

弯管气力输送炭黑的数值模拟与分析研究

李志华, 李绪超, 刘光朋

(青岛科技大学 机电工程学院, 山东 青岛 266061)

摘要:建立炭黑浓相气力输送的数学模型,对炭黑在弯管中的流动状态进行数值模拟分析。结果表明,炭黑颗粒在弯管中的流动状态不稳定,应尽量减少弯管数量,且两个弯管的距离不宜太短;弯管最易磨损,弯管 $30^\circ \sim 60^\circ$ 外壁面处的压力最大,磨损也最大,可在弯管的易磨损部位附加可更换衬板来延长弯管的使用寿命;炭黑在弯管中的输送压降与弯径比(R/D)有关,当 $R/D=5$ 时输送压降最小,最有利于炭黑的稳定输送和节能输送。

关键词:炭黑;弯管;气力输送;数值模拟

中图分类号: TQ333.93; TQ336.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-890X(2015)08-0495-04

气力输送是以压缩空气(或其他气体)为动力、管道为输送路径,依靠管道中前后的压力差把物料输送到目的地的一种方法。气力输送的研究涉及多个学科的分支,其应用领域包括化工、食品、粮食、电力和医药等行业^[1]。在橡胶行业,炭黑从仓库到炼胶车间普遍采用密封管道气力输送技术。密封管道由水平管道、垂直管道和弯管等组成。炭黑在气力输送过程中通常采用浓相输送方式。由于炭黑在弯管中流动状态复杂,输送稳定性较差,极易造成管道磨损、管道堵塞,因此对炭黑在弯管中的流动状态进行分析研究很有必要。

利用 Fluent 软件可以比较精确地模拟炭黑在弯管中的流动状态。Fluent 软件模拟管道中多相流的方法包括欧拉-欧拉方法和欧拉-拉格朗日方法。在输送管道内的气固两相流中,物料颗粒较多,颗粒碰撞的机理较为复杂,采用欧拉-拉格朗日方法需要对每个颗粒的运动情况进行跟踪,计算量庞大,不符合工程实际需要。本工作采用欧拉双流体模型,把各相分别看成连续介质,用各相的体积分数描述其分布,导出各相的守恒方程并引入本构关系使方程组封闭^[2-3],即建立炭黑浓相气力输送的数学模型,针对炭黑在弯管中的流动状态进行数值模拟分析(限于篇幅,本文仅对

最常用的垂直向上转水平布置直角弯管进行研究分析),以期对炭黑气力输送系统的研究和设计提供参考。

1 控制方程和边界条件

1.1 控制方程

连续性方程和动量方程分别如式(1)和(2)所示。

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{g} \quad (2)$$

式中 ρ ——流体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$;

$\mathbf{v}$ ——速度矢量, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;

t ——作用时间, s ;

P ——流体微元体上的外部体积力, $\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$;

$\boldsymbol{\tau}$ ——微元体表面的粘性应力, Pa ;

$\mathbf{g}$ ——重力加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

1.2 边界条件

1.2.1 气相

进口边界:入口处为速度入口型边界。气相垂直进入管道截面。假定径向速度为零,轴向速度服从光滑管中充分发展的湍流规律,轴向速度分布均匀。

湍流强度(I)、湍动能(k)和湍动能耗散率(ξ)的计算公式分别如式(3)~(5)所示。

$$I = 0.16(Re)^{-\frac{1}{8}} \quad (3)$$

作者简介:李志华(1964—),男,山东潍坊人,青岛科技大学教授,硕士,长期从事高分子材料加工装备及技术的教学及科研工作。

$$k = \frac{3}{2} (uI)^2 \quad (4)$$

$$\xi = C_\mu^{\frac{3}{4}} \frac{k^{\frac{3}{4}}}{l} \quad (5)$$

式中 Re ——按水力直径计算得到的雷诺数;

u ——进口气流平均速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;

l ——湍流尺度 [$l = 0.07L$, 因数 0.07 是基于充分发展的湍流管流中的混合长度的最大值, L 为特征尺度(可认为是水力直径)], m ;

C_μ ——常数, 取 0.09。

出口边界: 出口取充分发展的管流条件。

管壁: 取无滑移的流动条件^[4-5]。

1.2.2 固相

进口边界: 固相的边界条件是进口速度均匀, 轴向速度为常数, 径向速度为零。设定入口截面处固相的体积分数, 入口条件为速度型。根据输送固相的质量流量计算固相的速度, 公式为

$$u_p = \frac{G_p}{\varphi_p \rho_p} \quad (6)$$

式中 u_p ——固相轴向速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;

G_p ——固相的质量流量, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;

φ_p ——固相的体积分数, 其值为 1;

ρ_p ——固相真密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

出口边界: 出口取充分发展的管流条件。

管壁: 固相在弯管壁面处滑移, 镜面反射因数在 0(完全镜面碰撞)和 1(完全漫反射碰撞)之间取值。同时, 选取合适的固相颗粒与壁面的恢复因数以及固相颗粒与颗粒的恢复因数^[6]。镜面反射因数和颗粒与壁面的恢复因数取决于颗粒表面性质和壁面的粗糙度, 而颗粒与颗粒的恢复因数则与颗粒的材料特性有关。

2 模拟计算工况

模拟过程中的相关参数如下: 入口气流 $11.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 空气密度 $1.293 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; 气体分子粘度 $1.81 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$; 固气比 $21.8 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 颗粒流量 $868.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; 平均颗粒粒径 $242 \mu\text{m}$; 炭黑真密度 $1\,950 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; 弯管内径 100 mm ; 弯径比[管道弯曲半径(R)与管道直径(D)之比, R/D] $2, 3, 4, 5,$

$6, 7$ 和 8 ; 弯管布置 垂直向上转水平。对以炭黑为输送物料而言, 假设镜面反射因数取 0.005 , 颗粒与壁面的恢复因数取 0.9 , 颗粒与颗粒的恢复因数取 0.95 。

3 模拟结果与数据分析

3.1 弯管的流动状态

图 1 示出了垂直向上转水平布置的直角弯管的固相分布。从图 1 可以看出, 炭黑颗粒在重力和离心力共同作用下出现气固融合并最终气固分离。在 0° 截面处炭黑颗粒分布较均匀, 但在管道中心浓度略高, 在进入弯管时炭黑颗粒和气体开始分离; 30° 和 60° 截面处炭黑颗粒逐渐向管道外壁面移动, 90° 截面处炭黑颗粒大部分积聚在管道外壁面。由于离心力的作用, 越靠近外壁面处炭黑颗粒的体积分数越大, 而在弯管的内侧甚至出现了无炭黑颗粒的区域。可见, 炭黑颗粒在弯管中的流动状态不稳定, 应尽量减少弯管数量, 同时两个弯管的距离不宜太短, 应留出气固流动充分稳定的距离。

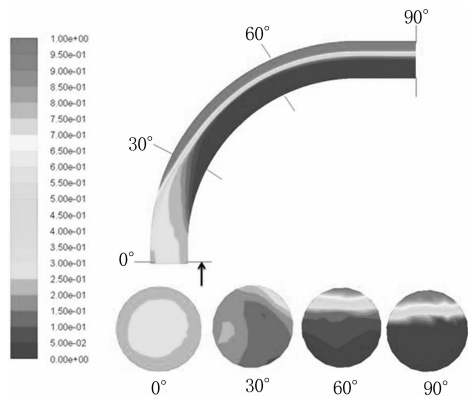


图 1 垂直向上转水平直角弯管的固相分布示意

3.2 弯管的磨损分析

图 2 示出了炭黑在垂直向上转水平直角弯管的压力等值线。从图 2 可以看出, 弯管外侧压力高于内侧压力, 在弯管靠近内壁面处甚至出现负压, 内外壁面的压力差约为 $2\,300 \text{ Pa}$, 弯管处的压力梯度较大, 分布不均匀。弯管在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 之间的外侧管道内壁压力最大, 此段区域也是磨损最为严重的区域。上述现象是炭黑颗粒在离心力和惯性力的相互作用下与管道外侧的内壁面不断产生冲击的结果。

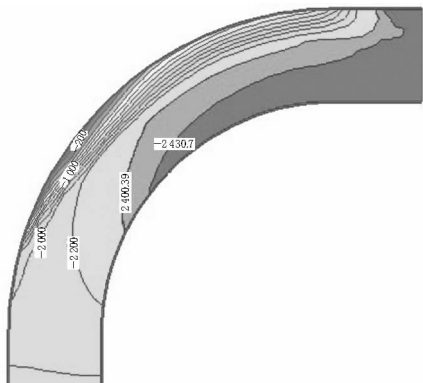
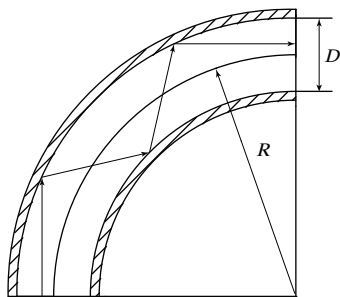
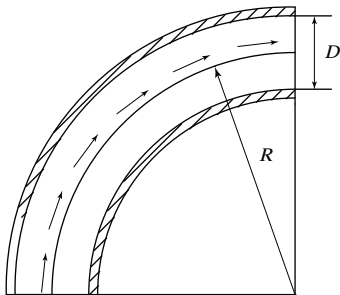


图 2 弯管处的压力等值线

图 3 示出了炭黑对弯管内壁的磨损情况。从图 3 可以看出,弯管中的炭黑颗粒一部分沿着管道外侧的内壁面滑动摩擦[见图 3(b)],一部分因颗粒碰撞反射到管道的内侧壁面后又弹回到管壁外表面[图 3(a)],如此反复碰撞与摩擦,导致气力输送管道中弯管成为最容易磨损的部位。



(a) 炭黑颗粒碰撞反射冲击



(b) 炭黑颗粒在外侧壁面滑移摩擦

图 3 炭黑对弯管内壁的磨损情况

弯管磨损造成内壁面粗糙,导致炭黑破碎率增加,严重时可能磨透管壁引起泄漏,不仅影响炭黑的正常输送,而且污染环境。因此,结合模拟与分析结果,对易磨损的部位附加可更换衬板(见图 4),从而有效减少弯管磨损对气力输送的影响。

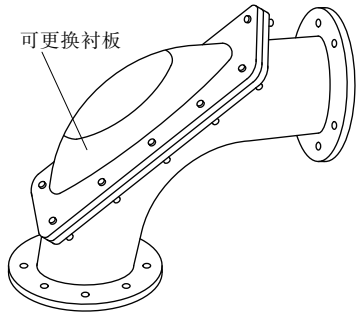


图 4 外侧附加可拆卸衬板的弯管

3.3 R/D 对流动状态和输送压降的影响

图 5 示出了 R/D 分别为 2, 4 和 6 时炭黑在垂直向上转水平直角弯管中的流动变化情况。可以发现, R/D 不同时, 炭黑在管道中的流动状态有所不同, 随着 R/D 的增大, 炭黑的集聚点提前。炭黑颗粒进入弯管后, 大约在与水平方向成 30° 夹角处开始与壁面碰撞, 此处炭黑颗粒开始堆积, 随着速度方向急剧转变和重力的作用, 炭黑进入水平管段开始逐渐抛落到管道底部。

图 6 示出了 R/D 与输送压降的关系。从图 6 可以看出, 弯管的输送压降随着 R/D 的增大呈先减小后增大的规律, 当 $R/D=5$ 时弯管的输送压降最小。分析认为: 当 R/D 较小时, 弯管的形状可以近似认为直角弯管, 炭黑颗粒经过弯管处发生拥堵, 速度急剧下降后又被压缩空气吹起并转向, 导致了弯管处的压力梯度较大、动力消耗也较大, 因此弯管处的压力损失较大; 随着 R/D 的增大, 弯管的弯曲程度减小, 炭黑颗粒速度方向转变放缓, 导致输送压降减小; R/D 进一步增大时, 虽然弯管的弯曲程度不断减小, 但是增加了弯管的几何尺寸, 弯管处颗粒之间、颗粒与气体之间、颗粒与壁面之间相互作用的区域加长, 反而造成了弯管处输送压降升高。

4 结论

(1) 炭黑颗粒在弯管中的流动状态不稳定, 应尽量减少弯管数量; 两个弯管的距离不宜太短, 应留出气固流动充分稳定的距离。

(2) 弯管部位最易磨损, 弯管的 $30^\circ \sim 60^\circ$ 外壁面处的压力最大, 磨损也最大, 可以在弯管的易磨损部位附加可更换衬板来延长弯管的使用寿命。

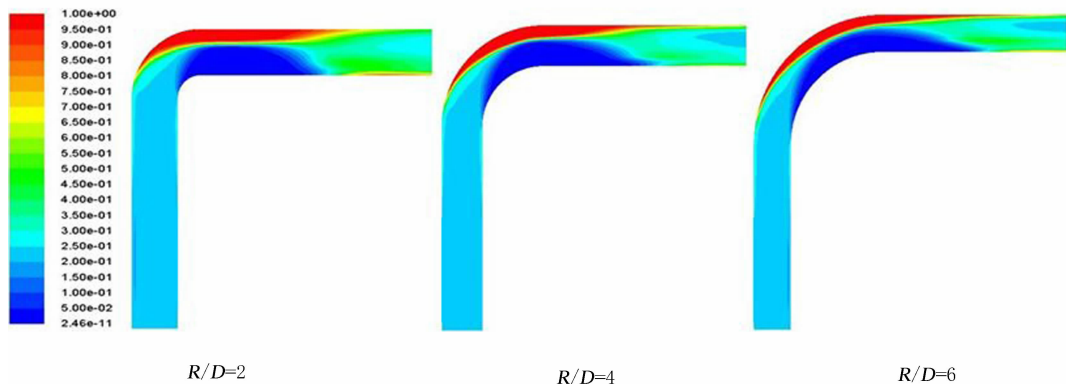


图5 炭黑在不同 R/D 下的流动状态

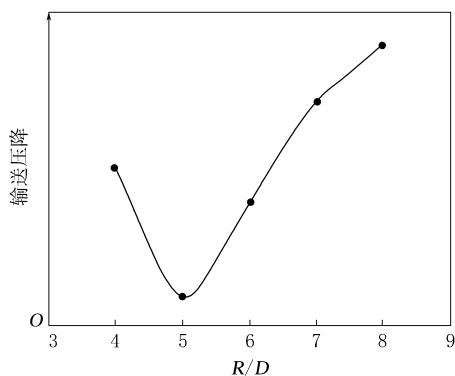


图6 R/D 与输送压降的关系

(3) 炭黑在弯管中的输送压降与 R/D 有关, 存在一个最佳的 R/D , 当 $R/D=5$ 时输送压降最小, 最有利于炭黑的稳定输送和节能输送。

参考文献:

- [1] 陈思林, 杨旭东, 秋实, 等. 气力输送设备管道中物料的速度特性研究[J]. 交通信息与安全, 2012, 30(3): 71-73.
- [2] 张政, 谢灼利. 流体-固体两相流的数值模拟[J]. 化工学报, 2001, 52(1): 1-12.
- [3] 张师帅. 计算流体力学及其在应用: CFD 软件的原理与应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2011: 76-94.
- [4] 朱健云, 杨晓燕, 归柯庭, 等. 水平管气力输送最佳经济速度的模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(10): 1688-1690.
- [5] 林江, 林建忠, 楼建勇, 等. 气力输送系统中初始气固速度比对固粒输送速度的影响[J]. 煤矿机械, 2003, 24(8): 35-37.
- [6] 汤颜菲, 王佳骏, 冯连芳, 等. 提升管内气固流动行为的数值模拟[J]. 化学反应工程与工艺, 2006, 22(5): 445-449.

收稿日期: 2015-02-09

Numerical Simulation and Analysis on Pneumatic Conveying of Carbon Black in Bend Pipeline

LI Zhi-hua, LI Xu-chao, LIU Guang-peng

(Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: The mathematical model of the dense-phase pneumatic conveying of carbon black was established, and the flow state of carbon black particles in the bend pipeline was simulated and analyzed. The results showed that, the flow state of carbon black particles in the bend pipeline was unstable, so the number of bend pipelines should be as few as possible and the distance between neighboring bend should be long enough. It was found that the bend pipeline was worn easily, and the maximum pressure appeared in the outer wall at the angles from 30° to 60° of the bend pipeline, where the wear was most serious. A replaceable liner could be applied at the easily worn position to prolong the service life of the bend pipeline. The conveying pressure drop was dependent on R/D ratio, and the pressure drop was minimized when R/D was 5, while the conveying was stable and energy consumption was low.

Key words: carbon black; bend pipeline; pneumatic conveying; numerical simulation