烧结除尘系统 90°弯管壁面冲蚀磨损规律

冯晓峰[1]，张 华[1,2]，谢冬明[1]，李安桂[2]，吴禹卓[2]，左小林[3]
（1. 中冶长天国际工程有限责任公司，湖南 长沙 410205；2. 西安建筑科技大学 建筑设备科学与工程学院，陕西 西安 710055；3. 福建省三钢（集团）有限责任公司，福建 三明 365000）

摘要：基于实验和 CFD-DPM 模型分析对烧结除尘系统中 90°弯管管壁的冲蚀磨损进行研究，分析粉尘质量浓度、管道流速、颗粒直径、管道弯径比及管道直径对弯管冲蚀率的影响，将模拟结果与实验值进行验证，模拟结果与实验数据吻合良好，表明模拟结果基本可信。结果表明：弯管最大冲蚀速率随粉尘质量浓度的增加而线性增长，且粉尘质量浓度不同时，冲蚀率最大位置基本相同，主要集中在 50°～70°；弯管最大冲蚀率随管道流速增加且表现为指数函数增长，当管道流速大于 15 m/s 时，冲蚀率增大趋势明显；随着粉尘粒径的增加，弯管的最大冲蚀率增大，但当颗粒直径大于 150 μm 时，最大冲蚀率的增加速率随粒径增加而降低；冲蚀率随弯径比增大呈减小趋势，壁面冲蚀率随管径增大而减小。该研究结果可为弯管冲蚀耐磨研究和工程设计提供理论参考。

关键词：90°弯管；冲蚀磨损；除尘管道；数值模拟
中图分类号：TF046.4；TP39 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764（2024）02－0017－08
doi：10.13403/j.sjqt.2024.02.019

Erosion law of 90° elbow wall in sintering dust removal system

FENG Xiaofeng[1], ZHANG Hua[1,2], XIE Dongming[1], LI Angui[2], WU Yuzhuo[2], ZUO Xiaolin[3]
(1. Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China; 2. School of Building Services Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China; 3. Fujian Sangang (Group) Co., Ltd., Sanming 365000, Fujian, China)

Abstract: Based on the experiment and CFD-DPM model analysis, the erosion of 90° elbow pipe wall in sintering dust removal system is studied, and the effects of dust mass concentration, pipe velocity, particle diameter, pipe bend-diameter ratio and pipe diameter on the erosion rate of elbow are analyzed. The simulation results are verified with the experimental values, and the simulation results are in good agreement with the experimental data, which shows that the simulation results are basically reliable. The maximum erosion rate of elbow increases linearly with the increase of dust concentration, and when the dust concentration is different, the maximum erosion rate is basically the same, mainly concentrated in 50°～70°; The maximum erosion rate of elbow increases exponentially with the increase of pipeline velocity. When the pipeline velocity is greater than 15 m/s, the erosion rate increases obviously. With the increase of dust particle size, the maximum erosion rate of elbow increases, but when the particle diameter is greater than 150 μm, the increase rate of maximum erosion rate decreases with the increase of particle size. The erosion rate decreases with the increase of elbow-diameter ratio; The wall erosion rate decreases with the increase of pipe diameter. The results can provide a theoretical reference for the research and engineering design of elbow erosion and wear resistance.

Key words: 90° elbow; erosion; dust collector pipe; numerical simulation

收稿日期：2023－02－17；**修回日期**：2023－05－08
基金项目：国家自然科学基金资助项目（51978555）
作者简介：冯晓峰（1979—），男，高级工程师，从事通风除尘管道冲蚀磨损方面的研究工作。
通信作者：张 华（1984—），男，博士研究生，高级工程师，从事通风除尘管道冲蚀磨损方面的研究工作。

烧结作为钢铁生产流程中重要的一环，其粉尘排放量超过1 000万吨/年，占整个钢铁生产过程粉尘排放量的43%左右[1]。因此烧结除尘是工业污染物治理的重要环节。在烧结除尘系统中，颗粒在流体的携带下对管道内壁产生冲击，造成材料的损耗破坏，这种现象即冲蚀磨损[2-3]。由于除尘系统90°弯管的特殊结构，弯管处的粉尘颗粒与管道壁面发生碰撞和摩擦造成弯管内壁严重的冲蚀磨损问题，影响局部构件的使用寿命，严重时会威胁生产安全[4]，给企业造成巨大的经济损失。因此，研究除尘系统中弯管处的冲蚀磨损规律具有十分重要的工程意义。近年来，管道的冲蚀磨损研究在石油、天然气输送领域已有诸多研究。周大鹏等[5]基于CFD技术引入“Archard wear”模型对天然气管内气固两相流的冲蚀过程进行数值模拟，预测了颗粒运动状态和最易发生冲蚀磨损的区域。王岩[6]模拟了天然气输气管道的文丘里管和90°弯管的冲蚀，得出这两种输气管道的最大冲蚀磨损位置、最大冲蚀率和总冲蚀磨损量。KESANA等[7]研究了石油管路段塞流情况下管道的冲蚀磨损现象，利用超声波检测仪，得出弯管中段塞流条件下的冲蚀磨损规律。

国内外对弯管磨损的研究大多集中在石油、天然气行业，对烧结除尘系统中弯管磨损的研究较少，且主要研究某一工况参数对弯管磨损的影响，而忽略了各因素的综合作用，并缺少弯管磨损与影响因素的定量研究。本文结合烧结除尘系统的工程实际，基于试验研究和CFD-DPM模型分析粉尘颗粒的质量流量、管道流速、颗粒直径、管道弯径比及管道直径对弯管冲蚀磨损最严重位置和冲蚀速率的影响，以期可为除尘管道的耐磨优化设计提供借鉴与参考。

1 计算模型

1.1 连续相控制方程

对90°弯管内部气固两相流进行数值模拟时需先计算气相场，计算时采用湍流(流体雷诺数 $Re \geqslant 3.2\times10^4$)、稳态及不可压缩模型。连续性方程及动量方程如下。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i}=0 \tag{1}$$

$$\rho u_j\frac{\partial u_i}{\partial x_i}=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+(\mu+\mu_t)\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2}-\frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{u'_i u'_j})+F_{pi} \tag{2}$$

式中：x_i、x_j分别为i、j方向的速度，m/s；u_i、u_j分别为x、y方向的速度，m/s；μ为流体的运动黏度，Pa·s；μ_t为流体的动力黏度，Pa·s；p为时均压力，Pa；$\overline{u'_i u'_j}$为张量表达式；ρ为气相密度，kg/m^3；F_{pi}为控制体内颗粒的平均流体阻力，N。

1.2 离散相控制方程

在离散相模型(DPM)中，通过对拉格朗日坐标系下的固体颗粒作用力的微分方程进行积分得到固体颗粒的运动轨迹。基于牛顿第二定律，对单位质量颗粒进行受力分析，得到固体颗粒运动方程[8]：

$$m\frac{\mathrm{d}u_p}{\mathrm{d}t}=F_D+F_P+F_{VM}+F_B \tag{3}$$

式中：F_D、F_P、F_{VM}、F_B分别为固体颗粒受到的曳力、压力梯度力、附加质量力、重力与浮力的合力，N；u_p为颗粒运动速度，m/s；t为时间，s；m为颗粒质量，kg。

通常在流体密度大于颗粒密度时考虑压力梯度力和附加质量力，因此对于气固两相冲蚀问题，仅考虑曳力和重力与浮力的合力。其中，曳力是固体颗粒受到的主要作用力，形式如下。

$$F_D=\frac{18\mu}{\rho_p d_p^2}\frac{mC_d Re_s}{24}(u-u_p) \tag{4}$$

式中：u为颗粒速度，m/s；d_p为颗粒直径，m；ρ_p为颗粒密度，kg/m^3；Re_s为颗粒雷诺数；C_d为曳力系数，表征流体阻力对颗粒的影响程度；m为颗粒质量，kg。

$$Re_s=\frac{\rho d_p|u-u_p|}{\mu} \tag{5}$$

$$C_d=\alpha_1+\frac{\alpha_2}{Re_s}+\frac{\alpha_3}{Re_s^2} \tag{6}$$

式中：α_1、α_2、α_3为与Re有关的常数[9]。

1.3 冲蚀磨损模型

ZHANG等[10]在大量试验研究的基础上建立了冲蚀模型，得出弯管的冲蚀率η_{ER}[kg/(m^2·s)]的表达式：

$$\eta_{ER}=\sum_{p=1}^{N}\frac{m_p C(d_p)f(\theta)u_p^{b(u_p)}}{A_f} \tag{7}$$

式中：N 为在计算面积 A_f（m^2）上发生碰撞的粒子总数；m_p 为颗粒质量流量，kg/s；$C(d_p)$ 为粒径函数；$f(\theta)$ 为碰撞角函数；$b(u_p)$ 为碰撞速度函数。

其中，$C(d_p)$、$f(\theta)$、$b(u_p)$ 为可以用户自定义的壁面处边界条件。本文模拟设置碰撞角函数为分段线性函数，碰撞速度函数和粒径函数为常数。该冲蚀模型可模拟粉尘颗粒被气体带入管道内的轨迹，并使用冲蚀率 η_{ER} 的表达式计算粉尘颗粒对壁面的冲蚀率。

固体颗粒与壁面发生碰撞时存在能量转移和损失，主要表现在碰撞前、后速度分量的变化。通常以碰撞前、后速度分量的比值衡量能量的损失情况，并将该比值定义为恢复系数[11]。

$$e_n = 0.993 - 0.030\,7\theta + 0.000\,475\theta^2 - 0.000\,002\,61\theta^3 \quad (8)$$

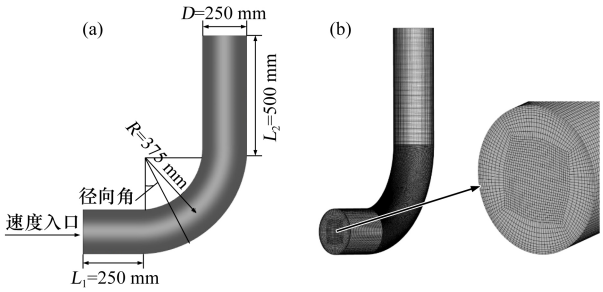
$$e_t = 0.988 - 0.029\,0\theta + 0.000\,642\theta^2 - 0.000\,003\,56\theta^3 \quad (9)$$

式中：e_n 为法向恢复系数；e_t 为切向恢复系数；θ 为碰撞角，rad。

2　研究对象与方法

2.1　几何模型和网格划分

选取实际除尘系统中的 90°弯管为研究对象，建立几何模型和网格划分如图 1 所示。弯管直径（D）为 250 mm，曲率半径（R）为 1.5D，进口直管段（L_1）长度为 1D，出口直管段（L_2）长度为 2D。采用的网格类型均为六面体网格，弯管近壁处采用边界层网格，第一层网格的高度是网格宽度的 20%，每层网格增长率为 11%。



（a）几何模型；（b）网格划分

图 1　90°弯管几何模型及网格划分

Fig. 1　Geometric model and meshing of 90° bending duct

2.2　边界条件及参数

不考虑颗粒形状因子，认为所有颗粒为球状，同时认为颗粒相的射流源以面源方式进入弯管，颗粒相与气相之间无滑移速度。边界条件设置如下：计算区域入口为速度入口（Velocity-Inlet），出口为自由出流（Outflow），管内流体为常温空气，密度为 1.225 kg/m^3，运动黏度为 1.57×10^{-5} Pa·s。模型假设入口气流的湍流已充分发展，速度在入口截面上均匀分布。粉尘颗粒材质为无烟煤，材料的比热容为 1 680 J/(kg·K)，密度为 2 046 kg/m^3。除尘管道采用钢制材料，管材密度为 7 850 kg/m^3。

2.3　网格无关性验证

合适的网格数量可以在保证计算精度的同时降低计算成本，本文通过网格无关性验证得到适合该模拟工况的网格数量。为得到 90°弯管的冲蚀磨损规律，通过最大冲蚀率随网格数量变化来确定合适的网格数。

本文采用 Oka 模型分别计算网格数量为 9.270×10^4、1.447×10^5、1.751×10^5、2.908×10^5、3.457×10^5、5.336×10^5、7.100×10^5、8.721×10^5、$1.108\,3\times10^5$、$1.319\,9\times10^5$、$1.623\,4\times10^5$ 共 11 组工况，结果如图 2 所示。由图 2 可知：在一定的网格数量范围内，弯管的最大冲蚀率随着网格数量的变化而波动，当网格为 7.100×10^5 以上时，计算所得的最大冲蚀率随网格数量的增加几乎不再变化，因此数值计算采用模型的网格数量为 7.100×10^5。

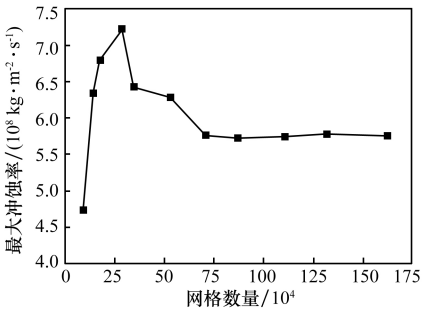


图 2　网格数对最大冲蚀率的影响

Fig. 2　Influence of mesh number on maximum erosion rate

3　模拟结果与分析

3.1　计算模型验证

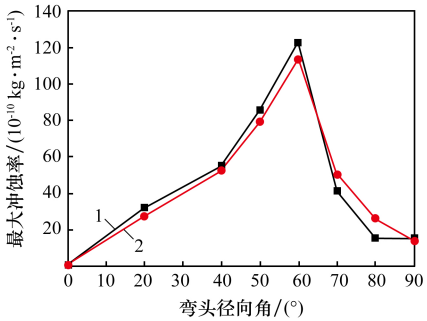
为了验证计算模型的有效性，本文搭建了弯

头磨损的试验平台，如图 3 所示。通过对弯径比为 1.5(管道曲率半径与直径之比)、入口风速为 19.7 m/s、颗粒直径为 500 μm、直径为 259 mm 的弯管在粉尘质量浓度为 16.4 g/m^3 的除尘弯管进行试验研究，采用超声测厚仪对弯管进行布点测量厚度，并通过一段时间的壁厚度变化差值计算试验弯头的冲蚀率；并将试验结果与该工况下采用 Oka 模型的模拟结果进行对比，结果如图 4 所示。由图 4 可知，模拟结果与试验数据变化规律基本一致，数据基本吻合，平均误差为 8%。考虑管内两相流动的复杂性，该模型误差在可接受范围内，因此利用该模型进行数值模拟所得结果基本可信。



图 3 弯头冲蚀率测试用试验平台

Fig. 3 Test platform for elbow erosion rate testing



1—模拟数据；2—试验数据。

图 4 弯头最大冲蚀率试验值与计算值对比

Fig. 4 Comparison between experimental and calculated

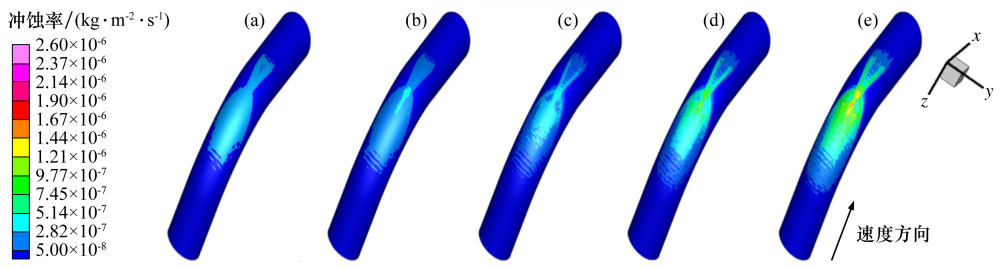
3.2 粉尘质量浓度对弯管冲蚀磨损的影响

为探究粉尘质量浓度对弯管冲蚀磨损的影响，对弯径比为 1.5、入口风速为 16.5 m/s、颗粒直径为 100 μm 以及弯管直径为 250 mm 的弯管在不同粉尘质量浓度下的壁面冲蚀磨损进行研究。根据烧结燃料、配料、机尾、整粒、成品等处的除尘系统管网内粉尘质量浓度不一致，分别选取粉尘质量浓度为 5.1、6.9、8.6、17.2、25.7 g/m^3 五组质量浓度进行研究，结果如图 5 所示。由图 5 可知，随粉尘质量浓度的增加，壁面冲蚀率逐渐增大且冲蚀面积明显增大，同时随粉尘质量浓度增加，“V”字形冲蚀样貌逐渐明显。这是由于随粉尘质量浓度增加，含尘气流的颗粒数增多，对壁面撞击次数增多，因此冲蚀率增大。

图 6(a)为管道内粉尘质量浓度对冲蚀率的影响规律。由图 6(a)可见，当管道内粉尘质量浓度不同时，冲蚀率最大位置基本相同，主要集中在径向角位为 50°~70°范围内。图 6(b)为最大冲蚀率随粉尘质量浓度的变化规律。由图 6(b)可见，最大冲蚀率随粉尘质量浓度的增大而呈现线性增加趋势。将数值计算所得数据进行拟合，得到冲蚀率 η_{ER} 与管道内粉尘质量浓度 ρ_m(g/m^3)的线性函数关系，即 $\eta_{ER}=4.23\times10^{-9}\rho_m$。该函数关系式为一条过原点的直线。对于不同工况，可以定义系数 A(m^{-1}·s^{-1})，满足 $\eta_{ER}=A\cdot\rho_m$，其中，A 随工况改变而改变。根据现场测得燃料除尘系统管网内粉尘质量浓度为 5.1 g/m^3。为了更好地研究其他变量对冲蚀率的影响，后续工况均选取管网内粉尘质量浓度为 5.1 g/m^3 进行研究。

3.3 入口风速对弯管冲蚀磨损的影响

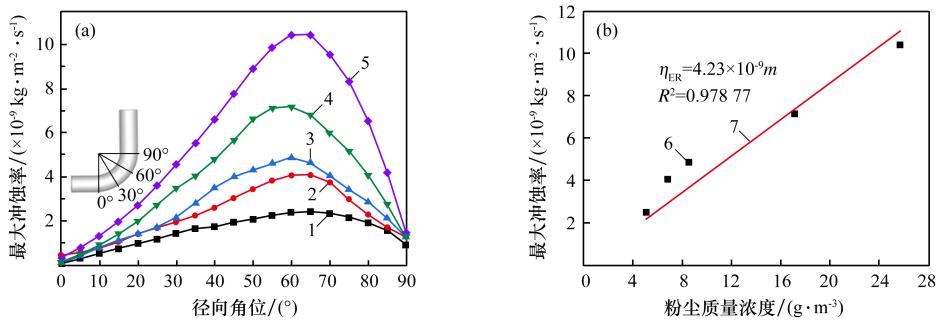
为探究入口风速对弯管冲蚀磨损的影响，对



质量浓度/(g·m^{-3})：(a) 5.1；(b) 6.9；(c) 8.6；(d) 17.2；(e) 25.7

图 5 不同粉尘质量浓度下弯管冲蚀磨损云图

Fig. 5 Erosion rate contour under different particle mass flow rates



（a）不同粉尘质量浓度、径向角位处的冲蚀率分布；（b）最大冲蚀率随粉尘质量浓度的变化

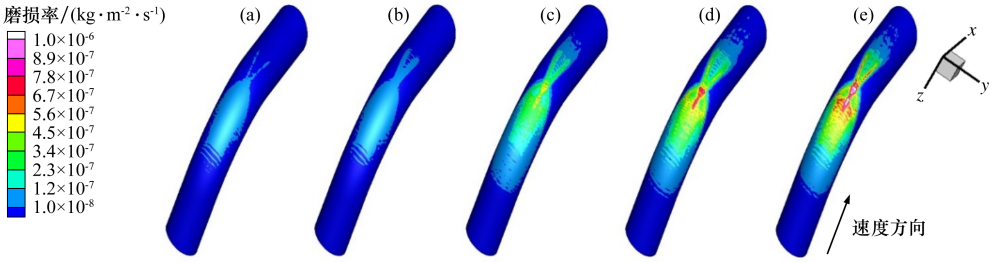
质量浓度/(g·m^{-3})：1—5.1；2—6.9；3—8.6；4—17.2；5—25.7；6—最大冲蚀率离散点；7—拟合曲线。

图 6　管道粉尘质量浓度对冲蚀率影响

Fig. 6　Effect of particle mass flow rate on erosion rate

弯径比为 1.5、粉尘质量浓度为 5.1 g/m^3、颗粒直径为 100 μm 以及弯管直径为 250 mm 的弯管在不同入口风速下的壁面冲蚀磨损进行研究，结果如图 7 所示。由图 7 可知，管道入口速度越大，弯管壁面的冲蚀率越大，且随入口速度的增加，冲蚀磨损面积也增加。这是因为速度越大，颗粒的动能越大，冲击的能量越大，每次对壁面造成的破坏也就越大，除尘管道冲蚀磨损越严重。

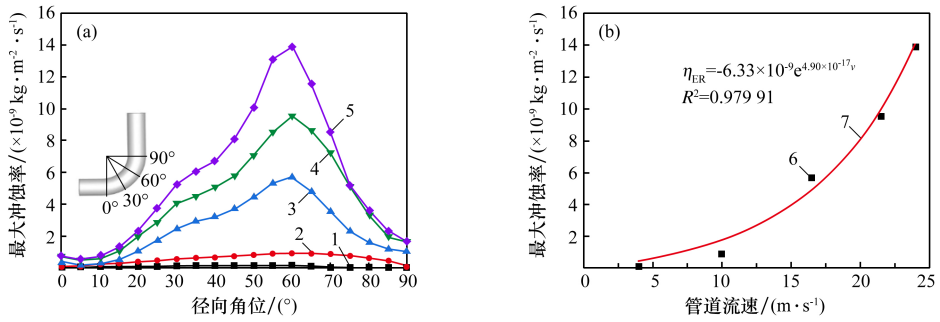
图8(a)为不同入口风速、不同径向角位处冲蚀率分布。由图 8(a)可看出，尽管不同管道流速下冲蚀率不同，但磨损最严重位置基本相同，主要集中在弯管径向角位为50°～70°范围内。图8(b)为管道最大冲蚀率随管道入口流速变化规律。由图 8(b)可看出：当速度为 0～10 m/s 时，冲蚀率随速度变化较小；当速度＞10 m/s 时，最大冲蚀率随速度增长趋势明显。这是因为当速度较小时，粒子的动能小，其对弯管壁面不能进行有效的冲击，因此冲蚀率较小。将计算结果进行拟合，得到关



速度/(m·s^{-1})：(a) 4.0；(b) 10.0；(c) 16.5；(d) 21.5；(e) 24.0

图 7　不同入口流速下弯管冲蚀率分布云图

Fig. 7　Elbow erosion contour under different inlet velocities



（a）不同入口风速、不同径向角位处冲蚀率分布；（b）最大冲蚀率随管道流速变化

速度/(m·s^{-1})：1—4.0；2—10.0；3—16.5；4—21.5；5—24.0；6—最大冲蚀率离散点；7—拟合曲线。

图 8　管道流速对冲蚀率影响

Fig. 8　Effect of inlet velocity on erosion rate

系式：$\eta_{ER} = -6.33 \times 10^{-9} e^{4.90 \times 10^{-17} v}$（$v$ 为速度，m/s）。可以定义系数 a、b，满足 $\eta_{ER} = a \cdot e^{b}$，其中，$a$、$b$ 随工况改变而改变。

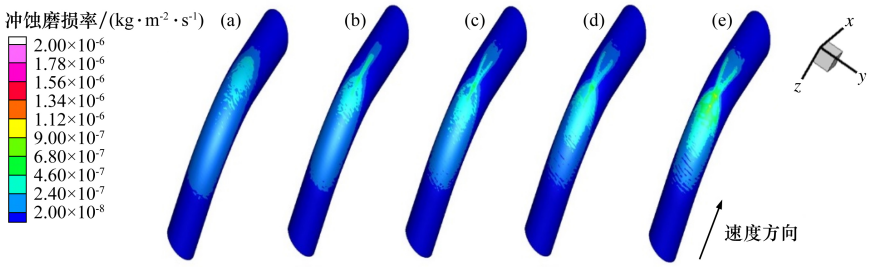
3.4 粉尘粒径对弯管冲蚀磨损的影响

为探究粉尘粒径对弯管冲蚀磨损的影响，对弯径比为 1.5、粉尘质量浓度为 5.1 g/m^3、入口风速为 16.5 m/s 以及弯管直径为 250 mm 的弯管在不同颗粒直径下的壁面冲蚀磨损进行研究，结果如图 9 所示。由图 9 可见，壁面冲蚀率随粒径增大而增大。这是因为小颗粒惯性较小，受流体曳力作用，其与流体无滑移运动的概率较大，因此转向撞击壁面的概率较小，平均冲蚀率较低。但当粉尘粒径增加，惯性也随之变大，所携带动能也增加，因此撞击壁面的概率与对壁面造成的撞击破坏均增大。粒径增大会使颗粒撞击壁面的范围缩小，即冲蚀磨损面积变小。因粒径增大，粉尘受流体拖曳作用减小，撞击壁面随机性较小，因此形成的冲蚀样貌也更具有规律。

图 10 为 5 种粒径的颗粒对除尘管道弯管的冲蚀磨损情况。由图 10(a)可见：当粒径不同时，弯管最大冲蚀位置也略有差异。而当颗粒直径大于 100 μm 时，最大冲蚀位置向出口端移动，在径向角位为 50°～70°范围内。由图 10(b)可见：当颗粒直径较小时，弯管冲蚀率随粒径增加而显著增加；当颗粒直径大于 150 μm 时，弯管冲蚀率的增长趋势变缓。这是因为随颗粒粒径增大，颗粒对流体跟随性变差，在一定的工况下会沉积于弯管处(如图 11 所示)，沉积率随粒径增大而增大。沉积层会阻挡管道内的粉尘对管壁的碰撞，起到对管壁的保护作用，因此在沉积效应与冲蚀磨损耦合作用下大粒径颗粒对壁面冲蚀率的增长趋势变缓。

3.5 弯径比对弯管冲蚀磨损的影响

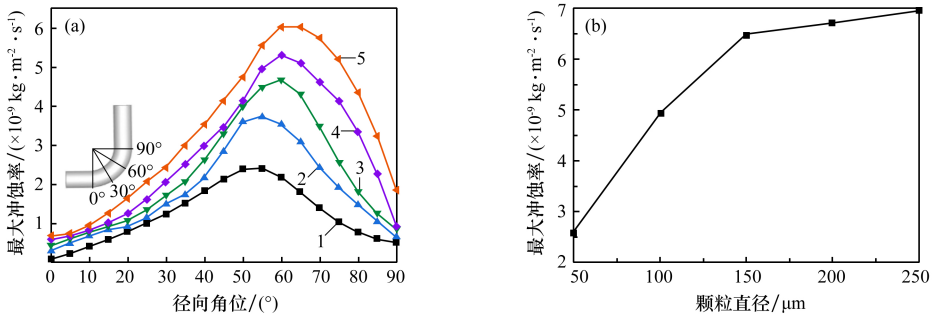
为探究弯径比对弯管冲蚀磨损的影响，对入口风速为 16.5 m/s、粉尘质量浓度为 5.1 g/m^3、颗粒直径为 100 μm 以及弯管直径为 25 0mm 的弯管在不同弯径比下的壁面冲蚀磨损进行研究，结果如图 12、13 所示。由图 12 可见，随着弯径比的增大，冲蚀率呈下降趋势，最大冲蚀磨损点随弯管弯径比增加向弯管出口端偏移。由图 13(a)可见：当弯径比为1、2时，最大冲蚀点位置在径向



颗粒直径/μm：(a) 50；(b) 100；(c) 150；(d) 200；(e) 250

图 9 不同颗粒直径下弯管冲蚀率分布云图

Fig. 9 Elbow erosion contour at different particle diameters

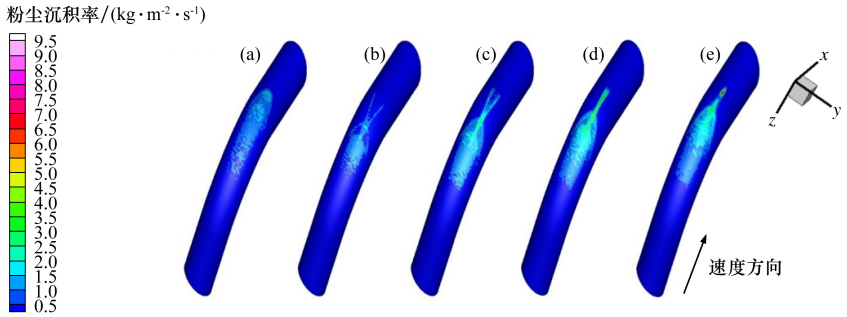


(a) 不同粒径弯管不同径向角位处的冲蚀率；(b) 冲蚀率随粒径变化

颗粒直径/μm：1—50；2—100；3—150；4—200；5—250。

图 10 颗粒直径对冲蚀率影响

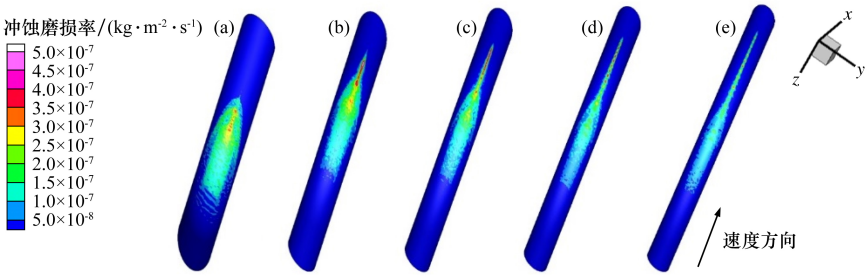
Fig. 10 Effect of particle diameter on erosion rate



颗粒直径/μm：（a）50；（b）100；（c）150；（d）200；（e）250

图 11　弯管沉积云图

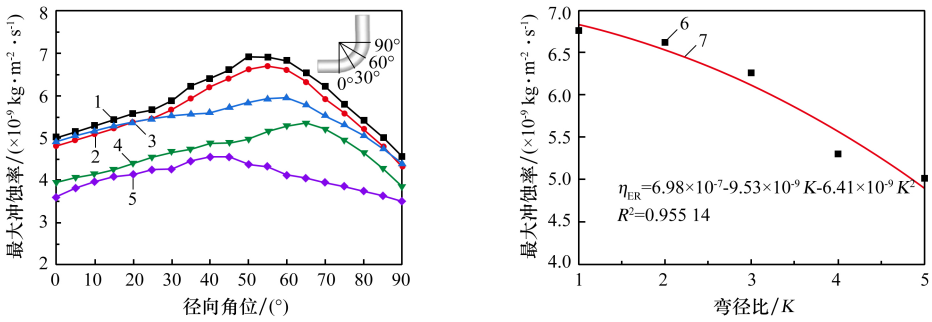
Fig. 11　Contour of accretion in elbow



弯径比：（a）1；（b）2；（c）3；（d）4；（e）5

图 12　不同弯管弯径比下弯管冲蚀率分布

Fig. 12　Elbow erosion contour at different bend diameter ratios



（a）不同弯径比下弯管不同径向角位处冲蚀率；（b）最大冲蚀率随弯径比变化

弯径比：1—1；2—2；3—3；4—4；5—5；6—最大冲蚀率离散点；7—拟合曲线。

图 13　弯径比对冲蚀率影响

Fig. 13　Effect of bend diameter ratio on erosion rate

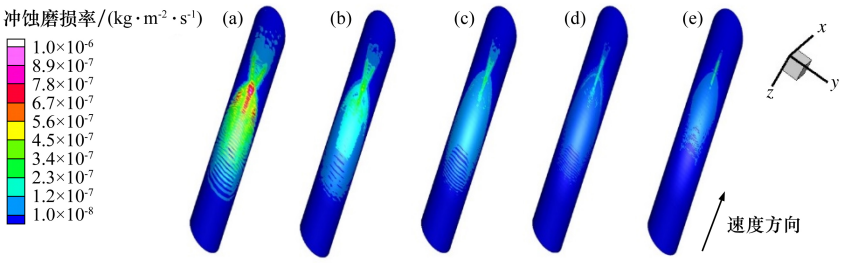
角位为 40° ~ 50°范围内；当弯径比大于 3 时，最大冲蚀点位置在径向角位为 50° ~ 70°范围内。当变径比为 1 时，弯管冲蚀速率最大。由图 13(b)可见：当弯径比增大时，管道最大冲蚀率下降。因为管道直径一定，弯管曲率半径趋于无穷大时，此时弯管接近于直管，颗粒与弯管碰撞的概率降低，与管壁摩擦概率降低，因此对管壁造成的碰撞概率降低，管路的冲蚀率下降。拟合数据得到冲蚀率 η_{ER} 与弯径比(K)函数关系：

$$\eta_{ER}=6.98\times10^{-7}-9.53\times10^{-9}K-6.41\times10^{-9}K^2 \quad (10)$$

3.6　管道直径对弯管冲蚀磨损的影响

为探究管道直径对弯管冲蚀磨损的影响，对入口风速为 16.5 m/s、粉尘质量浓度为 5.1 g/m^3、颗粒直径为 100 μm 以及弯径比为 1.5 的弯管在不同管径下的壁面冲蚀磨损进行研究，结果如图 14 所示。由图 14 可知：随管道直径增加，弯头的冲蚀速率明显降低，且最大冲蚀磨损点位置向出口端偏移。

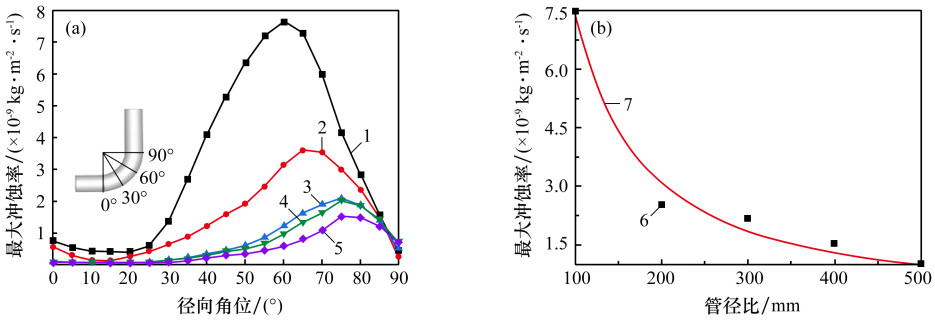
不同管道直径对冲蚀率影响如图15所示。由



弯管直径/mm：（a）100；（b）200；（c）300；（d）400；（e）500

图 14 不同管道直径下弯管冲蚀率分布

Fig. 14 Elbow erosion contour at different pipe diameters



（a）不同管径弯管不同径向角位处冲蚀率；（b）冲蚀率随管径变化

弯管直径/mm：1—100；2—200；3—300；4—400；5—500；6—最大冲蚀率离散点；7—拟合曲线。

图 15 管道直径对冲蚀率影响

Fig. 15 Effect of pipe diameter on erosion rate

图 15(a)可见，当管道直径为 100 ~ 200 mm 时，最大冲蚀磨损位置在 60° ~ 70°范围内，当管道直径大于 200 mm 时，最大冲蚀磨损位置在 75° ~ 80°范围内。这是由于随管径增大，入口直管段长度增加，由于惯性作用，颗粒有更长时间随气流发生偏转，因此大管径的壁面冲蚀磨损位置更偏向出口。由图 15(b)可见，当管道直径为 200 mm 时，壁面的冲蚀率达到较低值，且随管径继续增加，冲蚀速率下降不明显。因大直径管道有更大碰撞表面积，存在一定缓冲作用可以减弱冲蚀。拟合数据得冲蚀率 η_{ER} 与管径 D 函数关系：$\eta_{ER}=6.14\times10^{-4}D^{-1.26}$。

4 结 论

（1）除尘管道弯管处冲蚀率随颗粒质量流量增加而线性增加，冲蚀率与颗粒质量流量关系：$\eta_{ER}=4.23\times10^{-9}\rho_m$。对于不同工况可定义系数 A，满足 $\eta_{ER}=A\cdot\rho_m$，其中，A 随工况改变而改变。管道流速是影响弯管冲蚀率的重要因素，弯管冲蚀率随管道流速增加呈指数增长，拟合数值计算结果得到冲蚀率与管道流速的函数关系：$\eta_{ER}=-6.33\times10^{-9}e^{4.90\times10^{-17}v}$，可以定义系数 a、b，满足 $\eta_{ER}=a\cdot e^{b}$，其中 a、b 为与工况有关的系数。

（2）冲蚀率随粒径增大而增大，但在不同粒径范围内的增长速率不同。在粒径为 150 μm 以下的范围内，弯管冲蚀率随颗粒直径增大而显著增大；在 150 μm 以上范围内，由于大颗粒易沉积，颗粒直径增加会使弯管最大冲蚀率增长趋势变缓，冲蚀磨损面积减小。冲蚀率随弯径比增大而减小，因弯管长度增加，颗粒与壁面碰撞概率增大，但弯径比无限大则趋近于直管，颗粒偏转碰撞壁面概率降低。

（3）冲蚀率随管道直径增大而减小，因大直径管道有更大碰撞表面积，有一定缓冲作用可以减弱冲蚀。不同工况下的弯管冲蚀位置主要集中在径向角位为 50° ~ 70°，最大磨损位置在径向角位为 60°左右。

参考文献：

[1] 马京华. 钢铁企业典型生产工艺颗粒物排放特征研究[D]. 重庆:西南大学,2009. （下转第 37 页）

团强度的影响[J]. 钢铁钒钛,2013,34(6):29 – 32.
JIA Jihua,HAN Hongliang,DUAN Dongping,et al. Effect of different binder addition on strength of carbon-containing pelletized blast furnace dusts[J]. Iron Steel Vanadium Titanium,2013,34(6):29 – 32.

[8] 刘新兵,杜烨. 含有机黏结剂人工钠化膨润土在球团生产中的应用[J]. 烧结球团,2003,28(6):47 – 50.
LIU Xinbing, DU Ye. Application of a sodium activated bentonite added organic binder in iron ore pellet production[J]. Sintering and Pelletizing,2003,28(6):47 – 50.

[9] 王永刚,杨大兵. 黏结剂对程潮铁精矿球团质量的影响[J]. 烧结球团,2011,36(4):20 – 22;27.
WANG Yonggang,YANG Dabing. Influence of binder on quality of Chengchao iron concentrate pellet[J]. Sintering and Pelletizing,2011,36(4):20 – 22;27.

[10] 嵇建国,杨群,谢永生. 新型有机黏结剂在球团生产中的应用[J]. 烧结球团,2011,36(5):30 – 33.
JI Jianguo, YANG Qun, XIE Yongsheng. Application of new type of organic binder in pellet production[J]. Sintering and Pelletizing,2011,36(5):30 – 33.

[11] 刘福生,彭同江,张宝述. 膨胀蛭石的利用及其新进展[J]. 非金属矿,2001,24(4):5 – 7.
LIU Fusheng, PENG Tongjiang, ZHANG Baoshu. Utilization of expanded vermiculite and its new progression[J]. Non-Metallic Mines,2001,24(4):5 – 7.

[12] 胡光锁. 蛭石膨胀机理及膨胀蛭石性质的研究[D]. 北京:北京工商大学,2006.
HU Guangsuo. Study on the expansion mechanism of vermiculite and the properties of expanded vermiculite [D]. Beijing: Beijing Technology and Business University,2006.

(上接第 24 页)

MA Jinghua. Emission characteristics of particulates from typical production process iron and steel enterprises[D]. Chongqing:Southeast University,2009.

[2] GUAN F,DUAN M,MA W,et al. An experimental study of mechanical behavior of coiled tubing in pipelines[J]. Applied Ocean Research,2014,44:13 – 19.

[3] 谢振强,曹学文,吴超,等. 弯管固体颗粒冲蚀理论与防冲蚀研究进展[J]. 表面技术,2021,50(8):170 – 179.
XIE Zhenqiang,CAO Xuewen,WU Chao,et al. Research progress of solid particle erosion theory and erosion prevention in bent pipes[J]. Surface Technology,2021,50(8):170 – 179.

[4] 偶国富,许根富,朱祖超,等. 弯管冲蚀失效流固耦合机理及数值模拟[J]. 机械工程学报,2009,45(11):119 – 124;132.
OU Guofu,XU Genfu,ZHU Zuchao,et al. Fluid-structure interaction mechanism and numerical simulation of elbow erosion failure[J]. Journal of Mechanical Engineering,2009,45(11):119 – 124;132.

[5] 周大鹏,马学东,陈燕. 基于 CFD-DEM 耦合几形管冲蚀磨损的模拟分析[J]. 石油机械,2022,50(7):136 – 142.
ZHOU Dapeng, MA Xuedong, CHEN Yan. Simulation analysis of erosion wear of several shaped tubes based on CFD-DEM coupling[J]. Petroleum machinery, 2022,50(7):136 – 142.

[6] 王岩. 液体颗粒对天然气管道冲蚀的数值模拟[D]. 抚顺:辽宁石油化工大学,2019.
WANG Yan. Numerical simulation of erosion of natural gas pipeline by liquid particles[D]. Fushun: Liaoning Shihua University,2019.

[7] KESANA N R, GRUBB S A, MCLAURY B S, et al. Ultrasonic measurement of multiphase flow erosion patterns in a standard elbow[J]. Journal of Energy Resources Technology,2013,135(3):1160 – 1167.

[8] MENG H C,LUDEMA K C. Wear models and predictive equations:their form and content[J]. Wear,1995,181:443 – 457.

[9] CHEN X, MCLAURY B S, SHIRAZI S A. Application and experimental validation of a computational fluid dynamics (CFD)-based erosion prediction model in elbows and plugged tees[J]. Computers & Fluids,2004,33(10):1251 – 1272.

[10] ZHANG Y L, MCLAURY B S, SHIRAZI S A. Improvements of particle near-wall velocity and erosion predictions using a commercial CFD code[J]. Journal of Fluids Engineering-Transactions of The Asme, 2009,131(3):303 – 312.

[11] GRANT G, TABAKOFF W. Erosion prediction in turbomachinery resulting from environmental solid particles[J]. Journal of Aircraft,1975,12(5):471 – 478.