

煤粉密相气力输送弯管流动特性

王 翀, 陆海峰, 郭晓镭, 刘海峰, 龚 欣

(华东理工大学上海煤气化工程技术研究中心, 上海 200237)

摘要:在自主搭建的工业级管径(内径 50 mm)气力输送实验平台上,开展了密相气力输送实验,对气固两相通过弯管的流动特性进行了研究。借助电容层析成像技术分析弯管出口截面流型特征,发现煤粉流经弯管时管道截面浓度存在明显径向分布,外壁浓度相对较高。采用附加压降法,并结合对实验数据的回归分析,建立了精度 $\pm 10\%$ 以内弯管压降模型。并基于微元分析和弯管压降分布的基本规律,获得了煤粉浓度沿弯管流动方向的分布特征。

关键词:密相气力输送;弯管;流型;浓度;压降

中图分类号:TQ54

文献标志码:A

密相气力输送是气流床煤气化技术工艺中重要的供料和输送方式,具有低流速、高固气比、低能耗、低耗气量、管道磨损小等优点^[1-4]。在煤粉密相气力输送工程中,因为现场条件限制,常常会采用弯管输送的方式^[5]。但是,高浓度煤粉经过弯管时,常常形成不稳定输送的情况^[6],造成管路震动、管壁磨损严重和阻力损失大等不利影响^[7],因此,为了克服这些不利影响,研究弯管流动特性具有重要意义。

国内外对弯管研究包括^[5, 8-10]:周云等^[9]利用 Geldart 公式计算管道压降损失时,得出平均粒径大的煤粉压损大于平均粒径小的煤粉的结论;代婧鑫等^[5]采用 Savege 的颗粒动力学模型对垂直转水平弯管段输送流动特性进行模拟,发现弯管处出现明显的塌陷、二次流、涡流以及堆积等现象,从而引起弯管处两相流压力和浓度分布不均;周靖^[10]研究了不同曲率半径弯管的压损,发现弯管处的磨损均在弯管外壁;Chu 等^[11]采用固相离散元素法发现颗粒经过弯管时,弯管外壁产生强烈的气固相互作用,使得轴向速度的峰值由外壁向内壁移动。上述分析表明,目前关于弯管的文献多数是稀相气力输送,以研究弯管压损、摩擦等影响为主,但关于煤粉密相气力

输送弯管流动特性的研究报导相对较少。

本文在自主搭建的工业级管径(内径 50 mm)气力输送实验平台上,开展了煤粉密相气力输送实验。首先,借助 ECT 系统研究了弯管出口 ECT 截面流型和径向浓度分布随表观气速的变化情况,并对上述变化情况进行了解释;然后根据 Barth 附加压降损失理论,运用量纲分析法,对大量实验数据进行分析、拟合,给出了密相气力输送弯管的压降经验公式;最后,基于微元分析方法和弯管压力分布的基本规律,获得了煤粉浓度沿弯管流动方向的分布特征。

1 实验物料和实验装置

1.1 实验物料

以煤粉为实验物料,其基本物性参数如表 1 所示。煤粉的粒度分布由马尔文激光粒度仪 (Malvern 2000) 测得。其中 d_v 、 d_s 、 d_{10} 、 d_{50} 和 d_{90} 分别为体积平均粒径、表面积平均粒径、累计体积分数为 10% 的粒径、累计体积分数为 50% 的粒径和累计体积分数为 90% 的粒径。此外, ρ_p 为煤粉颗粒真密度。煤粉粒径分布在 1~200 μm 区间内,区间分布范围较广,大量

收稿日期: 2020-10-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51876066); 国家重点研发计划资助 (2018YFC0808500); 上海煤气化工程技术研究中心 (18DZ2283900); 中央高校基本科研业务费专项资金

作者简介: 王 翀 (1995—), 男, 浙江杭州人, 硕士生, 从事密相气力输送研究。E-mail: 717022137@qq.com

通信联系人: 陆海峰, E-mail: luhf@ecust.edu.cn

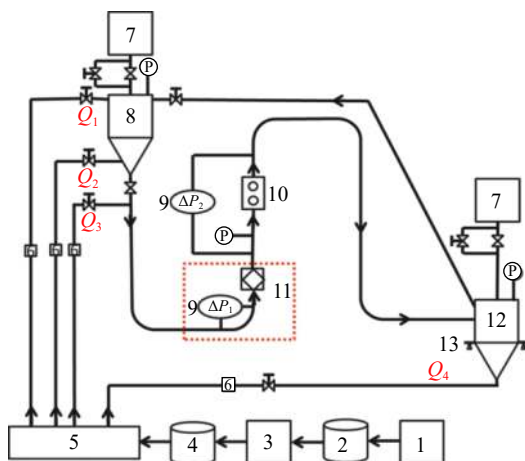
煤粉粒度集中在 1~50 μm 内,细颗粒含量较多。煤粉的体积平均粒径为 40.30 μm ,颗粒密度为 1 627.50 kg/m^3 。此外,用 MA150 红外水分分析仪测定实验前后水分质量分数(MC)均为 1.15%,结果表明实验过程的煤粉水分较低且无变化,对输送过程无影响。

表 1 煤粉的物料性质
Table 1 Material properties of pulverized coal

$d_v/\mu\text{m}$	$d_s/\mu\text{m}$	$d_{10}/\mu\text{m}$	$d_{50}/\mu\text{m}$	$d_{90}/\mu\text{m}$	$\rho_p/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	MC/%
40.30	4.83	2.07	17.42	115.30	1 627.50	1.15

1.2 实验装置与流程

煤粉密相气力输送装置如图 1 所示,煤粉的输送在密闭循环系统内进行。实验装置管道总长约为 23 m。实验以来自空气压缩机的空气为输送载气,气体分别通过缓冲罐,冷冻干燥机和缓冲罐后进入气体分配器,经合理分配并计量后送入输送系统。进行输送实验时,调节进入输送系统的三路气(加压气 Q_1 、流化气 Q_2 、调节气 Q_3)使其达到所需的操作条件。其中,加压气用于维持发料罐压力;流化气用于流化发料罐煤粉以及维持发料罐压力;调节气用于调节管路中煤粉的颗粒浓度和速度。在指定的操作条件下,打开发料罐下方阀门,气体和煤粉从发料罐流出并沿管线输送到接料罐,气固两相在接料罐中分离,煤粉由于重力作用沉积到罐底,气体由除尘器排出。输送实验完成后,关闭进入系统的加压气 Q_1 、流化气 Q_2 和调节气 Q_3 ,打开 Q_4 ,采用稀相输送的方式将物料送回到发料罐,为下次实验做准备。



1-空气压缩机,2,4-缓冲罐,3-冷冻干燥机;5-气体分配器;6-气体流量计;7-除尘器;8-发料罐;9-压差变送器;10-固体质量流量计;11-电容层析成像系统;12-接料罐;13-称重传感器;14-压力传感器

图 1 实验装置图

Fig. 1 Diagram of experimental equipment

为了分析煤粉气固两相通过弯管的流动特征,选取了图 1 中红色虚线处的水平-竖直弯管作为研究对象。采用压差变送器测量弯管压降,并在紧挨弯管出口截面安装了电容层析成像(ECT)系统。其中,压差变送器由北京远东罗斯蒙特仪表有限公司生产,精度为 0.1%;ECT 由南京工业大学^[12-13]研制,采样频率为 140 帧/s,在使用之前进行了空、满管标定,可获得煤粉的截面浓度分布特征。此外,还在弯管下游管路上安装了 keller 公司的高精度膜片传感器(精度为 0.1%)用于测量管道压力,安装了美国 Thermo Ramsey 公司生产的固体质量流量计(标定后精度 <1%),用于测量在输送过程中的速度、浓度等信息。进入系统的气量通过由 KROHNE 公司生产的金属浮子流量计(精度 1%)进行调节和测量,煤粉流量通过安装在接料罐上由梅特勒-托利多(常州)测量技术有限公司生产的称重传感器(精度 0.05%)获得。

在上述气力输送系统开展了大量实验,具体工况如图 2 所示。ECT 测量表明,在弯管出口截面存在 3 种典型的输送流型。从这些实验工况中,重点选取了表 2 的 3 组典型流型工况用于分析弯管流动特征。操作参数和特性参数如表 2 所示,对应加压气 Q_1 为 0 m^3/h , Q_2 、 Q_3 、 W_s 、 P_T 、 U_g 、 ΔP_1 、 $\Delta P_2/L$ 、 P 和 μ 分别表示流化气、调节气、输送量、罐压、表观气速、弯管压降、竖直管单位管长压降、竖直管 P 点压力和固气比。

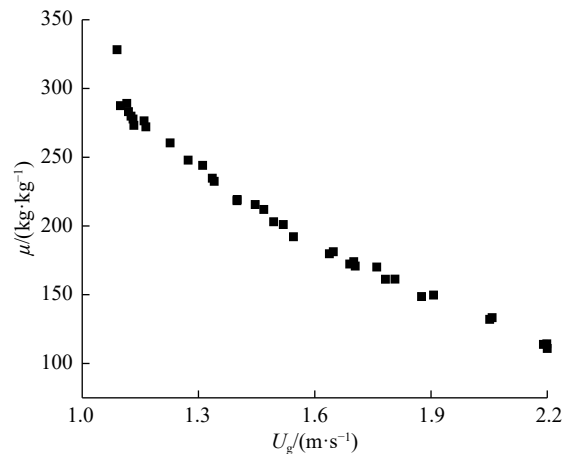


图 2 表观气速与固气比关系图

Fig. 2 Relationship between superficial gas velocity and the ratio of solid and gas

2 结果与讨论

2.1 弯管流动特性分析

通常气固两相流刚流出弯管,其流动未完全展

表2 实验工况表
Table 2 Experimental condition

Case	$Q_2/(m^3 \cdot h^{-1})$	$Q_3/(m^3 \cdot h^{-1})$	$W_s/(kg \cdot h^{-1})$	P_1/kPa	$U_g/(m \cdot s^{-1})$	$\Delta P_1/kPa$	$\frac{\Delta P_2}{L}/(kPa \cdot m^{-1})$	P/kPa	$\mu/(kg \cdot kg^{-1})$
1	15.75	0.00	4659.85	68.22	1.09	10.21	5.64	39.79	328.23
2	16.34	5.73	4161.88	62.15	1.76	8.61	3.90	49.65	170.14
3	16.07	16.41	3980.70	91.63	2.20	7.30	2.94	79.34	110.92

开,流体从未完全展开流动到完全展开流动需要流动一段距离,而流体由弯管出口输送到完全展开的距离称之为入口长度 L_e ^[14] 的计算方式如下:

Enick 和 Klinzing^[15] 确定了竖直上升管气固两相流湍流由弯管出口到充分发展段的距离:

$$\frac{L_e}{D} = (Re^{1/2}(1+\mu)) \cdot a(Fr)^b \mu^c (Re(1+\mu))^d \left(\frac{D}{d_s}\right)^e \left(\frac{\rho_p}{\rho_f}\right)^f \quad (1)$$

其中: L_e 为入口长度; D 为管道内径; Re 为雷诺数; μ 为固气比; d_s 为颗粒粒径; ρ_p 为固体真密度; ρ_f 为流体密度; $a=0.0104$, $b=-0.302$, $c=-0.121$, $d=-0.306$, $e=-0.127$, $f=0.67$ 。

雷诺数计算方式:

$$Re = \frac{DU_g \rho_g}{\mu_g} \quad (2)$$

其中: U_g 为表观气速; μ_g 为气体黏度; ρ_g 为气体密度;

表3列出了本文选取的3种工况雷诺数均大于4000,因此煤粉以湍流形式在管道内流动。由此计算得出的流体的 L_e 在1115.49~2506.37 mm之间,ECT截面距离弯管出口为600 mm,小于 L_e 的最小值1115.49 mm,因此,ECT截面处受弯管影响。

通过线性反投影算法获得了输送浓度的二维累积图(流型图)和径向浓度分布图,如图3所示。发现

表3 L_e 计算表

Table 3 Calculation of L_e

Case	$U_g/(m \cdot s^{-1})$	$\rho_g/(kg \cdot m^{-3})$	Re	L_e/mm
1	1.09	1.80	5480.45	2506.37
2	1.76	1.93	9488.27	1731.07
3	2.20	2.31	14195.53	1115.49

随着表观气速的逐渐增大,管道截面依次出现堆积床层流、不稳定栓塞流和稳定栓塞流的现象;ECT截面平均浓度逐渐减小。标尺中0代表空管,1代表满管标定时的相对浓度(相对浓度指的是管道中煤粉浓度与满管标定时煤粉浓度的比值),对于该煤粉,满管标定时的浓度为813.07 kg/m,图中显示了由空管到满管的颜色变化。

工况1的气体流量较小,管道内煤粉浓度较高,煤粉颗粒运动空间小,气场扰动能力较小,管道内煤粉浓度波动较小,相对浓度在 0.7 ± 0.1 范围波动,输送较为稳定。本研究体系的弯管上游有一段水平管,煤粉在水平管内输送时,受到重力作用,有一部分煤粉会沉积在管道底部^[16-19],在空间上形成不均匀的浓度分布特征,当输送至弯管时,由于管道结构和输送介质流向的变化,进一步加剧了煤粉不均匀的浓度

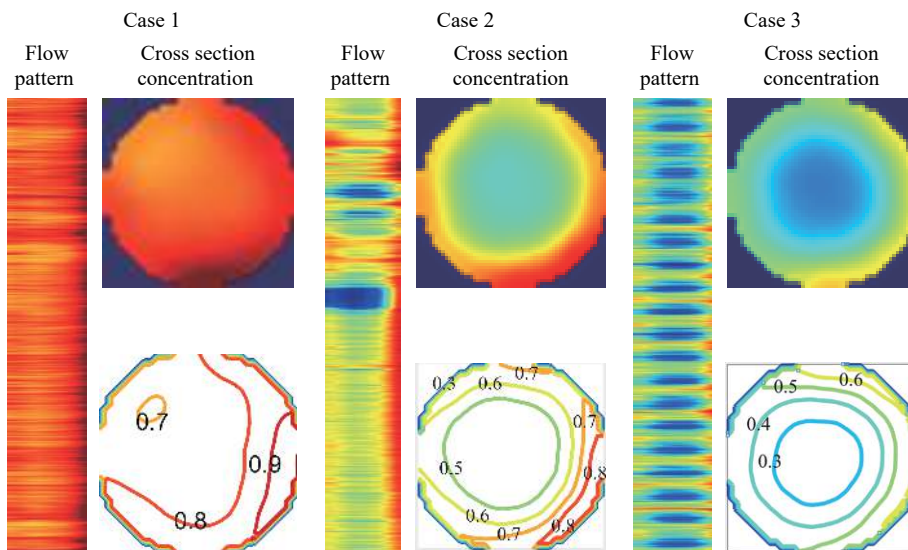


图3 ECT处流型以及平均截面浓度分布图

Fig. 3 Flow pattern and distribution profile of average cross section at ECT

分布特征^[20]。由截面平均浓度分布图可见,该输送条件下的截面浓度有 4 条等高线,每条等高线对应的煤粉相对浓度差值为 0.1,管道外壁浓度高于管道内壁,其中靠近管道外壁浓度接近于 1。煤粉粒径较小,受离心力和惯性力的作用,煤粉颗粒向管道外壁聚集。整体而言,管道截面的煤粉浓度相差不大,浓度最大区域为 0.7~0.8 之间,分布较为均匀,输送稳定性相对较好。

工况 2 的气体流量较大,管道内煤粉浓度降低,煤粉颗粒运动空间增大,气场扰动能力增强,管道内煤粉浓度波动相对较大,管道内出现干扰输送稳定的气栓。在气栓前,管道内颗粒相对浓度波动小,相对浓度在 0.5±0.1 范围波动,出现气栓后,管道内颗粒相对浓度波动范围在 0.2~0.6 之间。由截面平均浓度分布图可见,该输送条件下的截面浓度有 4 条等高线,每条等高线差值为 0.1,管道外壁浓度均高于管道内壁,其中管道外壁相对浓度为 0.8。整体而言,管道截面的煤粉浓度相差不大,浓度最大的区域为 0.5,输送过程中出现管内煤粉浓度骤降的气栓,输送稳定性较差。

工况 3 的气体流量更大,管道内煤粉浓度更低,煤粉颗粒运动空间大,气场扰动能力较大,管道内煤粉浓度波动大,管道内出现气栓与料栓周期性交替的流型,波动周期约为 4 s。输送较为稳定。由截面平均浓度分布图可见,该输送条件下的截面浓度有 4 条等高线,每条等高线对应的煤粉相对浓度差值为 0.1,浓度等高线呈环状结构,壁面浓度高于管道内部浓度。管道内煤粉浓度呈同心圆状。

2.2 弯管阻力特性分析

流型沿管道输送过程中,煤粉颗粒浓度逐渐降低,管道内煤粉浓度与单位管长压降有关,而且工业上管道内煤粉浓度是一个重要参数,管道内煤粉浓度的高低直接影响管道内煤粉的均匀性、后续炉内工况的稳定性和燃烧的效率。因此,预测管道内煤粉颗粒浓度具有重要意义。

根据 Barth 附加压力损失理论,压降可由固相压降和气体压降表示^[21],对于低压输送,气相压降占总压降比例不足 1%,因此可忽略气相产生的压降^[22],如式(3)所示:

$$\Delta P = \Delta P_s + \Delta P_g \approx \Delta P_s \quad (3)$$

其中: ΔP 为总压降; ΔP_s 为固相压降; ΔP_g 为气相压降; 弯管固相压降^[9]:

$$\Delta P_s = \lambda_s \mu \frac{\pi R}{2D} \cdot \frac{\rho_g U_g^2}{2} \quad (4)$$

其中: R 为弯管曲率半径; λ_s 为固相压损系数; μ 、 D 、 ρ_g 和 U_g 分别为弯管处的固气比、管道内径、气体密度和表观气速。

本文弯管压降为 ΔP_1 , 实验过程中,由于在弯管处无流动参数测量仪表,因此借用了距离弯管出口 0.6 m 处 ECT 截面的表观气速、固气比和气体密度等参数。考虑到从弯管到 ECT 截面气固流动参数的变化,因此加入一个“校正系数”。实际处理过程中,由于在压降建模过程中采用的是无量纲因次法,上述各“校正系数”被规整为一个常数 φ 。

根据图 3 ECT 截面浓度分布图可知,该截面存在径向浓度分布,管道外壁浓度较高,内壁浓度低,管道的平均浓度数值与靠近弯管壁面的浓度数值相近,因此,可选择管道的平均浓度作为计算浓度。浓度的处理方式与上述表观气速等参数相似,将 ECT 截面平均浓度与系数的乘积作为弯管的平均浓度。

λ_s 与气固相密度、表观气速、管道直径以及平均颗粒粒径等有关,并使用量纲分析法得到^[23]:

$$\lambda_s = \varphi Fr^a \left(\frac{\overline{C_s}}{\rho_g} \right)^b \left(\frac{d_s}{d} \right)^c \quad (5)$$

其中: φ 、 a 、 b 、 c 为方程系数。其中本实验中颗粒平均粒径与管道内径不变,因此可以将式(5)改写为:

$$\lambda_s = \phi Fr^a \left(\frac{\overline{C_s}}{\rho_g} \right)^b \quad (6)$$

对实验范围内(弯管压降从 5.7~12.7 kPa)的实验数据进行多元线性回归分析得到:

$$\lambda_s = e^{-12.2188} \cdot Fr^{-0.3503} \cdot \left(\frac{\overline{C_s}}{\rho_g} \right)^{2.2497}; R^2 = 0.9618 \quad (7)$$

图 4 将式(7)计算的不同操作条件下弯管压降与对应的实验值进行对比,发现式(7)的经验关系式

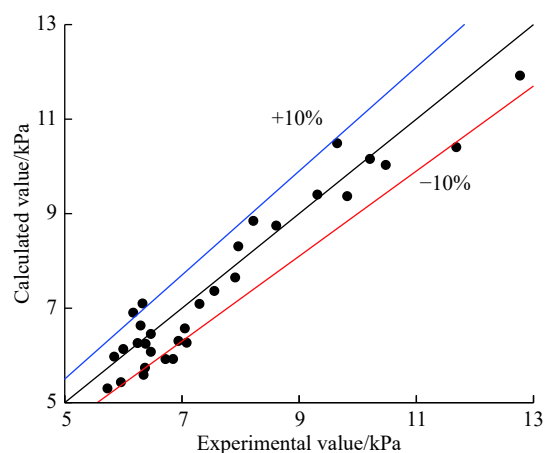


图 4 弯管压降实验值与计算值比较

Fig. 4 Comparison of experimental value and calculated value of pressure drop of bend

计算值与实验结果吻合较好,最大相对误差在 10% 以内。

煤粉由水平管流经弯管后,不仅受到气流推力、煤粉自身重力和物料与管壁的碰撞、摩擦产生的力,还受到离心力的作用,而离心力导致了煤粉的运动方向改变。由于改变了运动方向,煤粉在经过弯管过程中,在离心力的作用下高速撞击弯管外壁,其中一部分煤粉沿弯管外壁做滑移运动,另一部分煤粉撞击弯管内壁,又反复撞击弯管外壁,经过反复冲撞前移出弯管。煤粉与弯管碰撞、摩擦引起的磨损是输送管道磨损的主要原因,而煤粉与弯管的摩擦、碰撞产生的磨损与管道内煤粉与壁面的有效碰撞数有关^[24],而壁面的有效碰撞数与煤粉浓度有关。本研究采用的弯管压降模型与直管压降模型类似,谢铠^[25]在使用直管压降模型时,拟合了附加压降系数:

$$\lambda_s = 0.073 Fr^{-1} \left(\frac{C_s}{\rho_g} \right)^{0.148} \quad (8)$$

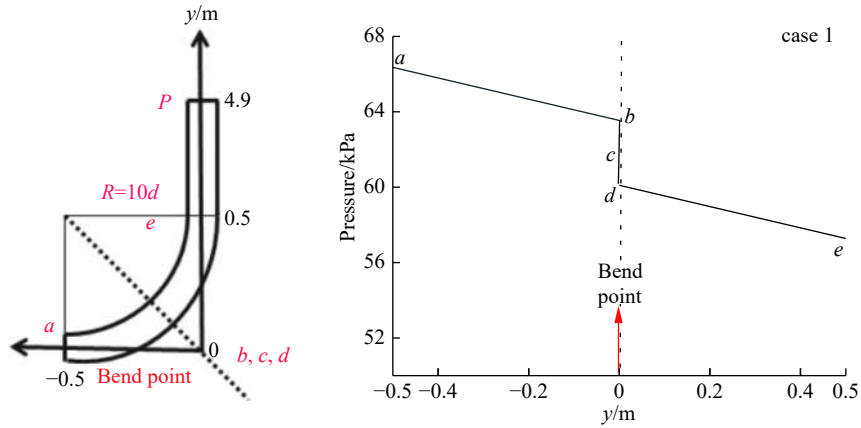


图 5 弯管结构示意图及压力的沿程变化图

Fig. 5 Schematic diagram of bend pipe structure and trend of pressure drop along the distance

图 5 中 e 点的压力可由 P 点压力和单位管长压降计算得出, x_{eP} 为 P 点到 e 点的距离, 为 4.4 m:

$$P_e = \frac{\Delta P_2}{L} x_{eP} + P \quad (9)$$

同理, a 点压力为弯管压降加上 e 点压力之和:

$$P_a = P_e + \Delta P_1 \quad (10)$$

d 点的压力可由 e 点压力与单位管长压降计算得出, x_{de} 为 d 点到 e 点的距离, 为 0.5 m:

$$P_d = \frac{\Delta P_2}{L} x_{de} + P_e \quad (11)$$

b 点的压力可由 a 点压力与单位管长压降计算得出, x_{ab} 为 a 点到 b 点的距离, 为 0.5 m:

通过比较直管和弯管的附加压降系数,发现两者的幂相差 15 倍,弯管煤粉浓度小幅度的改变就会对其压降系数产生巨大影响,因此有必要研究煤粉在弯管中的浓度分布情况。

Naveen 等^[26]拟合了弯曲之前的稳态区域以及弯曲之后从加速区域到稳态区域的压降趋势曲线图。弯管处压力曲线在弯曲点(下游管道与上游管道的交点)处发生突变。由于流体由弯曲点输送到下游时,充分发展段的单位管长压降与弯管点下单位管长压降相差不大,因此,可将弯曲点下游的压力下降趋势利用竖直管的单位管长压降计算。图 5 是弯管结构示意图及压力的沿程变化趋势图,弯管处的距离是沿曲率测量的。图中曲率半径 $R=10d$ 。由于在弯管处无压力测量仪表,本文参考文献中的压力分布规律,提出弯曲点剖面的概念,煤粉由弯管进口 a 点到弯曲点剖面前 b 点压力呈线性降低,压力在剖面处发生突变, c 点为突变中点,煤粉由剖面后 d 点到弯管出口 e 点压力呈线性降低。

$$P_b = P_a - \frac{\Delta P_2}{L} x_{ab} \quad (12)$$

流型沿弯管运动过程中,管道压力减小,气体密度以及表观气速发生相应的改变,根据图 6 的压力分布曲线和式(13)计算出浓度的沿程化。由于弯管内煤粉浓度在弯曲点处达到最大值,因此,只计算弯曲点下游的浓度分布。蔡海峰^[27]在研究水平弯管特性曲线中发现弯曲点前后煤粉浓度基本关于弯曲点对称,本文将弯曲点前浓度分布按照弯曲点后浓度分布对称处理。

弯管的浓度分布采用微元分析法和弯管压力分布规律获得。将弯管平均分为 n 小段(n 无穷大),取弯管任意一点位置 x ,取包含 x 点附近的一小段长

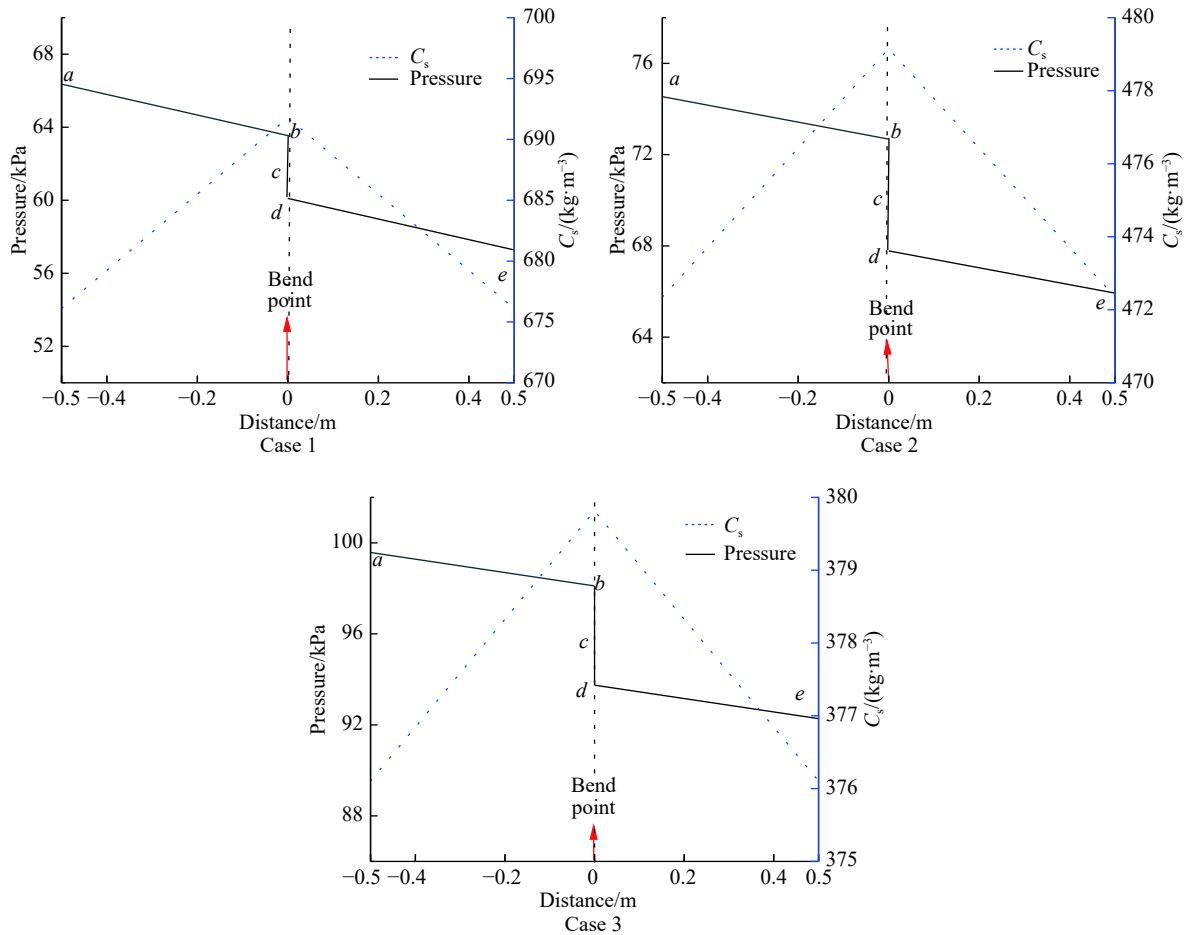


图 6 压力、浓度沿管道变化趋势图

Fig. 6 trend diagram of pressure and concentration along the pipeline

度 Δx , 从图 5(b) 中找到与之相对应的压力 P , 便可计算出该小段管道的气体密度和表观气速, 根据段的气体密度和表观气速, 可计算出该小段对应的平均浓度:

$$\frac{\Delta P}{\Delta x} = e^{-12.2188} \cdot Fr^{-0.3503} \cdot \left(\frac{C_s}{\rho_g}\right)^{2.2497} \cdot \frac{\rho_g U_g^2}{2D} \quad (13)$$

最后将 n 小段弯管的平均浓度连起来, 便得到了弯管浓度沿管道的变化趋势。

根据图 6 可知, 煤粉由弯管上游进入弯管时, 管道内煤粉浓度逐渐增加, 到达弯曲点时达到了最大值; 从弯曲点到弯管出口前, 管道内煤粉浓度逐渐降低。随着总气量的增大, 弯管煤粉浓度降低, 沿管道的浓度下降速率逐渐降低。

由工况 1 可知, 煤粉颗粒浓度在弯曲点处达到最大值 691.77 kg/m^3 , 浓度下降速率为 $31.33 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1})$; 工况 2 煤粉颗粒浓度在弯曲点处达到最大值 479.15 kg/m^3 , 浓度下降速率为 $13.60 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1})$; 工况 3 煤粉颗粒浓度在弯曲点处达到最大值 379.81 kg/m^3 , 浓度下降速率为 $7.42 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1})$ 。随着总气量的增大, 气体携带煤粉能力增强, 流体经过弯管时, 管道内煤粉

浓度下降, 管道压降减小, 管道内煤粉浓度下降速度降低。

图 6 显示压力与浓度在弯曲点处均出现突变。这是因为煤粉进入弯管后, 在离心力和惯性力的作用下, 紧贴弯管外壁, 形成高浓度区。煤粉到达弯曲点时, 管壁浓度达到最大值, 速度降至最小值, 颗粒与壁面的摩擦应力急剧增加, 在极小的距离内煤粉压力发生很大的改变, 压力发生类似突变现象。煤粉由弯曲点输送到弯管出口过程中, 离心力减小, 外壁面处煤粉摩擦应力迅速减小, 煤粉在载气的携带作用下开始加速, 煤粉浓度逐渐减小。

3 结论

本文借助 ECT 测量系统检测弯管出口的流型特征, 主要结论为:

(1) 随着表观气速的增大, 弯管输送流型由堆积床层流向不稳定栓塞流/稳定栓塞流转变。受惯性力和离心力的影响, 煤粉经过弯管时管道截面出现明显的径向分布, 外壁浓度相对较高。

(2) 借助 ECT 系统获取弯管出口截面的平均浓度,并通过附加压降法,对实验数据进行回归分析,得到弯管的压降模型关联式。该关系式与实验值吻合得较好,实验误差在 10% 以内。

(3) 基于微元分析和弯管压力分布规律,获得了煤粉浓度沿弯管流动方向的分布特征。在密相气力输送范围内,煤粉浓度沿着弯管流动方向先增大后降低,在弯曲点后,煤粉浓度的下降速率随着表观气速的增大而减小。

参考文献:

- [1] 马胜,郭晓镭,龚欣,等.粉煤密相气力输送流型[J].化工学报,2010,61(6):1415-1421.
- [2] MOLERUS O. Overview: pneumatic transport of solids[J]. *Powder Technology*, 1996, 88(3): 309-321.
- [3] 李君,卢洪,郭屹,等.煤粉加压密相输送系统研究现状及发展方向[J].洁净煤技术,2015,21(04):5-11.
- [4] 谢锴,郭晓镭,丛星亮,等.工业级水平管粉煤气力输送的最小压降速度和稳定性[J].化工学报,2013,64(06):1969-1975.
- [5] 代婧鑫,丁学勇,许海法,等.弯管中高浓度煤粉气力输送流动特性的模拟[J].钢铁研究学报,2020,32(05):377-385.
- [6] 贺春辉,沈湘林,周海军.煤粉高压密相气力输送稳定性分析[J].化工学报,2014,65(03):820-828.
- [7] 周云,陈晓平,梁财,等.高压密相气力输送垂直弯管阻力特性[J].化工学报,2009,60(3):580-584.
- [8] 杨石,刘振宇,王永英,等.稀相气力输送水平弯管与文丘里管气固流动特性[J].中国粉体技术,2019,25(01):40-45.
- [9] 周云,陈晓平,梁财,等.高压密相气力输送弯管压降研究[J].中国电机工程学报,2009,29(02):8-12.
- [10] 周靖.水平弯管密相输送数值研究[J].冶金动力,2019(10):16-18.
- [11] CHU K W, YU A B. Numerical simulation of the gas-solid flow in three-dimensional pneumatic conveying bends[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2008(47): 7058-7071.
- [12] 丛星亮.粉煤密相气力输送的流型与管线内压力信号关系的研究[D].上海:华东理工大学,2013.
- [13] 杨道业,周宾,王式民.电容层析成像在高压浓相煤粉气力输送中的应用[J].化工学报,2009,60(04):892-897.
- [14] JIN Y, LU H, GUO X, *et al.* Multiscale analysis of flow patterns in the dense phase pneumatic conveying of pulverized coal[J]. *AIChE Journal*, 2019, 65(9): e16674.
- [15] ENICK R M, KLINZING G E. A correlation for the acceleration length in vertical gas-solid transport[J]. *Chemical Engineering Communications*, 1986(49): 127-131.
- [16] TSUJI Y, MORIKAWA Y. Flow pattern and pressure fluctuation in air-solid two-phase flow in a pipe at low air velocities[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1982, 8(4): 329-341.
- [17] JAMA G A, KLINZING G E, RIZK F. An investigation of the prevailing flow patterns and pressure fluctuation near the pressure minimum and unstable conveying zone of pneumatic transport systems[J]. *Powder Technology*, 2000, 112(1-2): 87-93.
- [18] GUINEY P, PAN R, CHAMBERS J. Scale-up technology in low-velocity slug-flow pneumatic conveying[J]. *Powder Technology*, 2002, 122(1): 34-45.
- [19] 程克勤.低速密相气力输送综述[J].硫磷设计与粉体工程,2001,2(2):27.
- [20] YILMAZ A, LEVY E K. Formation and dispersion of ropes in pneumatic conveying[J]. *Powder Technology*, 2001, 114(1-3): 168-185.
- [21] 郭晓镭,陆海峰,陶顺龙,等.竖直上升管的煤粉密相气力输送阻力特性的实验研究[J].华东理工大学学报(自然科学版),2014,40(1):16-20.
- [22] 郭晓镭,龚欣,代正华,等.竖直上升管中密相气力输送压降特性[J].化工学报,2007,58(3):602-607.
- [23] 陈先梅,春辉,胥宇鹏,等.CO₂/N₂高压密相输送弯管压降特性实验研究[J].西安交通大学学报,2012,46(9):83-90.
- [24] 王秀娟,李灿.室内细颗粒物碰撞模型及碰撞结果讨论[J].应用数学和力学,2016,37(07):766-774.
- [25] 谢锴.工业级粉煤密相气力输送系统特性研究[D].上海:华东理工大学,2013.
- [26] TRIPATHI N M, PORTNIKOV D, LEVY A, *et al.* Bend pressure drop in horizontal and vertical dilute phase pneumatic conveying systems[J]. *Chemical Engineering Science*, 2019, 209: 115228.
- [27] 蔡海峰,熊源泉,周海军.水平弯管高压密相气力输送数值模拟[J].东南大学学报(自然科学版),2019,49(01):157-166.

Flow Characteristics of Dense Phase Pneumatic Conveying of Pulverized Coal through the Bend

WANG Chong, LU Haifeng, GUO Xiaolei, LIU Haifeng, GONG Xin

(Shanghai Engineering Research Center of Coal Gasification, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: Experiments on dense phase pneumatic conveying of pulverized coal were carried out in the self-built pneumatic conveying facility with a Industrial pipe diameter of 50 mm. The gas-solid two-phase flow characteristics through the bend were studied. Firstly, With the help of Enick and Klinzing model, the entrance length of gas-solid two-phase flow in a bend outlet is calculated. It is found that electrical capacitance tomography (ECT) is in the underdeveloped area, where the flow is affected by the bend. The flow patterns of the outlet section of the bend were analyzed in the means of ECT, and it was found that the flow pattern changed from the packed bed flow to the unstable/stable plug flow with the increase of the superficial gas velocity. Due to the influence of inertial force and centrifugal force, there was an obvious radial distribution in the concentration of the pipe section when the pulverized coal flowed through the bend, while the coal concentration on lateral wall surface was relatively high. Next, regression analysis of experimental data is carried out by using pressure drop model and dimensional analysis method, a pressure drop model of pulverized coal dense phase pneumatic conveying bend was established by providing errors most smaller than $\pm 10\%$. Finally, based on micro element analysis and pressure drop distribution along the bend, the distribution characteristics of pulverized coal concentration along the bend were obtained. The research in this work can provide important guiding significance in reducing the wear of bend.

Key words: dense phase pneumatic conveying; bend; flow pattern; concentration; pressure drop