

中等专业学校教学

321
1
3

重力选矿及特殊选矿

昆明冶金工业学校 編

422

冶金工业出版社

327
3
中等专业学校教学用书

重力选矿及特殊选矿

昆明冶金工业学校 編

冶金工业出版社

重力选矿及特殊选矿

昆明冶金工业学校 编

1961年1月第一版 1961年1月北京第一次印刷 4,250册

开本 $787 \times 1092 - \frac{1}{16}$ • 字数250,000 • 印张 13 • 插页 8 • 定价 1.40 元

统一书号 15062 • 2363 冶金工业出版社印刷厂印 新华书店科技发行所发行
各地新华书店经售

冶金工业出版社出版 (地址: 北京市灯市口甲45号)

北京市书刊出版业营业许可证出字第 093 号

內 容 提 要

本書是根据中等专业学校金属矿石精选专业的教育計劃和教育大綱編写而成的。書中讲述了矿粒在介质中的运动規律，及以此为理論基础的各种重力选矿法和設備，以及其他选矿法。

本教材根据中等专业学校的培养目标，理論部分与实际操作部分做了适当的安排，并注意了結合中国的实践，还介紹了簡易重力选矿設備和土法生产。

本書可作为中等专业学校选矿专业学生用教材，亦可供現厂技术人員参考。

目 录

序 言	6
精 论	7
第一章 物体在介质中的沉降规律	12
§ 1 重力和阻力的概念	12
§ 2 物体在介质中的自由沉降速度	15
§ 3 物体在介质中的干涉沉降速度	20
§ 4 等降颗粒、等降比和切巧特图	23
第二章 水力分級过程	28
§ 1 水力分級过程的一般概念	28
§ 2 水力分析法及其应用	31
§ 3 水力分級机械及其操作	33
§ 4 水力旋流器	45
§ 5 机械分級机	51
第三章 洗矿	67
§ 1 洗矿过程的一般概念	67
§ 2 洗矿机械	68
第四章 跳汰选矿法	73
§ 1 跳汰选矿法的理論基础	73
§ 2 跳汰机的构造及其操作	79
第五章 斜槽选矿的理論基础	96
§ 1 水流在傾斜面上的运动	96
§ 2 物体在沿傾斜面流动水流中的运动	97
第六章 溜槽选矿法	102
§ 1 固定溜槽	102
§ 2 可动溜槽	114
§ 3 螺旋选矿机	118
第七章 搖床选矿法	128
§ 1 搖床选矿法的理論基础	128
§ 2 搖床的构造及其操作	130
第八章 重介质选矿法	139
§ 1 重介质选矿的一般概念	139
§ 2 重介质的分类及其性质	140
§ 3 重介质选矿机械	144
第九章 风力选矿法	150

§ 1	概述	150
§ 2	风力分級	150
§ 3	风力选矿机械	153
第十章	重力选矿生产实践	157
§ 1	概述	157
§ 2	鎢矿石的选别实践	160
§ 3	錫矿石的选别实践	166
§ 4	贵金属矿石的选别实践	177
§ 5	用重力选矿法选别某些稀有金属矿石的实践	180
§ 6	黑色金属矿石的选矿	183
§ 7	重介质选矿流程	187
第十一章	按外部特征(颜色及光泽)的选矿法	190
§ 1	手选	190
§ 2	光电选矿	194
第十二章	摩擦选矿法	195
§ 1	摩擦选矿法的作用原理	195
§ 2	摩擦选矿机	197
第十三章	其它选矿法	201
§ 1	按粒度选矿	201
§ 2	按形状选矿	203
§ 3	按硬度选矿	203
§ 4	按强度选矿	204
§ 5	按弹性选矿	204
§ 6	热裂选矿法	206
参考書		207

序 言

几年来，在我们的教学过程中，深感沒有一批适合于我国实际情况的中等专业学校用专业教材，給教学工作带来困难。因此，迫切需要自編一套教材满足当前的需要。我校根据冶金工业部教育司的安排，組織了一批教材的編写工作。本書就是其中之一。

本書的主要对象是中等专业学校选矿专业的学生，亦可作为选矿工程技术人員参考。

本書的理論部分仍以苏联重力选矿教科書和其他专著为基础，实践部分則力求結合我国的生产实践。在編写时也照顧了学生水平，并充分地吸取了我們在几年来教学过程中所积累的点滴經驗。在書中尽量做到了能反映現代重力选矿的发展情况和我国重力选矿生产过程的特点，考虑了适合于我国情况的土法生产。例如，在書中用了較大的篇幅来討論水力旋流器、螺旋选矿机和一些处理細泥的土法溜槽。此外，書中还将重力选矿生产实践作为专章列出，并以錫和鉛的选矿作为重点，这样就更加适合于我国的实际情况。

在內容的深度和广度方面，書中遵循着以下原則：中等专业学校的教科書与大学教科書不同之处在于在理論方面，偏重于說明和建立物理概念，但也不排除必要的和基本的公式推导；在实际工作方面，对于机械设备的构造和性能不少于大学教科書，而在設備操作与維護方面應該較詳細，設計知識則适当減少。

为了使本書的适用范围更广一些，書中所包括的內容比中等专业学校选矿专业“重力选矿法”教学大綱中所要求的略微多了一些，但亦照顧到教师在备课和讲授过程中删減的方便，不致由于删去个别部份而影响到整个內容的系统性。

由于参加編写工作的教师水平不高，經驗不足，在內容上錯誤和缺点在所难免，希望讀者能从各方面給我們提出批評和指正，以供我們作进一步的修改。

本書編写过程承云南錫业公司各选矿厂大力支持并供給許多有关的資料，又承該公司尹继泰工程师全面审阅且提出宝贵的意見，在此特表謝意。

本書初稿完成后又經湖南冶金学院提出宝贵意見，一併在此致謝。

緒 論

重力选矿法是一种历史悠久的有用矿物机械加工的方法。和其它选矿法一样，其任务是将矿石中的有用矿物和脉石分离，以得出符合冶炼要求或便于下一步加工的产品。在选矿过程中力图以最简单最经济的方法获得优质的精矿和最高的金属回收率。

重力选矿是根据矿粒的比重和粒度不同来进行分选的，在一定程度上尚与矿粒的形状有关。

重力选矿过程是在介质中进行的。用于重力选矿的介质有水、空气、重液和重悬浮液。在选别过程中介质的动力作用有极其重要的意义。介质对物体运动的阻力，即水动力学或气体动力学的规律，是重力选矿过程的主要规律。

矿粒在介质中的运动，是由其本身的重力和介质对矿粒的阻力的合力来支配的。不同的矿粒，由于它们的比重、粒度或形状不同，在介质中的运动规律也不相同。借此即可达到分离的目的。

重力选矿的难易程度通常可近似地用公式 1 或公式 2 来表示：

$$e_1 = \frac{\delta_2 - \Delta}{\delta_1 - \Delta} \quad (1)$$

$$e_2 = \delta_2 - \delta_1 \quad (2)$$

式中： e_1 和 e_2 ——选矿难易程度；
 δ_1 ——轻矿物的密度；
 δ_2 ——重矿物的密度；
 Δ ——介质的密度。

e_1 和 e_2 的数值愈大，则表明愈容易选别。一般按 e_1 和 e_2 的数值将选别过程分为极易、易、中等、难和极难等五种情况，见表 1。

表 1

选别过程的难易程度

难易程度	极 易	易	中 等	难	极 难
e_1	>2.5	2.5~1.75	1.75~1.5	1.5~1.25	<1.25
e_2	>1.5($\delta_1 - \Delta$)	(1.5~0.75) ($\delta_1 - \Delta$)	(0.75~0.5) ($\delta_1 - \Delta$)	(0.5~0.25) ($\delta_1 - \Delta$)	<0.25($\delta_1 - \Delta$)

由公式 1 和公式 2 中可以看出，当 δ_1 小或 δ_2 大时选别是较易进行的，这说明重力选矿法只适用于有用矿物与脉石比重差较大的情况。从以上二式中尚可看出 Δ 加大可使 e_1 加大，说明加大介质比重可改善选别效果。由公式 1 可知，当 Δ 趋近于 δ_1 时，也就是说使介质的密度接近于轻矿物的密度时，则 e_1 趋向于无穷大，这时对选别过程是极其有利的。重介质选矿法即根据此原理来进行选别的。

在选别过程中，矿粒群相互间的摩擦与碰撞对矿粒的运动亦起着重大的影响。

重力选矿过程本身可分成以下几部分：水力分级、洗矿、跳汰选矿、溜槽选矿、筛

主要矿物的物理性质表

矿 物	化 学 成 份	晶 系	硬 度	比 重	形状与构造
石棉	$\text{Ca}(\text{MgFe})_3(\text{SiO}_4)_3$	单 斜	5~6	2.9~3.4	纤维状
蓝铜矿	$2\text{CuCO}_3 \cdot (\text{OH})_2$	单 斜	3.5~4	3.8	土状结晶
金刚石	C	等 轴	10	3.5	浑圆状结晶
钠长石	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	单 斜	7	2.62~2.65	片状结晶
硫酸铅矿(铅矾)	PbSO_4	斜 方	3	6.12~6.39	粒状结晶
磷灰石	$(\text{Cl}, \text{F})\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3$	斜 方	5	3.17~3.23	块状结晶
钟黄铁矿	FeAsS	斜 方	5.5~6	5.9~6.2	粒状结晶
雄黄	As_2S_3	单 斜	1.5~2	3.4~3.6	结晶性脆
重晶石	BaSO_4	斜 方	3~3.5	4.3~4.6	粒状
绿宝石	$\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_6$	六 方	7.5~8	2.63~2.80	粒状结晶
黑云母	$(\text{H}, \text{K})_2(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$	单 斜	2~3	2.7~3.1	片柱状
羟矾土	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	单 斜	2~3	2.25	土粒状
斑铜矿	$\text{Cu}_2\text{S} \cdot \text{CuSFeS}$	斜 方	3.5	4.5~5.4	致密粒状
硼砂	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	单 斜	2~2.5	1.7	多孔性结晶
锰土	Mn, Co, Cu 氧化混合物	—	—	4.5~5	致密土状
硅铈矿	Zn_2SiO_4	六 方	5.5	3.9~4.2	粒状
毒重石	BaCO_3	斜 方	3~3.5	4.27~4.35	土粒状
自然铋	Bi	六 方	2.5	9.8	柱粒状
辉铋矿	Bi_2S_3	斜 方	2~2.5	6.4~6.5	粒状
铋华	Bi_2O_3	斜 方	2~2.5	4.36	土状
铜铋铁矿	$(\text{Fe}, \text{Mn})\text{WO}_4$	正 方	4.5~5	7.2~7.5	块状结晶
赤铁矿	Fe_2O_3	斜 方	5.5~6.5	4.9~5.3	致密粒状
水锌矿	$\text{ZnCO}_3 \cdot 2\text{Zn}(\text{OH})_2$	六方, 斜方	2~2.5	2.58~3.8	土状
石膏	$\text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	单 斜	1.5~2	2.31~2.33	致密纤维状
石榴子石	$\text{R}_3\text{R}_3(\text{SiO}_4)_3$	等 轴	6.5~7.5	3.5~4.2	粒状结晶
石墨	C	六 方	1~2	2.1~2.2	致密土状
白云石	$\text{Ca}, \text{Mg}(\text{CO}_3)_2$	六方, 斜方	3.5~4	2.8~2.9	致密土状
自然金	Au (混有 Ag, Fe, Cu)	等 轴	2.5~3	15.6~19.3	树枝状结晶
钛铁矿	FeTiO_3	六方, 斜方	5~6	4.5~6	片状结晶
钾盐矾矿	$\text{MgSO}_4 \cdot \text{KCl} + 3\text{H}_2\text{O}$	单 斜	2.5~3	2.05~2.2	致密粒状
臭极矿	$(\text{ZnOH})_2\text{SiO}_2$	斜 方	5	3.4~3.5	纤维状结晶
碲金矿	$(\text{Au}, \text{Ag})\text{Te}$	斜 方	1.5~2	9.04	致密粒状
方解石	CaCO_3	六 方	3	2.7	土状结晶
高岭土	$\text{H}_4\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_9$	六 方	2~2.5	2.6	土状
石盐	NaCl	等 轴	2.5	2.4~2.6	粒状结晶
石英	SiO_2	六 方	7	2.6	致密结晶
角银矿	AgCl	等 轴	1~1.5	5~5.5	粒状结晶
辰砂	HgS	六 方	2.25	8~8.2	致密结晶
辉砷钴矿	CoAsS	等 轴	5.5	6.0~6.3	致密粒状
铜蓝	CuS	单 斜	1.5~2	4.6~4.65	土粒状
刚玉	Al_2O_3	六 方	9	3.95~4.10	粒状结晶
冰晶石	$3\text{Na}_2\text{FAI}_2\text{F}_6$	斜 方	2.5~3	2.9~3	片粒状
赤铜矿	Cu_2O_3	等 轴	3.5~4	5.85~6.15	结晶
褐铁矿	$\text{Fe}_3(\text{OH})_6\text{FeO}_3$	斜 方	5~5.5	3.6~4	致密粒状
菱铁矿	MgCO_3	六 方	3.5~4.5	3~3.1	致密膏状

續表 2

矿 物	化 学 成 份	晶 系	硬 度	比 重	形状及构造
磁铁矿	Fe_3O_4	等 轴	5.5~6.5	4.9~5.2	粒状结晶
孔雀石	$Cu_2(OH)_2CO_3$	单 斜	3.5~4	3.9~4	放射肾状
水锰矿	$Mn(OH)_2Mn_2O_3$	斜 方	4	3.7~4.7	粒状结晶
白铁矿	FeS_2	斜 方	6~6.5	4.6~4.9	针状结晶
辉铜矿	Cu_2S	斜 方	2.5~3	5.5~5.8	致密针状
自然铜	Cu	等 轴	2.5~3	8.8~8.9	树枝粒状
土状黑铜矿	CuO	无 定 形	—	8	土状
钼华	MoO_3	斜 方	1~2	4~5	土状
辉钼矿	MoS_2	六 方	1~1.5	4.7~4.8	片状结晶
独居石	$(Ce, La)PO_4$	单 斜	5~5.5	4.9~5.3	粒状结晶
白云母	$(H, K)AlSi_3O_{10}$	单 斜	2~2.5	2.8~3	片状
刚玉粉	見刚玉	单 斜	—	—	—
辉镍矿	NiS	斜 方	3.5	5.3~5.85	放射状
氧化铋	Bi_2O_3	斜 方	2~2.5	4.36	土状
橄榄石	$(Mg, Fe)_2SiO_4$	斜 方	6.5~7	3.3~3.6	致密粒状
锡石	SnO_2	正 方	6~7	6.8~7.1	粒状结晶
正长石	$KAlSi_3O_8$	单 斜	6~6.5	2.5~2.6	块状
铍华	BeO (混合 Rh, Pt, Ru 等)	六 方	6~7	19~21	片粒状
铁华	Fe_2O_3 或 $(FeOH)_2Fe_2O_3$	六 方	—	4	土状
黄铁矿	FeS_2	等 轴	6~6.5	4.95~5.10	粒状结晶
辉石	$Ca(Mg, Fe)(SiO_3)_2$	单 斜	5~6	3.2~3.6	结晶
软锰矿	MnO_2	斜 方	1~2.5	4.7~4.8	针片状
磁黄铁矿	$Fe_{11}S_{12}$	六 方	3.5~4.5	4.5~4.6	致密粒状
自然铂	$Pt(Fe)$	等 轴	4~4.5	14~19	针粒状
斜长石	$nNaAlSi_3O_8 + mCaAl_2Si_2O_8$	三 斜	5~7	2.6~2.7	块状结晶
淡红银矿	Ag_3AsS_3	六 方	2~2.5	5.6~5.7	棱状、隐性
硬锰矿	$MnO_2 \cdot BaO \cdot H_2O$	六 方	5~6	4.5~5	肾块状
雄黄	As_4S_2	单 斜	1.5~2	5.9~6.1	粒状
普通角闪石	$(Ca, Fe, Mg)(SiO_3)_2$	单 斜	5~6	2.9~3.4	柱状结晶
蔷薇辉石	$MnSiO_3$	三 斜	6~6.5	3.4~3.7	片状
菱锰矿	$MnCO_3$	六 方	4.5	3.5~4.5	粒状结晶
红宝石	見刚玉	六 方	—	—	—
金红石	TiO_2	正 方	6~6.5	4.1~4.2	结晶
蓝宝石	見刚玉	正 方	—	—	—
方铅矿	PbS	等 轴	2.5	7.4~7.6	粒状结晶
自然硫	S	斜 方	1.5~2.5	2~2.1	土状结晶
辉银矿	Ag_2S	等 轴	2~2.5	7.4~7.8	片状结晶
蛇纹石	$H_4Mg_2Si_2O_9$	等 轴	3~4	2.5~2.6	致密片状
菱铁矿	$FeCO_3$	六 方	3.5~4	3.8~3.9	块状结晶
菱锌矿	$ZnCO_3$	六 方	5	4.3~4.5	多孔性块状
锶辉石	$LiAl(SiO_3)_2$	单 斜	6.5~7	3.1~3.2	柱片状
黄铜矿	$(Cu, Sn, Fe)S$	等 轴	4	4.5	致密粒状
辉铋矿	Sb_2S_3	斜 方	2	4.5	粒柱状
自然铋	$Sb(Ag, Fe)$	六方, 斜方	3~3.5	6.6~6.8	放射粒状
滑石	$H_2Mg_3(SiO_3)_4$	斜 方	1~1.5	2.5~2.9	片状
黑铜矿	見土状黑铜矿	斜 方	—	—	—

續表 2

矿 物	化 学 成 份	晶 系	硬 度	比 重	形状及构造
磁铁矿	$Cu_3Sb_2S_7$	等 轴	3~4.5	4.5~5.1	粒状结晶
石榴石	Ca_3SiTiO_5	单 斜	5~5.5	3.4~3.5	片块状
黄晶	$Al_{12}Si_6O_{25}Fe_{10}$	斜 方	8	3.4~3.6	柱状结晶
透闪石	昆普通角闪石	—	—	—	—
电气石	$R_{13}B_2(OH)_3Si_4O_{19}$	六 方	7~7.5	2.98~3.2	柱状
煤	O+O+N+H	六 方	—	1.2~1.8	—
斜铁尖晶石	$(Zn, Mn)Fe_2O_4$	等 轴	6~6.5	5~5.2	致密粒状
萤石	CaF_2	等 轴	4	3~3.2	结晶,
黄铜矿	$CuFeS_2$	正 方	3.5~4.1	4.1~4.3	结晶
矽孔雀石	$CuSiO_3+2H_2O$	正 方	2~4	2~2.3	致密
铬铁矿	$FeCr_2O_4$	等 轴	5.5	4.3~4.6	致密粒状
白铅矿	$PbCO_3$	斜 方	3~3.5	6.5~6.6	片状结晶
闪锌矿	ZnS	等 轴	3.5~4	3.9~4.2	粒状结晶
红锌矿	ZnO	六 方	4~4.5	5.4~5.7	致密粒状
锆石	$ZrSiO_4$	三 斜	7.5	4.7	圆柱状
白钨矿	$CaWO_4$	三 斜	4.5~5	5.9~6.1	致密柱状
尖晶石	$MgAl_2O_4$	等 轴	8	3.5~4.5	结晶
硫磺铜矿	$CuAsS_4$	斜 方	3	4.4	粒状结晶
绿帘石	$Ca_2(Al, Fe)_2(O, OH)(SiO_4)_3$	单 斜	6~7	3.2~3.5	针状

床选矿、重介质选矿、风力分级、风力跳汰选矿和风力摇床选矿。

重力选矿法在选别前准备作业和选矿产品的处理作业的要求原则上与其它选矿法所要求的相同，但具有它自己的特殊性。例如，在对磨矿产品粒度均一性的要求较其它选矿法更加严格，而在产品的脱水方面则较为简单。

重力选矿法虽然是一种比较古老的选矿方法，但迄今仍有着广阔的前途，尤其在铜、锡、钨和贵金属（金和铂）更显得非常重要。在选煤方面重选法更是一个重要的选矿方法。在有色金属和黑色金属选矿方面有些情况下亦需要联合采用重力选矿法。

我国很早就建立了重力选矿厂。但在解放前由于国民党的黑暗统治，这些重力选矿厂只是作为帝国主义掠夺我国资源的一种工具。它们利用我国廉价的劳动力，使用的设备是非常落后，加之管理上的腐败和混乱，生产极端落后，工作条件异常恶劣，以至长期以来我国选矿工业和其它工业一样处于极端落后的状态。

解放后的十年里全国人民在伟大的中国共产党的领导下，迅速地恢复了一些旧有选矿厂，从根本上改变了企业的面貌，使得这些旧选矿厂在我国经济恢复时期就对国民经济的发展起了一定的作用。在这个时期内也开始建立了新的选矿厂，这些选矿厂在技术上和装备上都是比较先进的，对我国选矿工业的发展起着积极的作用。

在发展国民经济的第一个和第二个五年计划期间，选矿工业和其它工业一样得到了巨大的发展，建设了许多新型的高度机械化的选矿厂。这些企业都成了我们选矿工业的骨干力量。

中国共产党八届二次会议提出的鼓足干劲、力争上游、多快好省地建设社会主义的总路线，大大地鼓舞了全国人民。在总路线的光照耀下，和党的一整套两条腿走路的

方針指导下，我国选矿工业和其它工业一样得到了空前巨大的发展。在党的领导下，全国选矿工作者发扬了敢想敢说敢做的共产主义风格，創造了许多选矿设备，其中包括以最新科学成就为基础的选矿设备，和适合于不同具体条件的各种半土半洋的设备。

目前，我国选矿科学技术以世界上空前未有的高速度向前飞跃，完全可以預計在今后的年代中选矿工业将会得到更大更全面的跃进。

第一章 物体在介质中的沉降规律

§ 1 重力和阻力的概念

重力选矿过程中，作用在矿粒上的力主要有重力和阻力两种。矿粒的运动亦受该二力的影响。

在地球引力场内，物体受到引力的作用。单位质量所受的引力在数值上与重力加速度 g 相等。在地面附近较小的空间内， g 的数值和方向都可以看成是不变的。在真空中，物体所受的引力与物体的重力相等。在某种介质中，物体的重力根据阿基米德原理可用下式表示：

$$W = G - G_0, \tag{3}$$

式中： W ——物体在介质中的重力；

G ——物体的绝对重量（即在真空中的重量）；

G_0 ——与该物体同体积的介质重量。

公式 3 中

$$G = V\delta g;$$

$$G_0 = V\Delta g;$$

所以

$$W = V\delta g - V\Delta g = V(\delta - \Delta)g = V\delta \frac{\delta - \Delta}{\delta} g, \tag{4}$$

式中： V ——物体的体积；

δ ——物体的密度；

Δ ——介质的密度；

g ——重力加速度。

公式 4 又可写成如下形式：

$$W = mg_0, \tag{5}$$

式中： $m = V\delta$ ——物体的质量；

$g_0 = \frac{\delta - \Delta}{\delta} g$ ——物体在介质中的初加速度。

在介质中，物体的初加速度 g_0 的大小和方向同 δ 和 Δ 的大小有关。

如果 $\delta > \Delta$ ，则 g_0 为正，方向朝下；

$\delta < \Delta$ ，则 g_0 为负，方向朝上；

$\delta = \Delta$ ，则 g_0 为零，物体悬浮；

当两种不同比重的物体在介质中沉降时，

$\Delta = \text{常数}$ ，如 $\delta_2 > \delta_1$ ，则 $g_{02} > g_{01}$ 。

在介质中运动的物体受到的介质阻力，系由所谓惯性阻力（或称动力阻力）和摩擦阻力（或称粘性阻力）所组成。这两种阻力同时作用于物体上，但在不同的情况下，其大小各不相同。实验证明，当物体运动速度和尺寸较大时，惯性阻力占优势，而当物体的运动速度不大且尺寸较小时，则摩擦阻力占优势。这两种阻力的综合作用是很复杂的，目前还没有完整的解析公式，因此对每种阻力必须分别加以研究，然后才来讨论它们相互间的关系。

液体的运动形态可以分为层流运动和紊流运动两种。液体在作层流运动时，液体的流綫是相互平行互不相扰的。液体质点只有与液流方向一致的运动，而没有与液流方向垂直的运动。各层液体之间，没有质量的交换。液体在作紊流运动时，液体的流綫是杂乱无章的。液体质点除作与液流方向一致的运动外，还有与液流方向垂直的运动。各层液体之间有质量的交换。液体的流动形态与液体的流速、密度以及容器的尺寸有关。通常用无因次参数Re数值的大小来衡量液体的流动形态。Re称为雷诺数，可用公式6表示，即

$$Re = \frac{dV\Delta}{\mu}, \quad (6)$$

式中：V——液体的流速；
Δ——液体的密度；
μ——液体的粘性；
d——容器的尺寸。

上面所指的容器的尺寸是广义的。对管流来说，d代表管径；对在液体中沉降的球形物体，d代表球形物体的直径。

球形物体在介质中的运动形态如图1所示

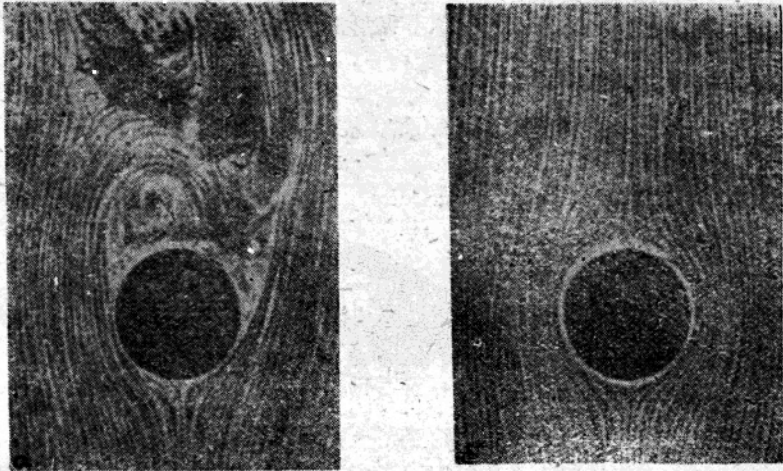


图1 球形物体在介质中的运动形态

a—紊流运动；b—层流运动

如图所示,物体在介质中沉降时,介质在它周围流过。在物体表面上形成了一层极薄的介质层。尺寸小的物体以較低的速度沉降。此时,介质平滑地流过物体,介质的流綫是平滑而連續的。介质在物体的前面和后面的流动形态几乎是对称的。介质的阻力主要为消耗在移动介质层的力,即所謂摩擦阻力(物体沉降中的能量消耗用于克服介质的粘性)。尺寸較大的物体具有較大的沉降速度。此时,介质不是平滑地流动,只有在远离物体处,流綫才是連續的。物体后面所受到的介质静压力較其正面受到的要小。这样在物体两面就形成了介质的压力差。介质在物体前面和后面的流动状态是不对称的。此时介质的阻力主要是慣性阻力,物体沉降时的能量主要消耗于克服介质的慣性。

当物体尺寸較小且物体对介质的相对速度不大,或 Re 值較小时,介质呈层流运动,介质的慣性力可以完全忽略不計。因此,介质对物体运动的阻力仅考虑介质本身质点間內部彼此的摩擦力,并且設想介质和物体間沒有滑动,即在物体周围好像形成微細不动的介质层。英国物理学家斯托克斯导出了作用在球形物体上的摩擦阻力公式,如公式 7:

$$P_{st} = 3\pi\mu dV, \quad (7)$$

- 式中: P_{st} ——介质对球体的摩擦阻力;
 μ ——介质的动力粘性系数;
 d ——球体的直径;
 v ——球体对介质的相对速度。

从公式 7 可以看出,当摩擦阻力占优势时,介质对物体的阻力与速度和直径的一次方成正比。另外必須指出公式 6 仅适用于球形物体,对非球形物体必須加以修正。

当物体尺寸較大,物体对介质的相对速度較大,或 Re 值較大时,介质呈紊流运动。在物体的表面,特别是后面会发生漩涡。在这种情况下,物体的动能主要是消耗于克服介质的慣性。因此介质对物体的阻力主要考虑为慣性阻力,而摩擦阻力可忽视不計。由德国科学家雷廷智提出經匈牙利科学家芬基所修正的計算介质对球形物体的慣性阻力公式,如公式 8:

$$P_R = \frac{1}{3} \frac{\pi d^2}{4} \Delta V^2, \quad (8)$$

- 式中: P_R ——介质对球体的慣性阻力;
 Δ ——介质的密度;
 d ——球体的直径;
 v ——球形对介质的相对速度。

从公式 8 可以看出,当慣性阻力占优势时,介质对物体的阻力与速度和直径的平方成正比。与公式 7 相同,公式 8 只适用于球形物体。

显然,公式 7 和公式 8 在使用的时候都有其局限性。只有在摩擦阻力占优势时,公式 7 才适用;只有在慣性阻力占优势时,公式 8 才适用。究竟是那种阻力占优势,可用 P_{st} 和 P_R 的比值来衡量。

由公式 7 和公式 8 得:

$$\frac{P_R}{P_{st}} = \frac{\frac{1}{3} \frac{\pi d^2}{4} \Delta d}{3\pi\mu dV},$$

所以

$$\frac{P_R}{P_{st}} = \frac{dV\Delta}{36\mu}, \quad (9)$$

在公式9中，当 $dv\Delta > 36\mu$ ，则 $P_R > P_{st}$ 。在这种情况下，惯性阻力占优势。当 $dv\Delta < 36\mu$ 时，则 $P_{st} > P_R$ 。此时摩擦阻力占优势。当 $P_R = P_{st}$ 时，即：

$$\frac{dv\Delta}{\mu} = 36 = Re, \quad (10)$$

由上述可知雷诺数 Re 不同，阻力的型式也不同，也就是说流动形态不同，则阻力也不同。

对既不适合用摩擦阻力公式，又不适合用惯性阻力公式的中间情况，A. 阿达提出了另一阻力公式，如公式11：

$$P_A = \frac{10}{\sqrt{Re}} \frac{\pi d^2}{4} \frac{v^2 \Delta}{2}, \quad (11)$$

式中： P_A ——介质对球体的阻力。

综上所述，我们知道物体在介质中的运动是受重力和阻力所支配的。重力与物体的大小、密度和介质的密度有关，而阻力则与物体的大小、运动速度、介质粘性及密度有关。

应该指出的是，重力与阻力是互相影响和互相制约的，认识二者间的关系，对进一步分析物体在介质中的运动具有重要的意义。

§ 2. 物体在介质中的自由沉降速度

从公式4中可知，当 $\delta \approx \Delta$ 时，物体在介质中受阻力和重力的合力的作用发生运动。在下面研究物体在介质中的运动时，除特别指出外，均考虑物体向下运动的情况，即当 $\delta > \Delta$ 时的情况。

另外，在本节中，我们仅讨论单个物体在无限的介质中运动的情况。在该情况下，物体的沉降仅受介质的阻力和物体的重力的影响，而没有另外的物体对它直接和间接产生的机械阻力。在这种情况下下的沉降称为自由沉降。显然，物体的自由沉降速度，仅与介质和物体本身的性质有关。

和自由沉降的情况相反，在实际过程中，往往是物群在有限介质中运动。在这种情况下下，物体沉降除受介质阻力和物体的重力的影响外，还受到其它物体和器壁的影响。此时，物体的沉降称为干涉沉降。

在生产过程中，真正的自由沉降是不存在的，但当液固比大于8或在同一水平面上各物体最大截面积之和，小于或等于该截面面积的3%时，可以算做是自由沉降，在这种情况下，运用自由沉降的规律来分析物体的运动与实际情况相当接近。

物体在介质中运动时的微分方程式可以写成公式12的形式:

$$m \frac{dv}{dt} = W - P \quad (12)$$

式中: m ——物体的质量, 对球体, $m = \frac{\pi d^3}{6} \delta$;

v ——物体的沉降速度;

t ——时间;

W ——物体的重力;

P ——介质的阻力。

按公式4:

$$W = V(\delta - \Delta)g,$$

对球形物体,

$$W = \frac{\pi d^3}{6} (\delta - \Delta) g, \quad (13)$$

对适应于摩擦阻力公式的情况, 即 $P = P_{st} = 3\pi\mu dv$ 时, 则公式12对球形物体可写成:

$$\frac{\pi d^3}{6} \delta \frac{dv}{dt} = \frac{\pi d^3}{6} (\delta - \Delta) g - 3\pi\mu dv,$$

两边除以 $\frac{\pi d^3}{6} \delta$ 得:

$$\frac{dv}{dt} = \left(\frac{\delta - \Delta}{\delta} \right) g - \frac{18\mu v}{d^2 \delta} \quad (14)$$

由前节可知 $\left(\frac{\delta - \Delta}{\delta} \right) g = g_0$, 称为物体在介质中的初加速度。当物体在介质中开始沉降的瞬间, $V = 0$, 从公式14得知物体是以初加速度 g_0 向下运动的。随着物体的加速运动, V 不断加大, 而加速度逐渐减小, 最后到物体的加速度为零时, 物体以等速向下沉降, 此时:

$$\frac{dv}{dt} = \left(\frac{\delta - \Delta}{\delta} \right) g - \frac{18\mu v_0}{d^2 \delta} = 0 \quad (15)$$

式中: v_0 ——物体在介质中沉降末速度。

由公式15:

$$\left(\frac{\delta - \Delta}{\delta} \right) g = \frac{18\mu v_0}{d^2 \delta},$$

所以

$$v_0 = \frac{g}{18} \left(\frac{\delta - \Delta}{\mu} \right) d^2,$$

若令

$$K_{st} = \frac{g}{18}$$