

气固两相流中 90° 竖直弯管肋条防磨性能的研究

郭仁宁, 赵立柱, 马冶, 段乐乐

(辽宁工程技术大学 机械工程学院 辽宁 阜新 123000)

摘要: 针对弯管中气固两相流对弯头处的冲蚀磨损问题, 提出一种弯管防磨方法—肋条防磨。通过在弯头外壁均匀地加设 8 根肋条构造出防磨弯管的几何模型。基于 CFD 模拟技术, 采用 DPM 模型对肋高为 2 mm 防磨弯管进行了数值模拟, 观察其磨损情况, 并与普通弯管进行对比。结果表明: 普通弯管的平均磨损率和最大磨损率都接近于防磨弯管的两倍, 从而证明防磨弯管且有明显的防磨作用。调整防磨弯管肋条的高度, 在相同工况下, 对不同肋高的防磨弯管进行数值模拟。通过对比不同肋高下的磨损率, 确定最佳的防磨肋高为 2 mm。最后, 完全按照模拟模型的尺寸建立普通弯管及 2 mm 肋高的防磨弯管的实验模型, 并进行实验, 将模拟结果与实验研究进行对比, 发现两者平均磨损率的模拟值与实验值基本一致。

关键词: 冲蚀磨损; 普通弯管; 肋条弯管; 磨损率

中图分类号: U173.92 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2016.04.004

引言

多相流技术在国民经济的各行业得到应用的同时也产生了很多问题。气固两相流中固体颗粒高速打击到设备壁面上时, 会引起冲蚀磨损, 这种磨损大大降低了设备的使用寿命^[1]。例如: 除尘管磨损会造成系统漏风, 影响尘源控制效果, 破坏除尘系统功能, 甚至造成系统瘫痪; 高架除尘管道磨损会使管道的强度和刚度急剧下降, 带来不安全隐患^[2]。

研究表明, 影响弯管磨损的主要因素包括输送速度、所输送物料硬度及形状尺寸、磨粒撞击角度、弯管材料和几何尺寸等^[3]。因此国内外研究人员对气固两相流防磨的研究, 主要是通过直接或间接的改变以上影响因素来达到防磨的目的。但是, 在实际的应用过程中, 防磨方法主要是采用材料强化处理的被动防磨措施^[4], 虽然效果很好, 但成本

较高。

本研究通过在弯管外壁加设一排截面为正方形的肋条, 来改变颗粒碰撞壁面的速度和角度, 以达到防磨的目的^[5]。相比其它防磨方式, 肋条防磨具有效果显著、操作简单等优点。

1 数理模型

1.1 空气流动模型

弯管中空气温度为 25 °C, 密度为 1.225 kg/m³, 黏度为 1.79 × 10⁻⁵ Pa·s。

空气的连续性方程和动量方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho u) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u^2) = -\text{div}p + \text{div}\tau + \rho g - f \quad (2)$$

式中: ρ —空气的密度, kg/m³; u —空气速度, m/s; p —空气压强, Pa; g —重力加速度, m/s²; τ —空气应力张量; f —空气的平均阻力, N^[6]。

应用 DPM 模型进行气固两相流模拟; 空气作为主相; 固体相以小颗粒形式入射; 考虑滑移速度影响; 基于 standard $k-\varepsilon$ 湍流模型对气固两相进行计算; 采用 SIMPLE 算法进行压力-速度耦合。

1.2 颗粒模型

由于固体颗粒的体积分数比较小, 所以固体颗粒运动采用 lagrangian 离散相模型。Lagrangian 能详细地模拟多相流中有复杂经历的颗粒相, 因此能比较精准地预测固体颗粒的扩散情况。

颗粒相的平衡方程为:

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{3\mu C_D Re_p(\mu - \mu_p)}{4\rho_p d_p^2} + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F \quad (3)$$

收稿日期: 2015-06-24; 修订日期: 2015-07-14

作者简介: 郭仁宁(1956-), 男, 辽宁阜新人, 辽宁工程技术大学教授, 硕士研究生导师。

$$u = u' + u'' \quad \mu' = \xi \sqrt{\frac{2k}{3}} \quad (4)$$

式中: u_p —颗粒相速度, m/s; u' —流体的时均速度, m/s; u'' —脉动速度, m/s; k —湍动能, m^2/s^2 ; ξ —正态分布随机数; C_D —曳力系数; Re_p —相对雷诺数; ρ_p —颗粒相密度, kg/m^3 ; ρ —空气密度, kg/m^3 ; d_p —颗粒直径, m; g —重力加速度, m/s^2 ; F —主要包括附加质量和升力 $N^{[7]}$ 。

1.3 磨损率计算

管壁磨损率方程为:

$$E = \sum_{i=1}^n \frac{m_d C(d) f(\alpha) u_d d(u)}{A_d} \quad (5)$$

式中: E —磨损率; $C(d)$ —颗粒直径函数; $f(\alpha)$ —冲击角函数; α —颗粒与壁面的入射角, rad; $d(u)$ —颗粒的速度函数; A_d —颗粒在壁面的投影面积, m^2 。

1.4 边界条件

模型边界条件: 进口采用速度进口, 温度设定为 298 K; 出口采用流动出口, 空气进口速度为 15 m/s。固体颗粒的进口速度 15 m/s, 固体颗粒的流量是 0.04 kg/s, 采用弹射性壁面, 进口和出口采用逃逸条件。壁面材料为中碳钢, 固体颗粒采用密度为 1 500 kg/m^3 , 直径为 200 μm 的无烟煤。为了使模拟过程与实验过程的工况相同, 从而对比分析模拟结果的真实性, 模拟过程的固体颗粒密度为 1 500 kg/m^3 , 直径为 200 μm 的无烟煤。

1.5 几何模型

几何模型如图 1 和图 2 所示, 肋条是紧贴壁面底端的半圆环沿弯管轴线拉伸而成, 从竖直方向开始, 沿逆时针每 10° 设置一个肋条, 共 8 个肋条。考虑重力, 重力沿 Y 轴负方向。弯管及肋条尺寸如表 1 所示。

表 1 弯管及肋条尺寸

Tab. 1 Dimensions of elbow and ribs

参数	数值
弯管直径 d/mm	80
上游直管段长度 L_2/mm	800
下游直管段长度 L_1/mm	800
弯头曲率半径 R/mm	120
肋条宽度 W/mm	2
肋条高度 H/mm	待定

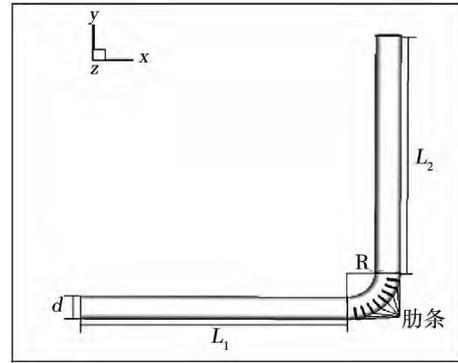


图 1 肋条弯管结构图

Fig. 1 Rib elbow structure

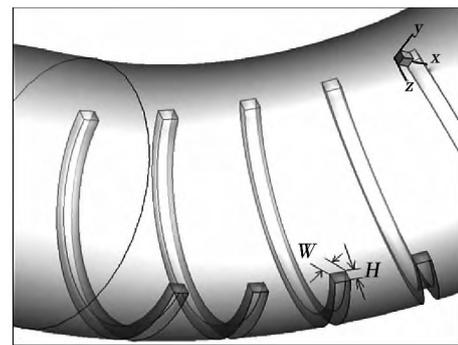


图 2 肋条结构图

Fig. 2 Rib structure

2 模拟结果分析

2.1 肋条对磨损的影响

肋条弯管的肋高选为 2 mm, 从图 3 和图 4 中可以直观地看出, 普通弯管相较于肋条弯管磨损更加的集中, 且磨损严重区域的面积更大。两者的磨损率从下到上都遵循先变大后变小的规律。在弯头处两者磨损最严重的部位都集中在与竖直面成大概 50° 到 60° 之间的位置。肋条弯管的发生严重磨损的面积远小于普通弯管且都集中在与肋条连接的壁面处。

从图 5 和图 6 中可以看出, 普通管的最大磨损率是肋条管的两倍。从磨穿即报废的角度来说, 肋条管的寿命就是普通管的两倍。不仅如此, 普通管的平均磨损率也超过了肋条管, 这也说明肋条管在一定程度上起到了防磨的作用。

从竖直方向开始, 沿逆时针每 10° 做一个压力切片, 从图 7 和图 8 可以看出, 两管在各个压力切片

中, 压力由内侧壁面到外侧壁面都是递增的, 在内侧壁面甚至出现负压, 说明在惯性力的作用下, 气固两相更多的流向了外侧壁面^[8]。这为外侧壁面的磨损提供了先决条件。

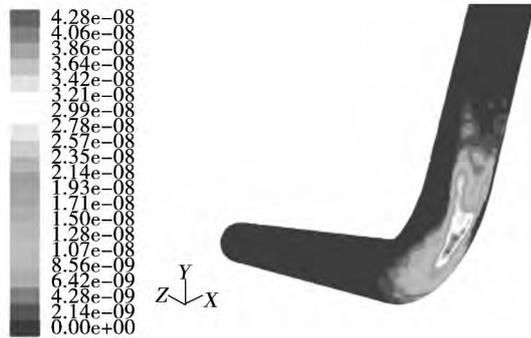


图 3 普通弯管磨损率分布云图(kg/m²·s)

Fig. 3 Wear rate distribution of common elbow(kg/m²·s)

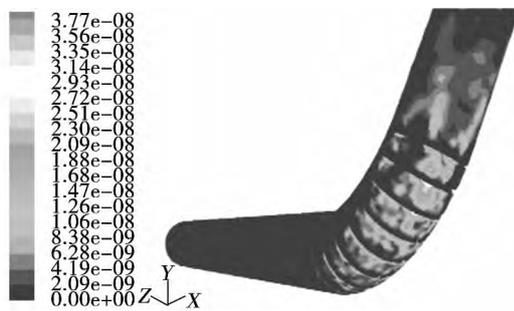


图 4 2 mm 肋条弯管磨损率分布云图(kg/m²·s)

Fig. 4 Wear rate distribution of 2mm rib elbow(kg/m²·s)

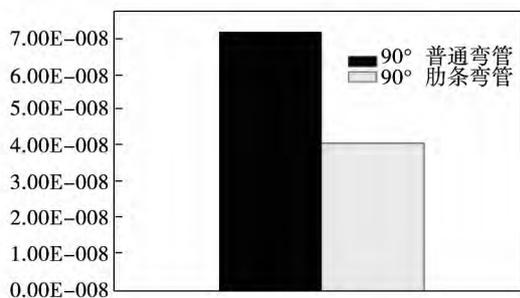


图 5 普通弯管与 2 mm 肋条弯管最大磨损率(kg/m²·s)

Fig. 5 Maximum wear rates of common elbow and 2 mm rib elbow(kg/m²·s)

从图 9 和图 10 可以看出, 两管的压力降开始都是随着夹角的增大而不断地增大, 到 50° 出现最大值, 然后再随着夹角的增加而减小。说明气固两相在弯头部位都经历了先分离再次融合的过程。肋条弯管在各个角度的压力降都低于普通弯管, 说明肋条弯管的流场更加均匀, 两管的平均静压力都随角度增加而不断减小, 但普通弯管明显变化更快, 也说明肋条弯管的流场更加均匀, 均匀的流场有助于降低磨损^[9]。图 10 中, 普通弯管的平均静压力在各个角度都小于同角度的肋条弯管, 说明肋条弯管对颗粒相的平均阻力要大于普通弯管, 有助于防磨^[10]。

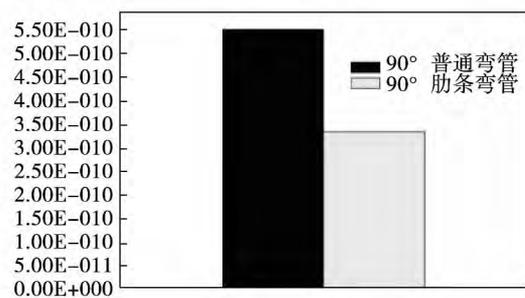


图 6 普通弯管与 2 mm 肋条弯管平均磨损率(kg/m²·s)

Fig. 6 Average wear rates of common elbow and 2 mm rib elbow(kg/m²·s)

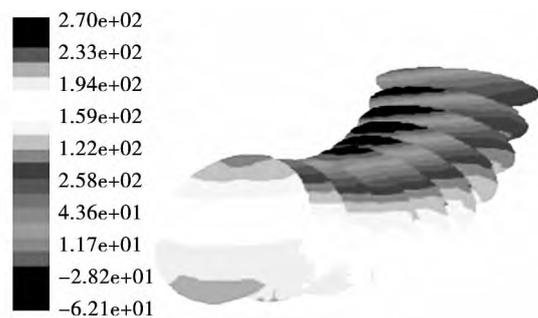


图 7 普通弯管各角度的表压切片云图(Pa)

Fig. 7 Pressure contour sequence of ordinary elbow(Pa)

由磨损率云图已知, 普通管在 50° ~ 60° 之间磨损最为严重。不但磨损率大, 磨损面积也很大。从图 11 可知, 主要原因在于上游直管段内壁附近的颗粒经过弯头时, 在离心力作用下, 获得相对更大的动能^[11]。高速颗粒直接撞击在 50° ~ 60° 之间的壁面处, 导致较大磨损率的出现。又因为这样的高速颗

粒较多,所以出现了以 50°~60°之间为中心的大面积磨损。

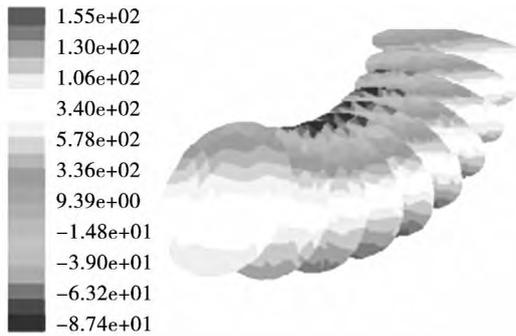


图 8 2 mm 肋条弯管各角度的表压切片云图 (Pa)
Fig. 8 Pressure contour sequence of 2 mm rib elbow (Pa)

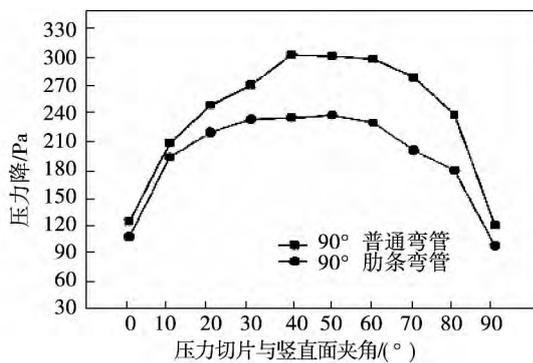


图 9 普通弯管和肋 2 mm 条弯管各角度的压力降
Fig. 9 Pressure drop of common elbow and 2 mm rib elbow

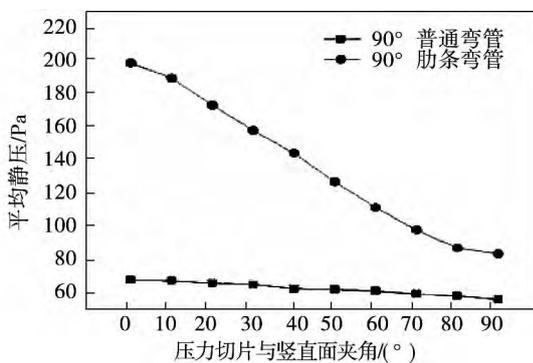


图 10 普通弯管和 2 mm 肋条弯管各角度的平均压
Fig. 10 Average pressure of common elbow and 2 mm rib elbow

从图 12 可以看出,部分颗粒撞击肋条后,速度急剧下降,然后又在空气二次流的推动下,直接进入

下游直管段的主流区,在一定程度上减小了颗粒与壁面的碰撞频率^[11~12]。大量流向下游直管段主流区的颗粒在飞行的过程中与上游内壁附近飞来的高速颗粒碰撞,通过动量的传递,有效地减小了高速颗粒的动能,导致高速颗粒的撞击伤害明显减轻。

2.2 肋条高度的优化分析

肋条高度的大小对防磨效果起着决定性的作用。分别对 1、2、3、4、6、8、10、12、14、16、18 和 20 mm 肋高进行数值模拟^[14],分析不同肋高时弯头处的磨损情况,可以确定最优的肋高尺寸。这里只列出肋高为 1、2、3、4、10 和 16 mm 这 6 种情况的磨损率云图。

从磨损率云图可以看出,1 和 2 mm 肋高时,磨损云图的形状和普通弯管还很相似,磨损面积从下到上都是先变小再变大。肋高增加到 3 mm 以后,磨损率云图规律发生变化,从下到上都出现了大面积磨损,50°~60°之间的位置也不例外。原因在于随肋条高度的增加,颗粒的反射轨迹越来越混乱,对壁面的碰撞更无规则性。颗粒不断地在肋条之间高频的碰撞,还会提高平均磨损率与最大磨损率变大的可能性。

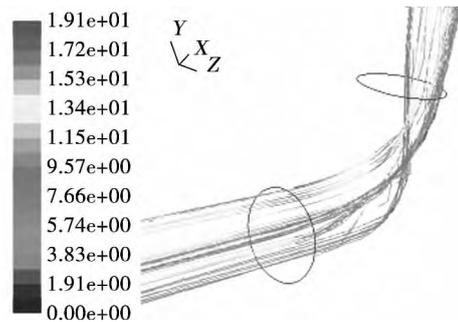


图 11 普通弯管颗粒速度轨迹 (m/s)
Fig. 11 Particle trajectory in common elbow (m/s)

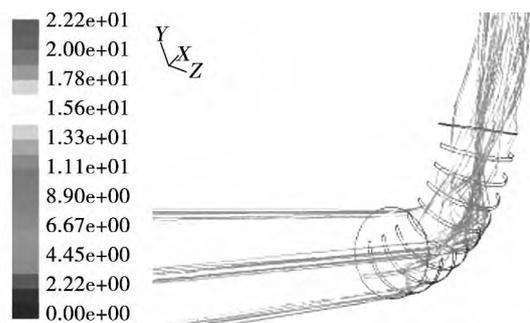


图 12 2 mm 肋条弯管颗粒速度轨迹 (m/s)
Fig. 12 Particle trajectory in 2 mm rib elbow (m/s)

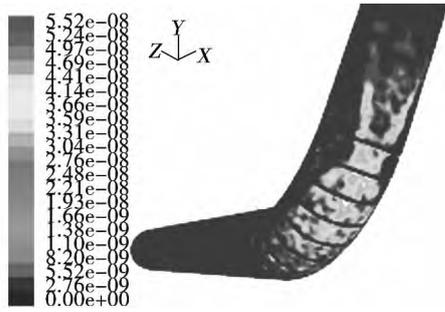


图 13 1 mm 肋条弯管磨损率云图(kg/m²·s)

Fig. 13 Wear rate distribution of 1mm rib elbow(kg/m²·s)

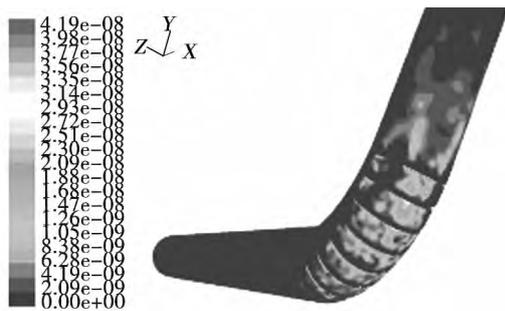


图 14 2 mm 肋条弯管磨损率云图(kg/m²·s)

Fig. 14 Wear rate distribution of 2mm rib elbow(kg/m²·s)

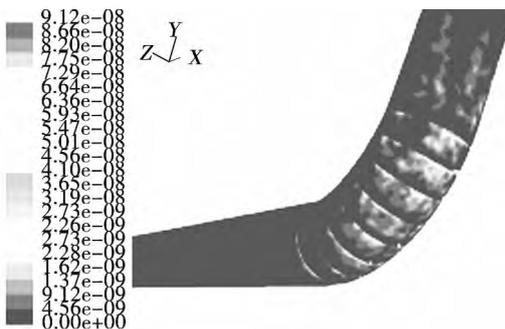


图 15 3 mm 肋条弯管磨损率云图(kg/m²·s)

Fig. 15 Wear rate distribution of of 3mm rib elbow(kg/m²·s)

从图 19 可以看出最大磨损率随肋高的增加先变小后变大 2 mm 肋高时最小。说明肋高为 2 mm 弯管的肋条最有效地改变了颗粒的轨迹,防磨的效果最好。1 ~ 8 mm 肋高之间的弯管最大磨损率变化幅度不大。10 ~ 20 mm 肋高之间的弯管最大磨损率变化幅度明显变大。18 ~ 20 mm 肋高两者的最大磨

损率变化最大。差值达到了 $4.5 \times 10^{-10} \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。从 14 mm 肋高开始最大磨损率甚至超过了普通弯管,且最大磨损率都集中在紧贴肋条的壁面处。因为随着肋条高度的增加,颗粒更容易积存在肋条之间,靠近肋条的壁面更容易积存颗粒,在空气二次流作用下,颗粒不断地冲刷壁面,导致肋条附近的壁面磨损严重。

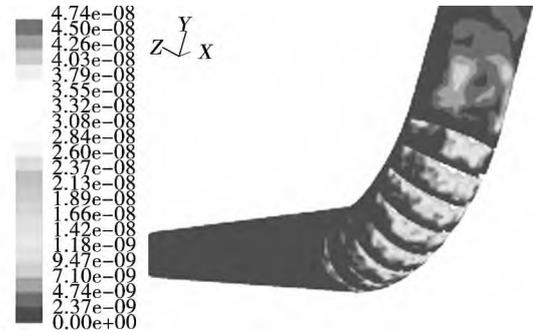


图 16 4 mm 肋条弯管磨损率云图(kg/m²·s)

Fig. 16 Wear rate distribution of 4mm rib elbow(kg/m²·s)

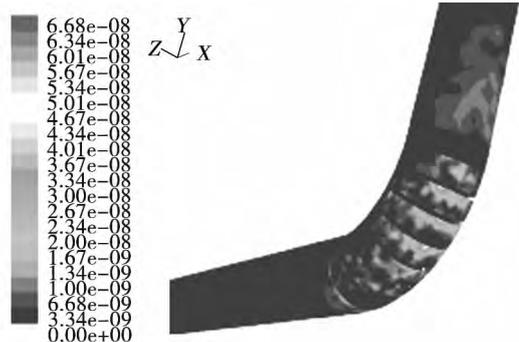


图 17 10 mm 肋条弯管磨损率云图(kg/m²·s)

Fig. 17 Wear rate distribution of of 10 mm rib elbow(kg/m²·s)

从图 20 看出平均磨损率随肋高的增加也是先变小后变大,虽然各肋条弯管平均磨损率相差不大,但 2 mm 肋高时还是最小。说明 2 mm 肋高弯管防磨效果最好。

3 实验分析

平均磨损率实验式:

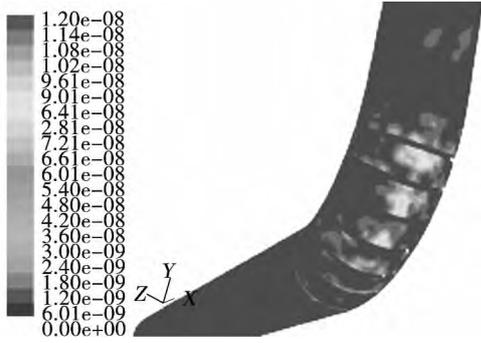


图 18 16 mm 肋条弯管磨损率云图(kg/m²·s)

Fig. 18 Wear rate distribution of 16mm rib elbow(kg/m²·s)

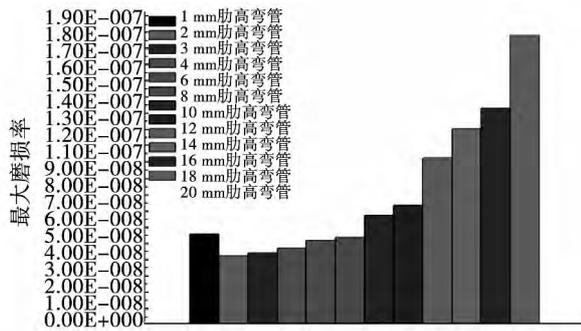


图 19 不同肋高弯管的最大磨损率(kg/m²·s)

Fig. 19 Maximum wear rates of different rib elbows(kg/m²·s)

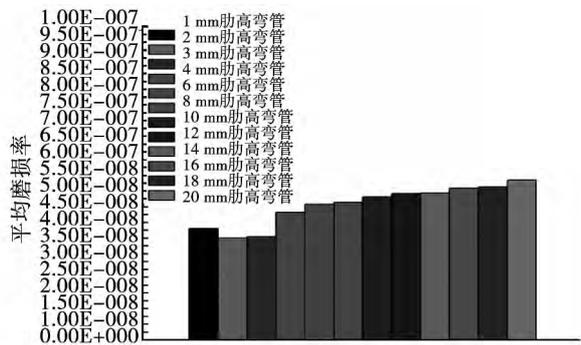


图 20 不同肋高弯管的平均磨损率(kg/m²·s)

Fig. 20 Average wear rates of different rib elbows(kg/m²·s)

$$\bar{E} = \frac{M_1 - M_2}{S \cdot t} \quad (6)$$

式中: \bar{E} —平均磨损率, kg/(m²·s); M_1 、 M_2 —实验前、后质量, kg; S —弯管内表面面积, m²; t —实验时

间, s。

实验的目的在于检验数值模拟过程的可靠性。由于模型的尺寸比较小,所以直接按照数值模拟过程的模型尺寸建立普通弯管和 2 mm 肋高的肋条弯管的实验模型。模型材料仍为中碳钢。首先,在实验前测出普通弯管和肋条弯管的质量及内表面面积,然后按照图 21 装置进行实验,AB 段为可拆卸的实验弯管。在供料器中放入准备好的密度为 1 500 kg/m³ 粒径为 200 μm 的无烟煤煤粉;在供风管道上和旋转式供料器上加装流量计,通过调节阀门的大小来改变流速和流量,从而获得与模拟过程相同的工况条件。开动设备,分别工作 72 h 后,测出普通弯管和肋条弯管实验后的质量,再根据式(6)计算出二者的平均磨损率的实验值,再与以上数值模拟结果进行比较^[15]。实验参数及实验装置如表 2 和图 21 所示。

表 2 实验参数

Tab. 2 Experimental parameters

	普通弯管	肋条弯管
实验前质量 M_1 /kg	12.358 363	13.126 397
实验后质量 M_2 /kg	12.358 431	13.126 437
实验时间 t /s	259 200	259 200
弯管内壁面积 S /m ²	0.449 5	0.449 5
平均磨损率实验值 /kg·(m ² ·s) ⁻¹	5.84×10^{-10}	3.43×10^{-10}
平均磨损率模拟值 /kg·(m ² ·s) ⁻¹	5.51×10^{-10}	3.25×10^{-10}
误差大小 δ /%	5.9	5.6

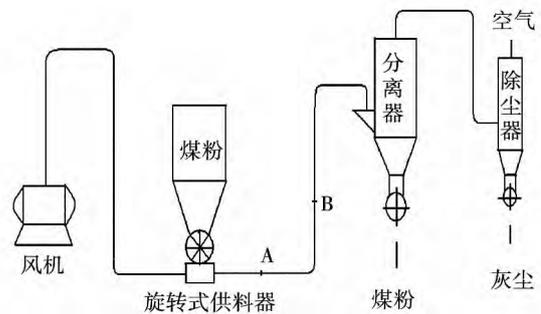


图 21 实验装置

Fig. 21 Experimental apparatus

从表 2 可以看出,无论是普通弯管还是肋条弯管,平均磨损率的实验结果与模拟结果相差都很小,误差都在 7% 以内。说明肋条优化的模拟过程能够较好的反映实际的肋条磨损情况。

4 结 论

(1) 通过对普通弯管和肋高为2 mm的肋条弯管的数值模拟及对比分析,发现普通弯管的平均磨损率和最大磨损率都接近2 mm肋高弯管的两倍。肋条弯管的寿命大概是普通弯管的两倍。确定了壁面加设肋条有一定的防磨效果,为防磨优化提供了可行性条件。

(2) 通过对12组不同肋高的肋条弯管的数值模拟及对比分析,发现平均磨损率和最大磨损率都是随着肋条高度的增加,先减小后增大。2 mm肋高弯管平均磨损率和最大磨损率都是12组中最小的。肋条高度增大到14 mm以后,最大磨损率甚至超过了普通弯管。说明并非肋条高度越大,防磨效果越好。2 mm肋高弯管是最优选择。

(3) 完全按照模拟模型的数据建立实验模型,得出普通弯管和肋条弯管的平均磨损率的模拟值与实验值相差较小,在误差允许范围内,可行性强。

(4) 研究成果对防磨弯管的设计具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 李 强,唐 晓,李 焰.冲刷腐蚀研究方法进展[J].中国腐蚀与防护学报,2014,34(5):399-409.
LI Qiang,TANG Xiao,LI Yan. Progress in erosion corrosion research methods [J]. Chinese Journal of Corrosion and Protection, 2014, 34(5): 399-409.
- [2] 姚 群,李育杰.除尘管道磨损与防磨措施[J].工业安全与防尘,2000,(1):47-48.
YAO Qun,LI Yu-jie. Wear and tear of dust removal pipe [J]. Industrial Safety and Dust, 2000, 1: 47-48.
- [3] 高万夫,郑雁军,崔立山等.管道弯头磨损特性的研究[J].石油化工高等学校学报,2003,16(4):56-60.
GAO Wan-fu,ZHENG Yan-jun,CUI Li-shan,et al. Research on the wear characteristics of pipe elbow [J]. Journal of the University of Petroleum and Chemical Engineering, 2003, 16(4): 56-60.
- [4] 柳成文,毛靖儒,俞茂铮.90°弯管内稀疏气固两相流及固粒对壁面磨损量的数值研究[J].西安交通大学学报,1999,33(9):53-57.
LIU Cheng-wen,MAO Jing-ru,YU Mao-zheng. Analysis of gas-solid two-phase flow and erosion in a 90° curved duct [J]. Journal of Xi'an Jiao Tong University, 1999, 33(9): 53-57.
- [5] 姚 军,陈丽华,樊建人等.一种气固两相流中弯管抗磨方法的数值试验研究[J].中国电机工程学报,2002,22(5):134-138.
YAO Jun,CHEN Li-hua,FAN Jian-ren,et al. Numerical simulation of a new method for protecting bends from erosion in gas-particle flows [J]. Proceedings of the Chinese Electrical Engineering, 2002, 22(5): 134-138.
- [6] 李 亮,申龙涉,范开峰等.弯管中多相流冲刷腐蚀数值模拟[J].辽宁石油化工大学学报,2014,34(3):48-52.
LI Liang,SHENG Long-she,KAI Feng-fan,et al. Numerical simulation of bend multiphase flow erosion [J]. Journal of Liaoning University of Petroleum and Chemical, 2014, 34(3): 48-52.
- [7] 张 义,周 文,孙志强等.管道内气固两相流冲刷磨损特性数值模拟[J].金属材料与冶金工程,2011,39(1):11-15.
ZHANG Yi,ZHOU Wen,SUN Zhi-qiang,et al. Numerical simulation of erosion wear characteristics of gas and solid two-phase flow in pipelines [J]. Metal Materials and Metallurgical Engineering, 2011, 39(1): 11-15.
- [8] 杜 俊,胡国明,方自强等.弯管稀相气力输送CFD-DEM法数值模拟[J].国防科技大学学报,2014,(4):134-139.
DU Jun,HU Guo-ming,FANG Zi-qiang,et al. Simulation of dilute pneumatic conveying with bends by CFD-DEM [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2014, 4: 134-139.
- [9] 谢振华,周艳荣.90°方截面弯管内加装导流板的优化研究[J].应用基础与工程科学学报,2009,17:566-572.
XIE Zhen-hua,ZHOU Yan-rong. Optimization research on guide plate installed in quadrate 90° curved duct [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2009, 17: 566-572.
- [10] 刘晓斌,段广彬,刘宗明等.水平弯管内气固两相流的试验研究与数值模拟[J].济南大学学报:自然科学版,2012(3):230-235.
LIU Xiao-bin,DUAN Guang-bin,LIU Zong-ming,et al. Experimental study and numerical simulation of gas-solid two phase flow in horizontal elbow pipe [J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology), 2012(3): 230-235.
- [11] 潘忠兴,侯成仁,闫 芳.90°弯管内湍流流动的数值模拟[J].化学工业与工程技术,2011,32(3):4-7.
PAN Zhong-xing,HOU Cheng-ren,YAN Fang. Numerical simulation of turbulent flow field in 90° bend pipe [J]. Journal of Chemical Industry & Engineering, 2011, 32(3): 4-7.
- [12] 毛靖儒,柳成文,相晓伟.弯管内二次流对固粒磨损壁面的影响[J].西安交通大学学报,2004,(7):746-749.
MAO Jing-ru,LIU Cheng-wen,XIANG Xiao-wei. Effect of secondary flow on erosion from solid particles in 90° curved duct of quadrate section [J]. Journal of Xi'an Jiao Tong University, 2004, 7: 746-749.
- [13] 张新育,沈瑛婵.方截面弯管加导流板时湍流二次流数值模拟[J].浙江大学学报:工学版,1996,(4):440-445.
ZHANG Xin-yu,SHEN Luo-chan. Numerical simulations of the turbulent secondary flow in curved ducts of square cross section with a baffle [J]. Journal of Zhejiang University (Natural Science), 1996, 4: 440-445.
- [14] 朱秀苹,李 勇.气力输送中弯管磨损原因分析及预防措施[J].橡胶工业,2008,55(11):680-684.
ZHU Xiu-ping,LI Yong. Causes for wear of siphon in pneumatic conveying system and their countermeasures [J]. China Rubber Industry, 2008, 55(11): 680-684.
- [15] 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,(10):2175-2177.
XING Ting,ZHANG Yan,WANG Xiao-ning. Numerical simulation of gas-solid two-phase flow in horizontal pipe [J]. Contemporary Chemical Engineering, 2014, 10: 2175-2177.

(姜雪梅 编辑)

ses gradually. A smaller transducer radius results in a larger sound field distribution and descaling scope. As transducer radius increases, the effective descaling scope gradually focuses on the area perpendicular to transducer center. When ultrasound transducer radius is 50mm, the descaling efficiency at the area perpendicular to transducer ultrasound center reaches the maximum of 95.56%. **Key words:** ultrasonic, descaling, ultrasound transducer, radius

节能量计算的第二定律方法及其应用 = **An Energy-saving Calculation Method Using the Second Law of Thermodynamics and its Applications** [刊, 汉] ZHOU Shao-xiang, KONG Wei-ying, LIU Hao (School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing, China, Post Code: 102206), LIU Yu-me (Beijing Xing You Engineering Project Management Co., Ltd, Beijing, China, Post Code: 100080) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2016, 31(4). - 12 ~ 16

In view of the problems related to the energy conservation analysis using the first law of thermodynamics, a general method of energy-saving calculation was deduced based on the second law of thermodynamics in this paper. It was demonstrated that the energy-saving is essentially proportional to the reduction of the total entropy production from the improved energy utilization system. Specifically for the thermal power unit, the corresponding calculation model of the total entropy production was given. For an ultra-supercritical unit with constant fuel input, the calculation formula of energy-saving through reusing the exhaust waste heat to heat the condensed water was deduced, and it further showed that the reduction of the total entropy production of the unit is proportional to the reduction of the total heat loss. It implies that the energy-saving calculation based on the second law of thermodynamics can be made through comparing the overall thermal balances of the system before and after the energy-saving improvement is applied. Case analyses have verified the validity and the practicability of the method proposed. **Key words:** energy-saving, entropy production, waste heat utilization, fuel specific consumption analysis

气固两相流中 90° 竖直弯管肋条防磨的数值试验研究 = **Numerical Simulation for Protecting 90° Vertical Elbows from Erosion in Gas-particle Flow by Adding Ribs** [刊, 汉] GUO Ren-ning, ZHAO Li-zhu, MA Ye, DU-AN Le-le (Liaoning Technology University, Mechanical Engineering, Fuxin, Liaoning, China, Post Code: 123000) //

Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(4). -17 ~23

For the erosion wear problem in the elbow caused by gas-solid flow, a wear prevention method was put forward by adding ribs. A corresponding elbow geometry model was constructed by evenly adding 8 ribs of 2 mm height, and numerically simulated by using DPM model to test the wear condition and compare with the common elbow. The CFD simulation results show that the average and the maximum wear rates of the rib elbow are approximately half of those in the common elbow, indicating the anti-wear effectiveness of rib elbow. Numerical simulations of elbow with different rib heights were also conducted under the same condition. The comparison of wear rate under different rib heights shows the best anti-wear rib height is 2 mm. Finally, the experiment models of common elbow and rib elbow with rib height of 2 mm as numerically simulated were manufactured and the wear experiment was carried out. The experimental results confirm that the average wear rates of the two type ribs under study are similar to simulated, implying that the high fidelity and reliability of the numerical simulation for the rib optimization. **Key words:** erosion wear, common elbow, rib elbow, wear rate

气液分离双压有机朗肯循环热力学分析及优化 = **Thermodynamic Analysis and Optimization in Double-pressure Organic Rankine Cycle with a Gas-liquid Separator** [刊, 汉] LIANG Zhi-hui, LUO Xiang-long (School of Material and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong, China, Post Code: 510006), CHEN Ying, MO Song-ping (Soft Matter Center, Guangdong Province Key Laboratory on Functional Soft Matter, Guangzhou, Guangdong, China, Post Code: 510006) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(4). -24 ~30

Double-pressure organic Rankine cycle with a gas-liquid separator (DSORC) is proposed. Parametric optimization of DSORC used binary zeotropic mixtures, basic organic Rankine cycle (BORC) used zeotropic mixtures and DSORC used pure fluids is conducted. The second law efficiency maximization is used as objective function. The optimization variables are mixing ratios of zeotropic mixtures, evaporating temperature and vapor quality in separator. And the optimization model is solved using genetic algorithm. The working fluids under study are: R245fa, isopen-