

引用格式:许涛,丁甲博,司晓东. 90°弯管内颗粒沉积数值模拟研究[J]. 有色设备,2025,39(1):35-40.

XU Tao, DING Jiabo, SI Xiaodong. Numerical simulation study on particle deposition in 90° elbows[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment,2025,39(1):35-40.

90°弯管内颗粒沉积数值模拟研究

许涛,丁甲博,司晓东*

(江苏科技大学 能源与动力学院,江苏 镇江 212100)

[摘要] 船舶管道中固体颗粒的沉积严重影响管道的寿命及船舶的正常运行。本文运用 Ansys-Fluent 流体动力学软件,模拟分析了 90°弯管内部固体颗粒的沉积规律,研究了不同弯曲比下流速、温度以及不同颗粒直径对固体颗粒沉积率的影响。结果表明:随着弯曲比、温度和颗粒直径的增加,固体颗粒的沉积率逐渐上升;而随着入口流速的增加,固体颗粒沉积率则逐渐降低,同时加剧了弯曲比对沉积率的影响。此外,固体颗粒沉积率受流速的影响最大,其次是颗粒直径,而温度的影响相对较小。该研究可用于减少管道堵塞事故的发生率,为油流弯管设计提供理论依据。

[关键词] 弯管; 沉积率; 数值模拟; 颗粒物; 浓度

[中图分类号] TE863 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2025)01-0035-06

DOI:10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.01.004

0 引言

船舶管道作为船舶的重要连接构件,在长时间作业过程中,其油流管道内表面可能会产生杂质沉积。这些杂质不仅会进入船舶内部,导致机件受损,还会造成管道堵塞,增加能耗。因此,研究船舶管道内部的固体颗粒沉积及其迁移行为尤为重要,对于保障其运行安全、提升能效水平具有重要意义。

传统的船舶管系清洗方法主要利用高压水射流技术进行清洗^[1],可以有效去除管道内壁上的沉积物,但可能会损伤管道,从而影响其使用寿命。随着公众对环保的重视日益加深,部分学者^[2-4]提出了超声空化技术,该技术能够有效清除管道内壁的污垢和沉积物,并且清洗过程节能环保。王满等^[5]的研究表明,超声波可增强空化泡的膨胀和收缩过程,从而进一步提升管道清洗效果。Growcott 等^[6]报道了一种水下管道清洗系统,其清洗效率高,能够彻底去除管道内壁的生物污染,具有良好的环保性且操

作灵活,适用于不同尺寸和形状的管道。然而,该系统的设备投资成本较高,清洗过程中对管道的磨损程度大。因此,研究管道内部颗粒沉积规律至关重要。早期,Pui 等^[7]在小直径管道中进行了湍流气流中颗粒沉积的试验,并提出了一个经验模型以预测沉积率。Zhang 等^[8]采用不同湍流模型,研究了不同雷诺数、弯曲角度及弯曲比对管道内部固体颗粒沉积率的影响。Guo 等^[9]验证了在不同边界条件下的沉积模型。Abhijit 等^[10]阐明了颗粒在湍流和层流条件下的运输及沉积机制。Zhong 等^[11]提到,重力和湍流扩散是沉积物的主要分散效应,而流动惯性、粒子间相互作用及其他力(如升力)在沉积物的悬浮中也起到重要作用。吴晓南等^[12]分析了不同管型内萘颗粒的运移规律。陈磊等^[13]研究了硫颗粒在弯管中的沉积率随流速、颗粒直径和弯曲比变化的情况。然而,关于船舶油流管道内固体颗粒运移和沉积的研究仍然较少。

本文采用 Fluent 流体动力学软件对船舶滑油运

[收稿日期] 2024-11-12

[第一作者] 许涛(2002—),男,四川泸州人,本科生,研究方向为管道安全防护技术。

[通信作者] 司晓东(1990—),男,河南驻马店人,讲师,博士,研究方向为管道安全防护技术。

[基金项目] 江苏省双创博士项目(JSSCBS20210994);江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究面上项目(23KJB430015);中国博士后科学基金(2023M732564)。

输管系中 90°弯管内部固体颗粒的迁移与沉积过程进行了数值模拟,研究了入口速度、温度和弯曲比等因素对固体颗粒沉积的影响。

1 数值模拟

1.1 几何模型

几何模型如图 1 所示,水平放置的 90°弯管,进

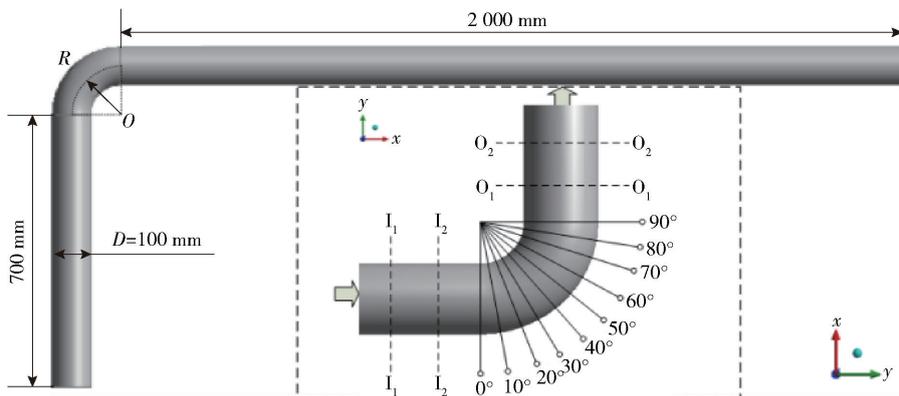


图 1 弯管几何模型

Fig.1 Geometric model of the bent pipe

壁面设置为无滑移壁面。壁面颗粒边界条件采用 trap,即颗粒碰到壁面就被捕集,不再计算其运动轨迹。入口边界条件采用速度入口,流体的初始速度范围为 1 ~ 6 m/s。利用经验公式(1)计算初始湍流强度^[12]。

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

式中: Re 为流体介质雷诺数。

2 结果与分析

2.1 弯曲比对流场特性的影响分析

图 2 为弯管不同弯曲比 R/D (1.5 ~ 3.5) 中心截面速度分布。弯管段内弯侧的流速呈现先增大后降低的趋势,弯管段外弯侧流速呈现先降低后增大的趋势。在流体刚进入弯管段时,内弯侧流速逐渐增大,导致内弯侧流速大于外弯侧,产生由外弯侧指向内弯侧压力梯度差,由于离心力相对较小,无法平衡这种压力梯度,因此出现了驱动向内流动的现象。随着流体的进一步流动,离心力逐渐增大,并开始抑制压力梯度的影响,导致中心流场不再向内流动而向外流动。在此过程中,外壁的流速增大,而内壁流场也因此向外流动,从而降低了中心流场的速度,这一现象与 Dean 涡流的形成有关^[14]。并且,随着弯

口直管段长 700 mm,出口直管段长 2 000 mm,管道直径 D 为 100 mm,重力方向沿 z 轴。

1.2 边界条件

固体颗粒的追踪采用 Fluent 的 DPM 离散相模块,其中滑油为连续相,密度为 846 kg/m^3 ,固体颗粒为离散相,密度为 $8 030 \text{ kg/m}^3$,颗粒直径为 0.002 mm 。出口边界条件设置为 outflow,颗粒出口设置为 escape。

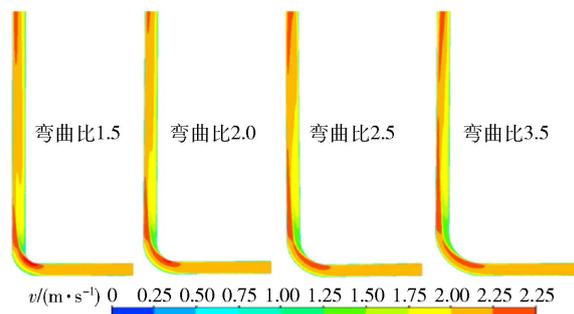


图 2 不同弯曲比管道内速度分布

Fig.2 Velocity distribution inside pipes with different bending ratios

曲比的增大,流体由内弯朝外弯流动的现象会提前出现。

固体颗粒运动轨迹分布如图 3 所示。由图 3 可知,随着弯曲比的增加,外侧壁面的颗粒速度增大,增加了颗粒与壁面接触的概率。在较大弯曲比的弯管中,弯曲段前段,外壁面附近颗粒流速更低,随着偏转角度的增加,内壁面附近颗粒朝着外壁面迁移,弯曲段后段,弯管内侧颗粒朝着外弯迁移,与上述二次流现象相似,且出口直管段外弯颗粒速度明显更高,充分发展阶段增长。这是由于在本文条件中 0.002 mm 颗粒属于较小颗粒,受流体动力学效应影响较

明显^[15]。

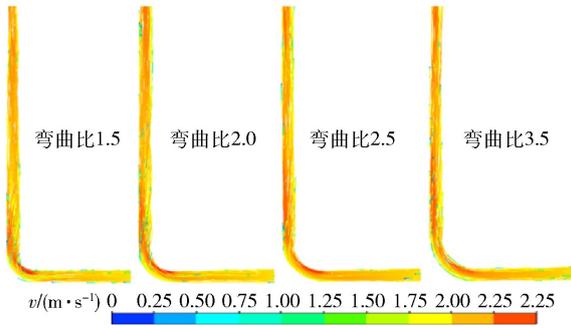


图3 固体颗粒运动轨迹分布

Fig.3 Trajectory distribution of solid particles

剪切应力分布云图如图4所示。图4显示,当流速为2 m/s,弯曲比为1.5时,弯管的剪切应力分布图表明,弯管内侧壁面的剪切应力先减小后增大,在 $\theta = 30^\circ$ 左右达到最大值,这与Xu等^[16]的仿真结果一致。由Xu等对流体在90°弯管中的湍流动能分布研究结果显示,沿流动方向,弯管外侧的湍流动能先增加后减少,而内侧弯头侧的湍流动能沿轴心逐渐增加,这主要是由于下游二次流的发展对湍流动能分布的影响导致的。但其在进行仿真计算时并未加入颗粒,仅对流体在90°弯管中的流场进行了分析,故可结合本文分析,湍流动能分布是影响较小颗粒沉积的重要指示参数。

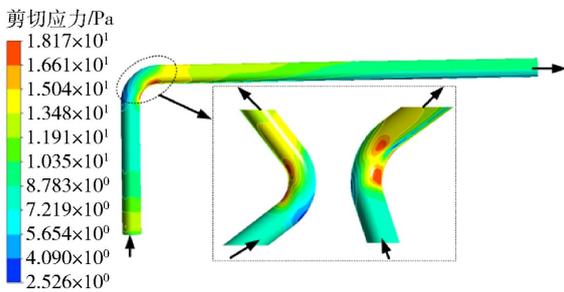


图4 剪切应力分布云图

Fig.4 Contour map of shear stress distribution

固体颗粒在不同截面浓度分布如图5所示。沿流动方向,弯管内侧的颗粒物浓度逐渐降低,并且随着弯曲比的增大,这一现象出现得更早。此现象与二次流现象随弯曲比变化的特性非常相似。这可能是因为弯曲比的增大减弱了二次流的强度,使得弯管段内的内弯侧流速降低,从而导致流体提前从内弯侧流向外弯侧。较小颗粒因受流体影响较大,更容易随流体由内弯向外弯移动;而较大颗粒由于受

惯性力影响较大,流体对其的作用减弱^[9]。对于小颗粒而言,随着弯曲比的增大,弯管段内弯侧附近的颗粒更容易朝着弯管段外弯侧迁移,且颗粒速度增大,从而导致弯管段外弯侧壁面的沉积率升高。对于大颗粒而言,由于惯性力的影响,流体对其作用较小,因此,弯曲比的增大使得二次流减弱,内部流场更加平稳,使得颗粒更易悬浮,降低了颗粒的沉积率。根据图3中对0.002 mm固体颗粒在弯管中的运动轨迹的分析,可以看出0.002 mm的固体颗粒受滑油运动影响较大,并且随着弯曲比的增大,弯曲段后段的固体颗粒随流体由内壁面迁移至外壁面的速度增加,这将导致内壁面颗粒沉积率降低,而外壁面颗粒沉积率上升。结合Xu等^[16]对湍流动能的分析,可以得知,湍流动能是影响小颗粒沉积的重要指示参数。

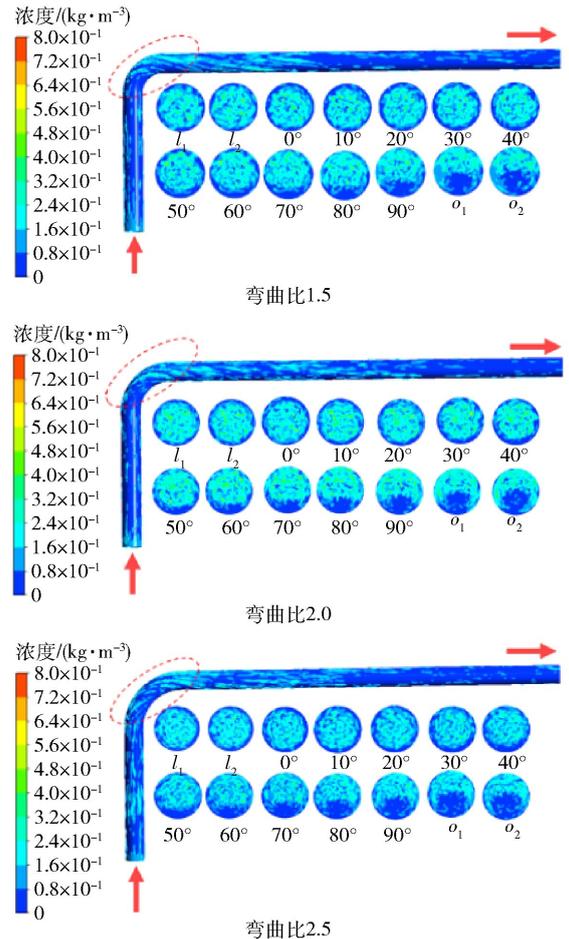


图5 固体颗粒在不同截面浓度分布

Fig.5 Concentration distribution of solid particles at different cross-sections

2.2 弯曲比对固体颗粒沉积的影响

图 6 和图 7 表明了弯曲比对于沉积率的影响。由图 6 分析可知,随着弯曲比的增加,固体颗粒的沉积率逐渐上升,最大变化率约为 1.5%。这是因为弯管弯曲比的增大导致流体在弯管内的流速分布不均匀。从上述弯曲比对颗粒沉积影响的分析可知,弯曲比的增加使得二次流现象提前出现,内侧流速降低,外侧流速增大,导致靠近弯管外壁面的颗粒速度增大,使颗粒与外壁面的接触概率增加,进而导致固体颗粒在弯管内的沉积率提升。由图 7 分析可知,在流速为 1 m/s 时,弯曲比对应的沉积率变化范围约为 1.5%,而在流速为 6 m/s 时,弯曲比沉积率的变化约为 2.5%,这表明随着流速的增加会放大弯曲比对于沉积率的影响。由图 6 可知,对于温度来说,温度的改变对于弯曲比对沉积率的影响微乎其微。

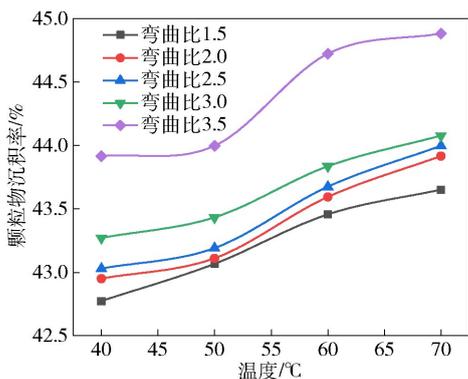


图 6 颗粒物沉积率与弯管弯曲比及温度的关系

Fig. 6 Relationship between particle deposition rate and bend ratio of pipe bend as well as temperature

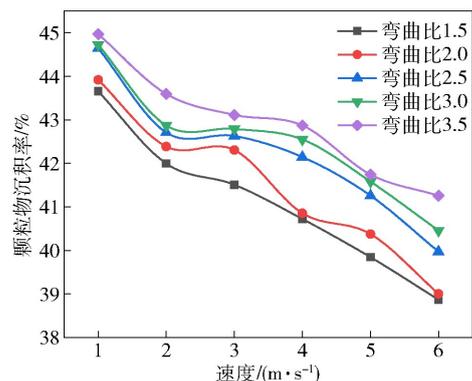


图 7 颗粒物沉积率与速度及弯曲比的关系

Fig. 7 Relationship between particle deposition rate, velocity, and bend ratio

2.3 温度对固体颗粒沉积的影响

图 6 显示了流速为 2 m/s、颗粒直径为 0.002 mm 时,不同温度对固体颗粒沉积率的影响。由图可知,随着温度从 40 °C 增至 70 °C,固体颗粒沉积率亦随之升高,但变化范围小于 1%。Wikström 等^[17]提出了最大接触压力和油温对剪应力-压力系数 γ 的影响。研究表明,温度升高会导致壁面的剪切应力增加,从而使湍动能上升,导致二次流提前出现,从而增加颗粒沉积率;同时,温度升高还会降低流体黏度、增大雷诺数以及增强湍流强度,从而加大了离心力和湍流扩散^[18],促进了颗粒在弯头处的沉积,提高了颗粒在弯曲段的沉积率。

2.4 流速对固体颗粒沉积的影响

图 7 显示了在温度为 300 K、颗粒直径为 0.002 mm 时,不同弯曲比及流速对固体颗粒沉积率的影响。随着流速的增加,固体颗粒的沉积率逐渐降低,流速从 1 m/s 增至 6 m/s,固体颗粒沉积率的变化范围约为 3.707% 至 4.785%。此外,流速的提升使弯曲比对颗粒沉积的影响更加明显,在流速为 1 m/s 时,弯曲比对应的沉积率变化范围约为 1.5%,而在流速为 6 m/s 时,弯曲比沉积率的变化约为 2.5%。这是由于惯性沉积机制在此过程中起着主导作用^[19]。随着流速的增加,颗粒的惯性力增大,颗粒的惯性力相对于压力梯度力的比例增加,降低了压力梯度对颗粒运动的影响,使得颗粒更容易被携带远离壁面,减少了颗粒沉积的可能性,使颗粒更容易随流体运动^[20],导致颗粒在弯管中的沉积量减少,因此,固体颗粒沉积率降低。

2.5 颗粒直径对于颗粒运移沉积的影响

图 8 显示,当弯曲比为 1.5、流速为 2 m/s、温度

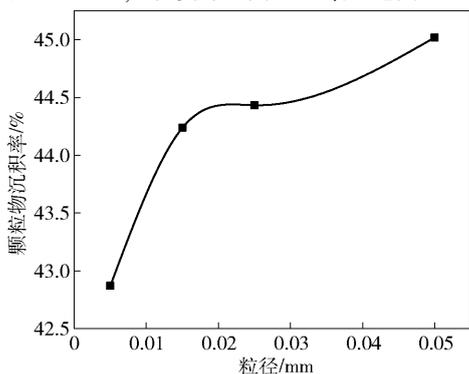


图 8 颗粒物沉积率与颗粒直径的关系

Fig. 8 Relationship between particle deposition rate and particle diameter

为 300 K 时,不同颗粒直径对固体颗粒在 90°弯管内沉积的影响。可以看出,颗粒沉积率随着颗粒直径的增大而增加,颗粒直径从 0.005 mm 增至 0.05 mm,颗粒物沉积率变化范围约为 2.148%。这是因为较大的固体颗粒受重力影响更显著,导致更高的动量交换,增强了摩擦力,使该区域的固体颗粒的压力、温度和剪切应力增加。诱导的升力促使固体颗粒在湍流边界层内上升^[21-22],从而增加了固体颗粒与壁面的接触概率,提高了沉积率。同时,随着颗粒直径的增大,颗粒的轨迹主要受惯性力控制,惯性力驱动颗粒沿轴向流动并撞击外壁面^[23],最终被壁面捕获,进一步增加了颗粒的沉积率。

3 结论

本文分析了 90°弯管中弯曲比、流速和温度以及颗粒直径对固体颗粒沉积率的影响,结论如下。

1) 固体颗粒沉积率受流速的影响最大,其次是颗粒直径,而温度的影响相对较小。

2) 随着弯曲比的增大,固体颗粒沉积率升高,变化范围约为 1.375%。

3) 随着温度的升高,固体颗粒沉积率亦随之升高,但变化范围小于 1%。

4) 随着流速的增大,固体颗粒沉积率降低,并且流速的增加加剧了弯曲比对固体颗粒沉积的影响。不同流速下,固体颗粒沉积率的变化范围为 3.707%~4.785%;在流速为 1 m/s 时,弯曲比对应的沉积率变化范围约为 1.5%,而在流速为 6 m/s 时,弯曲比沉积率的变化约为 2.5%。

5) 颗粒直径增大时,固体颗粒沉积率也相应升高,变化范围约为 2.148%。

[参考文献]

[1] 李根生,沈忠厚. 高压水射流理论及其在石油工程中应用研究进展[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(1): 96-99.

[2] Huang X, Niu G, Xie Y, et al. Application of Ultrasonic Cavitation in Ship and Marine Engineering [J]. Journal of Marine Science and Application, 2024, 23: 23-38.

[3] Chen C, Liu Y, Wang C H, et al. Acoustic black hole immersed sonoreactor for high-efficiency cavitation treatment [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2024, 111: 107106.

[4] Lais H, Lowe P S, Gan T H, et al. Numerical modelling of acoustic pressure fields to optimize the ultrasonic cleaning technique for cylinders [J]. Ultrasonics Sonochemistry,

2018, 45: 7-16.

[5] 王满,袁淼,闵瑞,等. 自激振荡射流空化泡动力学特征及超声强化数值研究[J]. 石油钻探技术, 2023, 51(6): 43-49.

[6] Growcott A, Kluza D, Georgiades E. Review: In-Water Systems to Reactively Manage Biofouling in Sea Chests and Internal Pipework [J]. Marine Technology Society Journal, 2017, 51(2): 89-104.

[7] Pui D H, Romay-Novas F, Liu B Y H. Experimental study of particle deposition in bends of circular cross section [J]. Aerosol Science and Technology, 1987, 7(3): 301-315.

[8] Zhang P, Roberts R M, Bénard A. Computational guidelines and an empirical model for particle deposition in curved pipes using an Eulerian-Lagrangian approach [J]. Journal of Aerosol Science, 2012, 53: 1-20.

[9] Guo J, Chen Z, Shen B, et al. Numerical study on characteristics of particle deposition efficiency on different walls of 90° square bend [J]. Powder Technology, 2020, 364: 572-583.

[10] Guha A. Transport and Deposition of Particles in Turbulent and Laminar Flow [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2008, 40(1): 311-341.

[11] Zhong D Y, Wang G Q, Wu B S. Drift Velocity of Suspended Sediment in Turbulent Open Channel Flows [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 140(1): 35-47.

[12] 吴晓南,李倩,苟珈源,等. 城市燃气管道内已沉积颗粒的运移规律[J]. 天然气工业, 2019, 39(8): 104-112.

[13] 陈磊,李长俊,季楚凌. 水平弯管内疏沉积数值模拟研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(2): 28-35.

[14] Dean W R, Hurst J M. Note on the motion of fluid in a curved pipe [J]. Mathematika, 1959, 6(1): 77-85.

[15] Guo Y, Huang J, Xia G, et al. Experiment investigation on two-phase flow instability in a parallel twin-channel system [J]. Annals of Nuclear Energy, 2010, 37(10): 1281.

[16] Xu T, Wang J, Li X, et al. Effects of fluid dynamics parameters on flow-accelerated corrosion at elbow of carbon steel pipeline [J]. Materials Research Express, 2024, 11: 056520.

[17] Wikstroöm V, Hoöglund E. Investigation of Parameters Affecting the Limiting Shear Stress-Pressure Coefficient: A New Model Incorporating Temperature [J]. Journal of

- Tribology, 1994, 116(3): 612.
- [18] Wilson S R, Liu Y, Matida E A, et al. Aerosol Deposition Measurements as a Function of Reynolds Number for Turbulent Flow in a Ninety-Degree Pipe Bend [J]. Aerosol Science and Technology, 2011, 45(3): 364 - 375.
- [19] Crane R I, Evans R L. Inertial deposition of particles in a bent pipe [J]. Journal of Aerosol Science, 1977, 8(3): 161 - 170.
- [20] Liu Y Q, Gong J K, Fu J, et al. Nanoparticle motion trajectories and deposition in an inlet channel of wall-flow diesel particulate filter [J]. Journal of Aerosol Science, 2009, 40: 307 - 323.
- [21] Joshi T, Parkash O, Krishan G. CFD modeling for slurry flow through a horizontal pipe bend at different Prandtl number [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47 (56): 23731 - 23750.
- [22] Kallio G A, Reeks M W. A numerical simulation of particle deposition in turbulent boundary layers [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1989, 15(3): 433 - 446.
- [23] Cong X C, Yang G S, Qu J H, et al. A model for evaluating the particle penetration efficiency in a ninety-degree bend with a circular-cross section in laminar and turbulent flow regions [J]. Powder Technology, 2017, 305: 771 - 781.

Numerical simulation study on particle deposition in 90° elbows

XU Tao, DING Jiabo, SI Xiaodong*

(School of Energy and Power, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China)

Abstract: Solid particle deposition in ship piping significantly affects the lifespan of the pipes and the normal operation of the vessel. This paper utilizes Ansys-Fluent fluid dynamics software to simulate and analyze the deposition patterns of solid particles inside a 90° elbow, investigating the effects of different bending ratios, flow velocities, temperatures, and various particle diameters on the deposition rate of solid particles. The results indicate that with the increase of elbow ratio, temperature, and particle diameter, the deposition rate of solid particles gradually increases; conversely, with the rise in inlet flow velocity, the deposition rate of solid particles gradually decreases, which exacerbates the impact of elbow ratio on the deposition rate. The deposition rate is most significantly influenced by flow velocity, followed by particle diameter, while temperature has a relatively minor effect. This study can be applied to reduce the incidence of pipeline blockage and provide a theoretical basis for the design of oil flow elbows.

Keywords: elbow; sedimentation rate; numerical simulation; particulate matter; concentration ▲