



李诗久 周晓君 编著

气力输送理论与应用



机械工业出版社

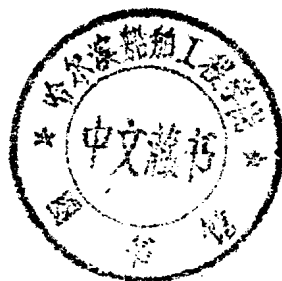
TH232

L34

365831

气力输送理论与应用

李诗久 周晓君 编著



机械工业出版社

(京)新登字054号

本书较系统地讲述了悬浮式和栓塞式两类气固两相流的理论基础、气固两相流的压损, 临界风速及 φ 、 λ 值的实验测试, 阐述了料栓的形成机理及两种料栓的压损模型, 按两种理论观点建立旋风分离器的分离临界粒径公式, 列举了仓式泵的设计应用实例, 编入了流幕式气力分级理论、设计与实验结果, 讲述了集装筒气送原理。全书编入20余项(个)设计、计算、应用实例, 可供参考应用。

本书内容适用于化工、建材、粮食、矿冶、机械、动力等工业领域, 可供从事散装物料输送、装卸、分级等工作的工程技术人员参考, 也可用作大学高年级相关专业的选修课教材和与“两相流”学科有关的研究生参考教材。

DL62/31

气力输送理论与应用

李诗久 周晓君 编著

*

责任编辑: 王海峰

封面设计: 郭景云

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

北京市昌平环球科技印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本787×1092 1/16 印张17 5/8 字数430千字

1992年5月北京第一版·1992年5月北京第一次印刷

印数 001—1800·定价: 19.80元

*

ISBN 7-111-03213-6/TB·156

序 言

气力输送装置是在管道中利用气流能量,来输送粉粒状物料的一种新型连续输送装置,它在我国化工、建材、粮食、采矿、冶金、机械、动力等部门的塑料颗粒、水泥、粮谷、面粉、矿砂、煤粉、煤灰、型砂等散装物料的装卸输送中,得到广泛应用。60年代出现的密相栓流式气力输送装置,代表了近代气力输送的发展方向,而被称之为第四代气送装置,受到国际上的普遍重视。我国从70年代开始,有少数单位对此进行研究和试验,取得了一些成果,受到有关部门和专家的高度重视,并被认为这是我国急待开发、研制、应用的新的科学技术领域。

本书源于“两相流理论及应用”学科六届研究生的教学与研讨和为全国粮食系统四次“气力输送”专题讲学以及作者对流幕式丸砂分离器、粉煤灰微珠气力分级及脉冲栓流气送等科研课题和科学试验的研究成果,并参阅大量国内外文献,经过多次整理、补充、删减、核实资料、斟酌加工,四易其稿,最后定稿而成的,在进行科学试验的过程中,周晓君同志运用两相流原理,对流幕式气力分级装置进行了系统的设计计算,并动手安装调试,做了大量的试验,取得了多项有规律性的实验数据,在气力输送,特别是在寻求分级的适宜风速和采用均方差与偏差系数来评定分级质量方面,取得了重要成果。

本书较系统地讲述了气力输送所涉及的气固两相流理论基础,将气固两相流明确地分成悬浮式和栓塞式两类。在悬浮式两相流中,补充了阿连区的最终速度比,对斯托克斯区和阿连区在分界点上粒径不衔接的问题,作了明确解释,系统阐述了悬浮式气固两相流的压损、临界风速及 ϕ 与 λ 的实验测试。在栓塞式两相流中,阐述了料栓的形成机理,并明确了供料成栓与中途成栓及这两种料栓的压损模型,讲述了流态化原理,用量纲分析法导出了厄贡公式;按涡流与汇流两种理论建立了旋风分离器的分离临界粒径公式,并建立了压损计算公式;对输送粉料有代表性的仓式泵,介绍了其设计原理与计算实例,将流幕式丸砂分离器及粉煤灰微珠气力分级装置的设计、实验、应用的科研成果和开展倾斜管气力输送的科学试验分析结果,编入本书第五、九两章中;最后讲述了集装筒气送原理。全书结合各章节,编入20余项(个)设计、计算及实际应用例子,可供借鉴参考。

本书内容适用于化工、建材、粮食、矿冶、机械、动力等工业领域,可供从事散装物料输送、装卸、分级等工作的科技人员参考,也可用作大学高年级相关专业的选修课教材和与“两相流”学科有关的研究生参考教材。

本书在编写过程中,得到了东北工学院和石油大学有关部门领导的支持和指导,得到了闻邦椿、闻荫槐、丁耀武、翟庆良、贺礼清、燕宁等教授学者的关心与帮助,同时得到了刘玉民、归彤、富晓东、漆良明、王猛翔等研究生的热情帮助,在此一并表示衷心感谢。

由于编著者水平所限,书中错误、不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

编著者

1991年6月

目 录

序 言

第一章 气力输送及特性参数	1
§1-1 气力输送的类型及特点.....	1
§1-2 物料的性质.....	5
§1-3 气固混合体的物理性质.....	11
第二章 运动物体的阻力及悬浮速度	14
§2-1 附面层的概念.....	14
§2-2 运动物体的阻力及阻力系数.....	17
§2-3 球形物体的自由悬浮速度.....	20
§2-4 有限空间及非球体对悬浮速度的影响.....	29
§2-5 颗粒群的悬浮速度及其测定.....	35
第三章 流态化原理	38
§3-1 理想流化过程与似流体特性.....	38
§3-2 实际流化过程.....	40
§3-3 临界流化的流体力学原理及厄贡公式.....	41
§3-4 多孔板的开孔率与压力降.....	45
§3-5 输送床或输料管中物料的运动状态及悬浮因素.....	46
第四章 悬浮式气固两相流理论基础	49
第一部分 单粒子自由悬浮运动理论	49
§4-1 倾斜管中单粒子悬浮运动微分方程.....	49
§4-2 粒子运动速度与时间和距离的关系方程.....	50
§4-3 粒子运动速度与运动时间和距离的关系曲线.....	53
§4-4 粒子运动方程的应用.....	54
第二部分 粒群均匀悬浮运动理论	55
§4-5 倾斜管中粒群的运动微分方程.....	55
§4-6 水平管中粒群的运动方程.....	57
§4-7 垂直管中粒群的运动方程.....	59
§4-8 粒群运动的最终速度及速度化.....	60
§4-9 粒群运动方程的应用.....	63
第五章 悬浮式气固两相流的压损临界风速及λ测试	69
§5-1 两相流的各项压力损失.....	69
§5-2 等速段附加压损及附加压损系数.....	72
§5-3 弯管附加压损的离心沉降理论.....	75
§5-4 输料管中压力损失与临界风速.....	77

§5-5	垂直输料管临界风速的简化解	81
§5-6	输料管堵塞的临界条件及最小风速	90
§5-7	固气速度比及阻力系数的实验测试	93
第六章	高压输送中两相流动及压力损失	103
§6-1	管中等温气固两相流的运动方程	103
§6-2	高压高真空输料管的压损计算	105
§6-3	水泥高压气送系统计算实例	107
第七章	供料器	111
§7-1	供料器及其要求	111
§7-2	吸送式气力输送的供料器	111
§7-3	压送式气力输送的供料器	119
第八章	旋风分离器	125
§8-1	旋风分离器的结构及工作原理	125
§8-2	旋风分离器内气流的运动	126
§8-3	强制涡与准自由涡的运动规律	128
§8-4	旋风分离器的分离临界粒径	130
§8-5	旋风分离器的相似与适宜尺寸	134
§8-6	旋风分离器压力损失的分析	136
第九章	流幕式气力分级理论设计与实验	138
第一部分	流幕式丸砂分离器的原理、设计与实验	138
§9-1	流幕式丸砂分离器的工作原理	138
§9-2	分离板坐标的理论分析与计算	140
§9-3	分离器的可调构件及经验数据	146
§9-4	流幕式丸砂分离器系统的设计计算实例	147
第二部分	粉煤灰流幕式气力分级装置的设计与实验	151
§9-5	粉煤灰的技术开发与综合利用	151
§9-6	原状粉煤灰的物性参数	154
§9-7	流幕式气力分级理论及有关概念	159
§9-8	气力分级装置的设计计算	164
§9-9	流幕式气力分级实验及分析	174
§9-10	分级总偏差与分级产量的实验公式	188
第十章	仓式泵正压气力输送及其应用设计	192
§10-1	仓式泵的结构与工作原理	192
§10-2	仓式泵的实验特性	192
§10-3	粉料的仓式泵气力输送系统及工作原理	194
§10-4	仓式泵正压气力除灰的设计计算	195
§10-5	正压气力除灰计算程序与计算示例	213
第十一章	脉冲栓流输送的理论分析与实验研究	224
§11-1	概述	224

§11-2 脉冲气刀式输送装置原理及参数	224
§11-3 脉冲气刀式输送的理论分析	226
§11-4 理论公式的计算值与实测数据比较	231
§11-5 脉冲栓流动态压力测试装置系统	234
§11-6 气力输送装置的固定参数及输送技术参数的理论计算	235
§11-7 测点动态压力波线图变化过程的物理实质	238
§11-8 脉冲栓流输送中附加摩擦阻力系数的实验公式	244
§11-9 脉冲栓流输送中料栓压损及其阻力系数的实验公式	248
第十二章 柱塞式气固两相流理论基础	251
§12-1 料栓的形成机理及其运动形态	251
§12-2 料气速度比	253
§12-3 供料成栓栓流压损的理论模型	254
§12-4 中途成栓栓流的附加压损模型	262
§12-5 料栓的静力学分析	263
§12-6 压损的计算实例	267
§12-7 集装筒气力输送简介	268
§12-8 集装筒在倾斜直管中的运动规律	269
§12-9 集装筒的压力损失与压力差	270
§12-10 集装输送的加速段与加速压损	273
参考文献	274

第一章 气力输送及特性参数

§ 1-1 气力输送的类型及特点

一、气力输送的应用与发展概况

气力输送是利用气流在管道中输送粉粒状物料的一种方法，也就是利用具有一定压力和一定速度的气流，来输送粉粒状物料的一种输送装置。空气流动常称为风，因而气力输送又称为风力输送，并简称为风送或风运。

从流体力学的观点来说，所研究的流体介质是单一的，则叫做单相流，如液体、气体单相流；所研究的是两种混合介质，则叫做两相流，如气固、液固、气液两相流。在气力输送管道中，混合介质是空气和粉粒物料，因而属于气固两相流。所以气力输送理论，主要是研究气固两相流的基本规律。

气力输送是一门比较年轻的科学技术，从19世纪后半叶才发展起来。1883年在俄国彼得堡港出现了第一台用来卸船仓散装粮食的气力吸粮机。1893年英国也出现了固定式吸粮机。后来世界各港口广泛采用气力输送装置来卸运粮食。据统计，1925~1926年间荷兰的鹿特丹港、德国的汉堡港海运粮食中，将近90%是用气力吸粮机，即吸送式气力输送装置（图1-1）卸粮的。

近些年来，气力输送发展很快，在粮食、水泥、粉煤灰、化工物料、矿粉、食盐、面粉、玻璃配合料、型砂等各工业部门，得到广泛应用。随着输送距离的增长，又发展了压送式气力输送装置，如图1-2所示。

我国铸造部门最早采用气力输送的是长春汽车制造厂。

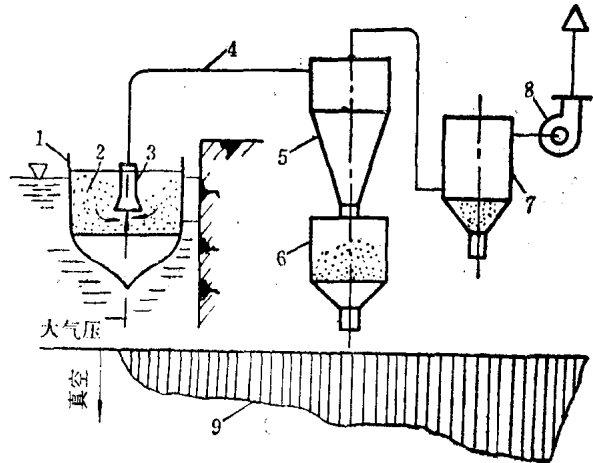


图1-1 吸送式气力输送装置

- 1—船仓 2—散装料 3—吸嘴 4—输料管
5—旋风分离器 6—料仓 7—袋式除尘器
8—离心通风机 9—压力变化图

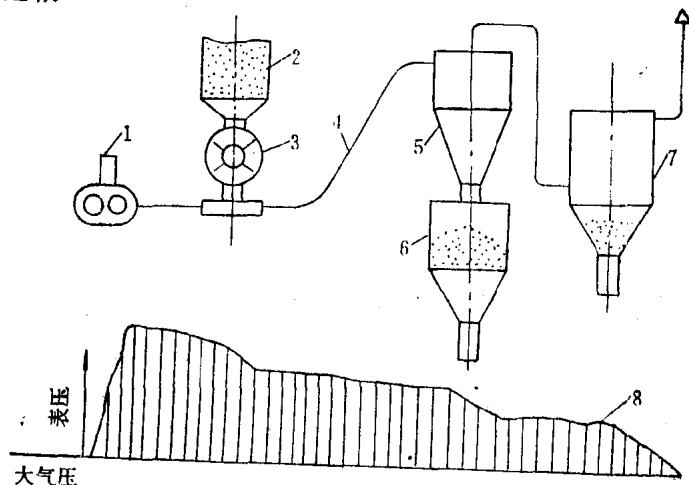


图1-2 压送式气力输送装置

- 1—罗茨鼓风机 2—供料斗 3—旋转供料器 4—输料管
5—旋风分离器 6—料仓 7—袋式除尘器 8—压力变化图

1959年我国进行了热气流烘砂的工艺试验，取得一定成果，1966年又试验成功涡流式压送装置。在水泥和粉煤灰的输送方面，已广泛采用仓式泵进行远距离（约2000m）输送。

上述吸送式气力输送装置，是属于低真空吸送，压送式气力输送装置，是属于低压压送，两者都属于悬浮稀相动压气力输送装置，称为第一代气力输送装置；而涡流式压送和仓式泵压送，则属于高压稀相动力输送，称为第二代气力输送装置。由于稀相动压输送存在混合比低、空气耗量大、动力消耗大、管道磨损严重和物料易被粉碎等缺点，近年来国外研制了多种新形式的低速高混合比的密相静压气力输送装置。

1. 脉冲气刀式气力输送装置

如1969年英国 Warren Spring 研究所研制成脉冲气刀式气力输送装置，如图1-3所示。这种新型的密相静压输送装置，是用脉冲进气的“气刀”将粉料切割成料栓，同时所喷进的气体构成气栓，利用气栓压力来推动前一个料栓。这样一个脉冲一个脉冲地循环动作，料栓在两端气栓的静压差作用下，以较低速度来输送，从而实现了以料栓、气栓相间的形式，来输送粉粒状物料，这就是栓流密相静压输送。它具有低速高混合比和低耗气量以及显著减少物料破碎和管壁磨损等特点，弥补了第一、二代稀相动压输送的缺点，而且除尘净化系统大为简化，只需较小的袋式除尘器即可满足要求，已成为能保护自然环境卫生的新输送设备，标志着近代气力输送的发展方向，而被称为第三代（也有称为第四代的）气力输送装置。

属于栓流式气送装置的，还有内重管式及外重管式的。简述如下：

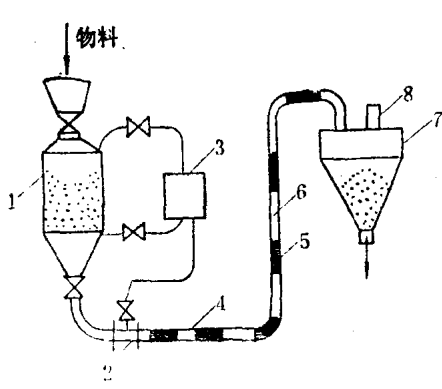


图1-3 气刀式脉冲气力输送装置
1—压力容器 2—气刀 3—控制器
4—输料管 5—料栓 6—气栓
7—贮料器 8—除尘器

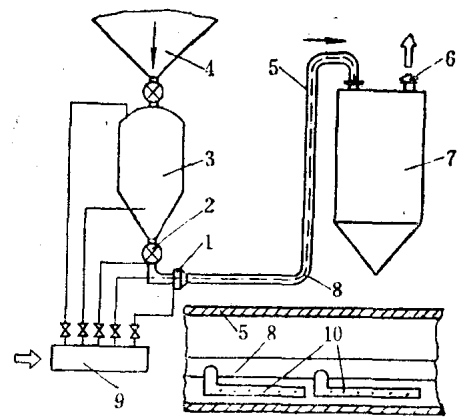


图1-4 内重管式气力输送装置示意图
1—环形喷嘴 2—出料阀 3—料罐 4—料斗
5—输送管道 6—空气排出过滤器 7—分离器
8—内管 9—空气分配器 10—自闭小孔

2. 内重管式栓流气力输送装置

如图1-4所示，其输料管道内装有直径比管道小得多的内管，内管上开有一些小孔。输料管和内管均通以压缩空气，内管中压缩空气经小孔进入输料管中，将物料切割成短料栓而成栓流输送；小孔喷出的气体，既将物料切割成料栓，同时它本身也就成为气栓而推送所切开的料栓。

内重管式气送装置为德国葛泰公司首创，故又称为葛泰式，目前已有许多国家应用，德国有输送量为25t/h、输送距离为720m的实例，日本也有输送距离达600m的气送装置。

3. 外重管式栓流气力输送

外重管式又称旁通管式，其装置系统如图1-5所示，主要由料罐和带有旁通气管的输管两部分组成。当料罐采用流化罐时，通常为向上排料；当料罐采用发送罐时，通常为向下排料。它与其他栓流气力输送相比，其区别主要在输送管外的旁通管及其旁通进气管。此旁通进气管的气流将物料切割成短料栓而被输送。

旁通管上两个进气管之间的距离，视物料的物性不同而异，一般约为输料管径的5~15倍。一般旁通管内的气体压力要比输料管的压力高 $0.1 \sim 0.5 \times 10^5 \text{Pa}$ ，为防止旁通管中气流中止时，物料回流到旁通管中，在旁通管内设有压力自闭开关。旁通管与输料管的直径比约为 $d:D = 1:8 \sim 1:10$ 。旁通管气送，在国内已有用于输送型砂、旧砂（ $D = 125, 118, 100 \text{mm}$ ； $d = 8, 2.5, 10 \text{mm}$ ；使用压力 $p = 4, 3.5, 3.6 \times 10^5 \text{Pa}$ ），德国Lippert用于输送水泥（ $D = 40 \text{mm}$ ， $d = 8 \text{mm}$ ）。

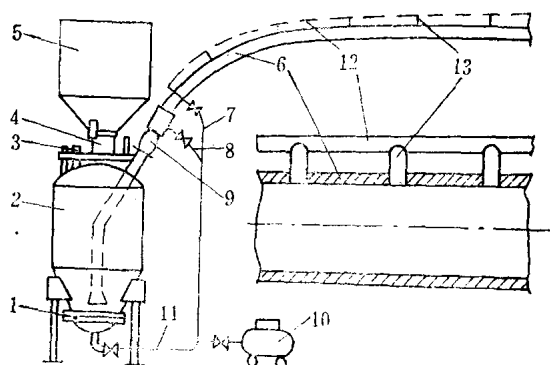


图1-5 外重管式栓流气力输送

- 1—多孔板 2—料罐 3—排气阀 4—进料阀
5—料斗 6—输送管道 7—外管供气管 8—二次空气供气管 9—出料阀 10—空气压缩机
11—一次空气供气管 12—旁通管 13—旁通进气管

二、气力输送的类型及特点

气力输送装置按工作原理大致可分为吸送式与压送式两种类型。吸送式气力输送装置，是将大气与物料一起吸入管道内，用低于大气压力的气流进行输送，因而又称为真空吸送。压送式气力输送装置，是用高于大气压力的压缩空气推动物料进行输送的。由此两种类型还可派生出其它形式的气力输送装置。

下面根据输料管中空气压力的不同，对气力输送进行分类，如表1-1所示。

脉冲栓流式气力输送、旁通管式输送等，则属于正压式高压气力输送。

三、气力输送的优缺点

吸送式气力输送具有以下特点：

1) 适用于从几处向一处集中输送。供料点可以是一个或几个，料管可以装一根或几根支管。不但可以将几处供料点的物料依次输送至卸料点，而且也可以同时将几处供料点的物料输送至卸料点。

2) 在负压作用下，物料很容易被吸入，因此喉管处的供料装置简单。料斗口可以敞开，能连续地供料和输送。

3) 物料在负压下输送，水分易于蒸发，因此对水分较高的物料，比压送式易于输送；对加热状态下供给的物料，经输送可起到冷却作用。

4) 部件要保持密封，因而分离器、除尘器、锁气器等部件的构造比较复杂。

5) 风机设在系统末端，要求空气净化程度高。

6) 与压送式相比，物料浓度与输送距离受到限制。因为浓度与输送距离加大，阻力也不断加大，这就要求提高管道内的真空度，而真空度太高，空气变得稀薄，携带能力也就下降。因此，真空度是有限制的，目前国内铸造车间吸送式可利用的最大真空度在 $6 \times 10^4 \text{Pa}$ 左右。

压送式气力输送具有以下优点：

表1-1 按压力分类的气力输送供料器及适用范围

形 式		供 料 器	最 大 性 能			主 要 用 途
			输送量 (t/h)	输送距离 (m)	所需真空度、压力 (kPa)	
负 压 式	高真空	固定吸嘴	50	200	-40	工厂内部输送(吸上型、 下型)
		可移动吸嘴	150	50	-40	车船卸料用、入仓库用 等
		旋转供料器	50	100	-50	灰处理
	低真空	管端直接吸入		(500)	-10	除尘、清扫、轻料输送
正 压 式	低 压	喷射供料器	30	30	200	短距离、轻量输送
		旋转供料器		100	60	定位置间的小型输送、 分配用
		空气斜槽	40	60	50	粉末近距离输送
	高 压	螺旋泵	100	500	200	定位置粉体输送、分配 用
		上仓泵	150	1000	200~400	长距离大容量输送、分 配用
		下仓泵	150	1000	200~700	长距离大容量输送、分 配用
		重叠式仓泵		500	200~300	定位置中量输送、分配 用
		低 压	输料管—送风 管—输料管	30	50	10
高 压	负压式—分离 供料—正压式	100	(500)		长距离大容量输送(集 料、分配并用)	

1) 适用于从一处向几处进行分散输送。即供料点是一个，而卸料点可以是一个或几个。

2) 与吸送式相比，浓度与输送距离可大为增加。从机理上讲，浓度与输送距离增加，阻力加大，这只需相应提高空气的压力即可。空气压力增高，空气重度增大，更能保证携带物料能力。其浓度与输送距离主要取决于鼓风机或空气压缩机的性能压力。其输送距离可达数公里。

3) 在正压情况下，物料易从排料口卸出，因而分离器、除尘器的构造简单，一般不需要锁气器。

4) 鼓风机或空气压缩机在系统首端，对空气净化程度要求低。

5) 在正压作用下，物料不易进入输料管，因此供料装置构造比较复杂。间歇式压送不能连续供给物料。

6) 与吸送式比较，管路上不严密处的漏气对工作影响不大，并且根据漏气处喷射出来的灰尘很易发现漏气部位。

连续式压送装置通常采用罗茨鼓风机，叶氏鼓风机或离心鼓风机，排气压力一般在 $5 \times 10^4 \text{Pa}$ 以下；间歇式压送装置通常采用空气压缩机，压力可达 700kPa 。连续式压送装置适应于生产率低，输送距离短的场合；而间歇式压送装置适应于生产率高，输送距离长的场合。

气力输送的缺点具有下列缺点：

- 1) 与其它机械相比，动力消耗大，管道磨损严重。
- 2) 不易输送易固结的粘滞性物料及湿度较大的物料。
- 3) 生产率及输送距离有一定的限制。

§1-2 物料的性质

在气力输送的气固两相流中，固体物料的性质，对两相流动状态、机理和阻力等有很大影响。因此，在研究气力输送原理之前，首先要了解物料的性质以及两相流中固气混合体的性质。

一、固体物料的物理性质

(一) 密实密度

密实密度是指在密实状态下，单位体积物料所具有的质量。以 ρ_s 表示

(二) 容积密度

容积密度是指在堆放松散状态下，单位体积物料所具有的质量，以 ρ' 表示。其值的大小取决于堆放状态时的孔隙率。孔隙率是指物料颗粒之间的空隙体积与物料堆放体积之比，用 ϵ 表示。容积密度与密实密度之间存在如下关系：

$$\rho' = (1 - \epsilon)\rho_s \quad (1-1)$$

常用物料的密实密度与容积密度列于表1-2中。

表1-2 物料的密实密度与容积密度

物 料	密实密度 (kg/m^3)	容积密度 (kg/m^3)	物 料	密实密度 (kg/m^3)	容积密度 (kg/m^3)
小 麦	1300~1400	660~830	棉 籽	1060	600
大 麦	1300~1350	550~650	各 种 砂	2500~2800	1100~2000
麦 芽		500	硅 石 砂	2650	520
糙 米	1120~1220	560	褐 煤 粒	1160~1340	750
稗 子	1330	520	煤 粉	1400~1600	700~800
大 豆	1180~1220	520~750	粘 土 粉	2300~2600	750~1300
落 花 生		300~400	石 灰 石	2400~2800	1600
玉 米	700~750	600~820	石 墨	2100~2200	760
油 菜 籽	1220	730	水 泥	3100~3150	1400~1500

(三) 含水率

含水率或称湿度，是指物料中所含水分质量与湿态物料质量之比，即

$$\omega = \frac{m - m_0}{m} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中 ω ——含水率；
 m ——湿态物料质量 (kg)；
 m_0 ——物料干燥后质量 (kg)。

物料的含水率，对气力输送的正常工作有着重要作用。含水率过高，物料容易结团，在输送过程中可能粘附在管道和卸料器等的内壁上，或在吸嘴、喉管和旋转供料器中，结成不易散开的团块，形成堵塞，使气力输送不能正常进行。因此，设计气力输送装置时，要注意物料的含水率。含水率过高时，应进行烘干处理或增设离散装置，并取较大的输送可靠性系数。

(四) 摩擦系数与摩擦角

摩擦角是表示颗粒状物料静止和运动的力学特性的物理量。在设计气力输送装置时，摩擦角是一个重要因素。但是，表示这些性质的物理量，在不同条件下得到的数值总有些差异。为能恰当地表示出这些性质，规定了以下几种摩擦角：

1. 静止角(ϕ_r)

物料通过小孔连续地下落到平面上时，堆积成的锥体母线与水平面的夹角，称为静止角或休止角。如图 1-6 所示，静止角有各种不同测法，其结果也各有差异；a) 表示因底面粗糙而引起若干变化；b) 表示可得到最稳定值时的情况；c) 表示因受侧壁的侧压影响，而静止角有所增加；d) 表示不同高度的两个

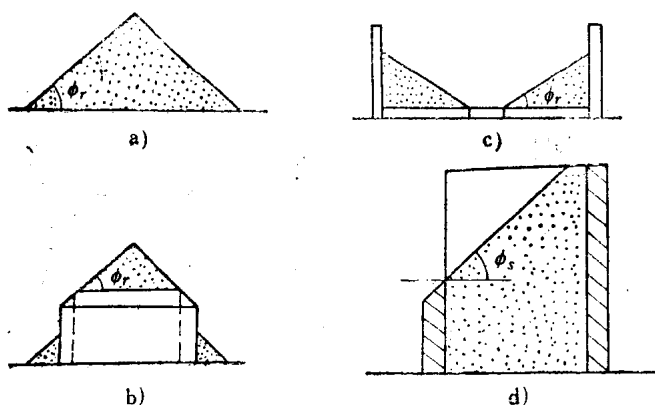


图1-6 粉粒体的静止角及崩解角

平行壁面间，堆积物料时所形成的静止角，称崩解角 ϕ_s 。因受侧壁的侧压影响， $\phi_s > \phi_r$ 。

对同一种物料而言，粒径越小则静止角越大，这是由于微细粒子间相互粘附性增大的缘故。而且粒子越接近于球形，静止角越小。常用物料的静止角如表1-3所示。

表1-3 几种物料的静止角

物 料	静止角 ϕ_r	物 料	静止角 ϕ_r
飞 灰	42°	石 块	45°
生 石 灰 粉	43°	米	20°
煤 渣	35°	锯 屑	45°
无烟煤 (核桃大小)	22°	大 豆	27°
棉 籽	29°	小 麦	23°

若物料不是松散自然下落充填，而是经过振动下落，则静止角减小，流动性增强，所以料仓排料时，常启动振动器。当通过透气板（多孔板）向物料通入压缩空气时，静止角也显著减小，这有利于存仓下料和利用空气斜槽输送物料。

2. 内部摩擦角(ϕ_i)

如图 1-7 所示, 将盛装粉粒体的两个相同框架重叠, 并在上部加上荷重, 上框架总重为 W , 仅给上框架以水平引力 F , 来切断料层, 测定产生滑动时剪切力 F 与法向力 W 之比为常数 μ_i , 称为内部摩擦系数, 它相当于内摩擦角 ϕ_i 的正切, 即

$$\frac{F}{W} = \mu_i \quad (1-3)$$

$$\phi_i = \text{tg}^{-1} \mu_i \quad (1-4)$$

如果计及框架与粉体的摩擦力 F_0 , 则上述关系为

$$F = \mu_i W + F_0 = W \text{tg} \phi_i + F_0 \quad (1-5)$$

若框架内粉体的截面积为 A , 以 A 除上式则得切向应力 τ 与法向应力 σ 的关系为

$$\tau = \sigma \mu_i + c \quad (1-6)$$

此式就是土力学中著名的库仑 (Coulom) 公式, 它与实验结果基本一致。

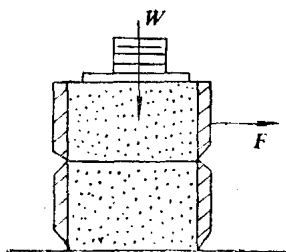


图1-7 内部摩擦测定

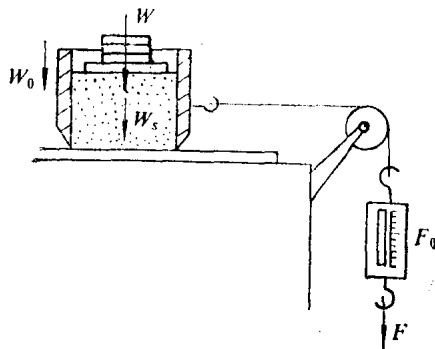


图1-8 壁面摩擦测定

3. 壁面摩擦角或滑动角 (ϕ_0)

壁面摩擦是指料层与固体壁面之间的摩擦其摩擦角 ϕ_0 可用图 1-8 机构来测定。壁面摩擦系数 μ_0 为所有水平力与全部法向压力之比。即

$$\mu_0 = \frac{F + F_0}{W + W_s + W_0} \quad (1-7)$$

所以

$$\phi_0 = \text{tg}^{-1} \mu_0 \quad (1-8)$$

在设计存仓、料槽和高浓度气力输送装置时, ϕ_0 是很重要的物理量, 应事先知道确切数值。

粉粒体物料除上述各性质外, 还具有粘附性、破碎性和粉尘的爆炸等物理性质。有关这方面的论述, 可参考其它著作和文献资料, 这里不再赘述。

二、物料的粒度及粒度分布

在使用上粒度和粒径具有相同的含义。通常把代表颗粒体大小的数值叫做粒度 (或粒径), 而把各种粒径在其粒体群中所占的比例, 叫做粒度分布。

平均粒径就是粒体群中各粒径的平均值, 所以若粒度已知, 便可由计算求出平均粒径, 它和粒度一样, 是判定粒体群粗细程度的指标。

对于一般物料而言, 不仅颗粒大小不同, 而且形状也是各种各样的。因此, 表征物料粒径通常分为: 代表单个粒子的单一粒径和代表许多不同大小的粒体群的平均粒径。

(一) 粗大颗粒的粒径

对较大而形状不规则的单一颗粒或料块，可以测量其长径、短径、高度，来表示其粒度或块度大小。在气力输送中，常用当量直径来代表单一粒子的粒径。

将形状不规则的粒子，换算成相等质量的球体，此球体的直径即为不规则形状粒子的当量直径(d_e)。即有

$$\frac{\pi}{6} d_e^3 \rho_s = m$$

$$\therefore d_e = 1.24 \left(\frac{m}{\rho_s} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1-9)$$

式中 d_e ——当量直径 (m) ;
 m ——粒子质量 (kg) ;
 ρ_s ——粒子密实密度 (kg/m³) 。

对于粗大而不均匀的颗粒群，可用平均当量直径来代表颗粒群的平均粒径。即从颗粒群中取有代表性的 n 个 (200个或更多) 粒子，换算成总质量 m_n 相等的 n 个相同球体的直径，即为平均当量粒径。即有

$$\frac{\pi}{6} d_e^3 \rho_s n = m_n$$

$$\therefore d_e = 1.24 \left(\frac{m_n}{\rho_s n} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1-10)$$

式中各量单位与式 (1-9) 相同。

(二) 粉体物料的平均粒径

对于不均匀的粉体物料，应根据其粒度分布来确定其平均粒径。

1. 粒度分布

粒度分布或粒度组成，是指粉料中各种粒度范围内具有的质量占总质量的百分数，可用筛分法或显微照象法来确定。因采用筛分法较普遍，故这里只介绍筛分法。

筛分法就是通过不同网孔 (筛孔) 的筛，将粉料群分成若干组，并测定出全部组成中每组的质量百分数，再用算术平均、几何平均、调和平均等计算方法，来确定相应方法的平均粒径。这种筛分法较简单，误差也较小。

2. 筛分法各组分的粒径

以我国原机械工业部规定的标准筛为例，来加以说明。

表 1-4 为原机械工业部规定的标准筛规格。此种筛子共11个；外加一个底盘。表中筛号 (或叫网目) 是指每英寸长度上筛孔的数目；某筛号上残留物料的粒径，是指该筛号的前后

表1-4 标准筛规格

规 格	筛 号 (网目)											
	6	12	20	30	40	50	70	100	140	200	270	底盘
筛孔边长 (mm)	3.36	1.68	0.84	0.59	0.42	0.297	0.21	0.147	0.105	0.074	0.053	
相邻两筛筛孔边长比例	2	2	1.42	1.40	1.41	1.41	1.41	1.42	1.42	1.40		1.40
筛分物料粒径 d_i (mm)	4.2	2.1	1.135	0.63	0.444	0.315	0.223	0.157	0.112	0.079	0.057	

两筛筛孔边长的算术平均值，此值作为残留在该筛号上的物料的粒径。

由于筛子标准不同，各组分物料的粒径，取决于筛子的标准。为了便于比较，下面介绍国际常用的有关标准筛，如表1-5所示。

表1-5 有关标准筛的粒径划分表

$\sqrt[4]{2}$ 系 列									$\sqrt[10]{10}$ 系 列		
日本标准筛 JIS		泰勒标准筛 Tyler		美国标准筛 ASTM		英国标准筛 BS.410:1962		法国 NF XII	AFNOR -501: 1938	西 德 DIN 4188	苏 联 ГОСТ
公 称 尺 寸 (μm)	网孔距离 (mm)	筛 孔 (个/in)	网孔距离 (mm)	编 号	网孔距离 (mm)	编 号	网孔距离 (mm)	编 号	网孔距离 (mm)	网孔距离 (mm)	网孔距离 (mm)
44	0.044	325	0.043	325	0.044	350	0.045	17	0.040	0.040	0.040
53	53	270	53	270	53	300	53	18	50	50	50
62	62	250	61	250	62	240	63	19	63	63	63
74	74	200	74	200	74	200	75	20	80	80	80
88	88	170	88	170	88	170	90	21	100	100	100
105	0.105	150	0.104	140	0.105	150	0.105	22	0.125	0.125	0.125
125	125	115	124	120	125	120	125	23	160	160	160
149	149	100	147	100	149	100	150	24	200	200	200
177	177	80	175	80	177	85	180	25	250	250	250
210	210	65	208	70	210	72	210	26	315	315	315
250	0.250	60	0.246	60	0.250	60	0.250	27	0.400	0.400	0.400
279	297	48	295	50	297	52	300	28	0.500	0.500	0.500
350	350	42	351	45	350	44	355	29	0.630	0.630	0.630
420	420	35	417	40	420	36	420	30	0.800	0.800	0.800
500	500	32	495	35	500	30	500	31	1.000	1.000	1.000
590	0.590	28	0.589	30	0.590	25	0.600	32	1.250	1.250	1.250
710	710	24	701	25	710	22	710	33	1.600	1.600	1.600
840	840	20	833	20	840	18	850	34	2.000	2.000	2.000
1000	1.000	16	991	18	1.000	16	1.000	35	2.500	2.500	2.500
1190	1.190	14	1.168	16	1.190	14	1.200	36	3.150	3.150	
1410	1.410	12	1.397	14	1.410	12	1.400	37	4.000	4.000	
1680	1.680	10	1.651	12	1.680	10	1.680	38	5.000	5.000	
2000	2.000	9	1.981	10	2.000	8	2.000				
2380	2.380	8	2.362	8	2.380	7	2.400				
2830	2.830	7	2.794	7	2.830	6	2.800				
3360	3.360	6	3.327	6	3.360	5	3.350				
4000	4.000	5	3.962	5	4.000						
4760	4.760	4	4.699	4	4.760						
5660	5.660	3.5	5.613	3.5	5.660						

3. 平均粒径的计算方法

对于物料所要进行的物理过程和化学反应等的不同问题，通常采用不同的平均粒径。例如，为了比较粒度的大小，就采用算术平均粒径；研究蒸发或分子扩散问题，则采用比表面积粒径等。

算术平均粒径或加权平均粒径：采用筛分法测出各筛号上残留物料的重量百分数(n_i)即

组分，并以该号筛的前后两筛网孔边长的算术平均值为该组分的粒径 d_i (mm)，则算术平均粒径

$$d_1 = \frac{\sum n_i d_i}{\sum n_i} \tag{1-11}$$

例1-1 某厂造型砂用原机械工业部标准筛，筛分结果如表1-6所示，试确定造型砂的算术平均粒径。

表1-6 原机械工业部标准筛筛分造型砂数据

物 料	筛 号	6	12	20	30	40	50	70	100	140	200	270	底盘	总计
造 型 砂	残留 g		0.05	3.73	11.77	14.67	13.43	3.57	0.97	0.68	0.45	0.18	0.50	50
	量 n_i		0.10	7.46	23.54	26.34	26.86	7.14	1.94	1.36	0.90	0.36	1.00	100

解 各筛号组分的粒径 d_i 由表1-4查得，则

$$\begin{aligned} d_1 &= \frac{\sum n_i d_i}{\sum n_i} \\ &= \frac{1}{99} [0.10 \times 2.1 + 7.46 \times 1.135 + 23.54 \times 0.63 + 29.34 \times 0.444 \\ &\quad + 26.86 \times 0.315 + 7.14 \times 0.223 + 1.94 \times 0.157 + 1.36 \times 0.112 \\ &\quad + 0.9 \times 0.079 + 0.36 \times 0.057] \text{mm} \\ &= 0.48 \text{mm} \end{aligned}$$

上述计算中未列入底盘上的组分，因它的组分较小，所以未计入对计算的平均粒径 d_1 影

表1-7 适用于不同物理过程和化学反应的平均粒径的计算方法表

名 称	计 算 公 式	物 理 意 义	适用于物理、化学方面的问题
算术平均径	$d_1 = \sum n_i d_i / \sum n_i$	单个粒径的算术平均值	各种粒度大小的比较蒸发
几何平均径	$d_2 = (d_1' \cdot d_2' \cdot \dots \cdot d_n')^{\frac{1}{n}}$	n 个粒径乘积的 n 次方根	
调和平均径	$d_3 = \sum n / \sum (n_i / d_i)$	各粒径的调和平均值	
面积长度平均径	$d_4 = \sum n_i d_i^2 / \sum n_i d_i$	表面总和除以直径的总和	吸附
体面积平均径	$d_5 = \sum n_i d_i^3 / \sum n_i d_i^2$	全部粒子的体积除以总面积	物质移动、反应、粒子充填层的流体阻力、充填材料强度
质量平均径	$d_6 = \sum n_i d_i^4 / \sum n_i d_i^3$	质量等于总质量、数目等于总个数的等粒子径	气力输送、质量效率、燃烧，平衡
平均表面积径	$d_7 = [\sum n_i d_i^2 / \sum n_i]^{\frac{1}{2}}$	总表面积除以总个数后的平方根	吸附
平均体积径	$d_8 = [\sum n_i d_i^3 / \sum n_i]^{\frac{1}{3}}$	总体积除以总个数后的立方根	光的散射、喷散的质量分布比较
比表面积径	$d = 6 / (s \rho_s')$	将粉粒体集合看作相同球体时，由比表面积 s 计算的粒径	蒸发，分子扩散
中位径	d_{50}	指粒径分布的累积值为50%所对应的粒径	分离、分级装置的分离性能
多数径	d_{mod}	指粒径分布中产率最高的粒径	