 采用现代新技术, 实行选矿过程检测与控制。采用计算机现代新技术, 对碎矿粒度、磨矿浓度和粒度、浮选系统给药、矿浆酸碱度等工艺条件及指标实行自动控制, 全面提升选矿技术水平。

近代选矿技术的发展不仅仅是矿产资源利用, 还包括能源利用, 三废治理、环境保护等, 在循环经济、低碳领域中都将会发挥其积极作用。

重选设备研制与创新仍然是推动重选技术不断发展的重要研究课题, 设备大型化、操作简单化、控制自动化将是选矿技术发展的主要趋势。



复习与思考题

1. 矿石分选的基本根据是什么?

2. 重选法适合处理哪些类型矿石?
3. 某铜矿其原矿品位 $\alpha = 1.05\%$ ，精矿品位 $\beta = 25.20\%$ ，尾矿品位 $\theta = 0.13\%$ 。求精矿产率 γ ，回收率 ε ，富集比。
4. 黑钨矿及其伴生脉石矿物石英的密度分别为 7200kg/m^3 和 2650kg/m^3 ；煤及其伴生脉石矿物煤矸石的密度分别为 1350kg/m^3 和 2000kg/m^3 ；分别计算评估其重选分离的难易度。
5. 某矿锡矿泥粗选离心机回收率 83.4% ，精矿中 $+0.075\text{mm}$ 的金属率 0.3% ，给矿中 $+0.075\text{mm}$ 粒级金属率为 1.2% ，求该粒级的粒级回收率。

2 重选理论基础

本章内容简介

本章主要阐述重选的基本理论——矿物和介质的特性及其与运动规律间的关系。重选实质就是物质松散—分层—分离的过程。在运动介质中，被松散的矿粒群，由于沉降时运动状态的差异，形成不同密度（或粒度）矿粒的分层。分好层的物料层通过运动介质的运搬达到分离。因此，有必要了解物体在介质中运动的各种规律。

2.1 颗粒在介质中的垂直运动

垂直的沉降是重选中矿粒运动的重要形式。矿粒因本身的密度、粒度和形状不同而有不同的沉降速度。这种差异归根结底是由介质的浮力和颗粒在介质中运动受到阻力所引起的。所以研究浮力和阻力就成为探讨颗粒运动差异的基本问题。

颗粒的沉降有两种不同形式：

(1) 自由沉降，即单个颗粒在广阔空间中独立沉降，此时颗粒除受重力、介质浮力和阻力作用外，不受其他因素影响。

(2) 干涉沉降，即个别颗粒在粒群中的沉降，成群的颗粒与介质组成分层的悬浮体，颗粒间碰撞及悬浮体平均密度的增大，使个别颗粒沉降速度降低。

理想的自由沉降是遇不到的，通常所谓的自由沉降是指介质中固体物料的含量少，在总容量中颗粒占有的体积不足3%，此时即可视为自由沉降。

2.1.1 介质的性质

与重选有关的介质性质是介质的密度和黏度。

2.1.1.1 介质密度

介质的密度是指单位体积内介质的质量，通常用 ρ 表示。水的密度随温度和压力变化很小，纯水的密度为 1000kg/m^3 或 1g/cm^3 。在通常条件下（ 0°C ， 0.1MPa ），空气的密度为 1.293kg/m^3 。

固—液悬浮体的密度与其中固体颗粒的密度和体积占有量有关。单位体积悬浮体内固体颗粒占有的体积，称作容度积，以 ϕ_B 表示，其与质量浓度 R 的关系为：

$$\phi_B = \frac{\rho R}{\delta(1 - R) + \rho R} \quad (2-1)$$

式中 ϕ_B ——容积浓度（用小数表示）；

R ——质量浓度（用小数表示）；

δ ——矿粒密度， kg/m^3 ；

ρ ——介质密度， kg/m^3 。

悬浮体的密度即是单位体积悬浮体内固体颗粒的介质与分散介质质量之和,称为悬浮体的物理密度,用 ρ_{su} 表示。

$$\rho_{su} = \phi_B \delta + (1 - \phi_B) \rho = \phi_B (\delta - \rho) + \rho \quad (\text{kg/m}^3 \text{ 或 } \text{g/cm}^3) \quad (2-2)$$

单位体积介质或固体物质所具有的重量称为重度,用 γ (N/m^3) 表示。

$$\gamma = \rho g \text{ 或 } \gamma = \delta g \quad (2-3)$$

式中, g 为重力加速度, $g = 980 \text{cm/s}^2$ 。

为了表示物质的相对重量大小,习惯上取待测物质的重量与同体积 4°C 水的重量作对比,得出的比值叫做比重。比重为一无因次数,其数值与用厘米·克秒单位制表示的物质密度相等。

2.1.1.2 介质黏度

介质在运动时,介质内各流层间产生切应力或内摩擦的特性称为黏度。

介质的黏性存在于实际流体中。液体的黏性由分子间的作用引起,气体的黏性主要由动能不同的分子在流速不同的层间交换引起的。均衡介质的黏性作用力服从牛顿内摩擦定律:

$$F = \mu A \frac{du}{dh} \quad (2-4)$$

$$\text{或} \quad \tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dh} \quad (2-5)$$

式中 F ——流体的内摩擦力, N;

τ ——切应力, Pa;

A ——内摩擦力作用的面积, m^2 ;

$\frac{du}{dh}$ ——流速梯度, $1/\text{s}$;

μ ——牛顿流体动力黏滞系数(动力黏度)或简称黏度 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

流体黏性还可以用动力黏度 μ 和液体密度 ρ 的比值来表示,称为运动黏度,以符号 ν 表示:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2-6)$$

2.1.2 物体在介质中运动受力分析

物体在介质中运动时,作用于物体上的力是重力和阻力。

2.1.2.1 物体在介质中的重力

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

$$G_0 = G - P$$

对于球形颗粒而言,因为 $G = \frac{1}{6} \pi d^3 \delta g$, $P = \frac{1}{6} \pi d^3 \rho g$

$$\text{故} \quad G_0 = \frac{1}{6} \pi d^3 \delta g - \frac{1}{6} \pi d^3 \rho g = \frac{1}{6} \pi d^3 g (\delta - \rho) \quad (2-7)$$

式中 d ——球形直径, m;
 δ ——物体密度, kg/m³;
 ρ ——介质密度, kg/m³;
 g ——重力加速度, m/s²。

将式(2-7)变形后得: $G_0 = \frac{1}{6} \pi d^3 \delta \frac{(\delta - \rho)}{\delta} g$

$$\text{令} \quad g_0 = \frac{\delta - \rho}{\delta} g \quad (2-8)$$

则

$$G_0 = \frac{1}{6} \pi d^3 \delta g_0 = mg_0 \quad (2-9)$$

式中, m 为颗粒质量。

g_0 与 g 一样具有加速度量纲, 称为物体在介质中的加速度。它的大小和方向随 $(\delta - \rho)$ 而定。

当 $\delta > \rho$ 时, g_0 为正值, 颗粒向下作沉降运动; 当 $\delta < \rho$ 时, g_0 为负值, 颗粒向上升起; 当 $\delta = \rho$ 时, g_0 为零值, 颗粒在介质中悬浮。

2.1.2.2 物体在介质中运动时所受的阻力

在重选过程中, 物体在介质中运动时所受的阻力, 由摩擦阻力和压差阻力两部分组成。

(1) 摩擦阻力: 摩擦阻力又称黏滞阻力, 是由于运动着的物体带动周围的流体一起运动, 使得流体自物体表面向外产生一定的速度梯度, 于是在各流层间引起了内摩擦力。所谓摩擦阻力, 即是作用在物体表面所有点的切向作用力在物体运动方向的合力。

(2) 压差阻力: 当流体绕过物体流动时, 由于内摩擦力的作用引起了流体运动状态的变化, 例如在物体背后形成漩涡 (见图 2-1b), 使得运动物体后方的压力下降, 低于物体前方压力, 于是形成压差阻力。所谓压差阻力即是作用在物体表面所有点的法向作用力在物体运动方向的合力。

为了定性反映惯性阻力与黏性阻力的相对大小, 常用一个无量纲数来表示惯性力与黏性力的比值, 这个量纲数称为雷诺数, 用 Re 表示。对于球形颗粒在流体中的运动, 雷诺数定义为:

$$Re = \frac{\rho dv}{\mu} \quad (2-10)$$

式中 v ——颗粒-流体的相对速度;

d ——颗粒直径;

ρ ——流体密度;

μ ——流体黏度。

阻力系数: 若颗粒受到阻力为 R , 阻力系数定义为阻力 R 与惯性力 $\rho d^2 v^2$ 之比:

$$\psi = \frac{R}{\rho d^2 v^2} \quad (2-11)$$

阻力系数是无量纲数。流体阻力通式可表示为:

$$R = \psi \rho d^2 v^2 \quad (2-12)$$