

# 水平管道细粉高浓度分层流动阻力特性的试验研究

邱朋华, 陈力哲, 王 宏, 吴少华, 秦裕琨

(哈尔滨工业大学 热能工程教研室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 高浓度粉体输送由于人们对其优越性认识的深入而得到了广泛的研究。水平管内分层流动是高浓度粉体输送流型中最重要的形式, 研究其阻力特性有着重要的意义。本文通过对近 50 年来在这一领域内工作的回顾, 分析了不同学者所获得的经验公式的利弊。在一高浓度气力输送试验台上的试验, 获得了水平管道细粉高浓度分层流动的阻力公式, 误差分析认为, 该公式能够满足一般工程设计要求。

**关 键 词:** 气力输送; 阻力特性; 气固两相流动

中图分类号: TQ051.1 文献标识码: A

## 1 前言

由于人们对管内高浓度气固流动优越性认识的不断深入, 一些相应的高浓度输送装置从 20 世纪 20 年代开始出现。对于粉末而言, 分层流动是高浓度输送流型中最稳定的状态, 在要求输送过程波动足够小, 输送固气混合比高的场合, 它是首选的流型。近 50 年来, 人们对于高浓度气力输送规律进行了大量的研究, 特别是两相流动在管内的阻力特性方面的研究, 获得了大量结果, 以下是一些研究者的研究成果。

(1) 1951 年, Albright 等在长约 15 m, 内径 7.94 m, 9.53 m, 12.7 m 的输送管中进行煤粉(平均粒径 78  $\mu\text{m}$ )输送试验, 混合比达到 125~256, 输送流态不明<sup>[1]</sup>。

(2) 1959 年, Wen 和 Simmon 在光滑透明玻璃管中(内径 12.7 mm, 20.1 mm, 25.4 mm)和钢管(内径 6.4 mm)进行短距离输送玻璃珠(平均粒径 0.071 mm, 0.147 mm, 0.279 mm)和煤粉(平均粒径 0.112 mm, 0.5 mm, 0.754 mm)两种物料, 混合比为 80~780<sup>[2]</sup>。

(3) 前苏联在研究燃用无烟煤、贫煤锅炉的燃烧系统中, 采用高浓度输粉系统, 通过在 III-210 型锅炉上的工业试验, 获得较简单的适于工程应用的阻力公式, 通过试验数据的优化表明输送浓度在 50 kg/kg 时输送过程最稳定<sup>[3-4]</sup>。

(4) 1990 年, Geldart 和 Ling 在钢管中进行了长距

离(105 m)的密相输送煤粉试验, 试验压力为 3.53 MPa 和 5.04 MPa, 并发现颗粒与管壁间的摩擦压降是高压密相输送压降的主要组成部分<sup>[5]</sup>。

(5) 1995 年, 洪江在其论文中提出一种计算水平管内气固分层流动阻力的方法, 他采用力平衡的方法, 分析了分层流动中上下两层流动介质, 以及两层之间的力作用情况, 对每一种受力采用经验或半经验公式的方法, 最终得到阻力公式, 精度较高<sup>[6]</sup>。其试验的颗粒粒径范围是 74  $\mu\text{m}$  和 105  $\mu\text{m}$  两种。

(6) 1997 年, 吴慧英在东南大学磁流体发电试验台上进行煤粉输送试验, 输送状态不明, 获得输送浓度范围是 85.516~354.246 的阻力公式<sup>[7]</sup>。

从以上各研究者的结果可以看出: 大多数学者研究阻力特性的方法是基于研究单相流体阻力特性的思路, 或是延续稀相悬浮流动的阻力计算方法, 而忽略了高浓度输粉条件下流动形式丰富, 流型与流动阻力之间的关系需给与考虑的事实。这是导致试验误差较大的一个主要因素。另外, 两相流动中某些参数测量非常困难, 试验可重复性较差等也是造成试验误差大的原因。但不同学者的这类工作在他们各自定义的试验范围内, 通常是可行的, 同时精度能够满足一般工程需要。但是如果考虑两相流动流型与阻力特性关系所获得的结果, 所做的某些假设或是过于理想化, 或是不尽合理, 距离实际工程应用还有一段距离。因此, 这就需要我们, 一方面针对不同的研究对象, 不同的问题, 需要进行专门的试验, 以获得在特定条件下精度较高的试验规律, 这在高浓度输送研究现有的理论程度下是必须的。另一方面, 要从研究高浓度输送机理出发, 认真分析两相流动的流动特征、混合特性与阻力特性之间的关系, 这应是今后高浓度两相流研究的重要方向<sup>[8-9]</sup>。

## 2 试验系统及测量

本文在一个粉仓式给粉的高浓度气力输送试验台上,对平均粒径为 38.6 μm 的细粉水平分层流动的阻力特性进行研究,获得工程适用的稳态充分发展阶段水平管道细粉输送阻力公式,并对试验误差进行了分析。本试验所研究粒径在模化条件<sup>[10]</sup>下可与室燃炉燃用的煤粉粒径相比拟,所获得的经验公式可用来为研究发电厂煤粉高浓度输送的规律提供预报和指导。因此这一工作对进一步研究在发电厂中采用高浓度输粉技术输送煤粉技术,发挥这一技术的诸多优点具有重要意义。

### 2.1 试验台简介

在一台仓泵给粉高浓度输粉试验台上,进行了水平管内分层流动的阻力特性试验。试验系统如图 1 所示。仓泵内径为 600 mm 输送管内径为 25.4 mm。试验物料为玻璃微珠,其物性参数如表 1 所示。

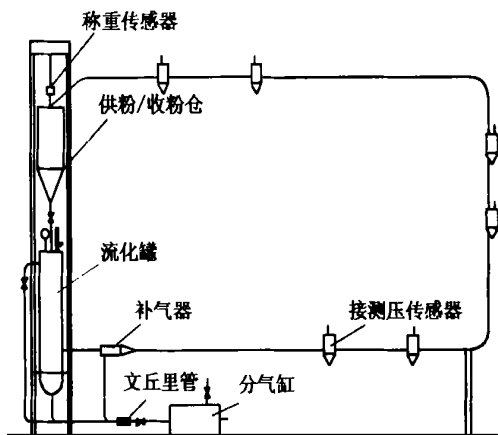


图 1 试验台示意图

表 1 玻璃微珠的物性参数

平均粒径 $d_s/\mu\text{m}$	真实密度 $\rho_s/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	堆积空隙率 $\epsilon_0$	终端速度 $u_t/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	类型
38.6	2519.6	0.465	0.11	球状

### 2.2 测量装置

气体流量测量采用标定过的文丘里管。固体流量测量采用 TB101-H 型称重传感器配 D-80D 型称重仪表。试验段压差测量采用 MSI-150 PRO 型差压变送器。罐压测量采用精密压力表。试验过程中,每 10 秒钟记录一次数据,从试验数据基本稳定开始到一罐粉输送结束,每次试验稳定段的有效数据记录时间大约 2~5 分钟。试验时每个工况重复 5 次,以增强试验数据的可信度。一共进行了 9 个工况,反映了细粉在质量浓度为 38~348 之间时的阻力变化规律。

## 3 试验数据回归及分析

### 3.1 试验数据回归

试验数据回归过程中,认为气体是不可压缩的,对不同工况下的试验数据根据罐压进行压力和密度修正。根据阻力计算的柯西公式,可以将阻力公式写成如下形式:

$$\Delta p/L = \frac{\lambda}{D} \frac{1}{2} \rho v^2$$

式中:  $\lambda$ ——沿程阻力系数;

$1/2\rho v^2$ ——气体相动压头;

$D$ ——输送管内径;

$\Delta p/L$ ——单位管长输送管上的压降。

获得相应试验条件下阻力公式的关键是求出  $\lambda$  与各单值量或是准则数的关系。通过分析发现,阻力系数与以下各单值量有关系:

即:

$$\lambda = f(v_g, v_s, \rho_g, \rho_s, d_s, D, g, \mu_s)$$

式中,  $\mu_s$  为固气两相质量流量比;

$v_g, v_s$  分别为气固两相表观速度;

$\rho_g, \rho_s$  分别为气固两相真实密度;

$d_s, D$  分别为颗粒平均粒径和输送管内径。

通过量纲分析,可以获得以下几个准则式:

$$\lambda = f(\rho_g/\rho_s, Fr_g, \mu_s)$$

经多元线性回归后获得如下经验公式:

$$\lambda = 453.7329 \times \mu_s^{-0.16486} \times Fr_g^{-2.49224} \times (\rho_g/\rho_s)^{-0.27546}$$

试验范围是气体流速:4.19 ~ 15.12 m/s, 固体质量流量 0.325 ~ 0.943 kg/s, 质量浓度: 18.89 ~ 428.67 kg/kg。

### 3.2 误差分析

图 2 是未计及系统误差时的误差曲线,其上下限分别是 -8.14% ~ +9.29%。

$$\Delta = \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2 + \Delta_4^2}$$

$$\Delta = \sqrt{0.0929^2 + 0.05^2 + 0.015^2 + 0.05^2}$$

$$\Delta_1 = \sqrt{0.0814^2 + 0.05^2 + 0.015^2 + 0.05^2}$$

考虑测量仪器误差,总的试验回归公式误差是:

$$\Delta = -10.89\% \sim 11.77\%$$

上式中:  $\Delta_1 \sim \Delta_4$  分别为:回归公式误差、称重传感器误差、称重传感器变送器误差和差压变送器误差。

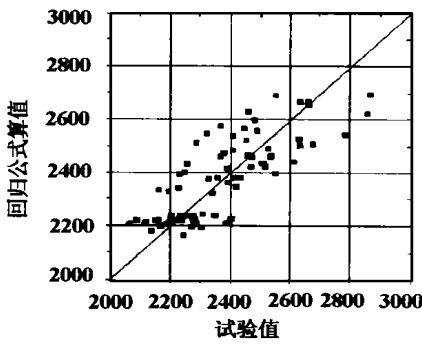


图 2 试验回归公式误差分析

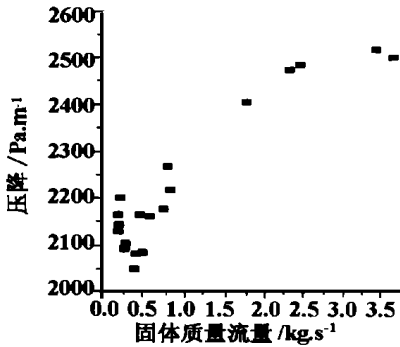


图 3 固体质量流量与压降关系

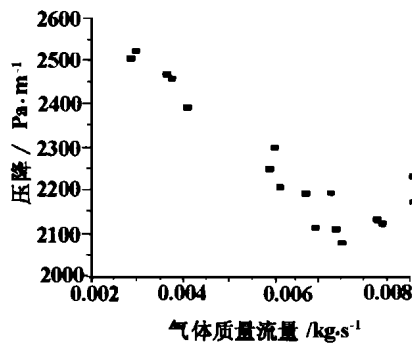


图 4 气体质量流量与压降关系

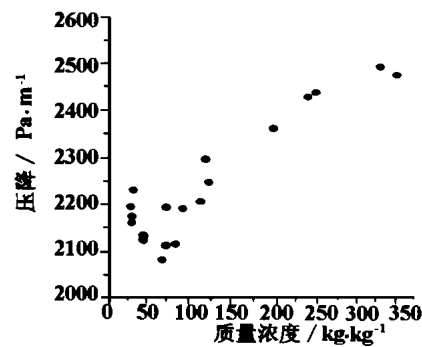


图 5 质量浓度与压降关系

### 3.3 试验结果分析

图 3 ~ 图 5 分别是试验条件下气固两相质量流量, 质量浓度与单位管长上压降的关系。可以看出, 各量与压差之间近似的呈递增或递减趋势。由于试验装置的限制不可能做到均匀安排试验工况, 同时各单项指标之间均是相关的, 因此单从各单值量与压差的关系图上看, 规律并不是十分明显。

图 6 ~ 图 8 是压差与气相的表观动压头和管径相除后 ( $\Delta p / (1/2 \rho v^2 D)$ ) 的值, 即输送沿程摩擦阻力系数与各单值量的关系。可以看出, 规律十分明显, 都近似呈指数关系。其中, 气相质量流量与阻力系数呈负指数关系, 固相质量流量和两相质量浓度与阻力系数呈

正指数关系。

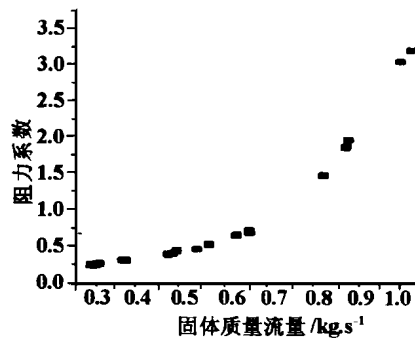


图 6 固体质量流量与阻力系数关系

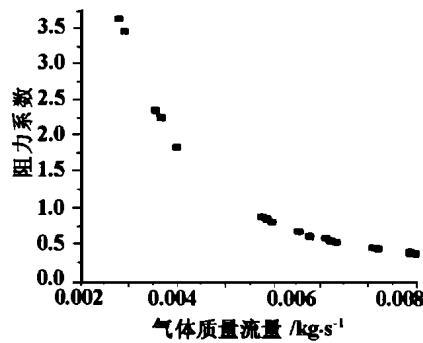


图 7 气体质量流量与阻力系数关系

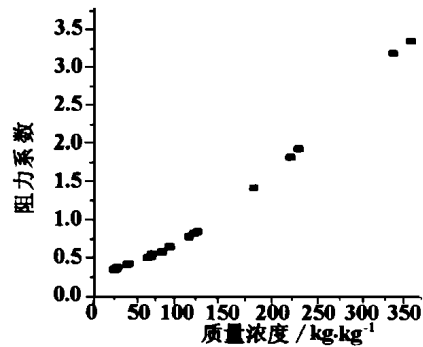


图 8 质量浓度与阻力系数关系

式简单, 精度较高, 完全满足一般工程需要。其适用范围正是一般输送场合适用的条件。

对实验数据的分析发现, 阻力系数与各单值量规律明显, 近似呈指数形式。

### 参考文献:

[1] ALBRIGHT C W, HIDDEN J H, SIMONSH P, *et al.* Pressure drop in flow of dense coal-air mixture[J]. *Ind. Eng. Chem.*, 1951, 43(8): 1837-1840.

[2] WEN C Y, SIMONS H P. Flow characteristics in horizontal fluidized solids transport[J]. *AIChEJ.*, 1959, 5(2): 263-267.

(转 72 页)

## 4 结论

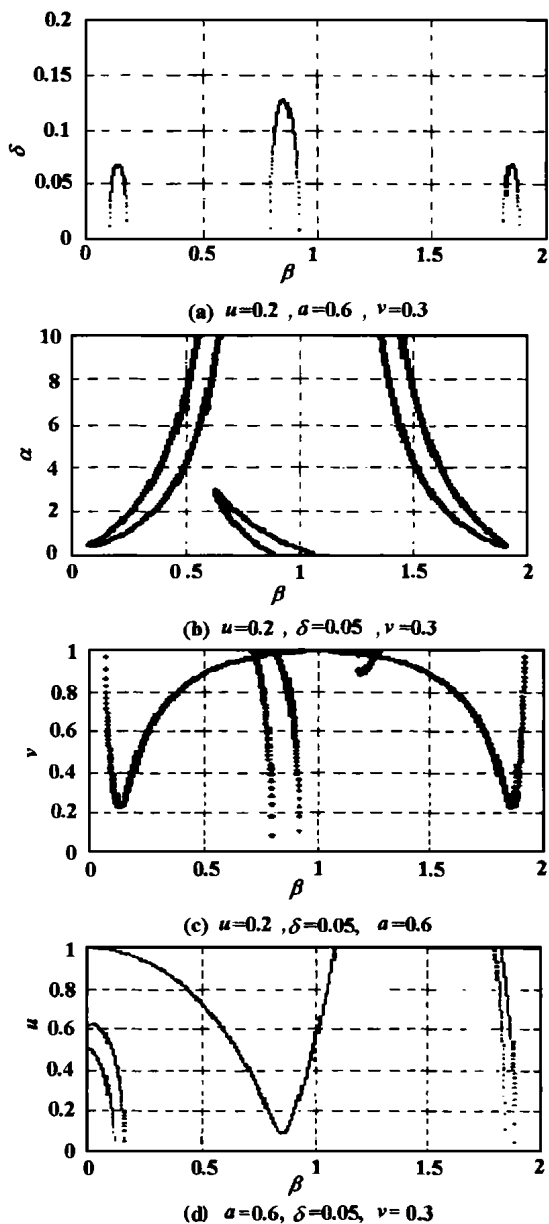


图 2 系统参数对稳定性的影响(a)、(b)、(c)、(d)

由图 2 中(c)可知:随着支撑刚度各向异性系数值的增大,不稳定区域逐渐增大,因此,减小支撑刚

度的各向异性系数,能减小不稳定区域的大小。但在临界转速附近( $\beta = 1.0$ ),很小的支撑刚度各向异性系数也有可能使系统失稳。

由图 2 中(d)可知:在某些转速区域,很小的转子刚度各向异性系数也有可能使系统失稳,随着转子刚度各向异性系数值的增大,不稳定区域逐渐增大,因此,减小转子刚度的各向异性系数,能减小不稳定区域的大小。

### 4 结论

根据以上的分析,可以得出以下结论:

- (1) 可以通过提高支撑刚度的对称性,来减小不稳定区域的大小;
- (2) 系统在临界转速附近非常容易失稳,可以通过提高支撑的相对柔度来消除;
- (3) 适当增大系统阻尼能抑制不稳定区域的出现,但从能量的观点来看,并不是一种好的方法。

### 参考文献:

[ 1 ] CRANDALL Y S H, BROSEN P J. On the stability of rotation of a rotor with rotationally unsymmetrical inertia and stiffness properties[ J ] . **Journal of Applied Mechanics**. 1961, 28: 567—570.

[ 2 ] JEI G, LEE C W. Modal analysis of continuous asymmetrical rotor-bearing systems[ J ] . **Journal of Sound and Vibration**, 1992, 152 (2): 245—262.

[ 3 ] JEI G, LEE C W. Modal characteristics of asymmetrical rotor-bearing systems[ J ] . **Journal of Sound and Vibration**, 1993 162(2): 209—229.

[ 4 ] KANG Y, IEE Y G, CHEN S C. Instability analysis of unsymmetrical rotor-bearing systems using the Transfer Matrix Method[ J ] . **Journal of Sound and Vibration**. 1997, 199(3): 381—400.

[ 5 ] 周纪卿. 非线性振动[ M ] . 西安: 西安交通大学出版社, 1998.

(何静芳 编辑)

(接 25 页)

[ 3 ] МУРАЕКНИН В.Н. 高浓度给粉技术在燃烧库涅茨贫煤的 TIII—210A 锅炉上的应用[ J ] . 热力发电译丛, 1991, (3): 28—32.

[ 4 ] 阿里那特斯基. TIII—210A 锅炉高浓度给粉系统[ M ] . 原苏联乌克兰知识出版社, 1990.

[ 5 ] GELDART D, LING S L. Dense phase conveying of fine coal at high total pressure[ J ] . **Powder Technology**, 1990, 62: 243—252.

[ 6 ] 周建刚, 沈颐身, 马恩泽. 粉体高浓度气力输送控制与分配技术

[ M ] . 北京: 冶金工业出版社, 1996.

[ 7 ] 吴慧英, 周强泰. 煤粉高浓度输送阻力特性的试验研究[ J ] . 热动力工程, 1997, 12(3): 189—192.

[ 8 ] 黄 标. 气力输送[ M ] . 上海: 上海科学技术出版社, 1984.

[ 9 ] 上野具贞. 粉粒体的空气输送[ M ] . 北京: 电力工业出版社, 1982.

[ 10 ] 李之光. 相似与模化[ M ] . 北京: 国防工业出版社, 1982.

(何静芳 编辑)

direct-flow slit type burner. The 360 MW boiler is a product of French Stein Co. With the help of a hot-wire anemometer the velocity distribution of a flow field in the furnace was measured and the flow field diagram of W-shaped air flow in the furnace under various operating conditions obtained. An analysis has been performed with respect to the following: the law of air flow velocity distribution of the flow field under different operating regimes, the filling fullness of air within the furnace, the air flow path, velocity excursions at the furnace outlet, etc. Also studied are the in-furnace aerodynamic field characteristics and their variation law and mechanism along with a measurement of flame short circuiting of the W-shaped flame boiler and the velocity excursions at the furnace outlet. **Key words:** W-shaped flame, boiler, flame short circuiting, velocity excursion, cold-state model test, aerodynamic field

水平管道细粉高浓度分层流动阻力特性的试验研究 = **Experimental Research of the Resistance Characteristics of High-concentration Fine Powder Stratified Flow in a Horizontal Pipe** [刊, 汉] / Qiu Peng-hua, Chen Li-zhe, Wang Hong, *et al* (Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2001, 16(1). —23 ~ 25, 72

With a progressively better understanding of the advantages of a high-concentration fine powder conveying system the latter has recently become an object under extensive study by numerous scholars. A stratified flow in a horizontal pipe represents the most important form of high-concentration powder transport flow. In view of this the study of its resistance characteristics is of great significance. On the basis of a review of their work in this area over the past fifty years the authors have analyzed the merits and demerits of empiric formulas presented by various scholars. Through a series of tests on a test rig of high-concentration pneumatic conveying system, deduced is a formula for calculating the resistance characteristics of a high-concentration fine powder stratified flow in a horizontal pipe. An error analysis indicates that the above-mentioned formula can well meet the relevant requirements of general engineering design. **Key words:** pneumatic transport, hydrodynamic characteristics, resistance characteristics, gas-solid two-phase flow

论燃气轮机在天然气输气管道上的选用和配套 = **The Selection of Gas Turbines for Use in a Natural Gas Transmission Pipeline and the Supply of Necessary Supporting Auxiliaries** [刊, 汉] / Chen Reng-gui (Tarimo Petroleum Exploration and Development Command Headquarters, Kurlu City, Xingjiang Autonomous Region, China, Post Code: 841000) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2001, 16(1). —26 ~ 29

A brief analysis was conducted of the major features of natural gas transmission pipelines, natural gas compressors and gas turbines. On this basis some problems are highlighted, which merit special attention in the course of the selection of gas turbines for use in natural gas transmission pipelines and the appropriate provision of necessary supporting auxiliaries. **Key words:** natural gas transmission, compressor, gas turbine

新模式热电联产供热系统用热终端高效换热器的分析 = **The Analysis of a High-efficiency Heat Exchanger at the Heat User End for a New Mode of Cogeneration Heat Supply System** [刊, 汉] / Qiu Lin (Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture, Beijing, China, Post Code: 100044) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2001, 16(1). —30 ~ 32

The present paper has proposed for a new mode of cogeneration low-grade heat supply system a high-efficiency heat exchanger at heat user's end, which is composed of a new type of fan coil tubes. A discussion and analysis was conducted from the perspective of technical feasibility, energy-saving potential and cost-effectiveness. The aim of the above is to provide a theoretical basis for the implementation of a new mode of cogeneration heat supply system. **Key words:** co-production of heat and electrical power, low-grade heat supply, exergy efficiency

300 ~ 3 000 K 水蒸气红外辐射谱带模型参数 = **Infrared Radiative Spectral Band-model Parameters for Water Vapor in the 300 - 3000 K Temperature Range** [刊, 汉] / Dong Shi-kui, Tan He-ping, Yu Qi-zhang, Liu Lin-hua