

# 颗粒质量流速对 90° 弯管流场及冲蚀的影响分析

周昱焱<sup>1</sup> 刘子煜<sup>1</sup> 李瑞朝<sup>2</sup> 刘文敏<sup>2</sup>

1. 重庆交通大学 航运与船舶工程学院 重庆 400041; 2. 重庆交通大学 河海学院 重庆 400041

**摘要:** 管道具有运输、冷却和物质交换等作用, 被广泛用于各大工业设备当中, 但是在使用过程中经常会由于液体中颗粒的碰撞而导致其寿命减少, 基于上述问题, 文本使用流体仿真软件 Fluent 针对不同颗粒质量流速对 90° 弯管在使用过程中, 由于颗粒冲蚀而导致的磨损影响情况进行仿真。结论指出, 在弯管位于 45° 至 90° 区间的磨损较为严重, 并且冲蚀程度会随着颗粒质量流速而增大, 但在颗粒流速到达 0.25kg/s 时冲蚀程度会趋于稳定。

**关键词:** 数值模拟; 颗粒冲蚀; 直角弯管; 固液两相流

## Analysis of the Influence of Particle Mass Flow Rate on the Flow Field and Erosion of a 90° Bend

Zhou Yutao 1, Liu Ziyu, Li Ruizhao 2, Liu Wenmin 2

1. The College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China; 2. College of Shipping and Marine Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China

**Abstract:** Pipelines have functions such as transportation, cooling, and material exchange, and are widely used in various industrial equipment. However, during use, their lifespan is often reduced due to the collision of particles in the liquid. Based on the above issues, the text uses fluid simulation software Fluent to simulate the wear impact of particle erosion on 90° bend pipes under different particle mass flow rates during use. The conclusion points out that the abrasion of the elbow is more serious in the range of 45° to 90°, and the erosion degree will increase with the particle mass flow rate, but the erosion degree will tend to be stable when the particle mass flow rate reaches 0.25 kg/s.

**Key words:** Numerical simulation; Particle erosion; Right angle elbow; Solid-liquid two-phase flow

### 引言

90° 弯管作为工程作业中常见的弯管布置形式, 在输送液体物质的同时也容易受到液体中掺杂的微小固体颗粒的冲蚀, 这种作用于弯管的冲蚀是一种常见的腐蚀形式, 而发生在弯管处的冲蚀速率通常要比其他部位高出 40~60 倍, 一旦弯管处被细微颗粒冲蚀损坏甚至破裂, 造成的经济、人力损失难以估量<sup>[1-4]</sup>。

针对该问题, 国内外许多的学者对弯管中的固液两相流冲蚀情况进行了数值模拟。Farokhipour 等人<sup>[5]</sup>使用拉格朗日-欧拉法对常见的三种弯管: 尖角弯管、90° 弯管、180° 弯管的冲蚀进行了模拟, 结果显示尖角弯管冲蚀程度最为严重; Yam Ke San 等人<sup>[6]</sup>尝试在弯管中加入涡流室, 结果表明涡流室的加入会大大减少弯管的冲蚀; Edwards 等人<sup>[7]</sup>使用 CFD 法模拟了弯头和三通管在工作中的冲蚀情况, 结果表明增加弯管处的直径可以有效防止冲蚀; 郭资含等人<sup>[8]</sup>试图从弯管的弯头入手, 提出了一种 3 点放样弯管结构, 使用 CFD 法对该结果进行数值仿真模拟, 结果表明 3 点放样弯管结构虽然拥有良好的抗冲蚀效果, 但是耗能却随着弯管处最大直径的增加而增

加; 曹学文等人<sup>[9]</sup>使用拉格朗日-欧拉法对 T 型管的颗粒冲蚀情况进行了数值仿真, 结果显示管道的最大冲蚀面会随着直管的拉长而向下偏移; 刘琦等人<sup>[10]</sup>使用拉格朗日-欧拉法对 7 种模型进行了冲蚀评估, 结果表明颗粒形状会对弯管冲蚀产生巨大的影响。金浩哲等人<sup>[11]</sup>以油管为对象, 预测典型工况下固液两相流冲蚀油管时的各项参数, 结果表明弯头中部外壁及出口内壁磨损最为严重。

目前, 许多工作都是针对弯管本身属性的研究, 而针对颗粒的研究相对较少。针对这一现象, 本文对 90° 弯管中颗粒质量流速对弯管冲蚀的影响进行了数值仿真, 通过对比内流场中液体流速、管壁压力、剪切力, 以及管道中颗粒运动轨迹和管道冲蚀率, 归纳总结颗粒质量流速对 90° 弯管冲蚀的影响, 为设计防冲蚀弯管提供了理论依据。

### 1 模型建立

#### 1.1 几何模型

此次研究对象为 90° 弯管, 因此对 90° 弯管使用 SolidWorks 模型软件构建几何模型, 如图 (1) 所示。

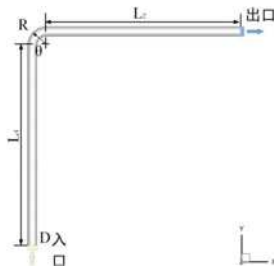


图 1 90° 弯管

90° 弯管由出口处的水平直管端、90° 弯管端和入口处的垂直直管端三个部分组成，为保证弯管在工作时流体可以在管中发展充分，出口与入口直径均为  $D=30\text{mm}$ ，而水平直管长  $L_2$  和垂直直管长  $L_1$  相同，即  $L_1=L_2=15D=450\text{mm}$ ，弯管曲率半径  $R$  为  $2D$ ，即  $R=2D=60\text{mm}$ 。

### 1.2 网格独立性验证

使用 ICEM CFD 对 90° 弯管进行六面体网格 O 型划分。管道液体模拟中，边界处和拐角处容易出现应力集中的现象，因此在靠近管壁部分和 90° 弯管处的网格需要进行加密处理。为保证在不减少计算准确度的同时可以最大程度的减少计算时间，本文分别划分了 6 种网格数不同的有限元网格模型，具体参数如下表 (1) 所示：

表 1 网格数目

序号	网格数
1	54364
2	125323
3	217987
4	425612
5	1044328
6	2013875

不同网格数计算出的对应的最大冲蚀速率如图 (2) 所示：

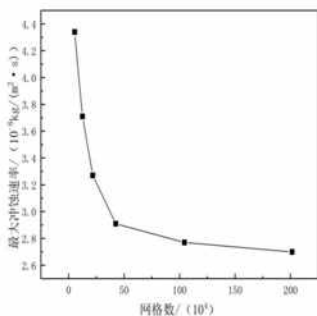
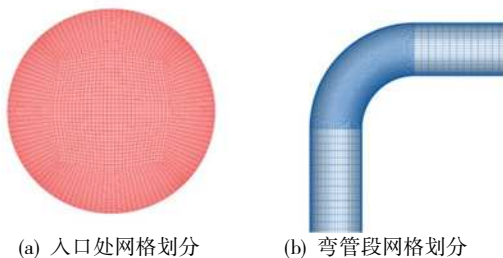


图 2 不同网格数对应的最大冲蚀速率

可见当网格数达到序号 5 以后，最大冲蚀速率变化十分微小，因此选用的网格数目为 1044328，划分网格后的模型如图 (3) 所示：



(a) 入口处网格划分

(b) 弯管段网格划分

图 3 模型网格

### 1.3 仿真参数

在两相流控制中，选择固相为砂砾，液相为纯净水，流强度设置为 5%，并设置竖直向下的重力加速度  $g=9.81\text{m/s}^2$ ，

为控制颗粒在给定时间内允许流入弯管的颗粒质量，本文设定的数值模拟参数如下表 (2) 所示：

表 2 数值模拟参数

序号	颗粒质量流速
1	0.2kg/s
2	0.25kg/s
3	0.3kg/s
4	0.35kg/s
5	0.4kg/s

### 1.4 基本控制方程

#### (1) 连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (2-1)$$

式中： $\rho$  表示物体密度， $t$  表示时间， $\vec{u}$  表示速度。

#### (2) 动量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla(\rho u \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x \quad (2-2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla(\rho v \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y \quad (2-3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla(\rho w \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z \quad (2-4)$$

式中： $\tau$  表示分子粘性产生的粘性力， $\tau_{xx}$ 、 $\tau_{yx}$ 、 $\tau_{zx}$  表示  $\tau$  的分量， $p$  表示压力， $u$ 、 $v$ 、 $w$  表示  $\vec{u}$  在三个方向上的速度分量， $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$  表示流体在三个方向上的力的分量，其他同上。

#### 1.4 湍流方程

由于在运算过程中需要考虑到二次流带来的影响，因此本次计算采用的湍流模型方程为 RNG k- $\epsilon$  模型[12]，其方程如下所示：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad (2-5)$$

$$+ G_k - \rho \epsilon + S_k$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] \quad (2-6)$$

$$+ C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon$$

$$(2-7)$$

$$u_t = \rho C_u \frac{k^2}{\epsilon}$$

式中： $\mu$  表示流体的粘度， $k$  表示液体的动能， $G_k$  表示动能的产生项， $\epsilon$  表示耗散的能量， $\sigma_\epsilon$  表示动能消耗功率对应的 Prandtl 系数， $\sigma_k$  表示方程湍流的 Prandtl 系数， $S_k$  和  $S_\epsilon$  是源项。

## 2 运算结果

### 2.1 颗粒质量流速对流场的影响

如图(4)所示为不同颗粒质量流速下的弯管中心轴对称面的流速图。由图可知由于弯管本身口径偏大,即使将颗粒质量流速由0.2 kg/s 增加至 0.4kg/s,颗粒在液体中的体积分数依旧很小,因此在5种颗粒流速下,对其内流场流速的影响有限。

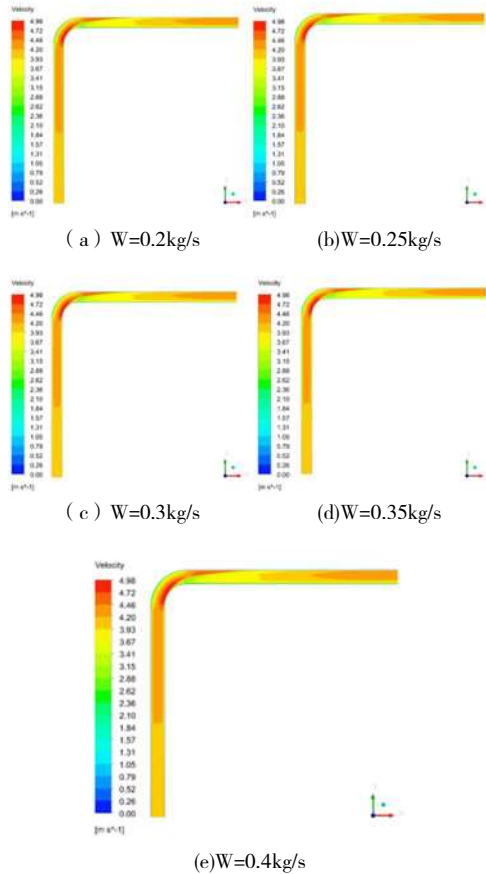


图 4 不同颗粒质量流速下的弯管中心轴对称面的流速图

下图(5)为不同颗粒质量流速下的弯管中心轴对称面的压力分布图。由图可见,颗粒质量流速的变化对弯管内的压力来说并不能起到大的作用,5种速度的管内压力基本不变,压力最大处主要集中于弯管拐角上部。

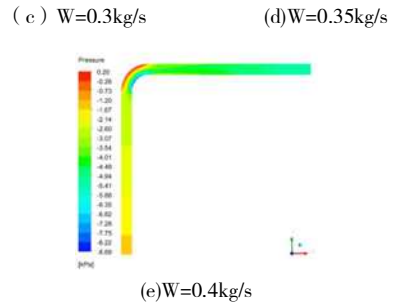
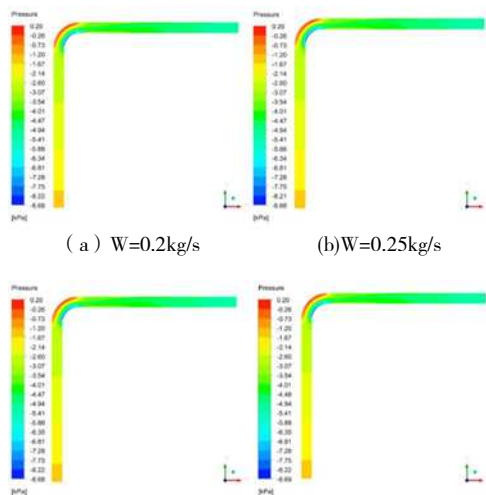


图 5 不同颗粒质量流速下的弯管中心轴对称面的压力分布图

如图(6)所示为不同颗粒质量流速下弯管的边界剪切应力分布图。由图可知,最大前切应力主要集中于弯管下壁拐弯区域,呈现出先变小,再变大,最后变再小的趋势,但是随着颗粒质量流速的变大,弯管的最大建切力并没有出现明显的变化。

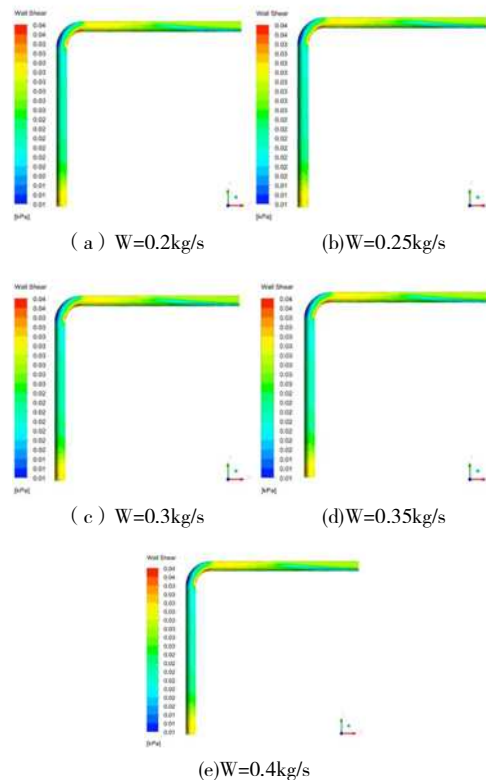
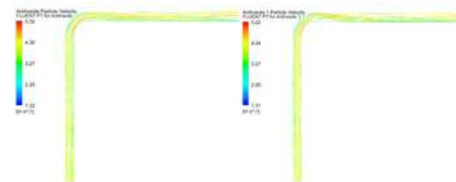


图 6 不同颗粒质量流速下弯管的边界剪切应力分布图

## 2.2 颗粒质量流速对冲蚀的影响

如图(7)所示为不同颗粒质量流速下弯管的颗粒轨迹及速度分布图。由图可知,在颗粒质量流速增加的同时,颗粒的引动轨迹仅仅只会产生些许的变化,在直管处颗粒的运动轨迹普遍沿直线运动,基本没有变化,而在拐角处则会产生很大的变化,主要表现为颗粒位置在上下壁之间调换了位置。



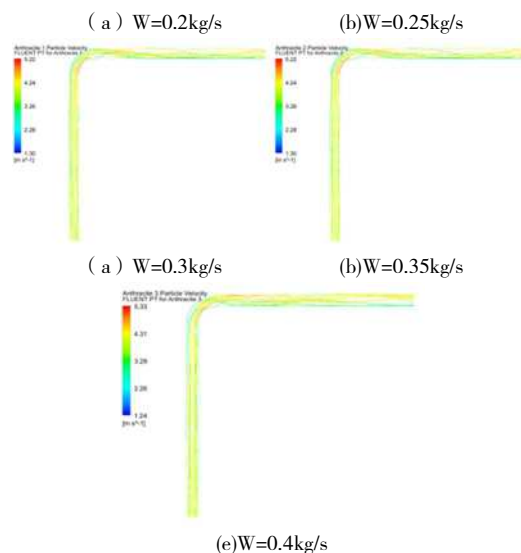


图 7 不同颗粒质量流速下弯管的颗粒轨迹及速度分布图

如图(8)所示为不同颗粒质量流速时弯管的冲蚀云图。由图可见,弯管冲蚀率最大处集中于弯管 $45^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 处,由图(7)可知,这是因为在这个部位颗粒会由于碰撞发生明显的位移,位移又会产生二次碰撞,由此会加剧弯管的冲蚀速度。随着颗粒质量流速的增加,弯管拐角处的冲蚀也会变得更加严重,尤其是由 $W=0.2\text{kg/s}$ 加速到 $W=0.25\text{kg/s}$ 时变化最大,由此可见,尽管冲蚀面积虽然会随着颗粒质量流速的增大而增大,但是这种增大并不是线性的,它在到达一定值后会保持一个稳定的值。

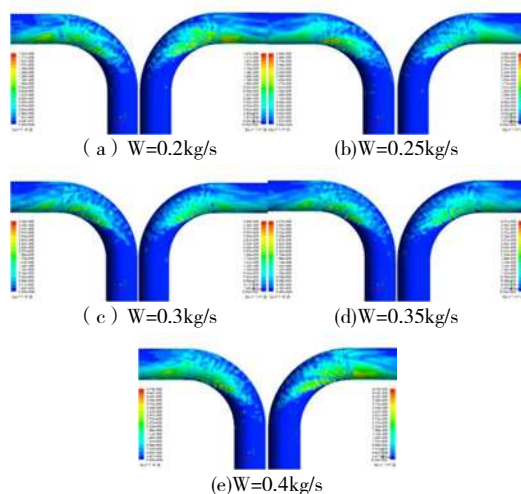


图 8 不同颗粒质量流速时弯管的冲蚀云图

### 3 结论

综上所述,管道内颗粒质量流速对管道的冲蚀影响情况结论如下:

(1) 颗粒质量流速对内流场流速、压力、剪切力的影响不大,这是因为颗粒的体积分数相对弯管来说过小。

(2) 弯管的最大冲蚀区域主要位于弯管 $45^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 之间,而且大多分布于弯管下部。

(3) 最大冲蚀增长率会随着颗粒质流速的增加而增加,其中在由 $W=0.2\text{kg/s}$ 增加到 $W=0.25\text{kg/s}$ 时增加的最快,之后增加速度会减少,最后趋于稳定。

### 参考文献

[1] Fan J, Yao J, Zhang X, et al. Experimental and numerical investigation of a new method for protecting bends from erosion in gas-particle flows[J]. *Wear*, 2001, 251(1-12): 853-860.[J].

[2] Pouraria H, Seo J K, Paik J K. Numerical study of erosion in critical components of subsea pipeline: tees vs bends[J]. *Ships and Offshore Structures*, 2017, 12(2): 233-243.[J].

[3] 白晓宁,胡寿根. 浆体管道的阻力特性及其影响因素分析[J]. *流体机械*, 2000, (11): 26-29, 11-3.

[4] 陈冠国,褚秀萍,张宏亮,等. 关于冲蚀磨损问题[J]. *河北理工学院学报*, 1997, (4): 30-35.

[5] Farokhipour A, Mansoori Z, Saffar-Avval M, et al. Numerical modeling of sand particle erosion at return bends in gas-particle two-phase flow[J]. *Scientia Iranica*, 2018, 25(6: Special Issue Dedicated to Professor Goodarz Ahmadi): 3231-3242.[J].

[6] San YK, Thien R, Chen VLC. Numerical Study on Erosion of a Pipe Bend with a Vortex Chamber[J]. *Particulate Science and Technology*, 2018, 37(2): 200-206.

[7] Edwards J K, McLaury B S, Shirazi S A. Modeling solid particle erosion in elbows and plugged tees[J]. *J. Energy Resour. Technol.*, 2001, 123(4): 277-284.[J].

[8] 郭姿含,张军,陈沪,等. 基于 CFD 的 3 点放样弯管冲蚀模拟研究\_郭姿含[J]. *化学工程*, 2023, 51(6): 73-78.

[9] 曹学文,胥赜,彭文山. 弯管液固两相流冲蚀失效模拟分析[J]. *表面技术*, 2016, 45(8): 124-131.

[10] 刘琦,龙新平,陈正文,等.  $90^{\circ}$  弯管液固两相流动冲蚀磨损的数值模拟[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2018, 51(5): 443-450.

[11] 金浩哲,易玉微,刘旭,等. 液固两相流冲洗管道的冲蚀磨损特性数值模拟及分析[J]. *摩擦学学报*, 2016, 36(6): 695-702.

[12] 安福宝. 高压管汇冲蚀磨损规律分析[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2019, 39(3): 191-192.

作者简介: 第一作者: 周显焘(1998-), 男, 湖南邵阳人, 重庆交通大学在读硕士研究生, 从事射流方面的研究。