

文章编号: 1000-0887(1999) 04-0381-05

# 纤维型物质的输送机理<sup>\*</sup>

奚致中

(安徽财贸学院 物贸工程系, 安徽蚌埠 233041)

(蔡树棠推荐)

**摘要:** 本文对纤维状物料的气力输送机理进行了探讨。文中将物料对空气的相对运动看作是空气在松散纤维状物料群体所组成的多孔介质中的渗流问题。由此推得的理论结果与以往所测的实验数据比较, 大致符合。

**关键词:** 纤维型物质; 多孔介质; 渗流; 气力输送; 群体沉降末速; 悬浮速度; 物料的体积浓度

中图分类号: TB156      文献标识码: A

## 前 言

纤维状物料(如籽棉、皮棉、烟丝等)的气力输送机理与粉状和粒状物料不同。我们知道, 物料在输送过程中一般成群团形状。纤维状物料及其群团由于内部含有空气, 我们可把它们看作为一种松散状的粘弹性物质。若用应力张量来描述时, 讨论起来是很复杂的。为此我们设想一个较为简单的机理来讨论。可知物料输送时, 一般在物料群团间、物料与输送管道的壁面间、群团与空气间均存在着相互作用。由于纤维状物料及其群团的尺寸相差不如泥沙颗粒那样悬殊(对于籽棉来说, 单个颗粒的直径为 30mm, 最大群团的直径为 300mm), 可以认为分选作用不甚明显, 因而能很快达到一种统计平衡的宏观力学状态。此时的速度称为平均速度。在这种等速输送中, 其群团间的孔隙率认为不变, 就如通常的多孔介质那样, 空气即在这种多孔介质中作定常的渗流运动。于是, 气力输送速度即为物料群体的速度和空气相对于物料群体的速度之迭加。我们可以认为空气相对于物料群体的速度与静止空气中物料的群体沉降速度, 两者在数值上是相等的<sup>[1]</sup>, 因而可以认为它与物料的悬浮速度在数值上也是相等的。然而, 物料的群体沉降末速在测试和讨论上是比较方便的。在垂直沉降时, 物料在其过流断面上可以认为是均匀分布的。但对于实际的水平输送, 物料在其过流断面上并不是均匀分布的。由于此时的相互作用情况更加复杂, 因而气力输送时选取的实际速度要比上述的悬浮速度大得多。经验上一般取为悬浮速度的若干倍数。

## 1 模型的建立及由此推得的结论

根据上述的思想, 可建立起一个渗流模型。我们取与群团一起运动的参考坐标系, 考虑如

\* 收稿日期: 1997\_05\_23; 修订日期: 1998\_11\_11

作者简介: 奚致中(1940-), 男, 副教授。

图1所示的一维均匀渗流。将求物料群团在静止空气中的群体沉降速度转为求多孔介质中空气的渗流速度。可用 Darcy 定律描述,有

$$V = k \frac{\Delta H}{\Delta L}, \quad (1)$$

式中  $V$  为渗流速度,  $\Delta H$  为上下剖面的压头差,  $\Delta L$  为多孔介质的厚度,  $k$  为渗流系数。

总静压头  $H$  可表为

$$H = Z + \frac{p}{\rho_a g}, \quad (2)$$

式中  $Z$  为位置高度,  $p$  为静压强,  $\rho_a$  为空气密度,  $g$  为重力加速度。

在一定浓度的物料和空气的混合体不作整体宏观运动时,可看作物料是在静止空气中作沉降运动。此时,上下两剖面的总静压头可分别写为

$$H_A = Z_A + \frac{p_A}{\rho_a g}, \quad H_B = Z_B + \frac{p_B}{\rho_a g}.$$

上下剖面的位置差为  $Z_A - Z_B = \Delta L$ 。

而上下剖面间的静压强差,可由流体静压强公式写为<sup>[2]</sup>

$$p_A - p_B = \rho_a g (Z_A - Z_B) (1 - s_v) + \rho_s g (Z_A - Z_B) s_v = [\rho_a g (1 - s_v) + \rho_s g s_v] \cdot \Delta L, \quad (3)$$

式中  $\rho_s$  为物料密度,  $s_v$  为混合体中物料的体积浓度。

这样,上下剖面间的总静压头可表为

$$\begin{aligned} \Delta H = H_B - H_A &= Z_B - Z_A + \frac{p_B - p_A}{\rho_a g} = \\ &= -\Delta L + \frac{\Delta p}{\rho_a g} \left[ \frac{\rho_s}{\rho_a} s_v + (1 - s_v) \right] = \Delta L \cdot \frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a} \cdot s_v. \end{aligned} \quad (4)$$

将式(4)代入式(1),得到渗流速度

$$V = k \cdot \frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a} \cdot s_v. \quad (5)$$

现在让我们再对渗流系数  $k$  进行因次分析。我们可将空气在多孔介质中的渗流运动看作空气在管道中的流动,  $V$  为其流速。在其作定常流动时,可将加速度项略去,于是流体的运动方程为<sup>[3]</sup>

$$g \frac{\partial H}{\partial x_i} + \nu \cdot \nabla^2 V_i = 0,$$

式中  $H$  为总静压头,  $\nu$  为流体的运动粘性系数,  $V_i$  为直角坐标  $x_i$  方向的流速分量。利用因次分析,有

$$V \sim \frac{gr^2}{\nu} \cdot \frac{\Delta H}{\Delta L},$$

式中  $r$  为管道半径。将此式与式(5)比较,可得渗流系数  $k \sim gr^2/\nu$ , 即

$$k = c_0 \frac{gr^2}{\nu}, \quad (6)$$

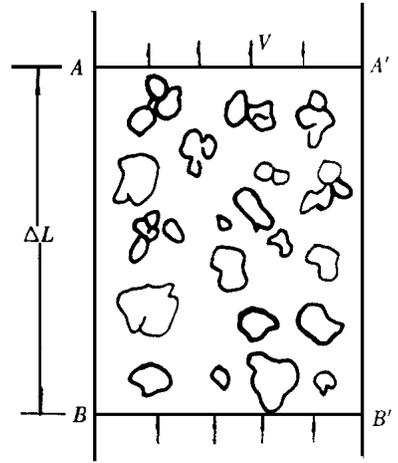


图 1

式中圆管半径  $r$  也可看作为多孔介质孔隙的线尺度,  $c_0$  为量纲一的因数。由上式可见, 渗流系数  $k$  与介质孔隙的线尺度  $r$  有关。

现我们进一步对多孔介质孔隙的线尺度  $r$  进行因次分析。假设物料组成群团, 再由群团构成多孔介质。为简便起见, 我们假定群团是均匀分布的, 群团大小是相同的, 且群团构成的多孔介质的孔隙是均匀分布的。这样就可求出孔隙的平均线尺度的因次表达式。令单位体积中群团的个数为  $n$ , 每个群团中物料所占体积为  $v_0$ , 则单位体积中物料的含量即体积浓度  $s_v$  可写为

$$s_v = nv_0 \quad (7)$$

再则, 假设每个群团的体积为  $v_1$ , 则群团的半径为

$$R = \left[ \frac{3}{4\pi} v_1 \right]^{1/3} \quad (8)$$

现令

$$v_1 = c' v_0, \quad (9)$$

式中  $c'$  为量纲一的因数。以上的  $v_0$ ,  $v_1$ ,  $c'$ ,  $R$  均和群团性质(如湿度、粘性、静电性质等)有关。于是有

$$R = \left[ \frac{3c'}{4\pi} v_0 \right]^{1/3} = c_1 v_0^{1/3} \quad (10)$$

可知, 两个群团间的平均距离为

$$n^{-1/3} = v_0^{1/3} / s_v^{1/3}, \quad (11)$$

因而群团间孔隙的线尺度

$$r \sim n^{1/3} - c' c_1 v_0^{1/3} = v_0^{1/3} [s_v^{-1/3} - c_2], \quad (12)$$

式中  $c_2$  和群团性质有关。

这样, 将式(12)代入式(6)有

$$k \sim \frac{g v_0^{2/3}}{\nu} [s_v^{-1/3} - c_2]^2 \quad (13)$$

再将上式代入渗流速度  $V$  的表达式(5), 整理后可得

$$V = \frac{c_0 g v_0^{2/3}}{\nu} \cdot \frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a} [1 - c_2 s_v^{1/3}]^2 \cdot s_v^{1/3} \quad (14)$$

可见, 渗流速度  $V$  与物料的体积浓度  $s_v$  有关。

现在我们假设物料浓度极稀时的沉降速度为

$$V_{0\infty} = \frac{\nu}{\sqrt{K_s}} \times 5.645 \sqrt{\frac{d_s(\rho_s - \rho_a)}{\rho_a}} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{d_s}{D} \right)^{2.4} \right], \quad (15)$$

式中  $K_s$  为物料颗粒的形状因子,  $d_s$  为物料颗粒的当量直径,  $D$  为输送管道的直径。

这样, 假设携带物料的输送速度为  $u$ , 物料浓度极稀时的输送速度为  $u_0$ , 则有  $u = fV$  和

$$u_0 = f_0 V_0, \quad (16)$$

其中  $f$  和  $f_0$  分别为携带物料输送和物料浓度极稀的输送时选取的经验常数。

于是有

$$\frac{u}{u_0} = \frac{fV}{f_0V_0} = \frac{f \sqrt{K_s} c_0 g v_0^{2/3}}{5.645 f_0 v} \sqrt{\frac{d_s(\rho_s - \rho_a)}{\rho_a}} \cdot \frac{[1 - c_2 s_v^{1/3}]^2 \cdot s_v^{1/3}}{[1 - (d_s/D)^{2.4}]}$$
 (17)

简化整理后,得到

$$\left(\frac{u}{u_0} s_v^{-1/3}\right)^{1/2} = A - B s_v^{1/3},$$
 (18)

式中

$$A = \frac{\left[\frac{f c_0 g \sqrt{K_s}}{5.645 f_0 v} \cdot \sqrt{\frac{d_s(\rho_s - \rho_a)}{\rho_a}}\right]^{1/2}}{\left[1 - \left(\frac{d_s}{D}\right)^{2.4}\right]^{1/2}} \cdot v_0^{1/3},$$

$$B = A c_2 \cdot$$

系数 A, B 与群团性质等有关。

由此可见, 以上的量纲一的方程表明  $\left(\frac{u}{u_0} s_v^{-1/3}\right)^{1/2}$  与  $s_v^{1/3}$  间存在有一定的线性关系。

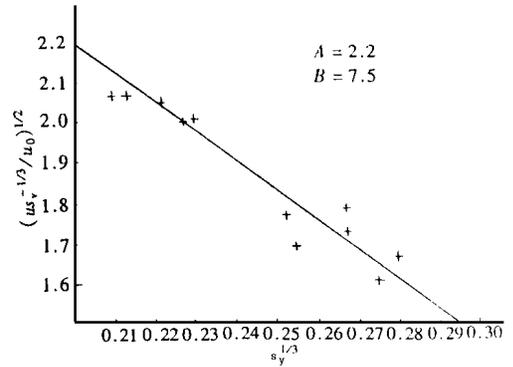


图 2

## 2 理论结果与实验数据的比较

我们可将式(18)与陕西省各轧花厂的实测数据作一比较, 见表1和图2。这里我们认为各厂的实验条件和选取的经验常数大致相同, 并将物料浓度极稀时的气力输送速度近似地用不携带物料的空载时的输送速度来代替。由图可见, 实测数据与理论曲线大致符合。

表 1

序号	混合比 <sup>1)</sup> $\mu_s$	空载速度 $u_0$ /m/s	带料速度 $u$ /m/s	体积浓度 <sup>2)</sup> $s_v = \frac{0.012\mu_s}{1 + 0.012\mu_s}$	$s_v^{1/3}$	$\frac{u}{u_0}$	$\frac{u}{u_0} \cdot s_v^{-1/3}$	$\left(\frac{u}{u_0} s_v^{-1/3}\right)^{1/2}$
1	0.81	20.8	18.8	0.099	0.2127	0.904	4.25	2.06
2	0.83	16.8	15.5	0.123	0.2144	0.919	4.29	2.07
3	0.92	22.0	20.5	0.093	0.2218	0.932	4.20	2.05
4	1.01	16.8	15.0	0.118	0.2288	0.893	3.90	1.98
5	1.03	13.7	11.9	0.142	0.2303	0.868	3.77	1.94
6	1.40	18.3	14.7	0.097	0.2547	0.803	3.15	1.77
7	1.45	26.1	18.0	0.063	0.2576	0.690	2.68	1.64
8	1.60	19.9	17.3	0.091	0.2661	0.869	3.27	1.81
9	1.68	20.6	14.1	0.077	0.2736	0.685	2.50	1.58
10	1.88	21.8	16.6	0.075	0.2805	0.760	2.71	1.65

注: 1) 重量(或质量)混合比  $\mu_s = \frac{G_s}{G_a} = \frac{M_s}{M_a} = \frac{\gamma_s Q_s}{\gamma_a Q_a} = \frac{\rho_s Q_s}{\rho_a Q_a}$  其中  $G_s$  和  $G_a$  分别为物料和空气的重量流量,  $Q_s$  和  $Q_a$  分别为物料和空气的体积流量,  $M_s$  和  $M_a$  分别为物料和空气的质量流量。对于籽棉重度  $\gamma_s = 981 \text{ N/m}^3$ , 空气重度  $\gamma_a = 11.76 \text{ N/m}^3$ 。

2) 物料的体积浓度  $s_v = \frac{\varphi_s}{\varphi_s + \varphi_a} = \frac{Q_s}{Q_s + Q_a} = \frac{\mu_s}{1 + \mu_s \rho_a / \rho_s} \cdot \frac{\rho_a}{\rho_s} = \frac{0.012\mu_s}{1 + 0.012\mu_s}$  其中  $\varphi_s$  和  $\varphi_a$  分别为物料和空气的体积。

## 参 考 文 献

- [1] 蔡树棠. 泥沙对水的相对速度和含沙浓度对脉动速度的影响[J]. 应用数学和力学, 1982, 3(1): 1~10.
- [2] 蔡树棠. 相似理论和泥沙的垂直分布[J]. 应用数学和力学, 1982, 3(5): 605~ 612.
- [3] 蔡树棠. 泥沙的群体沉降速度[J]. 应用数学和力学, 1983, 4(3): 341~ 346.
- [4] 李诗久, 周晓君. 气力输送理论及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- [5] 佟庆理. 两相流动理论基础[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1982.

## Mechanism in Pneumotransport of the Fibroid Substance

Xi Zhizhong

( Anhui Institute of Finance and Trade, Benglu , Anhui 233041, P R China )

**Abstract:** In this paper, the mechanism of pneumotransport of the fibroid material is discussed. It is thought that the motion of air relative to the material is that the filtration of the air passing through the porous medium which is composed of the duster of fibroid material. It is find that the deviations of the experimental data with the theoretical line are within experimental error.

**Key words:** fibroid substance; porous medium; filtration; pneumotransport; velocity of the collective motion of sedimentation; suspended velocity; concentration of material