

气力输送两相流基本理论

(修订版)

东北工学院 李诗久 编

一九八七年三月

目 录

I	气力输送及特性参数	
1-1	气力输送简介	3
1-2	气力输送类型和特点	5
1-3	物料的性质	7
1-4	固气混合体的物理性质	13
II	运动物体阻力及悬浮速度	
2-1	边界层的概念	16
2-2	运动物体阻力及阻力系数	19
2-3	球形物体的自由悬浮速度	23
2-4	不规则形状对悬浮速度的影响	26
2-5	管道有限空间影响的悬浮速度 (v_0'')	28
2-6	粒群的悬浮速度简介	28
2-7	管中物料运动状态及悬浮因素	30
III	输料管中粒群运动理论	
3-1	倾斜管中粒群的运动微分方程	33
3-2	水平管中粒群的运动方程	36
3-3	垂直管中粒群的运动方程	37
3-4	粒群运动的最终速度及速度比	38
3-5	粒群运动方程的应用	41
IV	气固两相流的压损	
4-1	两相流的加速压损	45
4-2	摩擦压损	46
4-3	粒群的悬浮提升压损	47
4-4	局部压损	48
V	弯管附加压损的离心沉降理论	
5-1	弯管附加压损的离心沉降理论分析	50
5-2	离心沉降速度与重力沉降速度的关系	51

5-3 附加压损系数的理论公式	52
VI 气力输送的经济风速与堵塞临界条件	
6-1 水平等速段的压损与经济风速	54
6-2 堵塞的临界条件	55
6-3 最小风速的经验公式	59
习 题	60
参考文献	61

气力输送两相流基本理论

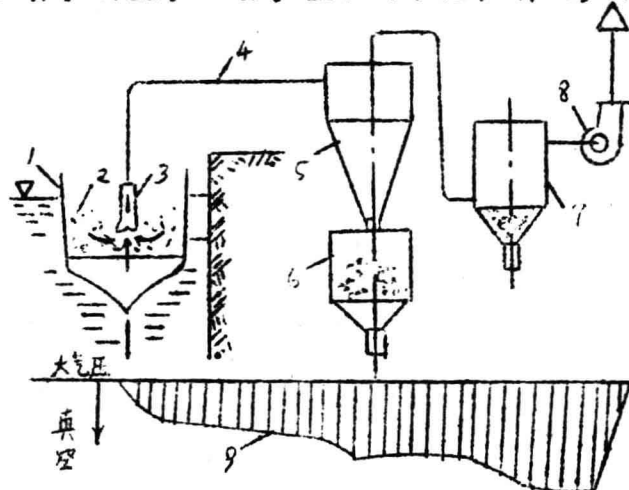
I 气力输送及特性参数

1-1 气力输送简介

气力输送是利用具有一定能量（一定压力和速度）的管中气流，来输送粉粒状物料的一种输送装置（图1~4）。空气流动常称为风，因而气力输送又称为风力运输，而简称为风送或风运。

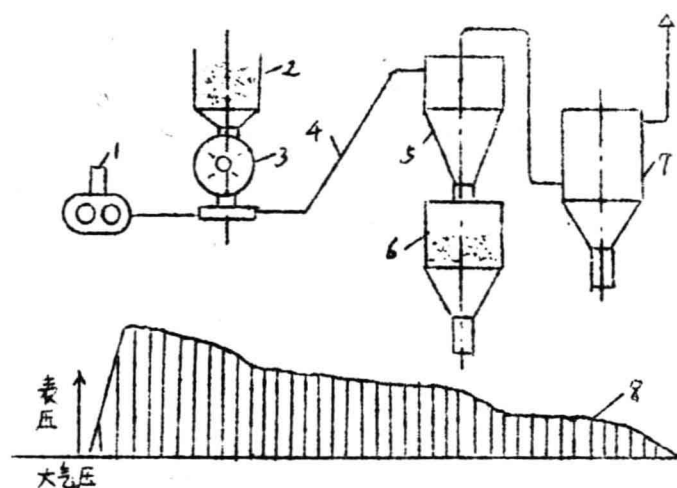
按流体力学的观点：单一流体介质的流动，称为单相流（如液体或气体单相流）；两种混合介质的流动，称为两相流（如气固、气液两相流）。在气送管道中，混合介质是空气和粉粒物料，因而属于气固两相流。所以气力输送所涉及的理论，是气固两相流的基本规律。

气力输送是从19世纪后期出现的港口吸粮机（图1），逐渐发展起来的。近年来气力输送发展很快，在粮谷、水泥、粉煤灰、化工物料、矿粉、食盐、面粉、型砂等各生产部门，得到广泛应用。

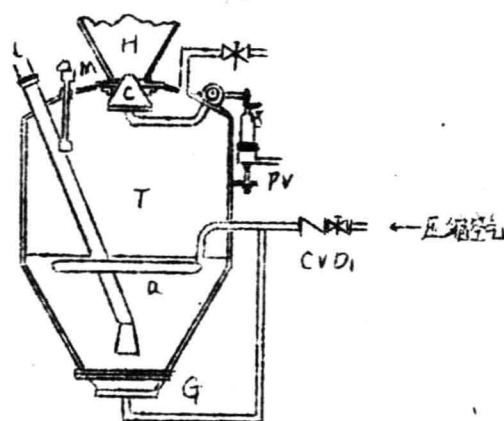


1—船仓 2—散装料 3—吸咀 4—输料管 5—旋风分离器
6—料仓 7—袋式除尘器 8—离心通风机 9—压力变化图

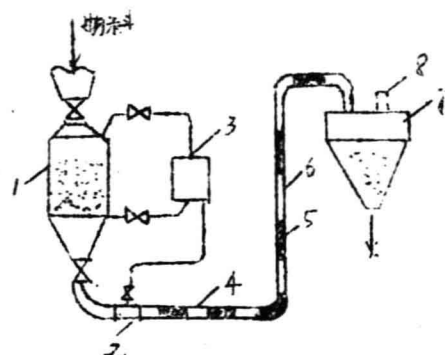
图1 吸送式气力输送装置



1—罗茨鼓风机 2—供料斗 3—旋转供料器 4—输料管
5、6、7—同图1 8—压力变化图
图2 压送式气力输送装置



H—料斗；C—给料阀；T—料罐；
G—底阀；D₁—薄膜阀；CV—单
向阀；a—空气环；t—排料口；
M—料位器；PV—活塞
图3 上送充气流化仓式泵压送



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4 气刀式脉冲气力输送
装置示意图

1-2 气力输送类型和特点

气力输送装置按工作原理，可分为吸送式与压送式两种类型：吸送式装置（图1），是将大气与物料一起吸入管道，用低于大气压力的气流进行输送，因而又称为真空吸送；压送式装置（图2），是用高于大气压力的空气流，进行输送的。上述两种类型是属于低真空吸送和低压压送，都属于悬浮稀相气动力输送装置，称为第一代气送装置；而上送充气流化仓式泵压送（图3），则属于高压稀相气动力输送，称为第二代装置。由于稀相气动力输送，存在着混合比低、耗气量大、动力消耗大、管道磨损严重以及物料易被破碎等缺点，近年来国外研制了多种新型式的低速高混合比的密相压差气力输送装置。如1969年英国Warrenspring研究所，研制成脉冲气刀式气力输送装置（图4）。

下面根据输料管中空气压力的不同，对气力输送装置进行分类，如下表1所示。

气力输送按压力分类供料器及适用范围

表 1

型 式	供 料 器	最 大 性 能			主 要 用 途	
		输送量 (t/h)	输送距离 (m)	所需 压力		
负 压 式	高真空	固定吸阻	50	200	-400mmHg	工厂内部输送(吸上型、吸下型)
		可移动吸咀	150	50	-400mmHg	车船卸料用、入仓库用等
	低真空	旋转供料器	50	100	-500mmHg	灰处理
正 压 式		管端直接吸入		(500)	-100mmHg	除尘、清扫、轻料输送
	低 压	喷射供料器	30	30	200KN/ m^2	短距离、轻量输送
		旋转供料器		100	60KN/ m^2	定位置间的小型输送、分配用
		空气料槽	40	60	5000mmwg	粉末近距离输送
	高 压	螺旋泵	100	500	200KN/ m^2	定位置粉体输送、分配用
上 仓 泵		150	1000	$(2-4) \times 10^2 KN/m^2$	长距离大容量输送、分配用	
下 仓 泵		150	1000	$(2-7) \times 10^2 KN/m^2$	长距离大容量输送、分配用	
联 合 式		重叠式仓泵		500	$(2-3) \times 10^2 KN/m^2$	定位置中量输送、分配用
	低 压	输料管—送风 管—输料管	30	50	100mmHg	粉体的低混合比输送(轧制工 厂等)
	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)

1-3 物料的性质

在气固两相流中，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。因此首先要了解物料的性质，以及固气混合体的性质。

一、固体物料的物理性质

1. 密实密度：以 ρ' 表示，单位为 (kg/m^3) 。

2. 容积密度：是指堆放松散状态下，单位体积中所具有的物料质量，以 ρ_s 表示。 ρ_s 的大小取决于堆放状态中的孔隙率。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，以 ε 表示。 ρ_s 及 ε 之间存在如下关系：

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

常用物料的 ρ_s 与 ρ' 列于表2中

物料的密实密度与容积密度

表 2

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	石英砂	2650	520
糙 米	1120—1220	560	褐煤粒	1160—1340	750
稈 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

3. 含水率：含水率或称湿度(w)，是指物料中所含水分的质量(或重量)，即湿态物料质量 W 与干燥物料质量 W_0 之差与湿态物料质量(或重量) W 之比的%，即

$$w = \frac{W - W_0}{W} \times 100\% \quad (2)$$

w 过高物料容易结团，在输送过程中可能粘附在吸咀，喉管、供料器以及管道和卸料器等内壁上，甚至形成堵塞。

二、粉粒物料的力学性质

力学性质主要是指摩擦角与摩擦系数。分述如下。

1. 静止角 (φ_r)：物料经小孔连续落到水平面上(图5)，堆积成的锥体母线与水平的夹角，称为静止角。



图5 粉粒体的静止角

2. 内摩擦角 (φ_i) 及内摩擦系数 (μ_i)

内摩擦的测定(图6)，上部总重为

几种物料的静止角实测值

表3

物 料	φ_r^0	物 料	φ_r^0	物 料	φ_r^0
飞 灰	42	棉	29	大 豆	27
生石灰粉	43	石 块	45	小 麦	23
煤 渣	35	米	20	锯 屑	45

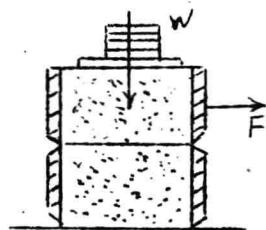


图6 内部摩擦测定

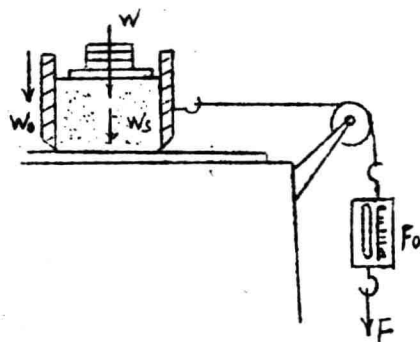


图7 壁面摩擦测定

W ，以水平拉力 F 使上下部料层产生滑动，此时切向力 F 与法向力 W 之比，称为内摩擦系数 (μ_i)，它相当于内摩擦角 (φ_i) 的正切，即

$$F/W = \mu_i \quad (3)$$

$$\varphi_i = \arctg \mu_i \quad (4)$$

若计及框架对料面的摩擦力 F_0 ，则上述关系为

$$F = W\mu_i + F_0 \quad (5)$$

以摩擦面积 (A) 除上式，得

$$\tau = \sigma\mu_i + C \quad (6)$$

此即土力学中的库伦 (Coulom) 公式。

如图 7 所示，所有水平拉力与全部与全部法向力之比，称为壁面摩擦系数 (f)，即

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

壁面摩擦角

$$\varphi_w = \arctg f \quad (8)$$

三、物料的几何性质

物料的几何性质，包括粒径（粒度）、粒度分布及平均粒径。是气送技术的重要参数。分述于下。

1. 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，换算成相等重量的球体，此球体的直径即为不规则形状粒子的当量直径 (d_e)。即有

$$\begin{aligned} \frac{\pi}{6} d_e^3 \gamma_s &= W_s \\ \therefore d_e &= 1.24 \left(\frac{W_s}{\gamma_s} \right)^{\frac{1}{3}} \end{aligned} \quad (9)$$

式中 d_e — 当量直径 (m)；

W_s — 粒子重量 (N)；

γ_s — 粒子密实重度 (N/m^3)。

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，换算成总重 W_n 相等的 n 个相同球体的直径，即为平均当量粒径。即有

$$\frac{\pi}{6} d_e^3 \gamma_s n = W_n$$

$$\therefore d_s = 1.24 \left(\frac{W_n}{\gamma_s n} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

式中各量单位与(9)式相同。

2. 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) 粒度分布及其粒径

粒度分布或粒度组成，是指粉料中各种粒度范围内具有的重量占总重量的百分数。可用广泛采用的筛分法来确定。

以我国机械工业部标准筛(表4)为例，来加以说明：此种筛共11个，外加1个底盘。表4中筛号(网目)，是指每吋长度上筛孔的数目；某筛号上残留物料重量占总重量的%数即粒度分布(n_i)，此残留物料的粒径 d_i (mm)，是指该筛号的前后两筛的筛孔边长的平均值。

(2) 平均粒径的计算法

加 平均粒径(算术平均粒径) d_1 ，按下式计算

$$d_1 = \frac{\sum n_i d_i}{\sum n_i} \quad (11)$$

例 某厂造型砂用机械工业部标准筛，筛分结果如表5所示。试确定造型砂的算术平均粒径为若干？

解：各筛号组份的粒径 d_i 由表4取

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

上述计算中未列入底盘上的组份，因它的组分较小，对计算的平

机械工业部标准筛的规格 表 4

筛号(网目)	6	12	20	30	40	50	70	100	140	200	270	底盘
筛孔边长 (mm)	336	168	084	059	042	0297	021	0149	0105	0074	0053	
相邻两筛筛孔边长比例	2	2	2	1.42	1.40	1.41	1.41	1.41	1.42	1.42	1.40	1.40
筛分的物料粒径 d_r (mm)	4.2	2.1	1.135	0.68	0.444	0.315	0.223	0.157	0.12	0.079	0.057	

机械工业部标准筛分造型砂数据 表 5

物料	筛号	6	12	20	30	40	50	70	100	140	200	270	底盘	总计
造型砂	残留量 g		005	373	1177	1467	1343	357	097	068	045	018	050	50
	n		010	746	2354	2934	2636	714	194	136	090	036	100	100

表 6

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	$d_1 = \Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$	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	$d_2 = (d_1' \cdot d_2' \cdots d_n')^{1/n}$	n 个粒径乘积的 n 次方根	
调和平均径	$d_3 = \Sigma n_i / \Sigma (n_i / d_i)$	各粒径的调和平均值	
面积长度平均径	$d_4 = \Sigma n_i d_i^2 / \Sigma n_i d_i$	表面总和除以直径的总和	吸 附 物质移动、反应、粒子填充层的 流体阻力、充填材料强度
体面积平均径	$d_5 = \Sigma n_i d_i^3 / \Sigma n_i d_i^2$	全部粒子的体积除以总面积	
重量平均径	$d_6 = \Sigma n_i d_i^4 / \Sigma n_i d_i^3$	重量等于总重量、数目等于总个数的等粒子径	这个气力输送、重量效率、燃烧、平衡
平均表面积径	$d_7 = [\Sigma n_i d_i^2 / \Sigma n_i]^{1/2}$	总表面积除以总个数后的平方根	吸 附
平均体积径	$d_8 = [\Sigma n_i d_i^3 / \Sigma n_i]^{1/3}$	总体积除以总个数后的立方根	光的散射、喷射的质量分布比较
比表面积径	$d = b / s \cdot \gamma'$	将粉粒体集合看作相同球体时，由此表面积 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_{med}	指粒径分布中产率最高的粒径	

均粒径 d_1 影响不大。

适用于不同物理过程和化学反应的其它平均粒径的计算方法，列入表 6，以供查阅应用。

1-4 固气混合体的物理性质

混合体的物理性质，对两相流的运动状态、颗粒的速度与输送管内的压损等，有很大影响。

(一) 浓度

浓度或称料气混合比，是指两相流中固体物料量与空气量的比值，是两相流的重要参数之一。一般分为重量浓度、体积浓度与实际浓度等三种。

1. 重量浓度 (m)

重量浓度简称混合比，是指单位时间通过输料管断面的物料重量流量 G_s 与气体重量流量 G_a 之比，即

$$m = \frac{G_s}{G_a} = \frac{G_s}{\gamma_a Q_a} \quad (N_{\text{料}}/N_{\text{气}}) \quad (12)$$

式中 G_s —物料重量流量 (N/h)；

γ_a —气体重度 (N/m^3)；

G_a —气体重量流量 (N/h)；

Q_a —气体流量 (m^3/h)。

2. 体积浓度 (m_0)

体积浓度是指物料的密实流量 Q_s 与气体流量 Q_a 之比，即

$$m_0 = \frac{Q_s}{Q_a} = \frac{G_s/\gamma_s}{G_a/\gamma_a} = m \frac{\gamma_a}{\gamma_s} \quad (13)$$

式中 γ_s —管中物料的密实重度 (N/m^3)。

由 (13) 式可知体积浓度是小于重量浓度的。

在气力输送气固两相流的设计中，通常采用重量浓度作为设计已知 m 参数。设计时应恰当选择混合比 m ，一般选取的范围如表 7 所示。

3. 实际浓度 (m')

实际浓度，是指输料管中单位长度内的物料重量 (G_s/v_s) 与气

重量浓度的选用范围

表 7

输 送 方 式		重 量 浓 度 m
吸 送 式	低真空吸送	0.5~10
	高真空吸送	10~40
压 送 式	低压压送	1~10
	高压压送	10~40
	流态化输送	50~400

体重量 (G_s/v_s) 之比, 即

$$m' = \frac{G_s/v_s}{G_o/v_o} = m \frac{v_o}{v_s} \quad (14)$$

式中 v_s —物料平均速度 (m/s);

v_o —气体平均速度 (m/s)。

从上式可以看出: 因在气力输送中 $v_o > v_s$, 所以 $m' > m$ 即实际浓度大于重量浓度; 在细粉料的稀相输送进入等速段之后, 可以认为 v_s 接近于 v_o , 近似取 $v_o/v_s \approx 1$ 时, 可用重量浓度来代替实际浓度。

(二) 重度

混合体的重度在气力输送的两相流计算中, 也是一个重要参数。一般分为流量重度和实际重度两种。

1. 流量重度 (γ_m)

流量重度是指两相流重量流量 ($G_m = G_s + G_o$) 与其体积流量 ($Q_m = Q_s + Q_o$) 之比, 即

$$\gamma_m = \frac{G_s + G_o}{Q_s + Q_o} = \frac{\gamma_s Q_s + \gamma_o Q_o}{Q_s + Q_o} \quad (15)$$

当忽略气体重量 G_o 和物料体积 Q_s 时, 则上式变为

$$\gamma_m = \frac{\gamma_s Q_o}{Q_o} = m \gamma_o \quad (16)$$

这就说明, 两相流的流量重度近似等于气体重度的混合比倍数。

2. 实际重度 (γ_m')

实际重度, 是指输料管中运动状态下混合体的重度。即单位长度

输料管内混合体重量 ($G_s/v_s + G_a/v_a$) 与其体积 ($Q_s/v_s + Q_a/v_a$) 之比, 即

$$\gamma_m' = \frac{G_s/v_s + G_a/v_a}{Q_s/v_s + Q_a/v_a} = \frac{G_s/v_s + G_a/v_a}{A_s + A_a} \quad (17)$$

在稀相低混合比的气力输送中, 物料所占体积 (Q_s/v_s) 较小, 可忽略不计, 则得

$$\gamma_m' = \frac{G_s}{Q_s} \frac{v_a}{v_s} + \frac{G_a}{Q_a} = \gamma_a \left(m \frac{v_a}{v_s} + 1 \right) = \gamma_a (m_0 + 1) \quad (18)$$

若再忽略气体的重量 (G_a/v_a) 时, 则得

$$\gamma_m' = \frac{G_s/v_s}{Q_a/v_a} = \gamma_a m \frac{v_a}{v_s} = \gamma_a m_0 = \frac{G_s}{Av_s} \quad (19)$$

比较 (16) 及 (19) 两式可知, 因气力输送中 $v_a > v_s$, 所以实际重度 γ_m' 大于流量重度 γ_m 。由 (19) 式可知, 实际重度等于气体重度的体积浓度 (m_0) 的倍数。

最后指出: (19) 式是在 (17) 式中忽略气体重量 (G_a/v_a) 及物料体积 (Q_s/v_s) 的条件下得出的。因而在物理意义上, 实质是单位管长容积中悬浮着的颗粒群的重度。所以它是输料管中悬浮状态下颗粒群的重度 (γ_a), 即

$$\gamma_a = \gamma_m' = \frac{G_s}{Av_s} \quad (20)$$

这一物理量和概念, 在研究气固两相流运动规律中, 有其重要作用和意义。