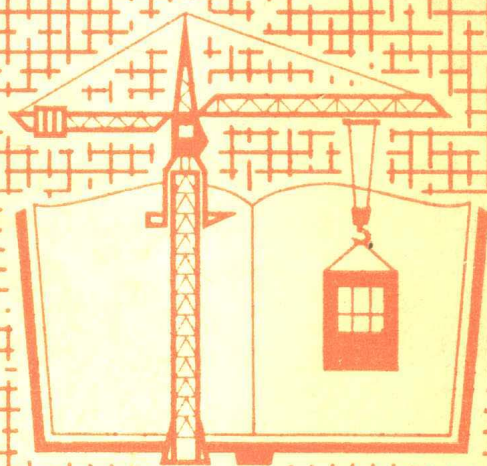


玻璃生产机械过程

上海化工学院
浙江大学 编



高等学校试用教材

中国建筑工业出版社

高等学校试用教材

玻璃生产机械过程

上海化工学院 编
浙江大学

中国建筑工业出版社

本书分粉体工程基础和玻璃成形工程基础两大部分。粉体工程部分，主要以粉体工程学的基本概念来阐述玻璃原料的加工和配合料制备的机械过程与设备；玻璃成形工程部分，主要以传热学和流变学的概念来阐述玻璃成形过程中的各种性质和成形设备。

高等学校试用教材
玻璃生产机械过程
上海化工学院 编
浙 江 大 学

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

*

开本：787×1092毫米 1/16 印张：26³/₄ 字数：653 千字
1980年7月第一版 1980年7月第一次印刷
印数：1—2,640 册 定价：2.75元
统一书号：15040·3896

前 言

本书系高等院校玻璃专业试用教材。书中的第一部分主要以粉体工程学的基本概念来阐述玻璃原料加工与配合料制备方面的单元机械过程与设备；第二部分则以传热学和流变学的概念来讨论玻璃成形方面的机械过程。对于玻璃机械设备的教学，着重加强生产过程的基础理论，适当减少一般性机械设备结构的叙述。总之，本教材的特点是在突出学科性的基础上，以机理的理论阐述为主要内容。

粉体工程学是一门新兴的工程学科，它以粉体力学和表面物理学等为基础，从单个粒子、粒子集合体性质和固液、固气界面现象着手，研究粉体工程上的粉碎、粒化、分离、分级、干燥、过滤、收尘、混合、贮存、给料、气力输送、流态化以及粉体过程测量等。

从传热学和流变学的角度来研究玻璃成形的工程问题，是近一、二十年来的技术动向。它对玻璃成形机的设计与使用，都是值得重视的。

本书由上海化工学院杨伦主编。浙江大学王仁柞编写第二、三、七章，浙江大学倪光裕编写第八章的第一、二节，上海化工学院颜维生编写第十二章，上海化工学院郑金标编写第十三章，姚国兴提供了第十五章的部分初稿，其余章节由杨伦编写。全书由蒋文达主审。在编审过程中，还得到了蚌埠玻璃工业设计院、上海玻璃机械厂、上海耀华玻璃厂、上海玻璃厂、齐齐哈尔轻工学院和武汉建材学院等单位的支持，谨致谢意。

本书在内容和编排上尚属新的尝试，限于编者水平，错误与不妥之处，请读者指正。

编 者

1979月11月

目 录

上篇 粉体工程基础

第一章 粉体的基本性质	1	4-3 筛分作用	95
1-1 概述	1	4-4 粉碎筛分流程类型	96
1-2 粒度分布	3	4-5 量流程计算	97
1-3 填充性质	13	第五章 选矿	101
1-4 形状性质	15	5-1 概述	101
1-5 摩擦角	16	5-2 重力选矿	102
1-6 附着性质	20	5-3 擦洗选矿	104
1-7 流动性质	21	5-4 磁力选矿	105
1-8 在流体中的运动性质	24	5-5 浮游选矿	109
1-9 对材料的磨损性质	29	第六章 贮料	120
附表——标准筛制(对照表)	34	6-1 贮料的分类与作用	120
第二章 粉碎	37	6-2 仓内粉体的重力流动	121
2-1 基本概念	37	6-3 料仓计算	126
2-2 被碎物料的主要物理性质	39	6-4 分料	131
2-3 粉碎过程机理	41	6-5 助流	133
2-4 粉碎功耗计算	43	第七章 机械输送与给料	139
2-5 粉碎机分类	46	7-1 概述	139
2-6 颧式破碎机	48	7-2 带式输送机	141
2-7 对辊式破碎机	55	7-3 螺旋输送机	148
2-8 锤式破碎机	59	7-4 埋刮板输送机	152
2-9 反击式破碎机	63	7-5 振动输送机	154
2-10 笼式粉碎机	65	7-6 斗式提升机	155
2-11 球磨机	66	7-7 溜管	159
2-12 自磨机	69	7-8 给料装置	161
第三章 筛分	72	7-9 电磁振动式给料机	163
3-1 筛分效率	72	附表——几种粉粒料的体积密度、休止角 和摩擦系数	170
3-2 筛面	72	第八章 气力输送	172
3-3 筛分机理	74	8-1 气力输送的类型与特点	172
3-4 筛分处理能力	75	8-2 进料装置	175
3-5 筛分机的分类	77	8-3 栓流气力输送	177
3-6 回转筛(筒筛)	79	8-4 管内气固两相流原理	181
3-7 摇动筛和旋动筛	80	8-5 低压压送与低真空吸送的计算	184
3-8 振动筛	81	8-6 高压压送与高真空吸送的计算	190
3-9 弧形筛	85	8-7 栓流气送的压力损失	194
3-10 摩根森筛	86	第九章 称量	199
第四章 粉碎筛分流程的选择与计算	89	9-1 概述	199
4-1 物料的粒度分布特性	89	9-2 误差理论	199
4-2 粉碎段数	94		

9-3 力的杠杆传递.....	201	12-1 概述.....	257
9-4 力的平衡与转换计量.....	204	12-2 湿空气的性质.....	257
9-5 间歇称量.....	211	12-3 湿空气的湿度图.....	260
9-6 连续称量.....	217	12-4 干燥计算.....	262
第十章 混合	221	12-5 物料含水性质.....	265
10-1 概述.....	221	12-6 干燥机理.....	266
10-2 混合程度.....	223	12-7 干燥设备种类.....	270
10-3 均匀度的测定.....	225	12-8 转筒干燥.....	271
10-4 混合原理.....	228	12-9 气流干燥.....	273
10-5 重力式混合机.....	234	12-10 沸腾干燥.....	275
10-6 强制式混合机.....	236	12-11 红外线干燥.....	277
10-7 气力混合.....	239	附图——湿空气的 I-X 图.....	279
10-8 连续混合.....	242	第十三章 收尘	280
第十一章 粒化	247	13-1 概述.....	280
11-1 概述.....	247	13-2 扬尘机理.....	281
11-2 水分的形态与作用.....	248	13-3 防尘方法.....	283
11-3 粉料与粘结剂对粒化的影响.....	251	13-4 收尘机理.....	285
11-4 粒化过程.....	252	13-5 旋风分离器.....	288
第十二章 干燥	257	13-6 袋式收尘器.....	293

下篇 玻璃成形工程基础

第十四章 玻璃成形概论	297	17-4 瓶罐成形.....	345
14-1 玻璃的成形性质.....	297	17-5 胆壳成形.....	353
14-2 玻璃的高温传热性质.....	299	17-6 轻瓶成形.....	355
14-3 玻璃的流变性质.....	303	第十八章 模具	359
14-4 机械化成形方法.....	305	18-1 结构.....	359
第十五章 延续成形机组	307	18-2 设计.....	361
15-1 垂直引上机组.....	307	18-3 材料.....	375
15-2 平拉法与浮法成型装置.....	314	18-4 粘附与润滑.....	385
15-3 压延机.....	316	18-5 清洗.....	392
15-4 水平拉管机.....	317	第十九章 模成形传热原理	397
15-5 垂直拉管机.....	319	19-1 传热过程.....	397
第十六章 延续成形的力学与传热学原理	320	19-2 温度分布.....	398
16-1 垂直引上玻璃平板的力学与传热学原理.....	320	19-3 料温测定.....	400
16-2 垂直拉制玻璃管时的热交换过程.....	324	19-4 模温测定.....	402
第十七章 模成形机组	330	19-5 相似理论及模型法的成形测温应用.....	404
17-1 概述.....	330	19-6 玻璃内的传热.....	406
17-2 供料.....	336	19-7 玻璃与模壁间的传热.....	410
17-3 导料.....	340	19-8 模壁传热.....	412
		19-9 模壁面与周围介质间的传热.....	415
		19-10 传热与成形时间.....	419

上篇 粉体工程基础

第一章 粉体的基本性质

1-1 概 述^{[1][2]}

1-1-1 粉体的种类

一般，常将粉体按其大小划分成两大类：小于1毫米的为粉料，而大于1毫米的为粒料，统称为粉粒料。

在玻璃生产过程中，原料加工与配合料制备所涉及的工作对象就是各种粉粒料。它们由许多固体粒子集聚而成。由于粉粒料具有某些流体行为，还有一些独特性质，所以有必要把它看作为一种体系来进行研究。粉粒料的存在状态不外有下列四种：固-固、气-固、液-固以及液-气-固。

根据形成粉粒料的原因，可以将粉粒料分成三大类：天然粉粒料、人工粉粒料、工业粉尘。

在玻璃生产过程中所用粉料的粒子大小，一般范围为0.5~1.2毫米，而工业粉尘的尺寸范围则为500~0.05微米。

1-1-2 粉体化意义

所谓粉体化是将粒子的尺寸进行缩减，所以粒子大小是粉粒料的最主要的特征。粉料的特性大半与粒子的大小有关。将固体原料粉体化，其目的有化学的与机械物理的两个方面。具体讲，粉体化的意义为：

一、增快反应速度 在玻璃配合料的熔化场合下，粒子间的接触表面积是影响熔化反应速度的重要因素之一。单位质量粉料的总表面积称谓比表面积。细粉料的粒子大小往往采用比表面积来表示，见表1-1。关于粒子大小对玻璃配合料熔化速度的影响参见表1-2。

粉料的比表面积		表 1-1
粉	料	比表面积 (米 ² /克)
玻璃配合料(平均)		~0.06
石英砂(0.1毫米)		~0.023
粘土		~0.33
氧化铁粉		~15.4

二、均化混合 原料粉体化，有利于混合，促进玻璃的均质化。因为玻璃的均质化几乎一半取决于配合料的混合程度。

三、便于不同组成的分离 为了剔除某些有害的组成(如硅砂中的氧化铁，见表1-3)，必须减小粒子大小，才能进行分离操作。

四、提高流动性 固体原料是粉料的话，具有较好的流动性，可进行气力输送。

粒子大小对玻璃配合料①熔化速度的影响

表 1-2

粒 子 大 小		熔 化 速 度 相 对 比 值
比 表 面 积 (厘米 ² /克)	在1000(孔/厘米 ²)筛面上的筛余%	
610	82.3	1
3030	43.0	1.14
7400	13.5	2.40
8200	6.7	2.85
11000	0	4.40

① 采用纯碱的平板玻璃。

硅砂粒子尺寸与Fe₂O₃含量(示例)

表 1-3

粒子尺寸(毫米)	0.49	0.30	0.26	0.142	0.097	<0.097
Fe ₂ O ₃ %	0.09	0.10	0.11	0.12	0.20	0.66

1-1-3 粉体的特点

一、不连续性 气体与液体均属连续体。而粉料乃由许多各自独立的大小粒子集合而成，因此是不连续的，所以粉料在料仓内的拱桥，其造成的料流闭塞与通畅，突变性很大。

二、表面积大 增加比表面积，固然有利于反应加速，但由于分散性大而易扬尘、易吸水结团或粘附。

三、粒子形状的不规则性 粒子形状涉及下列问题——填充状态、流动性、导热与导电的阻力等。粒子形状的不规则性就不容易正确推断上述有关问题。

四、磨损性 由于固体粒子的一定的硬度和不规则的形状，使粉料对金属等材料，具有一定的磨损作用。如在粉碎、输送、贮存等过程中对机械的磨损。

1-1-4 粉体性质

根据玻璃生产的具体情况，粉体的基本性质，除几何性质之外，主要是力学方面的。粉料所处的状态不外乎有集合的与分散的（固体粒子分散于液体或气体中）两种。不论是何种状态或是两者之间的转换，都必然会引起粒子之间的摩擦，并随之而构成力学现象。粉体的力学性质可作如下分类：

一、静力学性质 粉料的静力学性质包括粉料内部的压力分布、休止角、内部摩擦角、密实强度、粉料等。这些性质将涉及外界施予的力和粒子本身作用的质量作用力、摩擦力、压力之间的平衡关系。

二、动力学性质 动力学性质包括离心分离器内的粒子运动、重力沉降、输送、混合、贮存器出口速度、过滤介质的透过性、粒化等现象中所涉及有关固体粒子相互间摩擦压力、重力、离心力、分散介质的流动阻力以及运动状态等。

其它物理性质主要是粉料中固体粒子界面上所出现的有关电学、磁学、热学与声学方面的一些物理现象。

除此之外，粉料的化学性质早已在相应的化学或化工等有关专业领域中有所详细阐述。目前，对粉料力学性质的认识较为深刻，但关于粉料的其它物理性质尚待研究。

本章仅就各有关单元操作所共同涉及的一些基本粉体性质进行阐述，它们是：

(1) 几何空间性质——粒度分布、空隙率、体积密度、外形系数；

(2) 静力学性质——摩擦角、附着性；

(3) 动力学性质——流动性、在流体中的运动性质、对材料的磨损性。

总之，上述划分只是为了便于深入研究，而在处理工程问题时，还应从各方面综合考虑。

1-2 粒 度 分 布^{[3]~[8]}

粒子的大小由粒度来表示。粒子的大小和粒子的形状共同阐明了粒子的几何性质，而几何性质是解决粉料问题时首先要碰到的重要参数。

1-2-1 粒径

粉料粒子若为圆球，则直径作为粒径。实际上粒子的大小与形状不一，应按一定方法确定其平均粒径。粒径可分为：单个粒子的单一粒径和粒子群的平均粒径。

一、单一粒径

如图 1-1 所示，长径为平面投影图中的最大距离 l ，短径为垂直于长径方向的最大距离 b 和厚度 h 。根据这三个尺寸，单一粒径可以有如表 1-4 所示的各种表示方法。定向径系指粒子投影图上任意方向的最大距离；定向面积等分径系指按一定方向将投影面积分割成二等分时的直线长度。

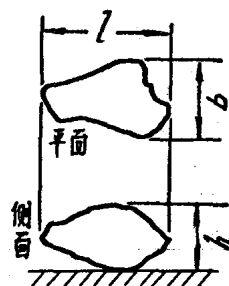


图 1-1 单一粒径

二、平均粒径

粗粒的平均粒径按下式计算

$$W = n \times \frac{\pi}{6} \times (\bar{d})^3 \times \rho_p$$

即

$$\bar{d} = \sqrt[3]{\frac{6W}{n\pi\rho_p}} \quad (1-1)$$

式中 $\bar{d}$ ——平均粒径；

n ——料粒数，一般在 200 粒以上；

W ——物料总质量；

ρ_p ——物料密度。

单一粒径的表示方法

表 1-4

名 称	计 算 公 式	名 称	计 算 公 式
长轴径	l	几何平均径	$(lbh)^{\frac{1}{3}}$
短轴径	b	立方体当量径	$\sqrt[3]{V}$
二轴算术平均径	$(l+b)/2$	球当量径	$(6V/\pi)^{\frac{1}{3}}$
三轴算术平均径	$(l+b+h)/3$	定向径	d_s
表面积平均径	$\frac{(2lb+2bh+2hl)^{\frac{1}{2}}}{6}$	定向面积等分径	d_m
体积平均径	$3lbh(lb+bh+hl)^{-1}$	沉降速度径	粘性阻力沉降径为 $\sqrt{\frac{18\mu V_0}{(\rho_p - \rho)g}}$

对于细到已无法逐粒拣集的细粉，采用调和平均计算：

$$\bar{d} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{W_i}{d_i} \right)} \quad (1-2)$$

如果简单地用算术平均计算，即

$$\bar{d} = \sum_{i=1}^n (W_i d_i) \quad (1-3)$$

差别也不大。式中 W_i 是粒径为 d_i 的粒子占总料量的百分数。

1-2-2 粒度测定的方法与试样

一、测定方法

粒度测定的方法见表1-5。

粒 度 测 定 方 法

表 1-5

测 定 方 法	粒度范围(微米)	测 定 方 法	粒度范围(微米)
筛析法	>40	吸附法(气相)	10~0.001
光学显微镜法	500~0.5	吸附法(液相)	10~0.001
电子显微镜法	10~0.001	润湿热法	10~0.001
通过细孔法	500~0.5	渗透法	100~0.5
沉降法(液相)	500~0.5	反应速度法	50~0.1
风筛法(气相)	100~1	散射法(光线)	10~0.001
离心力法	5~0.01	散射法(X光)	0.05~0.001
扩散法	0.5~0.001		

测定方法的选择，取决于粒度范围、粒度使用目的、物料的物理性质、测定精度以及测定的难易程度。根据玻璃生产情况，本章只讨论筛析法和沉降法。

二、试样准备

在生产现场采得的试样一般为大试样。而测定粒度时，却不需这么大。例如，筛析法只需100(克)，而显微镜法只需数千个粒就足够了。因此，必需先行缩分，其法有：

(一) 圆锥四分法：如图 1-2 所示。

(二) 直线交替法：如图 1-3 所示。

(三) 2 分割器：如图 1-4 所示，进料时难免左右不匀，可采用如图 1-5 所示的方法来使之相互抵消。

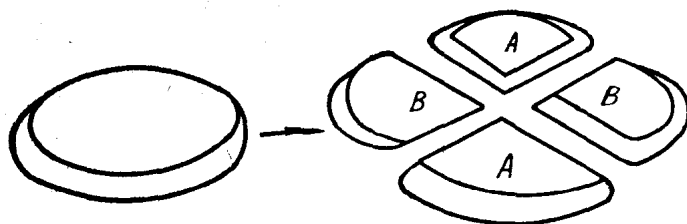


图 1-2 圆锥四分法

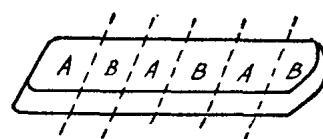


图 1-3 直线交替法

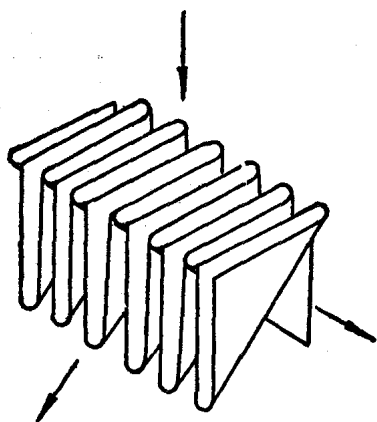


图 1-4 2分割器

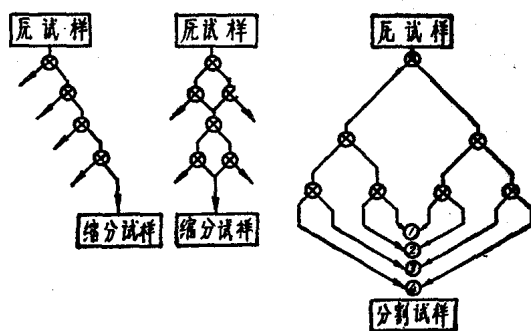


图 1-5 2分割器的缩分与分割操作

(四) 回转分割器：如图1-6、1-7所示，直接分成若干等分。

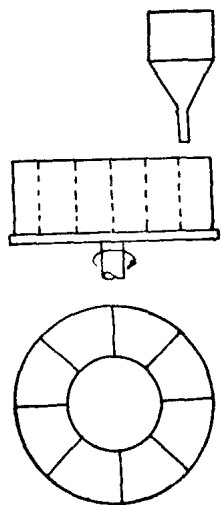


图 1-6 回转接料式分割器

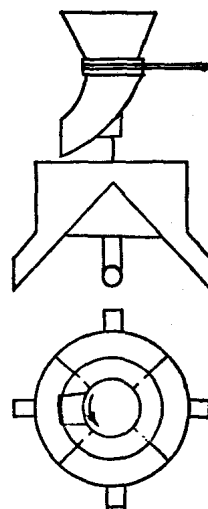


图 1-7 回转加料式分割器

1-2-3 筛析法测定粒度

一、应用范围

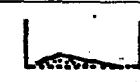
该法简便而迅速，最宜用于 100 毫米至 40 微米间的粒度测定，玻璃生产中粉状原料的粒度在此范围内。筛析法也可采用湿筛，使粘性料或细粉料变得比较易于筛分。

二、使用方法

筛析应由标准筛进行，标准筛系由一套筛孔自大至小按一定筛制叠置起来的若干层筛网所组成。各国的标准筛制详见附录（一）。先对试样粒度估计，选择若干层筛面叠置成套。见表 1-5，然后将一定质量（100~200(克)）的干燥试样放在最大筛孔的筛面上，将这套标准筛簸振一定时间，进行筛分，最后将每一层筛面上的粉料进行称量。各层料的总量与原试样重之间的误差以小于 2% 为宜，操作时不可溅失。筛析的例释见表 1-6。

筛析法示意

表 1-6

	层 序	料 重	孔 径	累 积 重 量 率 %
	I	W_1	ϕ_1	$\Sigma W_1 = \frac{W_1}{W}$
	II	W_2	ϕ_2	$\Sigma W_2 = \frac{W_1 + W_2}{W}$
	III	W_3	ϕ_3	$\Sigma W_3 = \frac{W_1 + W_2 + W_3}{W}$
	IV	W_4	ϕ_4	$\Sigma W_4 = \frac{W_1 + W_2 + W_3 + W_4}{W}$
	V	W_5	ϕ_5	$\Sigma W_5 = \frac{W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5}{W}$
	VI	$\frac{+W_6}{W}$		$\Sigma W_6 = 100\%$

三、筛析的力学条件

筛析法中的筛面运动，一般为水平的圆或椭圆运动，粒子与网面间的相对运动可由下式表示：

$$\mu_s < \frac{R_s \omega^2}{g} \quad (1-4)$$

式中 μ_s ——网面与粒子间的摩擦系数（—）；

R_s ——网面的回转半径（厘米）；

ω ——网面的回转角速度（度/秒）；

g ——重力加速度（厘米/秒²）。

摩擦系数 μ_s 值的测定，如图 1-8 所示。边缘粒子在其离心力克服摩擦力之后将会飞散，最后在网面中央残留成圆形区。

μ_s 值可按下式算得：

$$\mu_s = \frac{r_s}{g} \left(\frac{2\pi N_s}{60} \right)^2 \doteq r_s \left(\frac{N_s}{300} \right)^2 \quad (1-5)$$

式中 r_s ——残留粒子层的半径（厘米）；

N_s ——网面的回转数（转/分）。

关于 μ_s 的大小。流动性好的干粗粒 μ_s 为0.4~0.8，粒度在100（孔/英寸）以下的粒子 μ_s 为1.0左右，粘附性大的湿粉料为2.0以上。实际上，离心效果（ $R_s \omega^2 / g$ ）为1.2以下的占多数，而 $\mu_s > 1.2$ 时，筛分已属十分困难。

四、筛析时间

连续筛分时间直接影响筛析结果——筛面上的残留料重。不难设想，无限时间的筛析值为 R_∞ 的话，则在有限时间 t 所得的 R_t 必然较小，它们两者的关系为

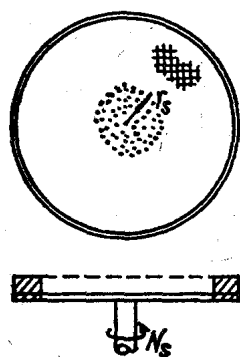


图 1-8 摩擦系数 μ_s 的测定

$$R_t = R_\infty + \frac{b}{2} \sqrt{\frac{\pi}{t}} \quad (1-6)$$

式中 b 为取决于筛网、筛分条件以及粒度分布的常数。图 1-9 为例释。实际操作上，按物料的性质不同，筛析的有限时间一般为 5~20(分)左右。

1-2-4 沉降法

沉降法适用于 0.5~500(微米) 细粉粉料，按粒子在流体中的运动性质，在粘性阻力的范围下，沉降过程中粒度 d_p 与沉降距离 H 、沉降时间 t 的关系，如下式所示：

$$d_p = \left[\frac{18\mu}{(\rho_p - \rho)g} \right]^{\frac{1}{2}} \left(\frac{H}{t} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1-7)$$

图 1-10 是上式的算图，图中以流体的温度来代替流体的粘度。具体用法为：

$$\begin{array}{c} T \quad \rightarrow \quad I \rightarrow II \rightarrow d_p \\ (\rho_p - \rho) \nearrow h \nearrow t \nearrow \end{array}$$

利用沉降法原理来测定粒度的装置如图 1-11 所示的四种：(a) 沉降天平式、(b) 比重计式、(c) 光透过式和 (d) 移液式。

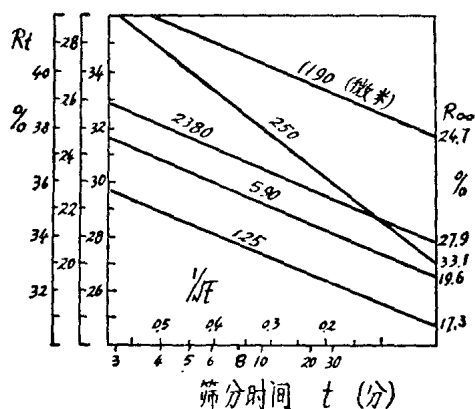


图 1-9 筛析时间

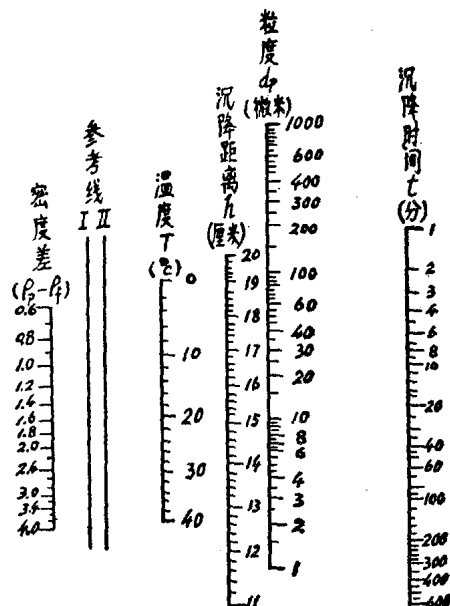


图 1-10 粘性阻力沉降径的算图

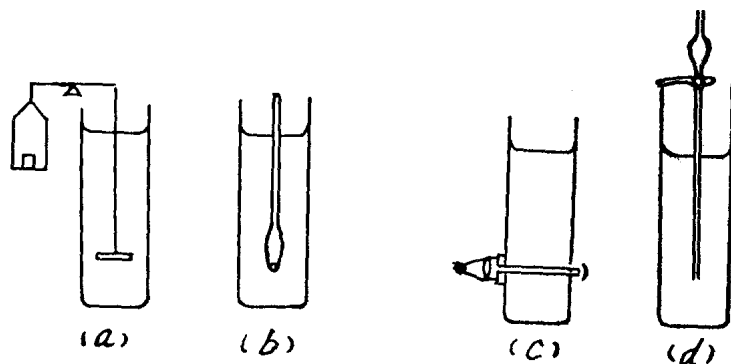


图 1-11 沉降法装置分类

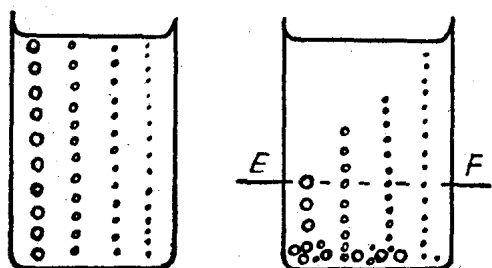


图 1-12 均质分散液的沉降

如图1-12所示，均质分散的悬浊液在其各处的粒度分布或粒子浓度均为相等，静置后，不同粒度的粒子各以其应有的沉降速度 V 。作等速沉降，于是在不同的深度上就有不同的粒度分布或粒子浓度，且随时间的推移而不断地变化着，即等粒度分布面或等粒子浓度面 EF 不断地向下移动。

为了得到均质分散相，可加入某些分散剂，如偏磷酸钠等，其浓度为0.2%左右。

移液式沉降法粒度测定的原理如图1-13所示，设该均质分散相内含有10个粒级，自 a 至 j ，其粒度分别为 $d_a < d_b < d_c < d_d < d_e < d_f < d_g < d_h < d_i < d_j$ ，它们的质量百分浓度 ω 由其长方柱的宽度来表示。设 AB 为液面， CD 为容器底。因系均质分散相，故在任何深度上的粒子浓度（无论是某个粒级的、或是所有粒级的总浓度）均应相等。经一定时间 t 沉降后，在深度为 H 处移出体积为 V （一般为10~25毫升）的试样。从图中不难看出，该试样内只有小于 d_i 以下的粒子。就体积 V 而言，上述试样内的粒子总量为

$$W = (\omega_a + \omega_b + \omega_c + \omega_d + \omega_e) V \quad (1-8)$$

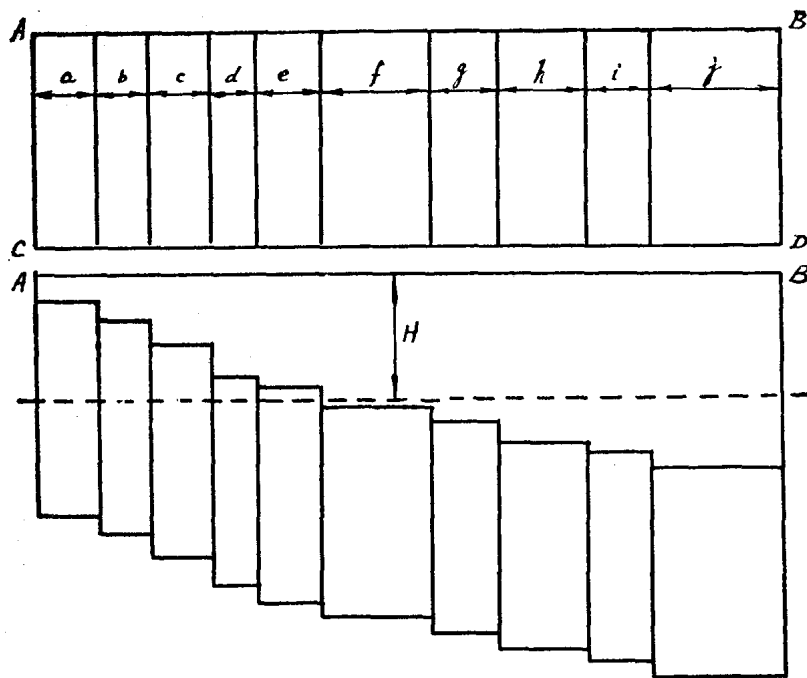


图 1-13 移液式沉降法粒度测定原理

而在 V （毫升）的均质分散相内的粒子总量为

$$W = \Sigma \omega \times V \quad (1-9)$$

所以，大于 d_i 的累积质量百分率为

$$R = 1 - \frac{W'}{W} \quad (1-10)$$

式中 W' 值可经烘干试样后称量得出。均质分散相的总浓度为

$$\Sigma \omega = \frac{m}{V} \quad (1-11)$$

式中 m ——均质分散相内粒子的总质量；

V ——均质分散相的总体积。

所以，式 (1-10) 也可写成

$$R = 1 - \frac{W'}{m} \quad (1-12)$$

在一定的沉降深度处，按不同的沉降时间，移取若干只体积为 V 的试样，就可得出描述粒度分布情况的 R 值。

移液装置如图 1-14 所示，其中以横式 (b) 更为合理，因其管内残留量较少。

1-2-5 粒度分布曲线

一般讲，粉料总是由一定粒度范围的、大小不一的粒子所组成。粒度的分布情况，通常用粒度 d 的函数关系来表示，主要有下列两种方式：

1. 频率分布 $W_i = f_1(d) \quad (1-13)$

2. 累积分布 $R = f_2(d) \quad (1-14)$

或 $D = f_3(d) \quad (1-15)$

式中 W_i ——在一定粒度间隔 Δd 内的料量占总料量 W 的频率质量百分率，即 $W_i =$

$$\frac{\Delta W}{W} (\Delta d) (\% / \Delta d) ;$$

R ——筛上残留料量占总料量的累积质量百分率 (%)；

D ——筛下通过料量占总料量的累积质量百分率，即 $D = 1 - R (\%)$ 。

粒度分布曲线的绘算，举例说明如下。长石粉料的筛析数据见表 1-7，可以绘制得不同形式表示粒度分布情况的 W_i 、 R 、 D 三种曲线，如图 1-15 所示。

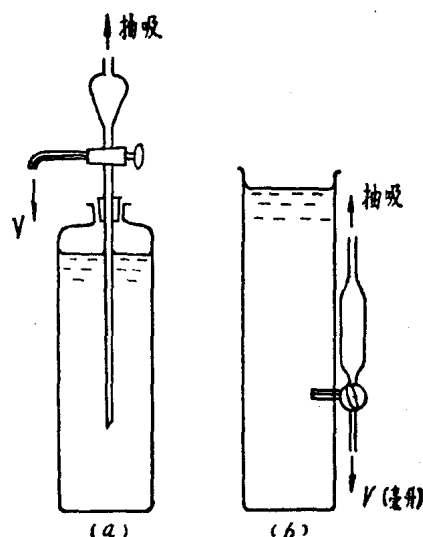


图 1-14 移液法粒度测定装置

长石粉料的筛析结果

表 1-7

筛目 (孔/英寸)	孔径 (毫米)	筛上物 (克)	筛上物累计 (克)	R (%)	D (%)
+28	0.63	0.25	0.25	0.2	99.8
+35	0.50	7.00	7.25	5.8	94.2
+45	0.40	11.27	18.52	14.8	85.2
+55	0.32	15.77	34.29	27.4	72.6
+75	0.20	24.86	59.15	47.3	52.7
+120	0.13	48.60	107.75	86.2	13.8
-120		17.25	125.00	100.0	0

由图看出，频率分布曲线给人粒度分布的印象更为直感。可以从上述累积分布曲线换得频率曲线，见表 1-8。取粒度间隔 Δd 为 0.05 (毫米)，则从图 1-15 的 R 曲线查得 W_i (%)

0.05毫米)值, 然后绘出 W_i 曲线, 即先绘示出若干个垂直的矩形柱, 最后连结各柱顶中点而成在粒度间隔 Δd 为0.05(毫米)之下的频率分布曲线。不难想象, 不同的粒度间隔, 其频率分布曲线也不尽相同。总之, 频率分布曲线总是累积分布曲线的微分式。

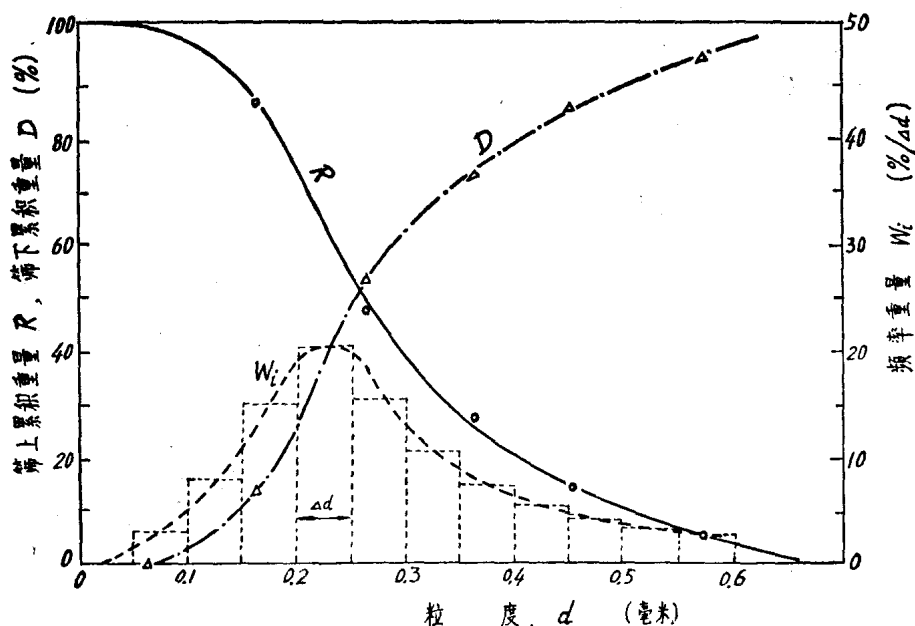


图 1-15 粒度分布曲线 (长石粉料)

长石粉料的频率分布 (示例)

表 1-8

粒 度 (毫米)	平 均 粒 度 (毫米)	W_i (%/0.05毫米)	粒 度 (毫米)	平 均 粒 度 (毫米)	W_i (%/0.05毫米)
0	0.025	0	0.40	0.425	5.5
0.05	0.075	3	0.45	0.475	4.5
0.10	0.125	8	0.50	0.525	3.5
0.15	0.175	15	0.55	0.575	3
0.20	0.225	20.5	0.60	0.625	2.5
0.25	0.275	15.5	0.65		
0.30	0.325	10.5	0.70	0.675	1.5
0.35	0.375	7			

1-2-6 粒度分布方程式

若能以简单的数学式来表示粒度分布曲线, 那就可以根据几个筛析数据来推断出整个粒度分布的规律。

一、正态分布

在自然现象与社会现象中, “随机事机” 的出现与否, 具有偶然性; 但就其总体而言, 却总是有其必然性的, 即这类事体出现的频率总是有统计规律性地在某个一定的常数附近摆动。这种从数量方面来研究大量现象中所特有的一种矛盾——偶然性与必然性, 这就是概率论的基本概念。

由此可以认为, 许多随机参量都服从于正态分布。如图1-16所示, A曲线正态分布曲

线有个最高点（即平均值），以此点的横坐标为中心线，对称地向两边快速单调下降；具体可叙述为：

（1）与平均值偏差大的数据所出现的频率少于与平均值偏差小的；

（2）在一定的过程中，这种偏差不会超过一定范围；

（3）在平均值两侧的偏差现象的出现是等机率的。

正态分布曲线系由正态概率密度函数给出：

$$f(d) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(d-\mu)^2}{2S^2}} \quad (1-16)$$

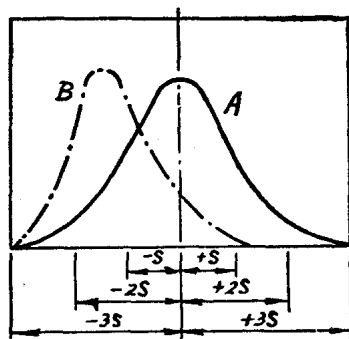


图 1-16 正态分布曲线

式中 μ ——正态分布的均值，曲线最高点的横坐标，即 $\mu = d = \frac{\sum fd}{n}$ ，其中 f 为每一个粒度数值 d 的频数， n 为测定次数；

e ——自然对数底；

S ——正态分布的标准偏差，用以表达曲线的胖瘦程度，其计算参见式（9-9）。

由此可见，知道了 μ 与 S 之后，就完全可以将正态分布曲线确定下表。而且，经过计算，得出在正态分布中，随机变数的68.25%处于 $(\mu - S, \mu + S)$ 的范围内，95.45%在 $(\mu - 2S, \mu + 2S)$ 内，99.73在 $(\mu - 3S, \mu + 3S)$ 内。

根据概率论的有关理论，只要某个随机变量是由大量相互独立的偶然因素的总和所组成，而且每一个别因素的影响都均匀地微小的，则可断定这个随机变量必然近似地服从于正态分布。在粉碎过程中，被碎料性质、粉碎机性能、流程布置等就是影响粒度分布——这个随机变量的偶然因素，因而碎成料的粒度分布规律也毫不例外地服从于正态分布。

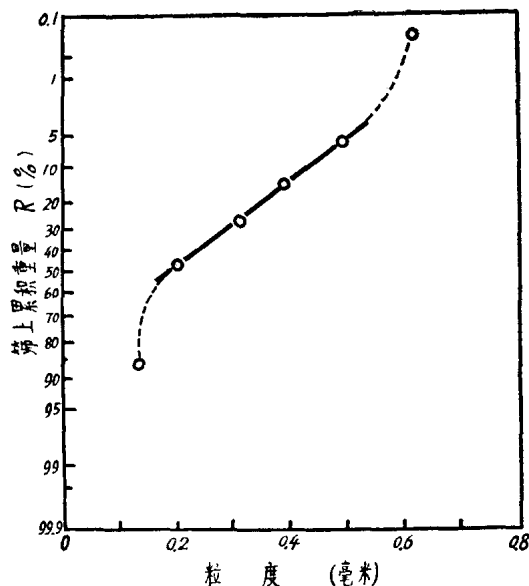


图 1-17 正态分布（正态概率纸）

在正态概率纸上还可进一步查得决定正态分布曲线的 μ 与 S 值，由于均值 μ 是曲线最高点的横坐标，所以在正态概率纸上50%水平线与标绘直线的交点的横坐标等于 μ 值。另外，根据上述随机变数有68.25%处于 $\mu - S, \mu + S$ 范围内的计算，则15.9%水平线与标绘直线的交点的横坐标为 $\mu - S$ 。

正态概率纸是一种检验正态分布的简便方法，如图1-17所示，其横坐标为普通的刻度，纵坐标则按正态分布的规律刻划。将表1-7的粒度分布数据，在该纸上标绘所得的曲线几乎为一直线（在直线两端处稍有出入），这种在正态概率纸上的线性关系，验明了正态分布的性质。

二、对数正态分布