

木材工业气力输送固、气速度比的理论分析及应用

陆永刚 李莹

(林业部节能中心·南京 210037)

摘要 本文从理论上探讨了木材工业低压气力输送水平通直管内固、气速度比(v_s/v_a)的分析方法,并计算出典型物料的理论固、气速度比值,为工程应用提供了有益的参考。

关键词 气力输送; 固、气速度比

1 前言

木材工业气力输送属于固、气二相流动,在对其进行分析、研究和设计的过程中,大量频繁地运用固、气速度比这一重要参数,因此从理论上分析研究固、气速度比,不仅有利于深入探讨木材气力输送的内在规律,而且对工程设计计算也具有重要的作用价值。

2 木材工业气力输送的一般规律

木材气力输送装置复杂,输送的散碎物料种类繁多,有锯屑、木纤维、刨花、木片等,但是如果设备运行工况稳定,输送的物料种类单一,输送压头不高,物料颗粒较小,混合浓度比也较小,如气力吸尘系统,则可以把输送管道中的气、固两相流看作是物料均匀分布的颗粒群,这种颗粒群作为一种特殊的均质流体的具有一般流体的运动规律。

现取倾斜直管中一颗粒群微元段来分析,如图1所示。微元段直径为 D ,长度为 dl ,质量为 M_s ,管轴与水平方向的夹角为 θ 。微元段流体所受的作用力有:

①物料的重力

$$G = A_s dl \gamma_s = (q_{ms}/v_s) dl \cdot g \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中: A_s —物料的总迎风面积(m^2);

γ_s —物料的重度(N/m^3);

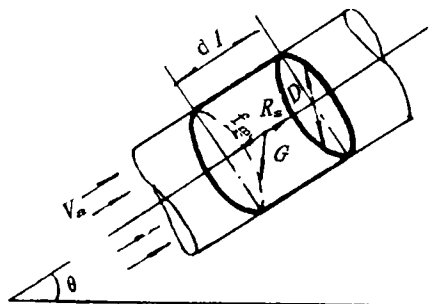


图1 液体微元段

q_{ms} —物料的质量流量(kg/m^3);

v_s —物料的速度(m/s)。

②物料与管壁的摩擦力

$$f_m = \frac{\lambda_s}{D} dl \frac{1}{4} \pi D^2 \frac{v_s^2}{2g} \gamma_{ms} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中: λ_s —颗粒群的阻力系数;

γ_{ms} —悬浮分散状态下颗粒群重度

(N/m^3), $\gamma_{ms} = \frac{g_{ms}}{v_s \cdot 1/4\pi D^2} \cdot g$ 。

③气动推动

$$R_s = C_s A_s \frac{(v_a - v_s)^2}{2g} \cdot \gamma_a \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中: C_s —绕流阻力系数;

γ_a —空气重度(N/m^3)。

在输送状态下,绕流阻力系数

$$C_s = \frac{\alpha}{Re^k} = \frac{\alpha}{\left[\frac{(v_a - v_s)d}{\nu} \right]^k} \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中: α, k —常系数,随阻力区而不同;

d —颗粒直径(m);

收稿日期 1995-07-31

* 林业部节能中心设在南京林业大学内

ν —气体运动粘度(m/s)。

在悬浮状态下的阻力系数

$$C_n = \frac{\alpha'}{\text{Re}^{k'}} = \frac{\alpha'}{(v_n d / \nu)^k} \quad (5)$$

式中： α' 、 k' —常系数，随阻力区而异；

v_n ——物料的悬浮速度(m/s)。

当输送状态和悬浮状态在同一阻力区时有：

$$\alpha = \alpha' \quad k = k'$$

$$\text{即：} C_s = C_n \left(\frac{v_n}{v_a - v_s} \right)^k \quad (6)$$

在悬浮状态下，气动推力等于重力，则有：

$$C_n A_s \gamma_a \frac{v_n^2}{2g} = \frac{q_{ms}}{v_s} dl \cdot g$$

$$C_n = \frac{(q_{ms}/v_s) dl \cdot g}{A_s \gamma_a (v_n^2/2g)} \quad (7)$$

将(7)式代入(6)式得：

$$C_s = \frac{q_{ms}}{v_s} dl \cdot g \left(\frac{v_n}{v_a - v_s} \right)^k \frac{1}{A_s \gamma_a (v_n^2/2g)} \quad (8)$$

根据牛顿第二定律，微元段流体的质量与其加速度的乘积应等于微元段流体所受的作用力的合力。即：

$$M_s \frac{dv_s}{dt} = R - f_m - G \cdot \sin\theta \quad (9)$$

把式(1)、(2)、(3)、(8)代入式(9)得：

$$\frac{1}{g} \frac{dv_s}{dt} = \left(\frac{v_a - v_s}{v_n} \right)^{2-k} - \frac{\lambda_s v_s^2}{D 2g} - \sin\theta \quad (10)$$

式(10)即为颗粒群运动微分方程。

因为： $dl = v_s dt$ ，所以上式又可写作

$$\frac{1}{g} v_s \frac{dv_s}{dl} = \left(\frac{v_a - v_s}{v_n} \right)^{2-k} - \frac{\lambda_s v_s^2}{2gD} - \sin\theta \quad (11)$$

对于水平管道， $\sin\theta = 0$ ，则有：

$$\frac{1}{g} v_s \frac{dv_s}{dl} = \left(\frac{v_a - v_s}{v_n} \right)^{2-k} - \frac{\lambda_s v_s^2}{2gD} \quad (12)$$

当加速度为0时， $\frac{dv_s}{dt} = 0$ ，即 $\frac{dv_s}{dl} = 0$ ， v_s 达到最大值 v_m ，可得：

$$\left(\frac{v_a - v_m}{v_n} \right)^{2-k} - \frac{\lambda_s v_m^2}{2gD} = 0 \quad (13)$$

根据式(13)可解出 v_m 或 v_m/v_a 。按Re的不同，分三个阻力区写出 v_m/v_a 的计算式：

① $\text{Re} \ll 1$ ，斯托克斯阻力区， $k=1$ ，

$$\frac{v_m}{v_a} = \frac{\sqrt{1 + \frac{2\lambda_s v_n v_a}{gD}} - 1}{\frac{\lambda_s v_n v_a}{gD}} \quad (14)$$

适用粒径范围： $d \leq 2.2 \left[\frac{\mu^2}{\rho_a (\rho_s - \rho_a)} \right]^{1/3}$

式中： μ —气体的动力粘度(Pa·s)；

ρ_s —颗粒密度(kg/m³)；

ρ_a —气体密度(kg/m³)。

② $1 < \text{Re} \leq 500$ ，阿连区， $k=0.5$

$$\frac{v_m}{v_a} = \frac{-1.5 + \sqrt{1.5^2 + 4 \left(\frac{\lambda_s v_n^{1.5} v_a^{0.5}}{2gD} - 0.325 \right)}}{2 \left(\frac{\lambda_s v_n^{1.5} v_a^{0.5}}{2gD} - 0.325 \right)} \quad (15)$$

适用粒径范围：

$$2.2 \left[\frac{\mu^2}{\rho_a (\rho_s - \rho_a)} \right]^{1/3} < d < 20.4 \left[\frac{\mu^2}{\rho_a (\rho_s - \rho_a)} \right]^{1/3}$$

③ $\text{Re} > 500$ ，牛顿区， $k=0$

$$\frac{v_m}{v_a} = \frac{1}{1 + \sqrt{\lambda_s v_n^2 / 2gD}} \quad (16)$$

适用粒径范围：

$$20.4 \left[\frac{\mu^2}{\rho_a (\rho_s - \rho_a)} \right]^{1/3} < d \leq 1100 \left[\frac{\mu^2}{\rho_a (\rho_s - \rho_a)} \right]^{1/3}$$

3 讨论

根据上述分析求解的结果，可作出如下讨论：

①由式(11)可见， v_s/v_a 沿管长 l 方向逐渐增大，经过一加速段后逐渐达到最大值 v_m/v_a ，并趋于稳定，因此通常所提及的固、气速度比 v_s/v_a 即指 v_m/v_a 。

②在不同的Re区域内，(或不同的粒径范围内)， v_s/v_a 的影响因素是不同的。在斯托克斯区和阿连区， v_s/v_a 与 v_a 、 v_n 、 λ_s 、 D 等因素有关，而在牛顿区 v_s/v_a 只与 v_n 、 λ_s 、 D 有关。所以只要知道输送系统的管路特性和物料特性，就可以从理论上精确求得 v_s/v_a 值。

③对于木材工业气力输送系统而言，流动状态大都处于牛顿区，所以求解 v_s/v_a 更为简单，可以直接根据木材碎料的悬浮速度 v_n 按式(16)求解，而 v_n 仅仅是物料特性参数

m, ρ_s, d 的函数。

④对于一定的物料, λ_s 是混合浓度 m 和佛汝德数 $Fr = v_s / \sqrt{gD}$ 的函数。目前各种物料的 λ_s 值只能通过实验求解。木材工业至今还缺乏 λ_s 的实验数据, 如果进行计算, 只能根据经验分析选取。一种较为有效的方法是根据沿程阻力附加系数的计算公式和气流阻力系数的经验公式以及式(16)联立求解。沿程阻力附加系数的计算式为

$$K = (\lambda_s / \lambda_a)(v_s / v_a) \quad \cdots \cdots \cdots (17)$$

实验求得木材散碎物料的 K 值范围为 $K = 0.7 \sim 0.25$ 。将式(17)代入式(16)得:

$$\frac{v_s}{v_a} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\lambda_a K}{v_s / v_a} \frac{v_n^2}{2gD}}} \quad \cdots \cdots \cdots (18)$$

式中: λ_a —气流的沿程阻力系数, $\lambda_a = 0.0125 + \frac{0.0011}{D}$ 。

因此, 对于不同的物料, 按通常方法选取不同的 K 值后, 即可按式(18)用迭代法求得 v_s / v_a 。

例1 锯屑物料, 形状近似球体, 当量直径 $d_s = 3\text{mm}$, $\rho_s = 660\text{kg/m}^3$, 混合浓度 $m = 0.17$, 管径 $D = 130\text{mm}$, 空气 20°C 时, $\rho_a = 1.2\text{kg/m}^3$, $\mu = 18.2 \times 10^{-6}\text{Pa} \cdot \text{s}$, 求 v_s / v_a 。

解: 1. 判断流动阻力区

$$\begin{aligned} \because d_s &= 3\text{mm} > 2.2 \left[\frac{\mu^2}{\rho_a(\rho_s - \rho_a)} \right]^{1/3} \\ &= 2.2 \times \left[\frac{(18.2 \times 10^{-6})^2}{1.2(660 - 1.2)} \right]^{1/3} \\ &= 0.165\text{mm} \end{aligned}$$

$\therefore$ 流动处于牛顿区。

2. 计算锯屑的悬浮速度 v_n

$$v_n = \frac{3.62}{\sqrt{K_s}} \sqrt{\frac{d(\rho_s - \rho_a)}{C\rho_a}}$$

式中: k_s —物料的形状系数, 对于锯屑 $k_s = 1$ 。

C —阻力系数, 在牛顿区 $C = 0.44$ 。

$$\begin{aligned} \therefore v_n &= 3.62 \sqrt{\frac{0.003 \times (660 - 1.2)}{0.44 \times 1.2}} \\ &= 7\text{ m/s} \end{aligned}$$

3. 计算 v_s / v_a

• 20 •

对于锯屑取 $K = 0.25$

$$\lambda_a = 0.0125 + \frac{0.0011}{D}$$

$$= 0.0125 + \frac{0.0011}{0.130}$$

$$= 0.0209$$

$$\frac{v_s}{v_a} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\lambda_a K}{v_s / v_a} \frac{v_n^2}{2gD}}}$$

$$= \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{0.0209 \times 0.25}{v_s / v_a} \times \frac{7^2}{2 \times 9.8 \times 0.130}}}$$

由此解得 $v_s / v_a = 0.75$

例2 $30 \times 12 \times 3\text{mm}$ 的刨花, $\rho_s = 750\text{kg/m}^3$, $m = 0.88$, $D = 380\text{mm}$, 空气的 $\rho_s = 1.2\text{kg/m}^3$, $\mu = 18.2 \times 10^{-6}\text{Pa} \cdot \text{s}$, 求 v_s / v_a 。

解: 1. 求刨花的当量直径 d_e :

$$d_e = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{6 \times 30 \times 12 \times 3}{3.14}} = 12.7\text{mm}$$

2. 判断流动阻力区

$$\begin{aligned} \because d_e &= 12.7\text{mm} > 2.2 \left[\frac{\mu^2}{\rho_a(\rho_s - \rho_a)} \right]^{1/3} \\ &= 2.2 \left[\frac{(18.2 \times 10^{-6})^2}{1.2(750 - 1.2)} \right]^{1/3} \\ &= 0.158\text{mm} \end{aligned}$$

$\therefore$ 流动处于牛顿区。

3. 计算刨花的悬浮速度 v_n

对于刨花 $k_s = 3.23$

$$\begin{aligned} v_n &= \frac{3.62}{\sqrt{K_s}} \sqrt{\frac{d(\rho_s - \rho_a)}{C\rho_a}} \\ &= \frac{3.62}{\sqrt{3.23}} \times \sqrt{\frac{0.0127 \times (750 - 1.2)}{0.44 \times 1.2}} \\ &= 8.54\text{m/s} \end{aligned}$$

4. 计算 v_s / v_a

对于刨花取 $K = 0.3$

$$\lambda_a = 0.0125 + \frac{0.0011}{D}$$

$$= 0.0125 + \frac{0.0011}{0.38}$$

$$= 0.0154$$

$$\frac{v_s}{v_a} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\lambda_a K}{v_s / v_a} \frac{v_n^2}{2gD}}}$$

表 1 木材工业典型物料的 v_s/v_a 理论计算值

物料	d_e (mm)	ρ_s (kg/m ³)	D (mm)	m	K	v_n (m/s)	v_s/v_a
锯屑 $d=3\text{mm}$	3	660	130	0.17	0.25	7.0	0.75
锯屑 $d=2\text{mm}$	2	800	130	0.17	0.25	6.3	0.76
刨花 $(30\times 12\times 3)\text{mm}$	12.7	750	380	0.9	0.30	8.54	0.79
碎片 $(40.4\times 20.8\times 17.3)\text{mm}$	30.2	760	360	1	0.35	14	0.69
碎片 $(25\times 25\times 25)\text{mm}$	34.6	500	380	0.88	0.36	15.2	0.68
碎片 $(40\times 40\times 8.5)\text{mm}$	29.6	760	360	1	0.34	9	0.77

$$= \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{0.0154 \times 0.3}{v_s/v_a} \times \frac{8.54^2}{2 \times 9.8 \times 0.38}}}$$

解得: $v_s/v_a = 0.79$

表 1 为木材工业典型物料在水平管内的 v_s/v_a 计算值,以供参考。在实际应用中可取 $v_s/v_{a\text{实际}} = (0.9 \sim 0.99)v_s/v_{a\text{理论}}$ 。

4 参考文献

- 1 李诗久等编著. 气力输送理论与应用. 机械工业出版社. 1992, 55~63
- 2 李维礼等编. 木材工业气力输送及厂内运输机械. 中国林业出版社, 1982, 274
- 3 郑洽馥、鲁钟琪主编. 流体力学. 机械工业出版社, 1980, 200~205

Theoretical Analysis and Application of Velocity Ratio of Solid to Gas in Pneumatic Transportation for Wood Industry

Lu Yonggang Li Ying

(Energy Conservation Center, Ministry of Forestry, Nanjing 210037)

Abstract This paper describes a method to analyse theoretically velocity ratio of solid to gas (v_s/v_a) inside low pressure horizontal-pipe in pneumatic transportation for wood industry, and the v_s/v_a of some typical materials are calculated rigorously as well. This result gives useful reference for engineering application.

Keywords Pneumatic transport; Velocity ratio of solid to gas

(上接第 10 页)

Study on Manufacturing Technique and Accelerated Ageing Behavior of Phenolic Resin-bonded Flaxboard

Pu Anbin Lu Renshu Shen Yaowen

(Northeast Forestry University, Harbin 150040)

Abstract This study mainly focused on manufacturing technique and accelerated ageing properties of phenolic resin-bonded flaxboard. Orthogonal design and variance analysis were used. Through comprehensive analysis, board manufacturing technique and test results of accelerated ageing properties of the board were obtained. The results showed: when density of the board is 0.75g/cm^3 , board's properties can meet the German Standard DIN 68763 V100 and surplus ratio of this board's MOR is more than 50% according to ASTM D 1037 (6-cycle accelerated ageing standard).

Keywords Phenolic resin adhesive; Flaxboard; Manufacturing technique; Accelerated ageing properties