工艺・设备

# 在气力输送弯管中炭黑的输送特性分析

李志华,赵宪冰,胡立皓,苏 昕 (青岛科技大学 机电工程学院,山东 青岛 266061)

**摘要**:研究炭黑(固相颗粒)在气力输送通过弯管时,弯径比(δ)对输送弯管内压力损失和固相颗粒运动速度以及弯 管内壁磨损的影响。当δ小于5时,随着δ的增大,输送弯管内压力损失减小和固相颗粒运动速度增大,弯管内壁磨损程度 降低;当δ增大到5后,输送弯管内压力损失和固相颗粒运动速度以及弯管内壁磨损速率变化放缓。设计炭黑气力输送弯 管时,δ在5~7范围内既可以使输送弯管内壁磨损程度和输送能耗降低,又可满足输送管道布局和工艺要求。

关键词:炭黑;固相颗粒;气-固两相流;气力输送;弯管;压力损失;磨损

中图分类号:TQ330.38<sup>+</sup>1 文献标志码:A 文章编号:1000-890X(2021)10-0769-05 DOI:10.12136/j.issn.1000-890X.2021.10.0769



气力输送具有输送距离长、输送量大、输送过 程密封而无污染等优点<sup>[1-3]</sup>,被越来越多地应用在 粉料输送工艺过程。

炭黑是橡胶行业应用最为普遍的原材料<sup>[4]</sup>。 将气力输送应用在炭黑的输送过程中存在对输送 管道,尤其是弯管内壁磨损严重以及能耗高等问 题<sup>[5]</sup>。利用ANSYS Fluent软件对炭黑在不同弯径 比δ(输送管道弯曲半径R与输送管道内径d之比) 气力输送弯管内输送状况进行模拟分析,可以得 到炭黑在不同δ输送弯管内运动状态和弯管内壁 磨损情况。

1 模型建立和参数设定

# 1.1 固相颗粒运动方程

多相流的数值模型有两种,分别是欧拉多相 流模型和拉格朗日离散相模型<sup>[6]</sup>。为了研究固 相颗粒对输送管道内壁侵蚀情况需要考虑每个 固相颗粒运动情况,本研究选择拉格朗日离散相 模型<sup>[7]</sup>。

在拉格朗日离散相模型中,固相颗粒的运动 遵循牛顿第二定律,在本研究的仿真工作中只考 虑曳力的影响。

在拉格朗日坐标系下,力的平衡方程为:

$$m_{\rm s}\frac{\mathrm{d}u_{\rm s}}{\mathrm{d}t} = F_{\rm D} + m_{\rm s}\frac{g(\rho_{\rm s}-\rho_{\rm a})}{\rho_{\rm s}} + f \qquad (1)$$

$$F_{\rm D} = \frac{3\mu m_{\rm s} \overline{u} C_{\rm D} \,\mathrm{Re}}{4\rho_{\rm s} d_{\rm s}^2} \tag{2}$$

式中: $m_s$ 是固相颗粒质量,kg; $u_s$ 是固相颗粒速度, m•s<sup>-1</sup>;t是时间,s; $F_p$ 是固相颗粒曳力,N;g是重 力加速度,m•s<sup>-2</sup>; $\rho_s$ 是固相颗粒密度,kg•m<sup>-3</sup>; $\rho_a$ 是气相密度,kg•m<sup>-3</sup>;f是附加力,N; $\mu$ 是气相分子 粘度, $mm^2$ •s<sup>-1</sup>; $\overline{u}$ 是气相与固相颗粒相对速度, m•s<sup>-1</sup>; $C_p$ 是曳力因数;Re是雷诺数; $d_s$ 是固相颗粒 直径,m。

## 1.2 气力输送物料参数及条件设定

在本研究的气力输送中固相为炭黑,其堆积 密度为500 kg•m<sup>-3</sup>,炭黑呈固相颗粒状态,该固

作者简介:李志华(1964一),男,山东潍坊人,青岛科技大学教授,硕士,从事高分子材料加工装备及技术的教学和科研工作。 E-mail:821734386@qq.com

引用本文:李志华,赵宪冰,胡立皓,等.在气力输送弯管中炭黑的输送特性分析[J].橡胶工业,2021,68(10):769-773.

Citation: LI Zhihua, ZHAO Xianbing, HU Lihao, et al. Analysis of transportation characteristics of carbon black in pneumatic conveying elbow[J]. China Rubber Industry, 2021, 68 (10): 769-773.

相颗粒可以看作均匀球形小粒,直径为2.5×10<sup>-3</sup> m,固相颗粒在d为0.1 m、材料为不锈钢的管道中输送,输送能力为2 000 kg•h<sup>-1</sup>;气相为空气,将气相看作牛顿流体,不可压缩,其密度为1.293 kg•m<sup>-3</sup>。考虑固相颗粒在流场中所受的阻力和重力,以及固相颗粒间、固相颗粒与管道内壁碰撞,设定固相颗粒与气相双向耦合,固相流动为定常流动,且在管道入口端均匀分布。

# 1.3 物理模型建立及边界条件设定

δ为3,5和7的气力输送弯管二维模型如图1 所示。将3D模型导入Star ccm+,对模型进行网格 划分,选择自动网格生成器,网格单元选择多面 体网格。利用Fluent软件对气-固两相流模拟计 算<sup>[8-9]</sup>,选择标准*K*-ω湍流模型(*K*为湍流动能,ω为 耗散率),使用DPM(Dispersion Phase Model)冲蚀 模型,建立离散相与连续相双向耦合模型:入口边 界条件选择速度入口,气相入口速度为18 m・s<sup>-1</sup>, 出口条件设为自由出口,固相颗粒(离散相)入口 方式为平射流,速度为18 m・s<sup>-1</sup>,质量流量为0.28 kg・s<sup>-1</sup>,直径函数为1.8×10<sup>-9</sup>,速度指数函数设 为2.6。固相颗粒在输送弯管内壁的法向反弹函 数( $\epsilon_N$ )和切向反弹函数( $\epsilon_T$ )设为多项式函数,函数 定义式为式(3)和(4),冲击角函数采用分段线性 定义。

 $\varepsilon_{\rm N} = 0.993 - 0.0307\alpha + 4.75e^{-4}\alpha^2 - 2.61e^{-6}\alpha^3$ (3)  $\varepsilon_{\rm T} = 0.998 - 0.029\alpha + 6.43e^{-4}\alpha^2 - 3.56e^{-6}\alpha^3$ (4) 式中, \alpha为固相颗粒对输送弯管内壁冲击角。



图1 不同δ的气力输送弯管二维模型 Fig. 1 Two-dimensional models of pneumatic conveying elbows with different δ

#### 2 仿真结果和数据分析

#### 2.1 气力输送弯管内压力分布

3种δ的气力输送弯管内压力云图如图2所

示。从图2可以看出,输送弯管弯曲部分的外侧内 壁压力随着δ的增大而减小,δ为3时整个弯管弯曲 部分的外侧内壁压力较大,δ为5和7时开始进入弯 管弯曲部分的外侧内壁压力较大。





图3为3种δ的气力输送弯管内压力损失对比 曲线。从图3可以看出,随着δ的增大,两相流压力 损失减小,原因是两相流经过不同δ输送弯管时流 动状态不同。当δ较小即为3~5时,输送弯管弯曲 程度高,两相流速度方向发生急剧变化,两相流 与管道内壁发生碰撞概率大,能耗高,压力损失 大<sup>[10]</sup>;当δ大于5时,两相流在输送弯管处的运动 主要是沿着弯管外侧内壁滑动,两相流速度方向 变化程度开始放缓,能耗降低,压力损失减小不明 显。因此,输送弯管δ不小于5,就可以满足输送能 耗低和压力损失小的要求。





#### 2.2 气力输送弯管内固相颗粒的运动速度分布

图4为3种δ的气力输送弯管内固相颗粒运动 速度分布云图。从图4可以看出,随着δ的增大,输 送弯管内固相颗粒最大速度呈先减小后增大的趋 势。当δ从3增大到5时,固相颗粒在输送弯管内路 程延长,能量损失增大,运动速度减小;当δ增大至 7时,输送弯管内最大压力增大明显,使固相颗粒 运动速度略有增大。

从图4还可看出,通过3种δ输送弯管的固相 颗粒最大运动速度比进入输送弯管初始运动速度 大,形成了中心运动速度大、周围运动速度小的速 度剖面。这是因为当固相颗粒以一定初始运动速 度进入输送弯管时在入口处会形成一定的压力, 固相颗粒受到压力后会产生运动加速度,随着弯 管内压力的降低,固相颗粒运动加速度相应减小, 但固相颗粒依然处于运动加速状态;压力持续降 低,运动加速度也持续降低直至降为零,此时固相 颗粒运动速度不再增加,而是保持一个相对固定 的值。对比图2和3发现,输送弯管内压力梯度和 速度梯度的变化趋势基本上是相反的。



图5为3种δ的气力输送弯管内壁磨损区域云 图。从图5可以看出,输送弯管内壁磨损区域主要 分布在弯管外侧内壁<sup>[11-12]</sup>,最大磨损区域出现在弯 管中间外侧内壁。随着δ的增大,输送弯管内壁磨 损区域有扩大趋势,但磨损程度明显降低,当δ为3 时局部磨损程度明显比δ为5和7时要高。这是因 为在输送弯管中间外侧流体速度最大,并且大量



#### $(c) \delta = 7$

#### 图5 不同 $\delta$ 的气力输送弯管内壁的磨损区域云图 Fig. 5 Nephograms of wear areas on inner wall of pneumatic conveying elbows with different $\delta$

的固相颗粒会与管壁碰 撞后改变方向,故此 处管壁受到的磨损最为严重。随着 $\delta$ 的增大, 固相颗粒碰撞和摩擦产生的壁面磨损程度逐 渐降低。 $\delta$ 为3,5和7时输送弯管内壁较大的磨 损速率范围分别为2.83×10<sup>-4</sup>~2.98×10<sup>-4</sup>, 2.34×10<sup>-4</sup>~2.46×10<sup>-4</sup>和1.55×10<sup>-4</sup>~1.64× 10<sup>-4</sup> kg•(m<sup>2</sup>•s)<sup>-1</sup>,可以看出最大磨损速率随着 $\delta$ 增大而减小。固相颗粒在输送弯管中对内壁的磨 损既有与管壁之间的摩擦磨损,又有与管壁碰撞 产生的侵蚀<sup>[13-14]</sup>。由于本研究炭黑(固相颗粒)磨 琢性较低,磨损的主要形式是摩擦磨损。炭黑在 气力输送弯管中时,其颗粒由于惯性作用碰撞到 管壁,一部分颗粒沿着弯管内壁滑动,另一部分则 是由弯管内壁反弹到另一侧内壁。

#### 3 结论

在输送能力和d相同的前提下对炭黑(固相颗 粒)在气力输送弯管中的输送特性进行分析。选 用不同的 $\delta$ ,通过仿真得到固相颗粒在输送弯管内 的压力云图和运动速度云图以及弯管内壁磨损区 域云图。δ较小的输送弯管具有较大的压力损失、 较低的固体颗粒运动速度和较大的内壁磨损速 率。分析认为,随着δ的增大,输送弯管内压力损 失先急剧减小然后减幅放缓,固相颗粒运动速度 先迅速增大然后增幅放缓,弯管内壁磨损程度逐 渐降低。因此,选用较大δ既可以延缓固体颗粒对 输送弯管内壁的磨损,又可以降低输送能耗。考 虑到δ增大至5后输送弯管内压力损失和固相颗粒 运动速度的变化不太显著,同时结合气力输送管 道的实际布置要求,选取输送弯管的δ为5~7,这 既可满足输送弯管内壁减磨和输送节能要求,又 可满足输送工艺需求。

### 参考文献:

[1] 李志华,刘凯,李州,等. 炭黑在水平管道中气力输送的数值模拟与分析[J]. 起重运输机械,2012(1):46-50.
 LIZH,LIUK,LIZ, et al. Numerical simulation and analysis of carbon

black pneumatic transportation in horizontal pipelines[J]. Hoisting and Conveying Machinery, 2012 (1):46–50.

- [2] 李州.炭黑在密相气力输送系统中的流动机理及数值模拟分 析[D].青岛:青岛科技大学,2013.
- [3] 李勇,辛龙胜,王海萍.炭黑气力输送系统的改造[J].轮胎工业, 2011,31(5):305-307.

LI Y, XIN L S, WANG H P. Modification of carbon black pneumatic conveying system[J]. Tire Industry, 2011, 31 (5) : 305–307.

[4] 邢婷,张妍,王晓宁. 气固两相流在水平管道中的数值模拟[J]. 当 代化工,2014,43(10):2175-2177.

XING T, ZHANG Y, WANG X N. Numerical simulation of gas-solid two-phase flow in horizontal pipes[J]. Contemporary Chemical

773

Industry, 2014, 43 (10) : 2175–2177.

2015,37(15):99-101,117.

- [5] 徐寒冬,田世伟,杨道龙,等.基于Fluent的气力输送弯管磨损分析[J]. 制造业自动化,2015,37(15):99-101,117.
   XUHD,TIANSW,YANGDL,et al. Erosion analysis in elbows of pneumatic conveying based on Fluent[J]. Manufacturing Automation,
- [6] 王博,康凯,郐楚婷,等. 低浓度多相流管道冲蚀磨损数值模拟[J]. 北京化工大学学报(自然科学版),2019,46(2):22-30.
  WANG B, KANG K, GUI C T, et al. Numerical simulation of the erosion wear of pipes with a low concentration of particles and multiphase flow[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology(Natural Science Edition),2019,46(2):22-30.
- [7] 李沧,孙宝财. 弯管中气固两相流冲蚀模拟研究[J]. 兰州理工大学 学报,2020,46(4):79-83.

LI C, SUN B C. Simulation of gas-solid two-phase flow erosion in elbow[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2020, 46 (4): 79–83.

- [8] 张惠,康士廷. FLUENT 14流场分析自学手册[M]. 北京:人民邮电 出版社,2014.
- [9] 胡海明,徐永涛,徐方鑫. 弹簧气孔套进气段流场可视化分析[J]. 橡胶工业,2019,66(1):42-45.

HU H M, XU Y T, XU F X. Visual analysis of flow field in air inlet section of spring vent[J]. China Rubber Industry, 2019, 66 (1): 42–45.

- [10] ZHU H, LI S. Numerical analysis of mitigating elbow erosion with a rib[J]. Powder Technology, 2018, 330: 445–460.
- [11] DERRICK O, NJOBUENWU, FAIRWEATLIER M. Modelling of pipe bend erosion by dilute particle suspensions[J].Computers & Chemical Engineering, 2012, 42 (11) :235-247.
- [12] 张日,朱东,董胜. 输气管道弯头处固体颗粒侵蚀的数值分析[J]. 船舶力学,2020,24(10):1342-1353.
  ZHANG R, ZHU D, DONG S. Numerical analysis of solid particle erosion in a gas flow bend[J]. Journal of Ship Mechanics, 2020, 24 (10):1342-1353.
- [13] 陈飞国,葛蔚. 耦合粗粒化离散颗粒法和多相物质点法的气固两 相流模拟[J]. 过程工程学报,2019,19(4):651-660.

CHEN F G, GE W. Coupling of coarse–grained discrete particle method and particle–in–cell method for simulation of gas–solid flow[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2019, 19 (4) : 651–660.

[14] 廖万林,杨成宇,张立强. 炭黑管道气力输送方式对混炼胶料性能的影响[J]. 橡塑技术与装备,2011,37(7):5-8.
LIAO W L, YANG C Y, ZHANG L Q. Influence of pneumatic conveying mode of carbon black pipeline on performance of Compound[J]. China Rubber/Plastics Technology & Equipment, 2011,37(7):5-8.

收稿日期:2021-04-08

# Analysis of Transportation Characteristics of Carbon Black in Pneumatic Conveying Elbow

LI Zhihua, ZHAO Xianbing, HU Lihao, SU Xin (Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: The influence of the bending diameter ratio ( $\delta$ ) on the pressure loss and the moving speed of solid particles in the conveying elbow and the wear of the elbow inner wall when carbon black (solid particles) was pneumatically conveyed through the elbow was studied. When  $\delta$  was less than 5, as  $\delta$  increased, the pressure loss in the conveying elbow decreased, the moving speed of solid particles increased, and the wear degree of the elbow inner wall was reduced. When  $\delta$  increased to above 5, the change of the pressure loss and the moving speed of solid particles in the conveying elbow and the wear rate of the elbow inner wall slowed down. When designing the carbon black pneumatic conveying elbow,  $\delta$  in the range of 5~7 could reduce the abrasion degree of the conveying elbow inner wall and the energy consumption of the conveying, and it could also meet the layout and process requirements of the conveying pipeline.

Key words: carbon black; solid particle; gas-solid two-phase flow; pneumatic conveying; elbow; pressure loss; abrasion