杭州应用工程技术学院学报,第11卷第1,2期,1999年6月
Journal of Hangzhou Institute Applied Engineering
Vol.11 No.1,2, June 1999

气相有明显压缩性的密相输送的研究

刘宗明
(山东建材学院材料系　济南 250022)

王振远
(南京海员学校　南京 210002)

刘福国
(山东电力科学研究院)

于荣宪
(东南大学动力系)

摘　要　使用煤粉和氮气作为介质,对气相具有明显压缩性的长距离密相输送进行了实验研究,并建立了一个与实验结果吻合较好的理论模型.

关键词　密相输送　压缩性　压降
中图分类号　TQ022.11

作为一种新的气力输送方式,密相输送尤其是挤压流型输送具有许多优点.首先,由于物料速度低,颗粒破碎和管壁磨损得到了抑制;其次,输送一定量的物料所需的气体少,这在气体昂贵的场合,变得十分重要,而且可以减少输送管路末端的气固分离设备;另外,密相输送系统所需的能量较稀相输送少;最后,密相输送能够抑制因磨擦而引起的静电释放.正是由于这些优点,所以它现在已被越来越多地应用于许多工业部门,如电力、冶金、化工、建材、轻工等.

作者在浓相气力输送方面已经作了一些工作[1],但是,其间并未考虑气体的压缩性.而事实上,当压降与绝对压力之比不能忽略时,必须考虑气体的可压缩性.鉴于此,作者对气相具有明显压缩性的长距离密相输送进行了实验研究.

1　实验系统及输送特性

1.1　实验系统

实验系统如图1所示.实验中使用煤粉和氮气作为介质,通过Ø20mm,长为96m的输送管以挤压流型输送.供料器与贮料仓之间的压差最高为0.7MPa(贮料仓中为大气压).煤粉的真实密度 ρ_s = 1655kg/m^3,表观密度 ρ_p = 549kg/m^3,平均粒径 d_s = 0.075mm,壁面摩擦角 δ_w = 26.5°.

研究内容主要有:系统的输送能力、沿管线的压力降、压力分布及速度分布等.

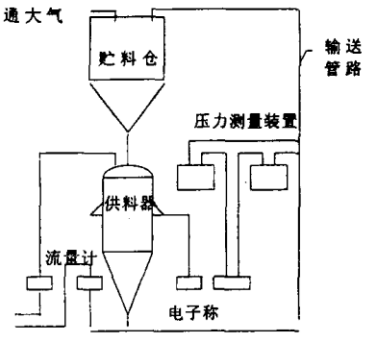

图1　试验系统图

收稿日期:1999-01-07

1.2 输送特性

1.2.1 输送能力 在图1中，气体可由下料口处的三通管加入．实验证明，在此处输入少量气体(简称输送气)，可以提高输送的稳定性，并可研究输送气对阻力特性的影响．结合以前的研究[1]，假如无气体加入，煤粉质量流量 M_s(kg/h) 与管径 D(m)、供料器表压力 p_f(MPa) 及管长 L(m) 之间的关系见图2，可以表示为

$$M_s = 251D^{2.11}L^{-0.8}p_f^{1.57} \qquad (\mathrm{kg/h}) \tag{1}$$

而供料器的压力以及输送气量(以气体的表观速度体现)对输送能力的影响见图3.

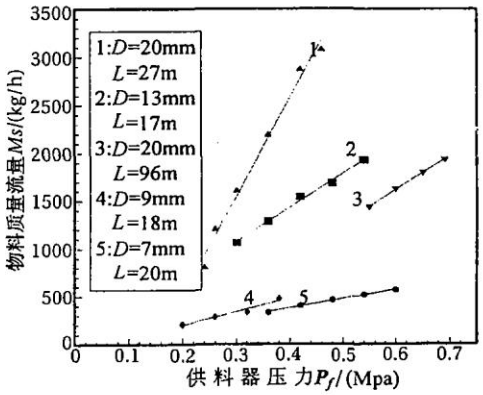

图2 系统的输送能力

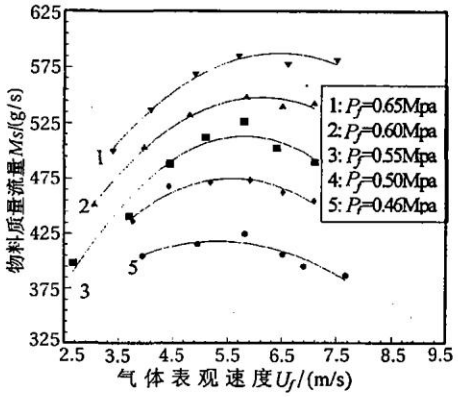

图3 物料的质量流量与气体表观速度

1.2.2 压力降 如忽略气体的压缩性，水平管单位管长的压力降 $\Delta p_h/L$ 可表述为[1]

$$\Delta p_h/L = \lambda\rho_m u_s^2/2D \qquad (\mathrm{Pa/m}) \tag{2}$$

$$\lambda = 1.2\times10^{14}\times\frac{\varepsilon^2(1-\emptyset)^{4.66}}{Y^{3.25}Re^{2.19}m^{0.44}}$$

式中 ρ_m—固气混合密度，$\rho_m = \rho\varepsilon + \rho_s(1-\varepsilon)$，$\varepsilon$ 为空隙率；Y—固气密度比，$Y = \rho_s/\rho$；Re—雷诺数，$Re = \rho(u-u_s)d_s/\mu$；$\emptyset$—固气速度比，$\emptyset = u_s/u$；m—固气输送比．

同时可以发现，弯管的单位管长的压降 $\Delta p_b/L$ 与 G_sU_f 成较好的线性关系

$$\Delta p_b/L = 0.865G_sU_f \qquad (\mathrm{Pa/m}) \tag{3}$$

式中，$G_s = M_s/A$，A 为输送管路的截面积；U_f 为气体的表观速度．

关系式(2)可以非常好地预测不太长的管长的压降，但是对于整个管线的压降预测却出现了一定的偏差，其原因是在整个管线的气体的压缩性不能忽略．

2 长距离挤压流型气力输送的压力分布

假定：① 流量稳定，压力 p 以及空隙率 ε 在管线的每个截面上均匀一致；② 供料器中压力对其中固体的堆积空隙率无影响；③ 气体沿输送管线等温膨胀[2]．在这些假定条件下，能量方程可以写出并整理、求解如下：

2.1 能量方程

气、固两相单独考虑，能量方程可以分别表述为

$$g\mathrm{d}z + \mathrm{d}p/\rho + \mathrm{d}(u^2/2) + \mathrm{d}F = \mathrm{d}W \tag{4}$$

$$Bs\mathrm{d}L - fs\mathrm{d}L = \mathrm{d}(u_s^2/2) \tag{5}$$

式(4) 中,$g\mathrm{d}z$、$\mathrm{d}(u^2/2)$ 分别是气体势能与动能,$\mathrm{d}p/\rho$ 为气体膨胀释放出的功;

$\mathrm{d}F$ 为由于气体的粘性而转化的热能,它包括水平管损失 $\mathrm{d}F_0$ 和弯管引起的损失 dF_1;

$$\mathrm{d}F_0 = 4f\frac{\mathrm{d}L}{D}\frac{u^2}{2}$$

式中 f—Fanning 摩擦系数,$f = \frac{0.074}{Re^{0.25}} = \frac{0.074}{(\rho uDe/\mu)^{0.25}}$;

De— 当量直径,$De = \frac{4\varepsilon}{1-\varepsilon}\frac{\mathrm{d}_s\Psi}{6}$,$\Psi$ 为形状系数.

考虑到其它因素的影响,引入一系数 q,则

$$\mathrm{d}F_0 = 0.2629q(\frac{\mu}{\rho})^{0.25}(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon \mathrm{d}_s\Psi})^{1.25}u^{1.75}\mathrm{d}L \tag{6}$$

$\mathrm{d}F_1$ 可由(3) 式方便地给出

$$\mathrm{d}F_1 = \frac{0.865G_sU_f}{\rho}\mathrm{d}b \tag{7}$$

$\mathrm{d}W$ 是对气体所作的功,它包括使粒子克服拖曳力 B 所作的功 $\mathrm{d}W_0$ 和使颗粒在垂直管中流动所作的提升功 $\mathrm{d}W_1$.

$$\mathrm{d}W_0 = -\frac{18\mu(1-\varepsilon)}{\rho \mathrm{d}_s^2\varepsilon}(u-u_s)\mathrm{d}L \tag{8}$$

$$\mathrm{d}W_1 = -\frac{(1-\varepsilon)\rho_s g}{\rho}\mathrm{d}z \tag{9}$$

方程(5) 中,$Bs\mathrm{d}L$ 是作用在单位质量的物料上的拖曳力,$fs\mathrm{d}L$ 是其它颗粒和管壁作用在单位质量的物料上的摩擦力,$\mathrm{d}(u_s^2/2)$ 是颗粒的动能.

$$Bs = \frac{18\mu(1-\varepsilon)}{\rho_s \mathrm{d}_s^2\varepsilon}(u-u_s) \tag{10}$$

$$fs = -\frac{\mathrm{d}p_s}{\mathrm{d}L}\frac{1}{\rho_s(1-\varepsilon)} = -\frac{1}{\rho_s(1-\varepsilon)}k(\frac{G_s}{D})^n(\frac{\mu}{\rho})^{0.4}\frac{1}{U_f} \tag{11}$$

式(11) 中,$G_s/D < 47000$ 时,$k = 106, n = 0.83$;$Gs/D > 47000$ 时,$k = 0.838, n = 1.28$.

2.2　方程的简化与 q 的确定

虽然气体与粒子的速度在气力输送的末端具有明显的增加,但是方程(4)、(5) 中的动能与势能的变化较其它项仍较小. 因此方程(4)、(5) 可写为

$$\mathrm{d}p/\rho + \mathrm{d}F = \mathrm{d}W \tag{12}$$

$$Bs\mathrm{d}L - fs\mathrm{d}L = 0 \tag{13}$$

将(6)、(7)、(8)、(9)、(10)、(11) 等式子代入方程(12)、(13) 中,得到

$$\frac{a_2}{p}\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}L} + a_1\frac{\mathrm{d}b}{\mathrm{d}L} + a_6\frac{1-\varepsilon}{p}\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}L} = \frac{a_5}{p\varepsilon} - \frac{a_4(1-\varepsilon)}{p^2\varepsilon^2} - \frac{a_3q(1-\varepsilon)^{1.25}}{p^2\varepsilon^3} \tag{14}$$

其中,$\mathrm{d}b = \mathrm{d}L$,在弯管段;$\mathrm{d}b = 0$,不在弯管段.

$\mathrm{d}z = \mathrm{d}L$,在垂直段;$\mathrm{d}z = 0$,不在垂直段.

$$\varepsilon = \frac{a_4}{a_5p + a_4 + b_1a_2\rho_s p} \tag{15}$$

边界条件为:$L = L_0, p = p_0 = 101300\mathrm{Pa}$.

式中,$a_1 = 1.73\frac{MsM(RT)^2}{(p_f+p_0)^2A^2}$　　$a_2 = RT$

$$a_3 = 0.2629\frac{\mu^{0.25}}{(d_s\Psi)^{1.25}}(\frac{M}{A})^{1.75}(RT)^2 \qquad a_4 = \frac{18\mu M}{d_s^2 A}(RT)^2$$

$$a_5 = \frac{18\mu Ms}{\rho_s d_s^2 A}RT \qquad a_6 = \rho_s gRT$$

$$b_1 = \frac{1}{\rho_s}k(\frac{Ms}{DA})^n\mu^{0.4}(\frac{A}{Ms})(\frac{p_0+p_f}{2RT})^{0.6}$$

上面诸式中，M 为气体的质量流量；T 为气体的绝对温度；R 为氮气的热力学常数，R = 297kJ/(kg·K).

结合方程(15)，当实验中测出压降和绝对压力 p 后，可以方便地计算出 q. 通过对实验数据进行回归分析，得到 q = 0.0484. 因此，从方程(6) 可得到，在挤压流或浓相气力输送中，由于气体粘性而产生的压降为

$$\frac{dp_g}{dL} = 0.0127\mu^{0.25}u^{1.75}(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon})^{1.25}(\Psi d_s)^{-1.25}\rho^{0.75} \tag{16}$$

2.3 数值求解

借助计算机，可以给出方程(14)、(15) 的数值解. 解此积分时，采用四阶龙格 — 库塔方法，步长为 1m. 积分是从输送管路的末端向入口处推进. 最终，获得了整个管线上的压力与空隙率. 对于图2给定的输送系统(D = 20mm, L = 96m)，其压力解以及气体的速度分布如图 4.

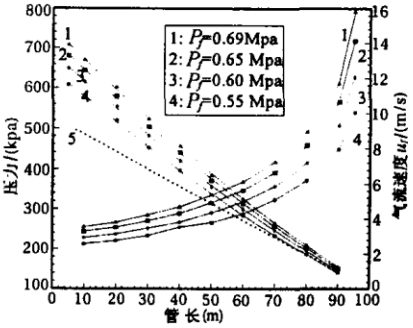

图4 压力和气流速度沿管路的分布

2.4 数值解与实验结果比较

实验中测量的压降值与数值解之间的比较见图 5，绝对压力的实验值及数值解之间的比较见图 6. 可以看出，实验结果与压降公式的计算值吻合得较好.

在图 4 中，曲线 5 通常是气体无明显膨胀时沿管线的压力分布，与曲线 4 对比，得到结论，压力梯度(气体无明显膨胀时为常数)随气体的膨胀在数值上逐渐减少，这与实验数据一致. 这一现象的原因是：当气体等温膨胀时，在相同的压差下，随着绝对压力的降低，释放出的技术功逐渐增多.

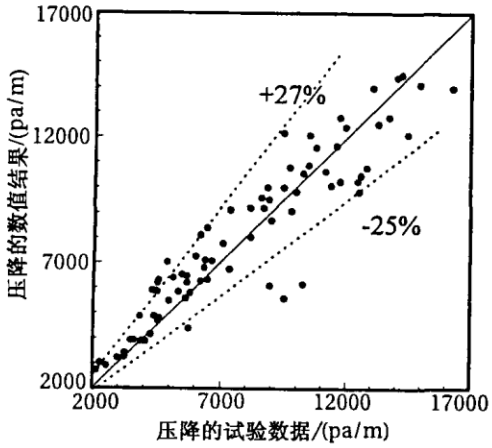

图5 压降的数值解与试验数据的对比

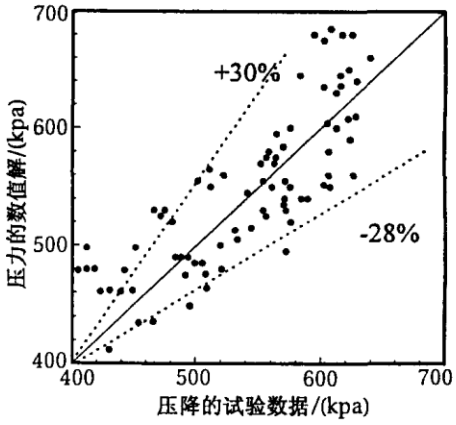

图6 压力的数值解与试验数据的比较

3 结 论

(1)浓相挤压流气力输送能力是供料器压力、管径、管长的函数,可用式(1)计算.

(2)当气体的压缩性可忽略时,浓相挤压流中的压降可由(2)式预测.

(3)由于气体粘性而引起的压降,可由(16)式计算.

(4)对能量方程进行数值求解,可得到沿管长的压力分布. 它显示:压力梯度随气体的膨胀在数值上逐渐减少;在管路末端,气体流速变化加剧.

参 考 文 献

1 刘宗明,李元和,刘福国等 . 增压流化床联合循环(PFBC)中细灰排放的冷态模拟研究 . 中国造船,1995,(增刊):184 ~ 188

2 Konrad K. Dense-phase pneumatic conveying through long pipelines: Effect of signficantly compressible air flow on pressure drop. Powder Technol, 1986,193,48

3 刘福国 . 气相有明显压缩性的密相输送:[学位论文]. 南京:东南大学动力系,1994

Investigation on Denes-Phase Pneumatic Conveying with Significantly Compressible Gas

Liu Zongming
(Shangdong Building Materials Institute　Jinan 250022)
Wang Zhengyuan　Liu Fuguo　Yu Rongxian

Abstract　In this paper, Nitrogen and pulverized coal were used as medium to study long-distance dense-phase pneumatic conveying in which gas compressibility was accompanied significantly, and a theoretical model was founded, which gives good results as compared with the experimental data.

Key words　dense-phase pneumatic conveying　compressibility　pressure drop