

# 基于 DSMC-CFD 方法的气固两相流冲蚀预测研究

孙晓阳, 曹学文, 谢振强, 付晨阳

(中国石油大学(华东) 储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266580)

**摘要:** **目的** 研究气固两相流中固体颗粒间碰撞对冲蚀的影响。**方法** 使用 Eulerian-Lagrangian 方法, 将气相作为连续相, 通过 Navier-Stokes 方程求解, 颗粒平移运动由离散相模型 (DPM) 求解。颗粒间碰撞运动采用直接模拟蒙特卡罗 (DSMC) 方法进行模拟, 用少量采样颗粒代替真实颗粒计算颗粒间碰撞, 碰撞的发生条件通过修正的 Nanbu 方法判定, 碰撞过程遵循颗粒间碰撞动力学模型, 采用 Grant-Tabakoff 随机颗粒-壁面碰撞反弹模型, 计算颗粒与壁面的碰撞运动。将颗粒运动信息导入 5 种不同的冲蚀模型, 并将计算与未计算颗粒间碰撞的冲蚀预测模拟结果与实验数据进行对比。**结果** 颗粒间碰撞位置主要分布在 90°弯头外拱侧的颗粒高浓度区, 随着颗粒质量流量的增大, 颗粒碰撞次数增加, 且直管段中碰撞次数占比增大。随着入口速度的增大, 颗粒碰撞次数减少。使用 DSMC-CFD 方法计算的最大冲蚀位置沿弯管外拱轴线向高角度方向偏移, 且数值比忽略颗粒间碰撞的 CFD 方法约低 5%~15%, 总冲蚀率则两者区别不大。**结论** 引入 DSMC 方法计算颗粒间的碰撞, 可以节省大量算力。弯管处发生颗粒间碰撞, DSMC-CFD 冲蚀预测方法更符合实际, 使用 DSMC-CFD 方法的 Oka 模型与实验测得值最贴近。

**关键词:** 气固两相流; 冲蚀; 颗粒碰撞; 弯管; DSMC 方法; CFD

**中图分类号:** TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)09-0274-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.09.031

## Erosion Prediction of Gas-Solid Flow Based on DSMC-CFD Method

SUN Xiao-yang, CAO Xue-wen, XIE Zhen-qiang, FU Chen-yang

(School of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the effect of solid particle collision on erosion in gas-solid flow. Eulerian-Lagrangian method was used to solve the gas phase as a continuous phase by Navier Stokes equation, while the particle motion was solved by discrete phase model (DPM). The direct simulation Monte Carlo (DSMC) method was used to calculate the collision between

收稿日期: 2019-09-06; 修订日期: 2020-08-21

Received: 2019-09-06; Revised: 2020-08-21

**基金项目:** 国家自然科学基金(51874340); 山东省自然科学基金(ZR2018MEE004); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(17CX06020); 国家重点研发计划专项(2016YFC0802301)

**Fund:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (51874340), the Shandong Provincial Natural Science Foundation (ZR2018MEE004), the Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (17CX06020); and the National Key Research and Development Project (2016YFC0802301)

**作者简介:** 孙晓阳(1990—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为油气水多相流理论及冲蚀磨损。

**Biography:** SUN Xiao-yang (1990—), Male, Doctoral candidate, Research focus: theory of multiphase flow and erosion.

**通讯作者:** 曹学文(1966—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为天然气处理与加工、油气水多相流理论及应用、海底管道完整性管理。邮箱: caoxw@upc.edu.cn

**Corresponding author:** CAO Xue-wen (1966—), Male, Doctor, Professor, Research focus: natural gas treatment and processing, theory and application of multiphase flow, submarine pipeline integrity management. E-mail: caoxw@upc.edu.cn

**引文格式:** 孙晓阳, 曹学文, 谢振强, 等. 基于 DSMC-CFD 方法的气固两相流冲蚀预测研究[J]. 表面技术, 2020, 49(9): 274-280.

SUN Xiao-yang, CAO Xue-wen, XIE Zhen-qiang, et al. Erosion prediction of gas-solid flow based on DSMC-CFD method[J]. Surface technology, 2020, 49(9): 274-280.

particles. A small number of sampled particles were used to replace the real particles to calculate the collision between particles. The collision conditions were determined by the modified Nanbu method. The collision process followed the dynamic model of the collision between particles. The Grant-Tabakoff model for particles-wall collision rebound was used to calculate the collision motion between particles and wall. The particle motion information was introduced into five different erosion models, and the erosion prediction results of whether to calculate the collision between particles were compared with the experimental data. The location of particle to particle collision was mainly in the high concentration area of particles on the outer arch side of 90° elbow. With the increase of particle mass flow rate, the number of particle collisions increased, and the proportion of collision times in straight pipe section increased. With the increase of inlet velocity, the number of particle collisions decreased. The maximum erosion position calculated by DSMC-CFD method was shifted to the high angle direction along the outer arch axis of the elbow, and the numerical value was about 5%~15% lower than that of CFD method, which ignored the collision between particles. The total erosion rate by two methods had no large difference. Therefore, the calculation of particle collision by DSMC method can save a lot of effort. DSMC-CFD erosion prediction method is more practical for the particle corrosion at the elbow, and the results of Oka model using DSMC-CFD method are the closest to the experimental data.

**KEY WORDS:** gas-solid flow; erosion; particle collision; elbow; DSMC method; CFD

管道冲蚀磨损是气力输送系统面临的主要问题之一,特别是在石油天然气领域,冲蚀会导致设备故障甚至失效,限制生产中的效率 and 安全性。因此,开发预测弯管冲蚀分布的有效方法,并生成高精度的冲蚀预测模型,对于节省维护时间和资源至关重要。

引起冲蚀磨损的根本原因是颗粒和壁面之间的相互作用对壁表面造成的材料损失,其中颗粒的速度和冲击角度在冲蚀现象中起主要作用。为了更好地揭示颗粒与壁面的相互作用机制,并建立冲蚀预测模型,需要进一步了解颗粒特性和流动状态对冲蚀的影响,国内外学者为此付出很多努力。Finnie<sup>[1-2]</sup>首次提出了塑性材料的微切削理论。Bitter<sup>[3-4]</sup>将表面材料的冲蚀磨损分为变形磨损和切削磨损,并推导出冲蚀模型。Neilson 和 Gilchrist<sup>[5]</sup>、Hutchings<sup>[6]</sup>、Zhang<sup>[7]</sup>、Oka<sup>[8]</sup>、DNV<sup>[9]</sup>等学者和机构在实验结果的基础上,分别提出经验以及半经验的冲蚀预测模型。最近,许多学者通过基于 CFD (Computational Fluid Dynamics, 计算流体动力学) 的冲蚀预测方法研究冲蚀现象。Chen<sup>[10]</sup>实验验证了 CFD 冲蚀预测技术的准确性。Duarte 和 Souza<sup>[11]</sup>使用数值模拟方法,研究了颗粒质量浓度对弯管冲蚀的影响。Peng<sup>[12]</sup>使用双向耦合的 Eulerian-Lagrangian 方法,研究了弯管中颗粒碰撞壁面机制和斯托克斯数对冲蚀的影响。Zamani<sup>[13]</sup>研究了颗粒旋转对冲蚀速率的影响,认为颗粒旋转运动会使冲蚀速率迅速增大。Zeng<sup>[14]</sup>基于 CFD-DEM 耦合方法,探讨了颗粒形状对冲蚀的影响,得出颗粒形状对颗粒运动速度和角度等参数的影响较大。这些学者的研究推动了 CFD 冲蚀预测技术的发展,但都缺乏颗粒间碰撞对冲蚀行为影响的研究。主要原因是,目前 CFD 冲蚀预测技术基于欧拉-拉格朗日颗粒轨迹模型,追踪流场中大量真实粒子的轨迹,并以确定性方式从所有轨迹中找到碰撞对,如果颗粒数量增加,则需要巨大的计算资源和计算时间。

因此,本文提出将直接模拟蒙特卡罗 (DSMC) 方法用于计算颗粒间碰撞的 CFD 冲蚀预测。此方法下,真实颗粒被少量采样颗粒取代,颗粒对之间的碰撞随机判定,可以节省大量算力。研究了气固两相流中固体颗粒间碰撞对冲蚀的影响,数值模拟研究了基于欧拉-拉格朗日框架的 CFD-DPM 模型,并将计算结果对比冲蚀实验数据。研究表明,DSMC-CFD 方法可有效修正最大冲蚀位置和最大冲蚀率。

## 1 理论模型

使用 Eulerian-Lagrangian 方法,将气相作为连续相,通过 Navier-Stokes 方程求解,将固体颗粒视为离散相处理,并通过牛顿第二定律求解。假设固体颗粒上的主要力是曳力、惯性力、重力和浮力。由于固体颗粒和流体之间的高密度比,忽略了虚拟质量力和压力梯度力。使用标准  $k-\epsilon$  模型对湍流进行建模,使用增强壁面函数模拟靠近壁面和边界层的流动行为。通过离散随机游走 (DRW) 模型求解湍流脉动对颗粒的影响。此外,本研究仍涉及到颗粒碰撞模型和冲蚀模型。

### 1.1 颗粒碰撞模型

计算颗粒运动过程中的颗粒间碰撞采用直接模拟蒙特卡罗 (DSMC) 方法,碰撞过程遵循颗粒间碰撞动力学模型,碰撞的发生条件通过计算碰撞概率得出。

#### 1.1.1 颗粒碰撞动力学模型

假设刚性球体颗粒  $i$  和  $j$  之间发生瞬间碰撞,碰撞后速度通过冲量方程求得,如式(1)所示:

$$\begin{cases} m_i (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_i^{(0)}) = \mathbf{J} \\ m_j (\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_j^{(0)}) = -\mathbf{J} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{J}$  是碰撞期间施加在颗粒  $i$  上的冲量矢量,  $\mathbf{v}^{(0)}$  是碰撞前的速度。数学推导后, 两颗粒碰撞后的速度如下所示。

如果  $(\mathbf{n} \cdot \mathbf{G}^{(0)} / |\mathbf{G}_{ct}^{(0)}|) < (1/\xi(1+e))$ , 则:

$$\begin{cases} \mathbf{v}_i = \mathbf{v}_i^{(0)} - (\mathbf{n} + \xi \mathbf{t})(\mathbf{n} \cdot \mathbf{G}^{(0)})(1+e) \frac{m_j}{m_i + m_j} \\ \mathbf{v}_j = \mathbf{v}_j^{(0)} + (\mathbf{n} + \xi \mathbf{t})(\mathbf{n} \cdot \mathbf{G}^{(0)})(1+e) \frac{m_i}{m_i + m_j} \end{cases} \quad (2)$$

如果  $(\mathbf{n} \cdot \mathbf{G}^{(0)} / |\mathbf{G}_{ct}^{(0)}|) \geq (1/\xi(1+e))$ , 则:

$$\begin{cases} \mathbf{v}_i = \mathbf{v}_i^{(0)} - [(1+e)(\mathbf{n} \cdot \mathbf{G}^{(0)})\mathbf{n} + |\mathbf{G}_{ct}^{(0)}|\mathbf{t}] \frac{m_j}{m_i + m_j} \\ \mathbf{v}_j = \mathbf{v}_j^{(0)} + [(1+e)(\mathbf{n} \cdot \mathbf{G}^{(0)})\mathbf{n} + |\mathbf{G}_{ct}^{(0)}|\mathbf{t}] \frac{m_i}{m_i + m_j} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $e$  为恢复系数;  $\xi$  为摩擦系数;  $\mathbf{n}$  是碰撞时从颗粒  $i$  指向颗粒  $j$  的法向单位矢量;  $\mathbf{t}$  是切向方向单位矢量;  $\mathbf{G}^{(0)}$  是碰撞前颗粒的相对速度,  $\mathbf{G}_{ct}^{(0)}$  是  $\mathbf{G}^{(0)}$  的切向分量。

### 1.1.2 碰撞概率计算

假设一定空间范围内随机分布  $N$  个颗粒。其中, 颗粒  $i$  可能与范围内其他颗粒碰撞的概率取决于颗粒相对速度、粒径和局部浓度, 如图 1 所示。

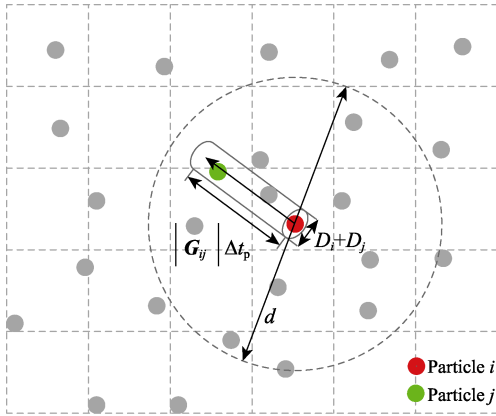


图 1 碰撞概率示意图

Fig.1 Diagram of collision probability

颗粒  $i$  单位时间内发生的碰撞次数, 即碰撞频率计算如下:

$$P_i = \sum_{j=1}^N \frac{n_\sigma \pi (D_i + D_j)^2 |\mathbf{G}_{ij}|}{4V_0} \quad (4)$$

式中,  $i$  和  $j$  表示碰撞对中颗粒编号;  $D_i$  和  $D_j$  为颗粒  $i$  和  $j$  的直径;  $|\mathbf{G}_{ij}|$  是颗粒  $i$  和  $j$  相对速度的模;  $V_0$  表示搜索范围体积, 搜索半径为  $|\mathbf{G}_{ij}| \Delta t_p$ ;  $N$  为搜索范围内的实际颗粒个数;  $n_\sigma$  为采样颗粒代表的实际颗粒个数。

根据式(4), 速度为  $v_i$  的颗粒  $i$  的碰撞平均自由程  $\lambda_i$  计算如下:

$$\lambda_i = \frac{|v_i|}{P_i} \quad (5)$$

选取足够小的颗粒时间步长, 以使颗粒间的相互碰撞和颗粒的自由运动解耦, 颗粒时间步长  $\Delta t_p$  由式(6)得出:

$$\Delta t_p = \min \left[ \frac{\lambda_i}{3v_i}, \Delta t_g \right] \quad (6)$$

式中,  $\Delta t_g$  是气相时间步长。因此,  $\Delta t_p$  期间颗粒  $i$  和  $j$  碰撞概率计算如下:

$$P_{ij} = \frac{\pi (D_i + D_j)^2 |\mathbf{G}_{ij}| n_\sigma \Delta t_p}{4V_0} \quad (7)$$

实际条件下, 颗粒的碰撞具有一定随机性, 本文采用修正的 Nanbu 方法判定碰撞是否发生<sup>[15]</sup>。首先, 从随机数发生器中提取从 0 到 1 的均匀分布的随机数  $R$ , 使用式(8)生成碰撞颗粒对中颗粒  $j$  的序号。

$$j = \text{int}[R \times N] + 1 \quad (8)$$

式中,  $\text{int}[R \times N]$  是对随机数  $R$  与搜索范围内颗粒总数  $N$  乘积的取整数运算。通过式(7)计算颗粒碰撞概率  $P_{ij}$ , 碰撞发生判断条件表述为:

$$R > \frac{j}{N} - P_{ij} \quad (9)$$

时间步长取  $\Delta t_p$ , 当  $P_{ij}$  满足碰撞条件时, 颗粒  $i$  和  $j$  将发生碰撞, 碰撞后的速度使用公式(1)~(3)计算得出。图 2 为 DSMC 方法中采样颗粒的计算流程。

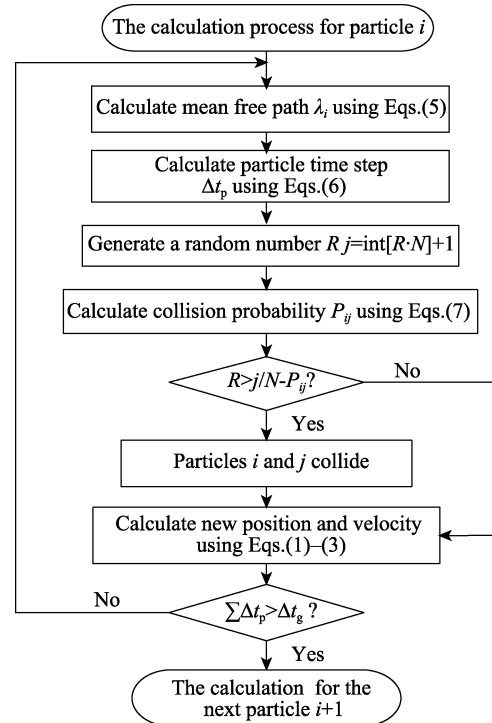


图 2 采样颗粒计算流程图

Fig.2 Flowchart of sampled particle calculation process

1.2 冲蚀预测模型

本文涉及五种冲蚀预测模型，包括：Oka 模型<sup>[8]</sup>、DNV 模型<sup>[9]</sup>、Zhang 模型<sup>[7]</sup>、Neilson and Gilchrist 模型<sup>[5]</sup>以及 Vieira 模型<sup>[16]</sup>。以上冲蚀预测模型可以定义为如下格式：

$$ER = K(BH)^{n_1} F_s u_p^{n_2} F(\alpha)$$
 (10)

式中， $ER$  为目标材料质量损失与冲蚀颗粒质量的比值； $F_s$  为颗粒形状系数； $BH$  为靶材硬度； $K$ 、 $n_1$  分别是基于材料性质的经验常数； $u_p$  是冲蚀颗粒速度， $n_2$  是基于经验的速度相关指数； $F(a)$  为碰撞角函数。其中，各模型的具体参数可参考相关文献。本文采用 Grant 和 Tabakoff 随机颗粒-壁面碰撞反弹模型计算颗粒与壁面碰撞后的速度变化，具体表达式参考文献[17]。

2 CFD 建模

90°弯头结构如图 3 所示，直径  $D$  为 76.2 mm，曲率半径为  $1.5D$ ，上游直管段长  $15D$ ，下游直管段长  $10D$ 。使用六面体对弯管流道划分结构性网格，且在近壁区域进行加密，以确保模拟结果稳定准确。进行网格无关性分析发现，当网格数大于 366 万后，冲蚀率不再显著变化。因此，本文研究案例的网格数量设置为 366 万。

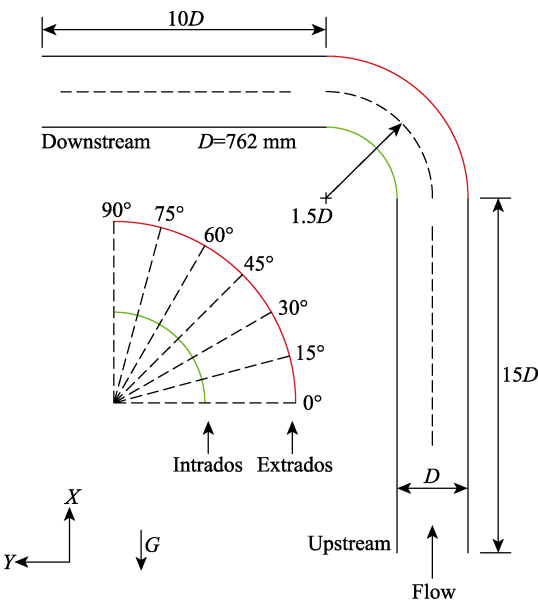


图 3 弯管几何结构示意图  
Fig.3 Diagram of elbow geometry

设置固体颗粒与空气以相同的速度均匀地注入弯管入口，入口采用速度入口边界条件，出口为自由出流边界。管壁为壁面边界，壁面粗糙度常数设为 0.5，湍流强度设定为 5%。目前研究表明，CFD 建模中应至少注入 2 万个颗粒，才可避免随机轨迹颗粒因为数量不足，而造成冲蚀预测结果的分布不规律。本

研究中在仿真模型入口注入 5 万个颗粒。冲蚀模拟工况如表 1 所示，并使用 Vieira<sup>[16]</sup>的实验数据验证。

表 1 计算工况  
Tab.1 Calculation conditions

Condition	Gas velocity /(m·s <sup>-1</sup> )	Particle diameter/μm	Particle mass flow rate/(kg·d <sup>-1</sup> )
1	15	300	154
2	15	300	192
3	15	300	452
4	11	300	288
5	15	300	103
6	23	300	227
7	27	300	256
8	11	150	254
9	15	150	237
10	23	150	257
11	27	150	206

3 数值模拟结果及分析

3.1 冲蚀模型对比

为了验证 DSMC-CFD 方法的准确性，对比了 5 种不同模型的数值模拟结果与实验数据，如图 4 所示。图 4 横轴为实验测得的最大冲蚀速率，纵轴为数值模拟计算结果的最大冲蚀率。可以看出，使用 DSMC-CFD 方法会使冲蚀计算结果比忽略颗粒间碰撞的 CFD 方法的计算结果偏低。原因是大量颗粒冲击弯管外拱管壁时，颗粒之间发生碰撞，造成颗粒动能发生损失或者颗粒被撞出原本轨迹，因而颗粒的冲蚀率更低。常规 CFD 方法假设颗粒之间不能相互影响，但本研究表明颗粒间碰撞会影响冲蚀结果，因此

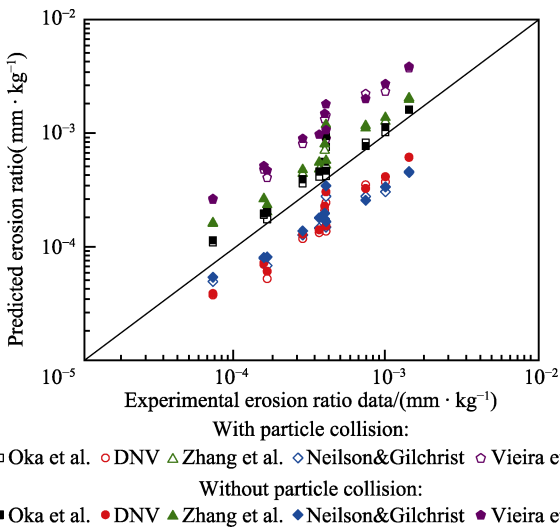


图 4 不同冲蚀模型计算结果与实验值对比  
Fig.4 Comparison between calculated results of different erosion models and experimental values

在 CFD 冲蚀预测研究中,不应忽略颗粒间碰撞的影响。计算工况范围内,使用 DSMC-CFD 方法的 Oka 模型与实验测得值最贴近。

### 3.2 冲蚀形貌分析

图 5 显示了采用忽略颗粒间碰撞的 CFD 方法和计算颗粒间碰撞的 DSMC-CFD 方法的冲蚀形貌对

比。可知,两种方法计算结果在弯头外拱侧同样形成了“V 形”冲蚀形貌,但 CFD 方法最大冲蚀位置的冲蚀率在计算颗粒间碰撞后减小,原因是颗粒间碰撞的“气垫作用”。DSMC-CFD 方法计算的最大冲蚀位置相对原位置,沿弯管外拱轴线向高角度方向偏移,且数值比原最大冲蚀率降低,同时“V 形”冲蚀痕迹的两翼外侧出现冲蚀率增大现象。

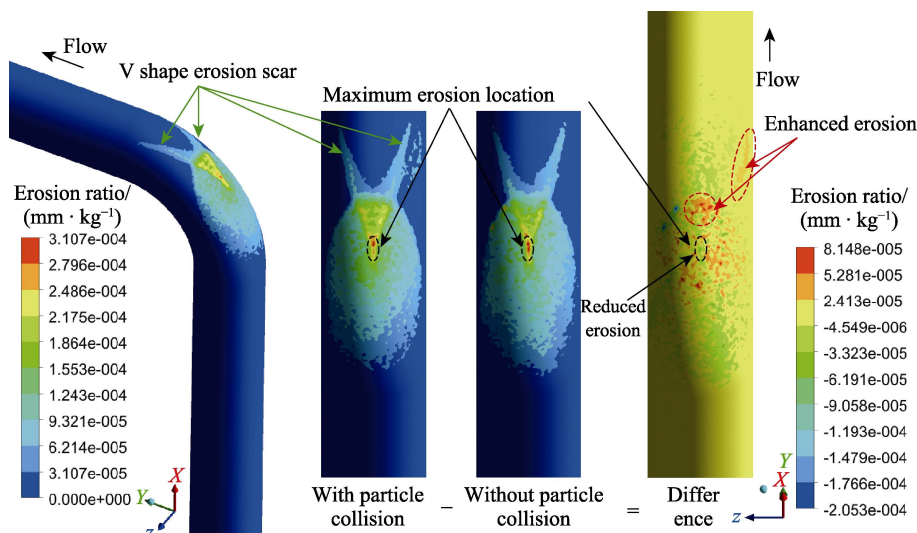


图 5 计算和忽略颗粒间碰撞对冲蚀结果的影响

Fig.5 Calculation and ignorance of effects of inter-particle collisions on erosion results

### 3.3 流场中颗粒及碰撞位置分布

图 6 对比了冲蚀率、颗粒轨迹、颗粒相对质量浓度分布和流场中颗粒间碰撞发生的位置。可以看出,在入口直管段处仅有极少量颗粒发生碰撞,进入弯管后,大量颗粒在弯头外拱侧发生碰撞。密集发生颗粒间碰撞的区域同样是局部颗粒高浓度区和最大冲蚀位置。颗粒在弯管内拱侧形成“无颗粒区”,颗粒间碰撞导致少量颗粒被撞出“V 形”区域,从而引起冲蚀率变化。

图 7 统计了颗粒间碰撞位置的分布规律,同样可以看出颗粒间碰撞位置主要分布在 90°弯头处。原因是颗粒运动至弯管处时,在惯性和二次流的作用下向弯头外拱侧汇集,形成局部的高浓度区,且颗粒碰撞管壁后,运动方向发生剧烈变化,更易与其他颗粒发生碰撞。随着颗粒质量流量的增大,直管段中碰撞次数占整个管道中碰撞次数的比例增大,但仍远小于弯头中的碰撞次数。同时可以看出,随着入口速度的增大,颗粒碰撞次数减少。

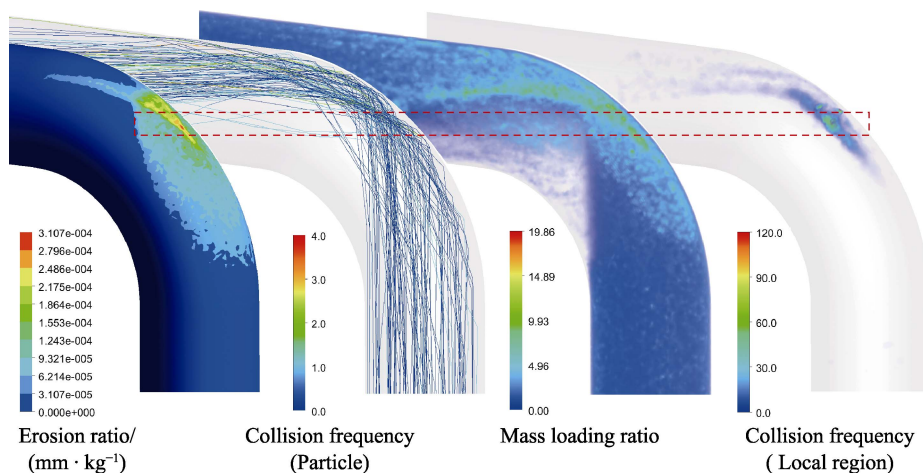


图 6 DSMC-CFD 方法的颗粒运动和冲蚀特征

Fig.6 Particle motion and erosion characteristics with DSMC-CFD method



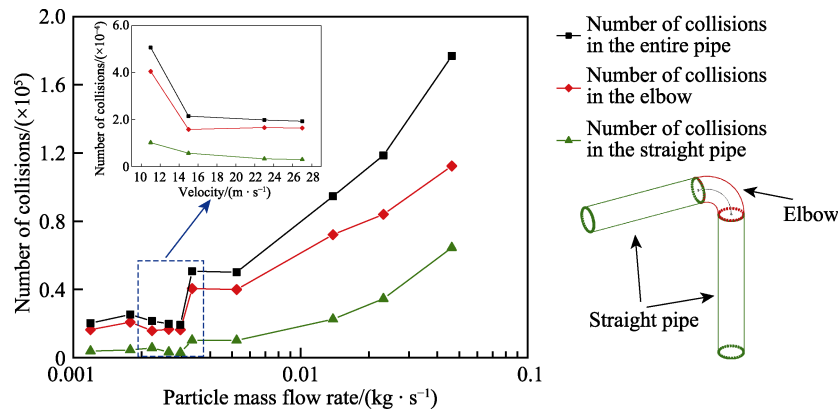


图 7 颗粒间碰撞发生位置分布

Fig.7 Distribution of inter-particle collision locations

图 8 显示了颗粒直径对颗粒间碰撞的影响。分析可知,随着颗粒直径增大,总碰撞次数减少。原因是同样质量的颗粒随着粒径增大,颗粒数减少,颗粒碰撞对更难配对。

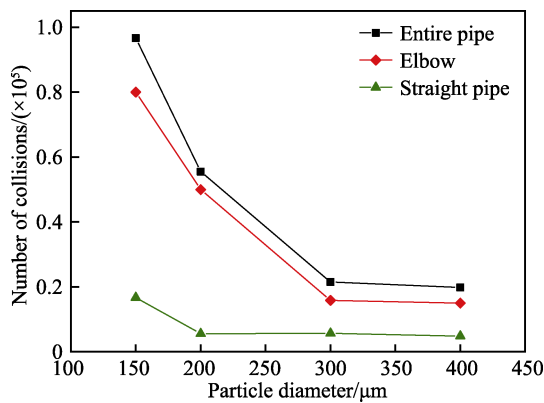


图 8 颗粒直径对颗粒间碰撞的影响

Fig.8 Effect of particle diameter on inter-particle collision

### 3.4 颗粒间碰撞对冲蚀率的影响

图 9 和图 10 分别给出颗粒间碰撞对最大冲蚀率和总冲蚀率的影响。可知,CFD 与 DSMC-CFD 方法的最大冲蚀率百分误差主要分布在 5%~15%,即使用 DSMC-CFD 方法考虑颗粒间碰撞时计算的最大冲蚀

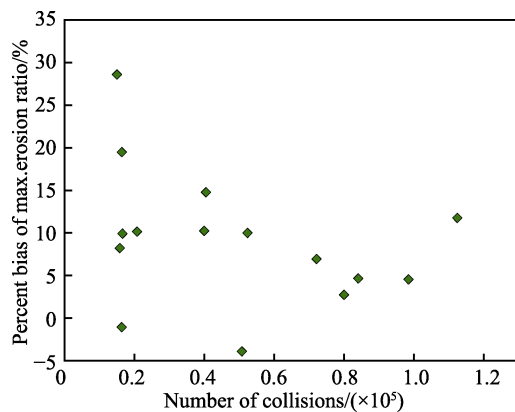


图 9 颗粒间碰撞对最大冲蚀率的影响

Fig.9 Effect of inter-particle collision on maximum erosion rate

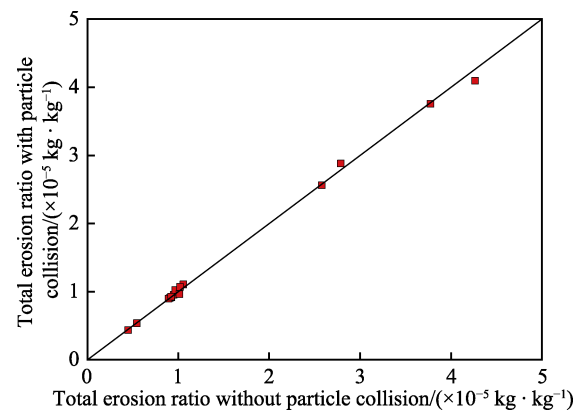


图 10 颗粒间碰撞对总冲蚀率的影响

Fig.10 Effect of inter-particle collision on total erosion rate

率,比使用忽略颗粒间碰撞的 CFD 方法计算的最大冲蚀率低约 5%~15%。同时表明,在使用合适的冲蚀模型情况下,CFD 方法得到的冲蚀率更保守。由图 10 可知,计算颗粒间碰撞对总的冲蚀率影响不大,CFD 与 DSMC-CFD 方法计算的总冲蚀率基本一致。

## 4 结论

本文研究了固体间颗粒的碰撞对气固两相流冲蚀的影响,并提出一种 DSMC-CFD 冲蚀预测方法,得出以下结论:

1) DSMC-CFD 冲蚀预测方法可以更好地描述大量颗粒在弯管处发生碰撞对冲蚀率的影响,使用 DSMC-CFD 方法的 Oka 模型与实验测得值最贴近。当计算颗粒间的碰撞时,原最大冲蚀位置冲蚀速率大幅降低,同时“V 形”冲蚀痕迹的两翼向外侧扩大。

2) 颗粒间碰撞位置主要分布在 90°弯头外拱侧的颗粒高浓度区,随着颗粒质量流量的增大,直管段中碰撞次数占整个管道中碰撞次数的比例增大。随着入口速度的增大,颗粒碰撞次数减小。

3) DSMC-CFD 方法计算的最大冲蚀率比忽略颗粒间碰撞的 CFD 方法计算值约低 5%~15%,但对总冲蚀率,两者区别不大。

## 参考文献:

- [1] FINNIE I. The mechanism of erosion of ductile metals[C]// 3rd US national congress of applied mechanics. Rhode Island: Brown University, 1958.
- [2] FINNIE I. Erosion of surfaces by solid particles[J]. *Wear*, 1960, 3(2): 87-103.
- [3] BITTER J G A. A study of erosion phenomena: Part I[J]. *Wear*, 1963, 6(1): 5-21.
- [4] BITTER J G A. A study of erosion phenomena: Part II[J]. *Wear*, 1963, 6(3): 169-190.
- [5] NEILSON J H, GILCHRIST A. Erosion by a stream of solid particles[J]. *Wear*, 1968, 11(2): 111-122.
- [6] HUTCHINGS I M. A model for the erosion of metals by spherical particles at normal incidence[J]. *Wear*, 1980, 70(3): 269-281.
- [7] ZHANG Y, REUTERFORS E P, MCLAURY B S, et al. Comparison of computed and measured particle velocities and erosion in water and air flows[J]. *Wear*, 2007, 263(1): 330-338.
- [8] OKA Y I, OKAMURA K, YOSHIDA T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact—Part I: Effects of impact parameters on a predictive equation[J]. *Wear*, 2005, 259(1): 95-101.
- [9] HAUGEN K, KVERNVOLD O, RONOLD A, et al. Sand erosion of wear-resistant materials: Erosion in choke valves[J]. *Wear*, 1995, 186-187: 179-188.
- [10] 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.
- [11] DUARTE C A R, DE S, FRANCISCO J, et al. Numerical investigation of mass loading effects on elbow erosion[J]. *Powder technology*, 2015, 283: 593-606.
- [12] PENG W, CAO X. Numerical simulation of solid particle erosion in pipe bends for liquid-solid flow[J]. *Powder technology*, 2016, 294: 266-279.
- [13] ZAMANI M, SEDDIGHI S, NAZIF H R. Erosion of natural gas elbows due to rotating particles in turbulent gas-solid flow[J]. *Journal of natural gas science and engineering*, 2017, 40: 91-113.
- [14] ZENG D, ZHANG E, DING Y, et al. Investigation of erosion behaviors of sulfur-particle-laden gas flow in an elbow via a CFD-DEM coupling method[J]. *Powder technology*, 2018, 329: 115-128.
- [15] PAWAR S K, PADDING J T, DEEN N G, et al. Lagrangian modelling of dilute granular flow—Modified stochastic DSMC versus deterministic DPM[J]. *Chemical engineering science*, 2014, 105: 132-142.
- [16] VIEIRA R E, MANSOURI A, MCLAURY B S, et al. Experimental and computational study of erosion in elbows due to sand particles in air flow[J]. *Powder technology*, 2016, 288: 339-353.
- [17] GRANT G, TABAKOFF W. Erosion prediction in turbomachinery resulting from environmental solid particles[J]. *Journal of aircraft*, 1975, 12(5): 471-478.
- (上接第 257 页)
- [9] KALIN M, POLAJNAR M. The wetting of steel, DLC coatings, ceramics and polymers with oils and water: The importance and correlations of surface energy, surface tension, contact angle and spreading[J]. *Applied surface science*, 2014, 293: 97-108.
- [10] 杨淑燕, 郭峰, 马冲, 等. 固液润湿性对流体动压润滑薄膜的影响[J]. *摩擦学学报*, 2010, 30(2): 203-208.
- YANG Shu-yan, GUO Feng, MA Chong, et al. Influences of the liquid/solid wettability on thin hydrodynamic lubrication films[J]. *Tribology*, 2010, 30(2): 203-208.
- [11] 田鹏晖, 郭峰, 王志君, 等. 固液界面对流体动压润滑膜厚的影响[J]. *表面技术*, 2016, 45(10): 77-82.
- TIAN Peng-hui, GUO Feng, WANG Zhi-jun, et al. Effects of the liquid/solid interface on thickness of hydrodynamic lubricating films[J]. *Surface technology*, 2016, 45(10): 77-82.
- [12] 王志君, 郭峰, 田鹏晖. 界面黏附功与润滑油膜厚度的相关性研究[J]. *润滑与密封*, 2016, 41(12): 52-56.
- WANG Zhi-jun, GUO Feng, TIAN Peng-hui. Correlation of interface adhesion work and hydrodynamic lubrication[J]. *Lubrication engineering*, 2016, 41(12): 52-56.
- [13] 王茜, 郭峰, 韩素立. 固体表面润湿性对滑块-盘接触润滑供油的影响[J]. *摩擦学学报*, 2019, 39(1): 73-81.
- WANG Qian, GUO Feng, HAN Su-li. Influence of surface wettability on the lubricating oil supply in a slider-on-disk contact[J]. *Tribology*, 2019, 39(1): 73-81.
- [14] 臧淑燕, 郭峰, 李超. 表面亲润性对限量供油润滑影响的研究[J]. *摩擦学学报*, 2017, 37(4): 429-434.
- ZANG Shu-yan, GUO Feng, LI Chao. Influence of surface wettability on lubrication by limited lubricant supply[J]. *Tribology*, 2017, 37(4): 429-434.
- [15] GUO L, WONG P L, GUO F. Correlation of contact angle hysteresis and hydrodynamic lubrication[J]. *Tribology letters*, 2015, 58(3): 45.
- [16] WHYMAN G, BORMASHENKO E, STEIN T. The rigorous derivation of Young, Cassie-Baxter and Wenzel equations and the analysis of the contact angle hysteresis phenomenon[J]. *Chemical physics letters*, 2008, 450(4-6): 355-359.
- [17] GUO L. Research on boundary slippage in thin film hydrodynamic lubrication[D]. Hongkong: City University of Hongkong, 2015.