

高压密相气力输送弯管压降研究

周云, 陈晓平, 梁财, 孟庆敏, 鹿鹏, 蒲文灏, 许盼

(东南大学热能工程研究所, 江苏省 南京市 210096)

Study on the Pressure Drop of Bend in Dense Phase Pneumatic Conveying of Pulverized Coal at High Pressure

ZHOU Yun, CHEN Xiao-ping, LIANG Cai, MENG Qing-min, LU Peng, PU Wen-hao, XU Pan
(Thermal Energy Engineering Research Institute, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: Experiments of dense-phase pneumatic conveying of pulverized coal with different mean particle size using nitrogen were carried out in an experimental test facility with the conveying pressure up to 4 MPa. The experimental data of pressure drop across bend was obtained under different conveying condition. Based on Barth's pneumatic conveying theory, an empirical correlation of the additional pressure drop coefficient of bend was proposed taking account of the conveying pressure and properties of pulverized coal. Comparing the pressure drop predicted by the correlation with experimental data, it is found that the calculation results agreed fairly well with the experimental data. Results indicate that, the pressure drop for coarse coal is higher than that of fine coal with the same mass flow rate, and the pressure drop increase with the decrease in superficial velocity in dense-phase pneumatic conveying.

KEY WORDS: dense-phase pneumatic conveying; high pressure; pressure drop; mean particle size; bend

摘要: 在输送压力可达 4 MPa 的气力输送实验台上, 进行不同平均粒径煤粉的密相输送实验。获得了不同操作参数下的弯管压损实验数据。在 Barth 附加压力损失理论上, 考虑发送压力以及煤粉物性参数对弯管压损的影响, 运用量纲分析法, 得到高压密相输送时附加压损系数的关联式。用关联式预测的压损值与实验值吻合得很好。研究表明, 相同质量流量下, 平均粒径大的煤粉在弯管中的压损要高于平均粒径小的煤粉; 在密相气力输送中, 压损随表观气速的降低而增加。

关键词: 密相气力输送; 高压; 压损; 平均粒径; 弯管

基金项目: 国家重点基础研究发展规划基金项目(2004CB217702-01)。

Project Subsidized by the Special Funds for Major State Basic Research Projects of China(2004CB217702-01).

0 引言

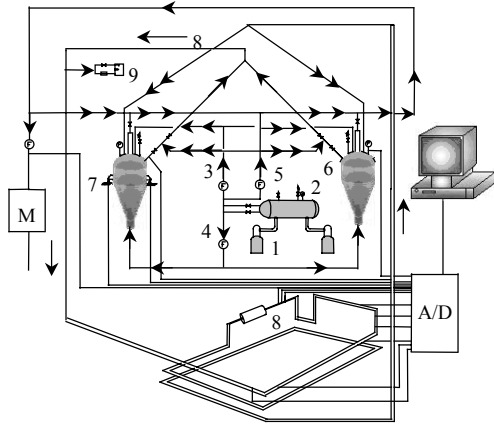
发展大规模高效煤气化技术是解决我国石油燃料短缺的有效途径之一。近些年来, 干煤粉气流床加压气化技术在煤气化行业中受到越来越多的重视。一般干煤粉气流床加压气化装置均采用密相加压输送的供煤系统, 这是因为干煤粉加压密相气力输送管道固气比大、需要的输送气体量少、管路磨损轻^[1-8]。有关粉体的密相输送已有许多有价值的研究成果^[9-21], 但这些研究主要针对低压输送。高压密相输送的流动形态复杂, 流动稳定性下降, 还没有成熟理论可供参考。这是制约干煤粉气流床加压气化技术发展的原因之一。

在高压密相气力输送中, 固相质量流量、发送压力和体积流量等参数与输送管路的压降有着内在的联系。如能预测一定输送条件下的管道压降, 对密相输送的机理研究和系统设计计算都有重要的意义。

国内外诸多学者对气力输送中管道压降特性进行了大量的实验和理论研究^[8-13]。其中, Barth 从能量守恒的观点出发提出了附加压降模型, 成为目前气力输送系统设计中常用的一种管道压降计算方法。然而这些研究主要针对低压输送条件下的直管段, 有关高压下弯管的压降研究报道很少。而弯管阻力是管道压损的重要组成部分, 对此进行深入研究十分必要。颗粒流经弯管时的再加速现象以及运行轨迹的复杂性使得弯管内压降的变化规律明显有别于直管段。本文根据 Barth 附加压力损失理论, 运用量纲分析法, 对大量实验数据进行分析、拟合, 给出了高压密相气力输送弯管的压降经验公式。

1 试验系统及物料性质

高压密相气力输送实验系统如图1所示。作为输送介质的高压氮气自缓冲罐,分成充压风、流化风,经流量计和调节阀进入发料罐,驱动煤粉从发料罐经输送管路进入接收罐。在实验过程中,充压风主要用于维持料罐的压力,而流化风经布风板后对发料罐中的煤粉进行流化,经提升段进入 $\phi 16 \times 3 \text{ mm}$ 的不锈钢输送管道。在发料罐出口处引入补充风可有效调节管道输送固气比,确保输送稳定性。接收罐中的氮气通过布袋除尘器与煤粉分离后,经背压调节阀节流放空。有关实验系统的详细介绍参见文献[2-8]。



1—氮气瓶; 2—缓冲罐; 3—充压风; 4—流化风; 5—补充风;
6—发料罐; 7—荷重传感器; 8—可视窗; 9—计量泵。

图1 高压煤粉密相输送试验系统图

Fig. 1 Schematic diagram of dense-phase pneumatic conveying of pulverized coal under high pressure

输送试验用煤为不同粒径的内蒙烟煤,其真实密度 ρ_s 为 1400 kg/m^3 ,平均粒径 d_s 分别为 0.52×10^{-4} 、 1.15×10^{-4} 和 $3.0 \times 10^{-4} \text{ m}$ 。弯管的弯曲半径 R 为 200 mm ,管内径 D 为 10 mm ,弯管的弯曲角度 θ 为 90° 。

2 理论及实验结果与分析

根据Barth附加压力损失理论^[8],管段内的压降为

$$\Delta p = \Delta p_g + \Delta p_s \quad (1)$$

式中: Δp_g 为气相压损; Δp_s 为固相压损。对于弯管来说,

$$\Delta p_g = \lambda_g \frac{\rho_g U^2}{2} \quad (2)$$

$$Re\left[\frac{D}{R}\right]^2 < 364 \text{ 时}, \lambda_g = 0.00515 \theta Re^{-0.2} \left[\frac{R}{D}\right]^{0.9}; Re\left[\frac{D}{R}\right]^2 >$$

364 时, $\lambda_g = 0.00431 \theta Re^{-0.17} \left[\frac{R}{D}\right]^{0.84}$ 。其中: $Re = \rho_g U D$
 μ_g ; ρ_g 为气体密度, kg/m^3 ; U 为表观气速, m/s ;
 μ_g 为氮气粘度, $\text{kg/(m}\cdot\text{s)}$ 。

$$\Delta p_s = \lambda_s \mu \frac{\pi R \rho_g U^2}{2D} \quad (3)$$

式中: μ 为固气质量比; λ_s 为固相压损系数。在高压密相气力输送中, λ_s 与表观气速、颗粒平均粒径、管道直径、气相与固相密度等有关,即

$$\lambda_s = f(U, D, g, \rho_g, \rho_s, d_s) \quad (4)$$

运用量纲分析法,得到

$$\lambda_s = \varphi Fr^a \left[\frac{\rho_s}{\rho_g}\right]^b \left[\frac{d_s}{D}\right]^c \quad (5)$$

式(4)和式(5)中: Fr 为气体弗劳德数; $Fr = U / \sqrt{gD}$;
 φ, a, b, c 为方程的系数。

通过对不同操作条件下的实验数据(见表1)进行多元回归分析,得到固相压损系数:

水平弯管

$$\lambda_s = e^{0.25} Fr^{-0.69} \left[\frac{\rho_s}{\rho_g}\right]^{0.11} \left[\frac{d_s}{D}\right]^{0.28} \quad (6)$$

垂直弯管

$$\lambda_s = e^{0.56} Fr^{-0.57} \left[\frac{\rho_s}{\rho_g}\right]^{0.041} \left[\frac{d_s}{D}\right]^{0.36} \quad (7)$$

表1 弯管部分实验数据

Tab. 1 Experimental data of bend

工况	平均粒径/ (10^{-4} m)	发送压力/ MPa	接收压力/ MPa	总风量/ (m^3/h)	水平弯 压损/kPa	垂直弯 压损/kPa
1	52	3.6	2.8	2.0	16.87	19.2
2	52	3.4	3	2.0	12.45	16.73
3	115	3.6	2.8	2.4	17.84	19.98
4	300	3.6	2.8	2.6	18.66	21.68

式(6)和式(7)拟合的标准偏差分别为0.05和0.07。图2和图3中将式(6)与式(7)预测的不同操作条件下压损值与对应的实验测量值进行对比,发现上述经验关系式的预测值与实验结果吻合很好,最大相对误差在10%范围内(图2~5中直线代表的实验值为不同工况下的压损,是独立存在的散点,为了便于与预测值比较,将散点连成直线。由于各工况操作条件很多且各不相同,为了节约篇幅,只在表1示出了几组典型工况)。

图4和图5为不同操作条件下单位管长弯管压损实验值与其他弯管压降公式的比较。图中Geldart^[9]

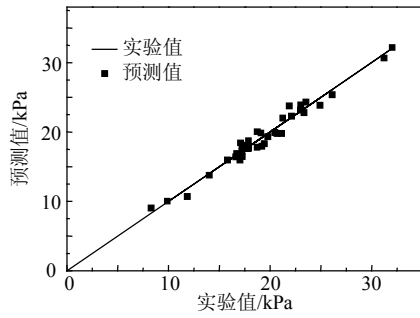


图2 水平弯管压降实验值与预测值比较

Fig. 2 Comparison between calculation and experimental results of pressure drop in horizontal bend

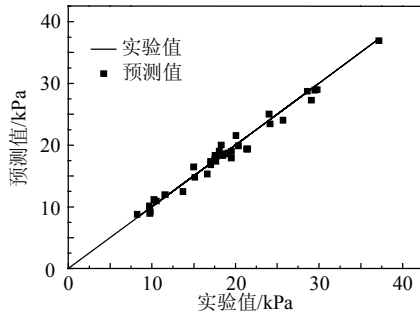


图3 垂直弯管压降实验值与预测值比较

Fig. 3 Comparison between calculation and experimental results of pressure drop in vertical bend

认为单位管长弯管的压损为

$$\Delta p / L = (0.5G_S U) / L \quad (8)$$

式中: G_S 为固相质量通量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

Klinzing^[10]公式为

$$\Delta p = 12 \left[\frac{\rho_S}{\rho_g} \right]^{0.7} \left[\frac{\rho_g U^2}{2} \right] \left[\frac{\Delta L_B}{D} \right] C_t \quad (9)$$

式中: $\Delta L_B = \pi R / 2$, m; $C_t = \frac{Q_S}{Q_S + Q_g}$; Q_S 、 Q_g 分别为管道内煤粉与气体的体积流量, m^3/s 。

从图中可以看出, Geldart 公式预测的弯管压降值要低于本文实验值。Geldart 同样在高压下用氮气

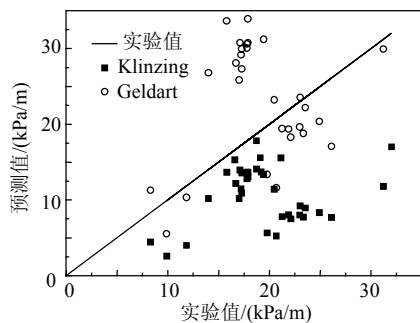


图4 水平弯管不同模型压降值与实验值比较

Fig. 4 Comparison between predicted results by different models and experimental results of pressure drop in horizontal bend

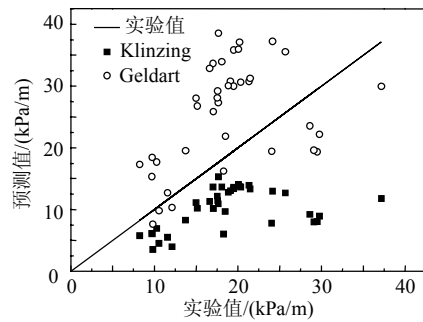


图5 垂直弯管不同模型压降值与实验值比较

Fig. 5 Comparison between predicted results by different models and experimental results of pressure drop in vertical bend

进行煤粉的密相输送, 且弯管几何条件与本文相近, 但是 Geldart 公式只是针对煤粉流经弯管由于能量损失而产生的动能压损, 并不包括煤粉与管壁的摩擦压损; 而本文中固相压损则是动能压损与煤粉摩擦压损的总和; Klinzing 只表明其公式适合计算 90° 弯管, 并没有给出实验条件, 因此用来预测本文高压密相输送条件下弯管的压降值并未获得较好的结果。

图6为实验所测高压密相条件下水平弯管中不同平均粒径煤粉压损与表观气速的关系。从图中可以看出, 在相同质量流量下, 平均粒径大的煤粉其压损值要高于平均粒径小的煤粉。煤粉流经弯管时, 受到离心力的作用向管外侧壁聚集, 颗粒与管外侧壁的摩擦是产生固相摩擦压损的主要原因。平均粒径大的煤粉受到的离心力要高于平均粒径小的煤粉, 因此更容易靠近管侧壁, 颗粒在管壁侧浓度更高, 与壁面的摩擦压损也较大。在动能压损及气相压损相近的情况下^[9], 平均粒径大的煤粉总压损要高与平均粒径小的煤粉。图中压损随着表观气速的降低而增大, 这是因为在密相输送范围内, 煤粉浓度对压损起主导作用。虽然表观气速降低气相压损也降低, 但固相浓度增加, 固气比增大、固相与壁面的摩擦加剧, 固相压损的增加量大于气相压损的降低量, 管路压损增加。从公式(6)可以看出, 煤粉平均粒径越大, 在固相密度不变的情况下, 煤粉的质量也越大, 煤粉受到离心力的作用增强, 固相压损系数增加; 而固相压损系数随着 Fr 数, 也就是表观气速的降低而增加。图7为与图6对应工况下, 用公式(6)计算出的不同平均粒径煤粉的压损值, 预测的压损值与实验值误差在 7% 以内。从预测值可以看出, 在相同输送条件下, 平均粒径大的

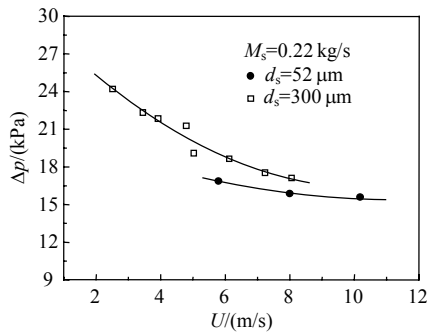


图 6 实验所测 2 种粒径煤粉的水平弯管压损与表观风速的关系

Fig. 6 Experimental data of pressure drop vs. superficial velocity for pulverized coal with mean particle size of 0.52×10^{-4} m and 3.0×10^{-4} m

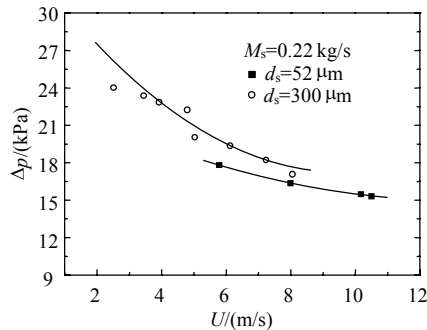


图 7 公式预测 2 种粒径煤粉的水平弯管压损与表观风速的关系

Fig. 7 Calculation data of pressure drop vs. superficial velocity for pulverized coal with mean particle size of 0.52×10^{-4} m and 3.0×10^{-4} m

煤粉压损要高于平均粒径小的煤粉，且压损随着表观风速的降低而增加，结论与实验一致。

3 结论

1) 根据 Barth 附加压力损失理论，运用量纲分析法，得到水平弯管以及垂直弯管的附加压损系数的关联式。该关系式与实验值吻合得很好，最大误差不超过 10%。这个结论为高压密相气力输送系统的设计和操作参数优化提供实验依据。

2) Geldart 的弯管压损公式只是考虑了两相流流经弯管由于能量损失而产生的动能压损，并没有考虑颗粒与管壁的摩擦压损；用 Klinzing 的公式来预测高压密相气力输送压损并未获得较好的结果。

3) 在相同质量流量下，平均粒径大的煤粉压损要高于平均粒径小的煤粉；在密相输送范围内，压损随表观风速的降低而增加。

参考文献

[1] 徐越，吴一宁，危师让. 二段式干煤粉气流床气化技术的模拟研

究与分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 187-190.

Xu Yue, Wu Yining, Wei Shirang. Simulation and analysis on gasification technology of a two-stage dry feed entrained flow bed [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 187-190(in Chinese).

[2] 沈湘林, 熊源泉. 煤粉加压密相输送实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 103-107.

Shen Xianglin, Xiong Yuanquan. Experimental study on dense-phase pneumatic conveying of pulverized coal at high pressures [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (24): 103-107(in Chinese).

[3] 梁财, 陈晓平, 赵长遂, 等. 高压浓相粉煤气力输送特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(14): 31-35.

Liang Cai, Chen Xiaoping, Zhao Changsui, et al. Investigation on dense-phase pneumatic conveying characteristic of pulverized coal under high pressure[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(14): 31-35 (in Chinese).

[4] Liang Cai, Chen Xiaoping, Zhao Changsui, et al. Flow characteristics and Shannon entropy analysis of dense-phase pneumatic conveying of variable moisture content under high pressure[J]. Chemical Engineering and Technology, 2007, 30(7): 926-931.

[5] 梁财, 陈晓平, 赵长遂, 等. 高压浓相变水分煤粉输送特性及香农信息熵分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(26): 40-45.

Liang Cai, Chen Xiaoping, Zhao Changsui, et al. Flow characteristics and Shannon entropy of dense-phase pneumatic conveying of pulverized coal with variable moisture content at high pressure [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(26): 40-45(in Chinese).

[6] Pu Wenhao, Chen Xiaoping, Zhao Changsui, et al. Three-dimensional numerical simulation of dense pneumatic conveying of pulverized coal in a vertical pipe at high pressure[J]. Chemical Engineering and Technology, 2008, 31(2): 215-223.

[7] 梁财, 陈晓平, 赵长遂, 等. 高压浓相粉煤气力输送[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2007, 37(3): 427-431.

Liang Cai, Chen Xiaoping, Zhao Changsui, et al. Dense-phase pneumatic conveying of pulverized coal under high pressure[J]. Journal of southeast university, 2007, 37(3): 427-431(in Chinese).

[8] 熊源泉, 赵兵, 沈湘林. 高压煤粉密相气力输送垂直管阻力特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 248-251.

Xiong Yuanquan, Zhao Bing, Shen Xianglin. A study on the resistance properties for vertical pipe in dense phase pneumatic conveying of pulverized coal under high pressures[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 248-251(in Chinese).

[9] Geldart D, Ling S J. Dense Phase conveying of fine coal at high total pressure[J]. Powder Technology, 1990, 62(3): 243-252.

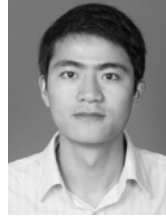
[10] Klinzing G E, Marcus R D, Rizk. Pneumatic Conveying of Solids [M]. London: Chapman & Hall, 1997: 117-119.

[11] Sanchez L, Vasquez N A, Klinzing G E, et al. Evaluation of models and correlations for pressure drop estimation in dense-phase pneumatic conveying and experimental analysis[J]. Powder Technology, 2005, 153(3): 142-147.

[12] Laouar S, Molodtsov L. Experimental characterization of the pressure drop in dense phase pneumatic transport at very low velocity [J]. Powder technology, 1998, 95(2): 165-173.

[13] Geldart D, Ling S J. Saltation velocities in high pressure conveying of

- fine coal[J]. Powder Technology, 1992, 69(2): 157-172.
- [14] Hirota M, Sogo Y, Marutani T, et al. Effect of mechanical properties of powder on pneumatic conveying in inclined pipe[J]. Powder Technology, 2002, 122(2): 150-155.
- [15] Lee L Y, Quek T Y, Deng R, et al. Pneumatic transport of granular materials through a 90° bends[J]. Chemical Engineering Science, 2004, 59(21): 4637-4651.
- [16] Gong Xin, Guo Xiaolei, Dai Zhenghua, et al. High solids loading pneumatic conveying of pulverized coal[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2006, 57(3): 640-644.
- [17] Peter W. Wypych, Yi Jianglin. Minimum transport boundary for horizontal dense-phase pneumatic conveying of granular materials [J]. Powder Technology, 2003, 129(3): 111-121.
- [18] Hong J, Shen Y, Tomita Y. Phase diagrams in dense phase pneumatic transport[J]. Powder Technology, 1995(84): 213-219.
- [19] Solt P E. Comparing dilute- and dense-phase conveying[J]. Powder and Bulk Engineering, 2003, 17(3): 64-68.
- [20] Lev A. A model for non-suspension gas-solids flow of fine powders in pipes[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2001, 27(3): 415-435.
- [21] Herbreteau C, Bouard R. Experimental study of parameters which influence the energy minimum in horizontal gas-solid conveying [J]. Powder Technology, 2000, 112(3): 213-220.



周云

收稿日期: 2008-03-27。

作者简介:

周云(1984—), 男, 硕士研究生, 研究方向为气固两相流, clearboy9@yahoo.com.cn;

陈晓平(1967—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为气固两相流、洁净煤燃烧等;

梁财(1980—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为气固两相流、洁净煤燃烧等。

(责任编辑 车德竞)