

孔板流量计气固两相流冲蚀规律及主控因素研究

陈纪任*, 刘浩伸

重庆科技大学安全科学与工程学院, 重庆

收稿日期: 2026年9月4日; 录用日期: 2026年9月11日; 发布日期: 2026年9月24日

摘要

在天然气生产过程中, 井筒内会携带出固体颗粒对孔板流量计产生冲蚀, 导致计量精度受到影响, 甚至引发安全事故。为探究天然气生产中颗粒对孔板流量计的冲蚀影响, 弥补现有研究在气固两相流条件下相关规律的不足, 为揭示气固两相流中孔板流量计的冲蚀规律, 本文基于离散相模型(DPM)开展数值模拟, 聚焦于颗粒质量流量、介质流速、粒径及形状因子四个关键变量对冲蚀行为的定量影响。结果表明: 质量流量(0.001~0.02 kg/s)和介质流速(6~15 m/s)是冲蚀强度的主控因素, 前者通过增加颗粒碰撞频率使平均冲蚀率提升19.96倍, 后者通过提高颗粒撞击动能使其提升13.09倍; 相比之下, 粒径和形状因子的改变对颗粒运动状态影响有限, 平均冲蚀率仅分别变化8.03%和13.63%。本研究可为孔板流量计的安全运行提供理论依据和工程参考。

关键词

气固两相流, DPM, 冲蚀, 孔板流量计

Study on Erosion Law and Governing Factors of Orifice Plate Flowmeter in Gas-Solid Two-Phase Flow

Jiren Chen*, Haoshen Liu

School of Safety Science and Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: September 4, 2026; accepted: September 11, 2026; published: September 24, 2026

*第一作者。

文章引用: 陈纪任, 刘浩伸. 孔板流量计气固两相流冲蚀规律及主控因素研究[J]. 石油天然气学报, 2026, 48(4): 527-540. DOI: 10.12677/jogt.2026.484057

Abstract

During natural gas production, solid particles entrained in the wellbore can cause erosion on the orifice plate flowmeter, affecting measurement accuracy and even leading to safety accidents. To investigate the erosion effects of particles on the orifice plate flowmeter in natural gas production, fill the gaps in existing research under gas-solid two-phase flow conditions, and reveal the erosion mechanism of orifice plate flowmeters, this paper conducted numerical simulations based on the Discrete Phase Model (DPM). The study focused on the quantitative effects of four key variables—particle mass flow rate, fluid velocity, particle diameter, and shape factor—on erosion behavior. The results indicate that mass flow rate (0.001~0.02 kg/s) and fluid velocity (6~15 m/s) are the governing factors for erosion intensity. The former increased the average erosion rate by 19.96 times by increasing the particle collision frequency, while the latter increased it by 13.09 times by enhancing the particle impact kinetic energy. In contrast, changes in particle diameter and shape factor have a limited influence on particle motion states, with the average erosion rate varying by only 8.03% and 13.63%, respectively. This study provides a theoretical basis and engineering reference for the safe operation of orifice plate flowmeters.

Keywords

Gas-Solid Two-Phase Flow, DPM, Erosion, Orifice Plate Flowmeter

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在天然气开采中,常通过高压将含砂液体注入地层,压开岩石形成裂缝,同时让砂粒填入裂缝作为支撑,使气体能顺畅流出,从而提高产量[1]-[3]。然而,部分支撑剂虽经除砂器过滤,仍有少量颗粒随流体排出[4][5]。高速流动的颗粒会对集输系统中的局部阻力部件造成严重冲蚀,导致设备磨损、测量精度下降甚至穿孔,引发安全事故和生产损失[6][7]。孔板流量计作为气井集输系统中典型的局部阻力部件,深入研究其在气固两相流条件下的冲蚀规律,对于保障系统安全运行、减少维护成本具有重要意义。

针对管道局部阻力部件的冲蚀问题,学者们已从机理、数值模拟和实验三方面开展了大量研究。在机理方面,Chen 等[8]通过经验分析和计算流体动力学模拟研究了颗粒反弹模型对三通管颗粒轨迹和冲蚀模式的影响;Pereira 等[9]研究表明,Grant 和 Tabakoff 的反弹模型与砂粒对铝的冲蚀之间存在显著关系;彭文山[10]讨论了页岩气井弯管中液固两相流的冲蚀规律和机理;Khan [11]讨论了磨损表面形貌和冲蚀磨损机理,表面粗糙度分析表明几种主要的磨损机制。在数值模拟方面,同武军等[12]对水下节流阀因冲蚀而损坏的现象进行了数值模拟研究得出冲蚀主要发生在节流孔附近的壁面和节流孔内壁。Hong 等[13]发现,气体流速、质量、砂流量和形状系数与最大冲蚀率呈正相关,而管径和弯头曲率半径与最大冲蚀率呈负相关。Peng 等[14]研究了流体因素、固体颗粒因素和管道尺寸因素对两相流弯头冲蚀率的影响,得到了不同因素对冲蚀率的影响程度以及最大冲蚀率的预测模型。Biglari 等[15]研究了管径与冲蚀率之间的关系,表明在相同工况下 2 英寸弯头的最大冲蚀率远低于 3 英寸弯头。在实验方面,董刚[16]使用冲蚀磨损试验机测试了钢、高铬铸铁等材料在不同冲蚀角度、冲击速度、磨料尺寸和冲蚀时间下的性能。Liu 等[17]使用失重测量、共聚焦显微镜和 CFD 模拟研究了水位钢制弯头在不同流速下的冲蚀现象。结

果表明, 弯头内侧、外侧和底部的冲蚀率最高, 并且在较高流速下观察到冲蚀率增加, 强调了弯头特定位置对腐蚀的敏感性。Zhang 等[18]通过扫描电子显微镜分析了实验数据, 并通过 CFD 验证结果, 表明较高的颗粒速度会导致较高的冲蚀率且冲蚀最严重的区域位于迎流区域。然而, 上述研究多集中于弯头、阀门和三通等部件, 且大多针对固液两相流。孔板流量计虽具有典型的突缩突扩结构, 但目前对其在气固两相流条件下的冲蚀行为及其关键影响因素仍十分匮乏, 制约了工程中对该部件冲蚀风险的准确评估。

为弥补上述不足, 本研究选取页岩气井场利用率最高的标准孔板流量计为对象, 基于 DPM 模型采用 Fluent 软件系统研究颗粒质量流量(0.001~0.02 kg/s)、介质流速(6~15 m/s)、粒径(100~400 μm)和形状因子(0.3~1)四个关键因素对冲蚀的影响规律, 揭示孔板关键冲蚀区域的分布特征。旨在探明影响冲蚀的主导因素和主控因素。本研究可为孔板流量计的安全运行区间确定及抗冲蚀优化提供理论依据和工程指导。

2. 数学模型

2.1. 连续相控制方程

孔板流量计内气固两相流连续相的质量守恒方程和动量守恒方程的基本数学模型如下(1.1)和(1.2)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\overline{\tau}) + \rho \vec{g} + \overline{S_D} \quad (1.2)$$

其中, ρ 是连续相的密度, kg/m^3 ; $\vec{u}$ 是瞬时速度矢量, m/s ; p 是压力, Pa ; $\overline{\tau}$ 是应力张量; $\overline{S_D}$ 是颗粒相对于连续相的附加源项。

2.2. 湍流控制方程

为实现连续相方程的封闭, 需要引入湍流控制方程。Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型结合了标准 $k-\varepsilon$ 和 RNG $k-\varepsilon$ 模型的优点, 并考虑了气流旋转和物体表面曲率。在模拟旋转流动、强逆压梯度边界层流、流动分离和二次流时, 该模型表现出良好性能, 且计算精度较高[19]。湍动能 k 和湍流耗散率 ε 的输运方程如下(1.3)、(1.4)。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + p_k - \rho \varepsilon \quad (1.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_1 \varepsilon S_\varepsilon - \frac{C_2 \varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_1 \varepsilon \frac{G_b}{k} \quad (1.4)$$

PK 是由速度梯度和湍流应力产生的湍动能生成项; $\rho \varepsilon$ 是湍流耗散项, 代表湍流能量损失; C_1 和 C_2 是模型常数, 取值为 $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$; S_ε 是湍流耗散率生成项, 与速度梯度和湍流应力有关; G_b 是由边界层产生的湍动能; σ_k 和 σ_ε 是湍流粘度的修正因子, 取值为 $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

2.3. 离散相基本控制方程

DPM 模型是一种模拟多相流中离散相与连续相相互作用的数值方法。DPM 模型基于拉格朗日法, 将颗粒视为离散粒子, 通过求解每个粒子的运动方程来模拟其在流体中的轨迹。忽略颗粒之间可能存在的相互作用并假设颗粒为硬球, 通过牛顿第二定律推导出单位质量颗粒的运动方程, 如(1.5)所示。由于连续相与离散相的密度差过大, 其压力梯度力和附加质量力可以忽略[10]。本文主要考虑离散相所受的曳力以及重力和浮力的合力。相关方程如下(1.5)~(1.9)。

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = \vec{F}_D + \vec{F}_p + \vec{F}_{VM} + \vec{F}_B \quad (1.5)$$

$$\vec{F}_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_d \text{Re}_s}{24} (\vec{u} - \vec{u}_p) \quad (1.6)$$

$$\vec{F}_B = \frac{(\rho_p - \rho)}{\rho_p} \vec{g} \quad (1.7)$$

$$\text{Re}_s = \frac{\rho d_p |\vec{u}_p - \vec{u}|}{\mu} \quad (1.8)$$

$$C_d = a_1 + \frac{a_2}{\text{Re}_s} + \frac{a_3}{\text{Re}_s^2} \quad (1.9)$$

其中, $\vec{F}_D, \vec{F}_p, \vec{F}_{VM}, \vec{F}_B$ 分别是作用在单位质量固体颗粒上的曳力、压力梯度力、附加质量力、重力和浮力的合力; $\vec{u}_p$ 是颗粒速度矢量, m/s; d_p 是粒径, μm ; ρ_p 是颗粒密度, kg/m^3 ; Re_s 是颗粒雷诺数; C_d 是曳力系数; a_1, a_2, a_3 是常数。

2.4. 冲蚀率计算模型

页岩气井口标准孔板流量计内砂粒对孔板壁面的冲蚀率[20]定义为方程(1.10)。

$$R_{\text{erosion}} = \sum_{p=1}^n \frac{m_p C(d_p) f(\alpha) v^{b(v)}}{A} \quad (1.10)$$

其中 R_{erosion} 是冲蚀率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; n 是碰撞颗粒数; m_p 是砂粒质量流量, kg/s ; $C(d_p)$ 是砂粒粒径函数; $f(\alpha)$ 是碰撞角度函数[21]; $v^{b(v)}$ 是速度指数函数; A 是壁面单元面积, m^2 。

2.5. 颗粒碰撞模型

采用 Floder [22]等人建立的颗粒碰撞模型, 其方程为(2.11)。

$$\begin{cases} e_n = 0.993 - 0.0307\theta + 0.000475\theta^2 - 0.00000261\theta^3 \\ e_t = 0.998 - 0.029\theta + 0.000643\theta^2 - 0.00000356\theta^3 \end{cases} \quad (1.11)$$

其中 e_n 是法向恢复系数, e_t 是切向恢复系数。

3. 数值模拟方法

3.1. 几何模型

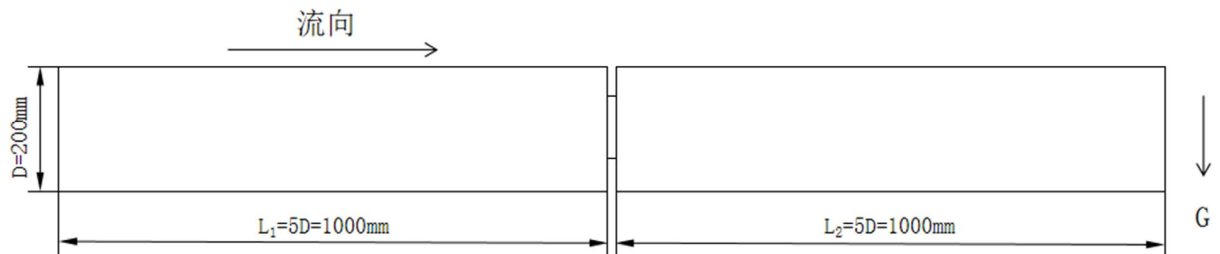


Figure 1. Two-dimensional schematic diagram of a standard orifice flowmeter

图 1. 标准孔板流量计二维示意图

本文以开孔比 0.5 的标准孔板流量计为研究对象, 管道公称直径 $D = 200 \text{ mm}$, 前后直管段长度 $L_1 = L_2 = 5D$, 孔板厚度 10 mm 。在 ANSYS Space Claim 中建立几何模型, 二维示意图如图 1 所示。

3.2. 模拟工况

连续相为甲烷, 密度 0.6679 kg/m^3 ; 离散相为砂粒, 密度 1500 kg/m^3 , 密度 1500 kg/m^3 。经调研及文献[23]-[28]确定影响因素范围为: 质量流量($0.001 \text{ kg/s} \sim 0.02 \text{ kg/s}$), 介质流速($6 \text{ m/s} \sim 15 \text{ m/s}$), 粒径($100 \mu\text{m} \sim 400 \mu\text{m}$)和颗粒形状因子($0.3 \sim 1$)。具体工况见表 1。

Table 1. Numerical simulation conditions

表 1. 模拟工况

工况	介质流速/(m/s)	质量流量/(kg/s)	颗粒直径/(\(\mu\text{m}\))	形状因子
1	6	0.01	250	1
2	8	0.01	250	1
3	10	0.01	250	1
4	12	0.01	250	1
5	15	0.01	250	1
6	6	0.001	250	1
7	6	0.005	250	1
8	6	0.015	250	1
9	6	0.02	250	1
10	6	0.01	100	1
11	6	0.01	150	1
12	6	0.01	350	1
13	6	0.01	450	1
14	6	0.01	250	0.3
15	6	0.01	250	0.4
16	6	0.01	250	0.6
17	6	0.01	250	0.8

3.3. 边界条件及离散相相关设置

入口为速度入口, 出口为压力出口; 颗粒以入口法线方向并以与连续相相同的速度注入; 壁面设置为反射, 入口和出口设置为逃逸。离散相基于 DPM 模型, 采用欧拉 - 拉格朗日方法追踪颗粒轨迹。本工况颗粒体积分数为 $3.0 \times 10^{-5} \sim 6.0 \times 10^{-4}$, 处于 $10^{-6} \sim 10^{-3}$ 区间内, 需考虑相间双向耦合[29]。为了更准确地预测复杂流场中颗粒的运动路径和冲蚀行为, 采用颗粒的离散随机轨迹模型。离散相与连续相之间的动量交换、压力梯度、重力等效应在 DPM 模型中通过拉格朗日参考系求解, 它基于其所在位置的连续相流场参数进行计算。由于这些参数随时间不断变化, 直接使用它们会导致数值不稳定或计算效率低下。为提高计算稳定性, 对相间动量交换源项进行了线性化处理[30]。

3.4. 网格无关性验证

建立六套网格, 数量分别为 231001、525121、734514、866529、1048948 和 1160034。在固定工况下

(流速 10 m/s, 质量流量 0.01 kg/s, 粒径 250 μm)计算孔板最大冲蚀率, 结果如图 2 所示。综合考虑计算精度与成本, 选取 1048948 个单元的网格方案进行后续计算。

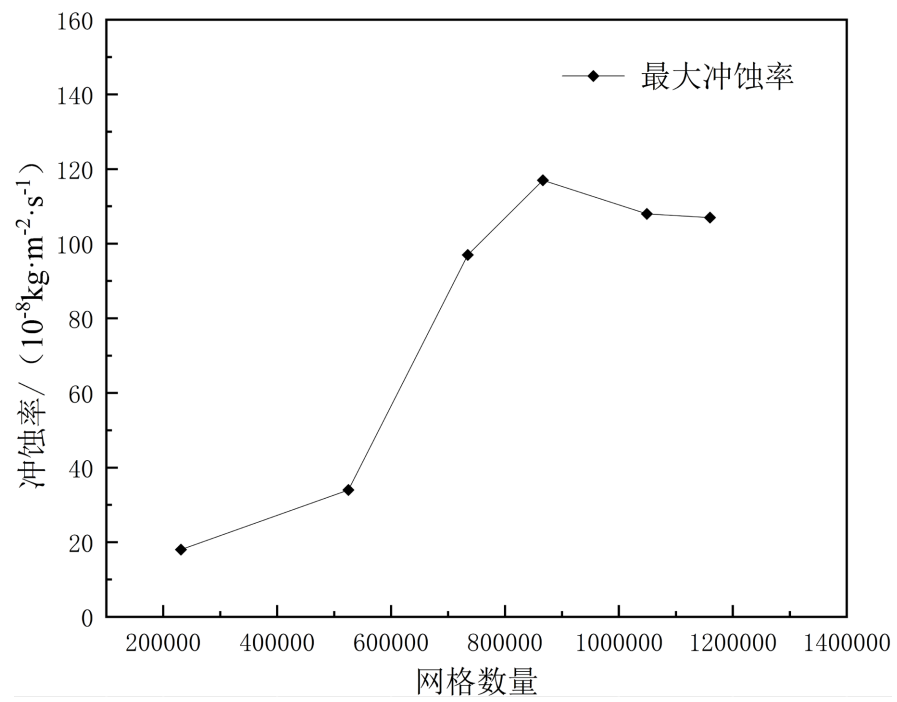


Figure 2. Grid independence verification
图 2. 网格无关性验证

3.5. 模型可行性

DPM 模型采用欧拉 - 拉格朗日方法, 能够精确模拟颗粒轨迹和相间相互作用, 更适用于实际工况。DPM 模型在数值模拟中成本低、计算效率高, 能够快速准确地获取研究对象的内部压力流场和颗粒信息。在气固两相流条件下, 其冲蚀计算具有较高的精度, 如表 2 所示。

Table 2. Errors between experimental and simulated data in gas-solid two-phase flow reported by previous researchers
表 2. 相关学者在气固两相流中实验与模拟数据误差

学者	离散相模型	研究对象	实验与数值模拟的误差
张晓彤[31]	DPM	弯管	4.01%
郑思佳[32]	DPM	弯管	23.3%
Veiskarami [33]	DPM	弯管	7.16%
彭文山[10]	DPM	弯管	5.35%
Yan [34]	DPM	闸阀	6.77%

4. 结果与讨论

4.1. 颗粒轨迹及主要冲蚀区域

图 3 展示了不同介质流速下孔板流量计内的颗粒轨迹云图, 图 4 为对应的轨迹示意图。由图可知,

在设定工况下, 孔板流量计内存在三种典型颗粒轨迹。当介质流速低于 10 m/s 时, 气体曳力不足以克服颗粒惯性及孔板下游涡流的干扰, 仅存在轨迹 2 和轨迹 3; 当流速达到或超过 10 m/s 时, 气相曳力增强, 部分颗粒可冲击孔板上半部分, 此时出现轨迹 1。

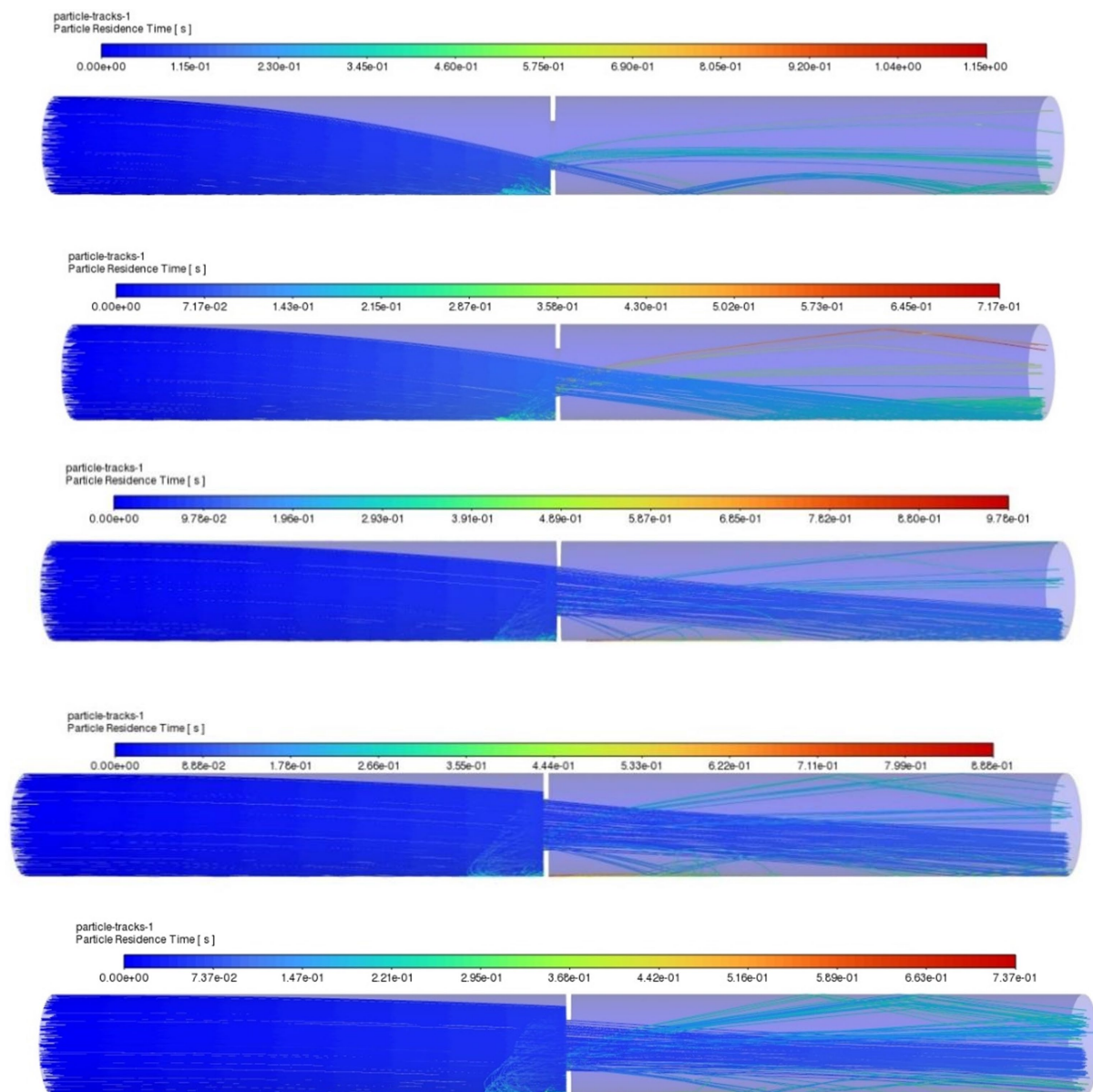


Figure 3. Particle trajectory contours
图 3. 颗粒轨迹云图

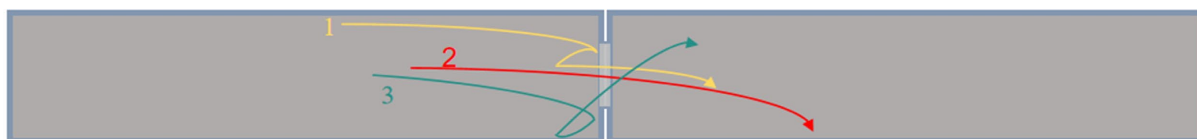


Figure 4. Schematic diagram of particle trajectories at the orifice
图 4. 孔板处颗粒轨迹示意图

进一步分析冲蚀云图可知, 关键冲蚀位置主要分布在孔板下游侧及冲蚀外轮廓区域, 这是由颗粒惯性撞击与下游涡流共同作用的结果。随着介质流速的增加, 气体曳力增强, 孔板处的冲蚀轮廓逐渐扩大, 冲蚀面积显著增大; 同时, 下游涡流强度随之提升, 关键冲蚀区域从孔板底部向下游轮廓的左右两侧扩展。上述颗粒轨迹与冲蚀区域的对应关系, 为后续各因素对冲蚀行为影响的分析提供了流动机理基础。

4.2. 质量流量对冲蚀的影响

在固定工况下(粒径 $250\ \mu\text{m}$ 球形颗粒, 介质流速 $10\ \text{m/s}$), 质量流量分别设为 0.001 、 0.005 、 0.01 、 0.015 和 $0.02\ \text{kg/s}$, 孔板关键冲蚀位置的冲蚀云图如图 5 所示, 最大冲蚀率和平均冲蚀率随质量流量的变化曲线如图 6 所示。

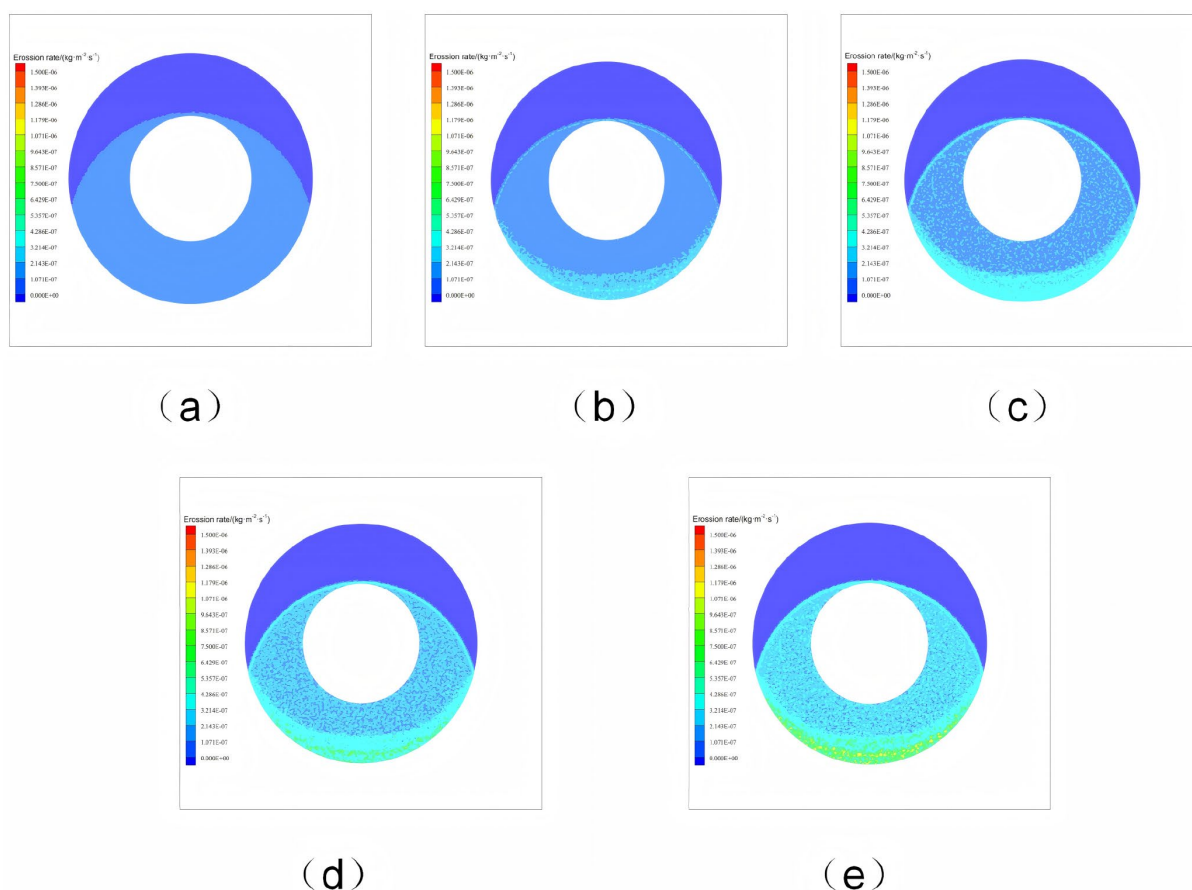


Figure 5. Erosion contours of the orifice plate under different particle mass flow rates, (a) $mp = 0.001\ \text{kg/s}$, (b) $mp = 0.005\ \text{kg/s}$, (c) $mp = 0.01\ \text{kg/s}$, (d) $mp = 0.015\ \text{kg/s}$, (e) $mp = 0.02\ \text{kg/s}$

图 5. 不同颗粒质量流量下孔板冲蚀云图, (a) $mp = 0.001\ \text{kg/s}$, (b) $mp = 0.005\ \text{kg/s}$, (c) $mp = 0.01\ \text{kg/s}$, (d) $mp = 0.015\ \text{kg/s}$, (e) $mp = 0.02\ \text{kg/s}$

由图 5 可知, 由于介质流速固定, 气相曳力在直管段维持不变。在重力与相同曳力的共同作用下, 不同质量流量下的冲蚀轮廓形态基本相似, 关键冲蚀位置均分布在孔板边缘、下游侧及冲蚀外轮廓。随着质量流量的增加, 孔板冲蚀轮廓处的最大冲蚀率显著提高, 下游侧冲蚀区域亦随之扩大。其机理在于: 质量流量越大, 单位时间内撞击孔板的颗粒数量越多, 碰撞频率增加导致冲蚀强度升高, 这一规律与弯头和喷嘴中的冲蚀结果一致[35]。

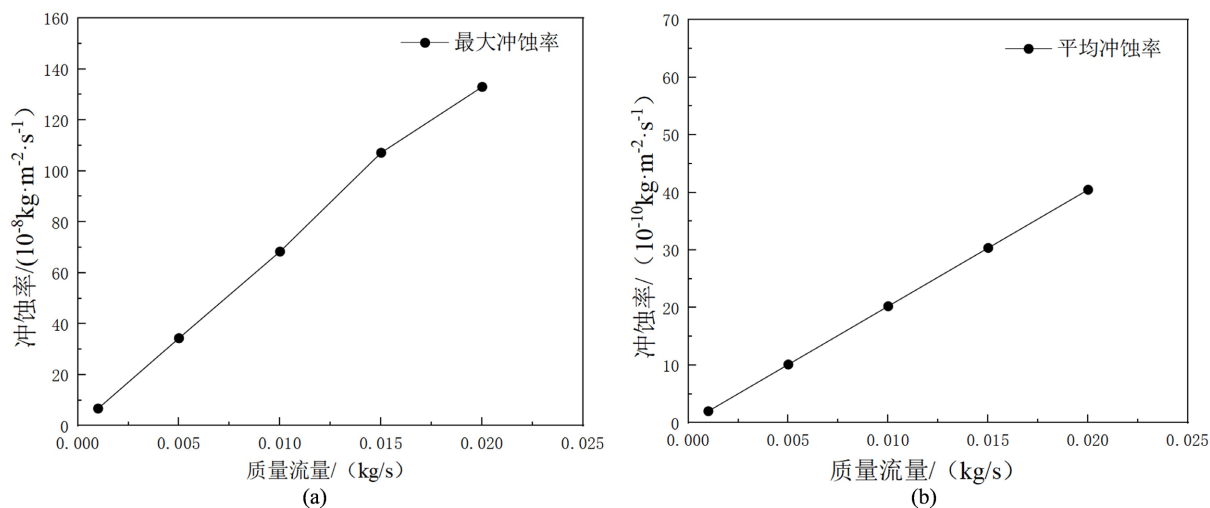


Figure 6. (a) Variation of maximum erosion rate with mass flow rate; (b) Variation of average erosion rate with mass flow rate

图 6. (a) 最大冲蚀率随质量流量变化曲线; (b) 平均冲蚀率随质量流量变化曲线

从图 6(a)和图 6(b)可以看出, 孔板处的最大冲蚀率和平均冲蚀率均随质量流量的增加而单调上升, 且两者增长趋势基本一致。当质量流量从 0.001 kg/s 增至 0.02 kg/s 时, 最大冲蚀率增加了 19.78 倍, 平均冲蚀率增加了 19.96 倍。

4.3. 介质流速对冲蚀的影响

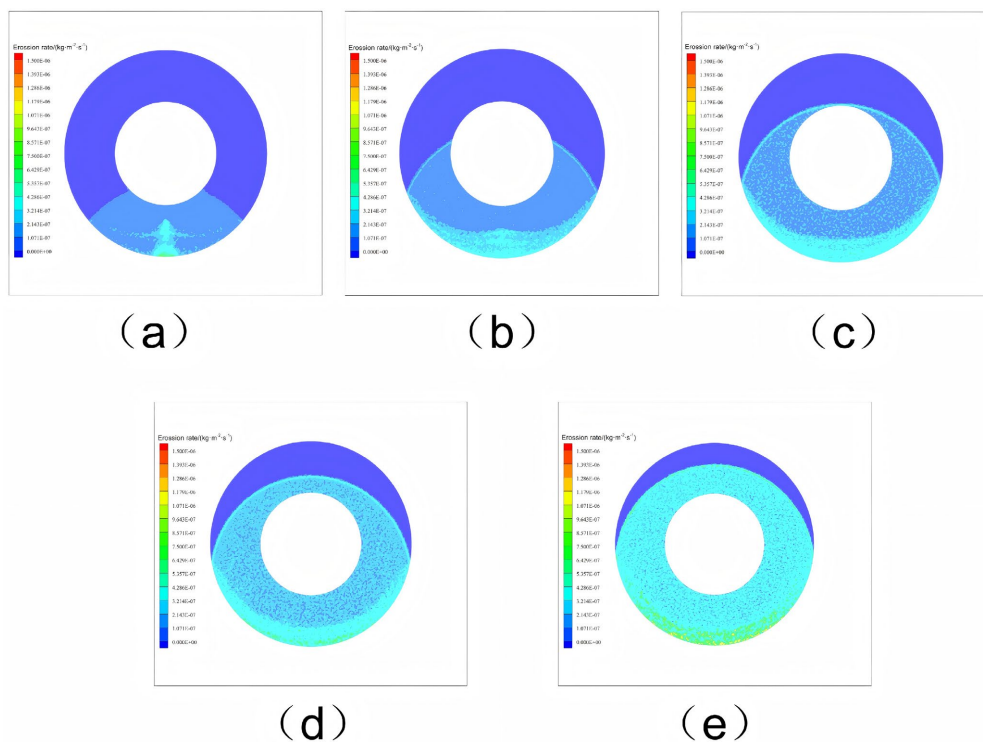


Figure 7. Erosion contours of the orifice plate under different medium flow velocities, (a) v = 6 m/s, (b) v = 8 m/s, (c) v = 10 m/s, (d) v = 12 m/s, (e) v = 15 m/s

图 7. 不同介质流速下孔板冲蚀云图, (a) v = 6 m/s, (b) v = 8 m/s, (c) v = 10 m/s, (d) v = 12 m/s, (e) v = 15 m/s

在固定工况下(粒径 $250\ \mu\text{m}$ 球形颗粒, 质量流量 $0.01\ \text{kg/s}$), 介质流速分别设为 6 、 8 、 10 、 12 和 $15\ \text{m/s}$, 孔板冲蚀云图如图 7 所示, 最大冲蚀率和平均冲蚀率随介质流速的变化曲线如图 8 所示。

由图 7 可知, 随着介质流速的增加, 气体对砂粒的曳力作用增强, 孔板处的冲蚀轮廓逐渐扩大, 冲蚀面积显著增大。关键冲蚀位置始终分布在孔板下游侧及冲蚀外轮廓, 但由于流速增加导致下游涡流强度提升, 关键冲蚀区域从孔板底部向下游轮廓的左右两侧扩散。

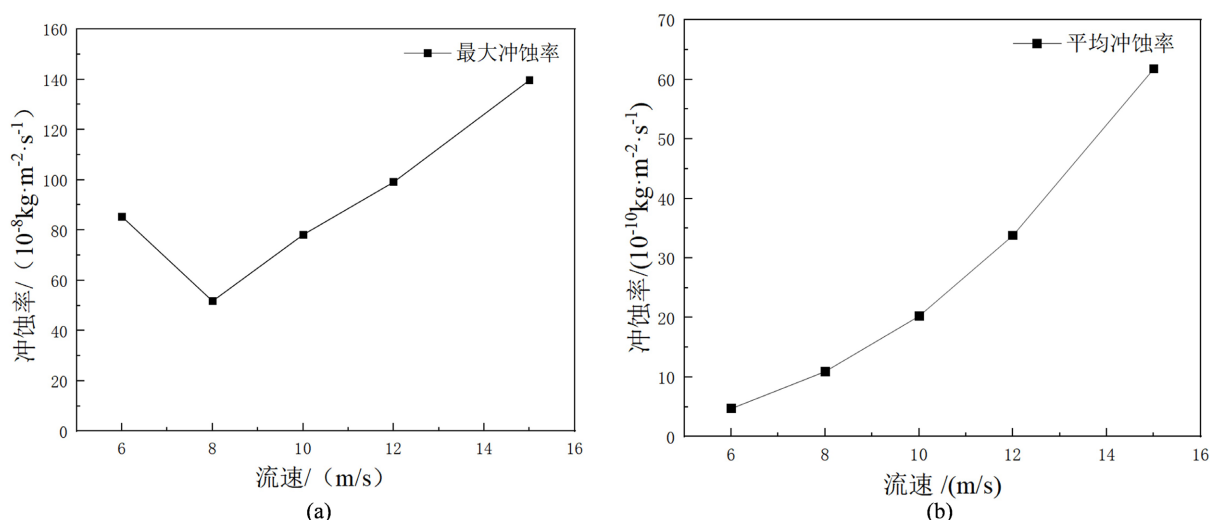


Figure 8. (a) Variation of maximum erosion rate with medium flow velocity, (b) Variation of average erosion rate with medium flow velocity

图 8. (a) 最大冲蚀率随介质流速变化曲线, (b) 平均冲蚀率随介质流速变化曲线

从图 8(a)可以看出, 孔板处的最大冲蚀率随流速增加先减小后增大。其原因为: 当流速为 $6\ \text{m/s}$ 时, 冲蚀轮廓集中于孔板下游小范围区域, 冲蚀效应集中导致最大冲蚀率偏高; 随着流速增加至 $8\sim 10\ \text{m/s}$, 冲蚀面积扩大, 单位面积冲蚀强度分散, 最大冲蚀率有所下降; 当流速进一步增至 $12\sim 15\ \text{m/s}$ 时, 颗粒动能大幅提升, 冲蚀强度显著增强, 最大冲蚀率随之快速上升。这与徐鑫等[36]在锥形管中得出的结论一致。从图 8(b)可以看出, 平均冲蚀率随流速增加单调上升, 从 6m/s 增至 15m/s 时增加了 13.09 倍, 表明平均冲蚀率能更稳定地反映整体冲蚀程度。

4.4. 粒径和形状因子对冲蚀的影响

在固定工况下(介质流速 $10\ \text{m/s}$, 质量流量 $0.01\ \text{kg/s}$), 分别考察粒径($100\sim 400\ \mu\text{m}$)和形状因子($0.3\sim 1.0$)对冲蚀行为的影响, 结果如图 9~图 10 所示。最大冲蚀率和平均冲蚀率随介质流速的变化曲线如图 11 和图 12 所示。

由图 9、图 10 可知, 不同粒径和形状因子下孔板冲蚀形态相近, 关键冲蚀区均位于孔板下游侧及外轮廓, 整体轮廓未显著改变, 主要因气相曳力与重力恒定, 颗粒受力状态未根本变化。图 11~图 12 表明, 粒径和形状因子对冲蚀率的影响程度显著低于质量流量和介质流速。粒径增大时, 最大、平均冲蚀率缓慢上升; 质量流量恒定时颗粒数随粒径增大而减少, 说明颗粒数固定时粒径越大冲蚀越强, 与孙小喆[37]一致, 粒径影响可能被其他因素掩盖。形状因子影响颗粒碰撞行为, 但低颗粒浓度下颗粒间作用较弱, 冲蚀率主要取决于单颗粒动能与碰撞频率, 形状因子贡献显著低于上述因素[38]; 最大冲蚀率在形状因子 0.8 时达峰值, 平均冲蚀率随形状因子由 0.3 增至 1 变化 13.7% 。总体看, 粒径和形状因子影响程度显著低于质量流量(增加 19.96 倍)和介质流速(增加 13.09 倍)。

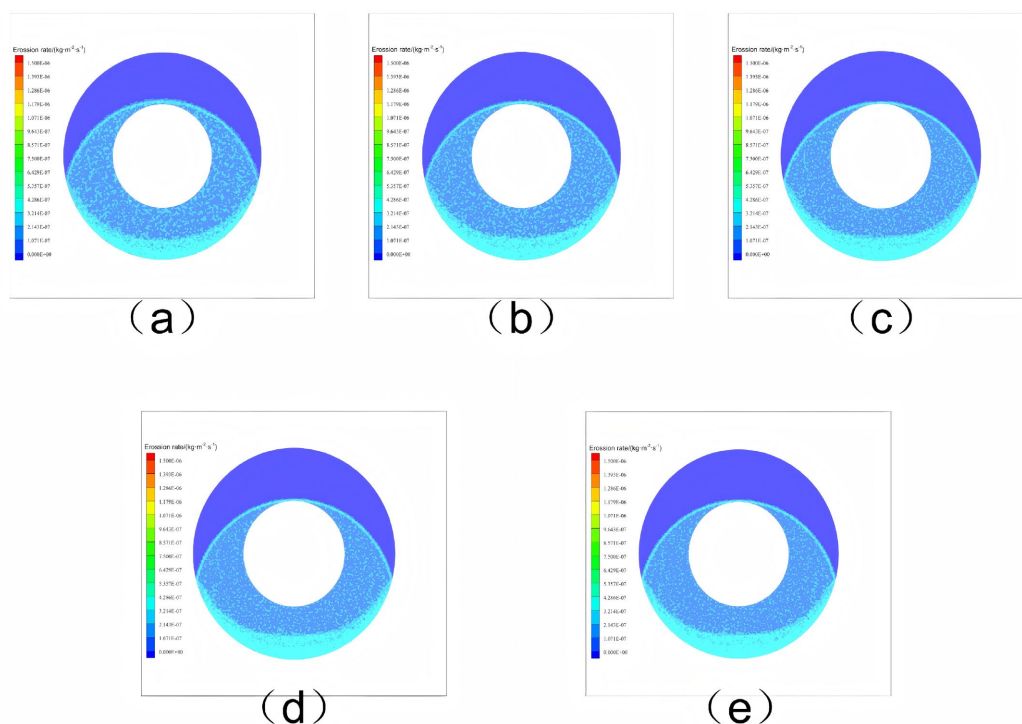


Figure 9. Erosion contours of the orifice plate under different particle sizes, (a) $dp = 100 \mu\text{m}$, (b) $dp = 150 \mu\text{m}$, (c) $dp = 250 \mu\text{m}$, (d) $dp = 350 \mu\text{m}$, (e) $dp = 400 \mu\text{m}$

图 9. 不同粒径下孔板冲蚀云图, (a) $dp = 100 \mu\text{m}$, (b) $dp = 150 \mu\text{m}$, (c) $dp = 250 \mu\text{m}$, (d) $dp = 350 \mu\text{m}$, (e) $dp = 400 \mu\text{m}$

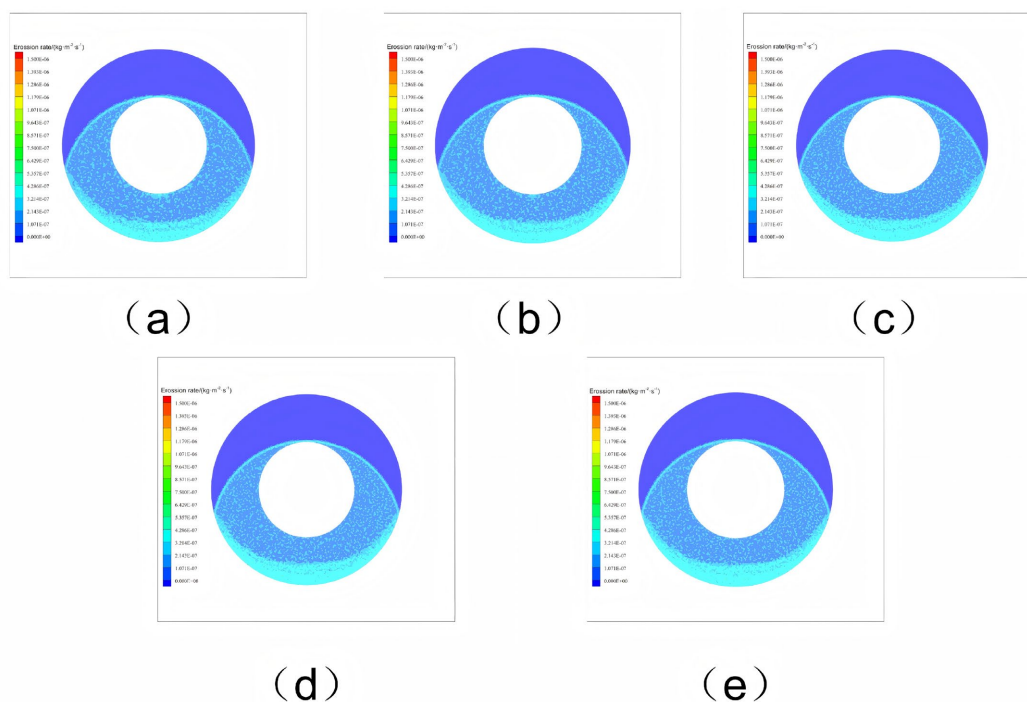


Figure 10. Erosion contours of the orifice plate under different particle shape factors, (a) shape factor = 0.3, (b) shape factor = 0.4, (c) shape factor = 0.6, (d) shape factor = 0.8, (e) shape factor = 1

图 10. 不同形状因子下孔板冲蚀云图, (a) 形状因子 = 0.3, (b) 形状因子 = 0.4, (c) 形状因子 = 0.6, (d) 形状因子 = 0.8, (e) 形状因子 = 1

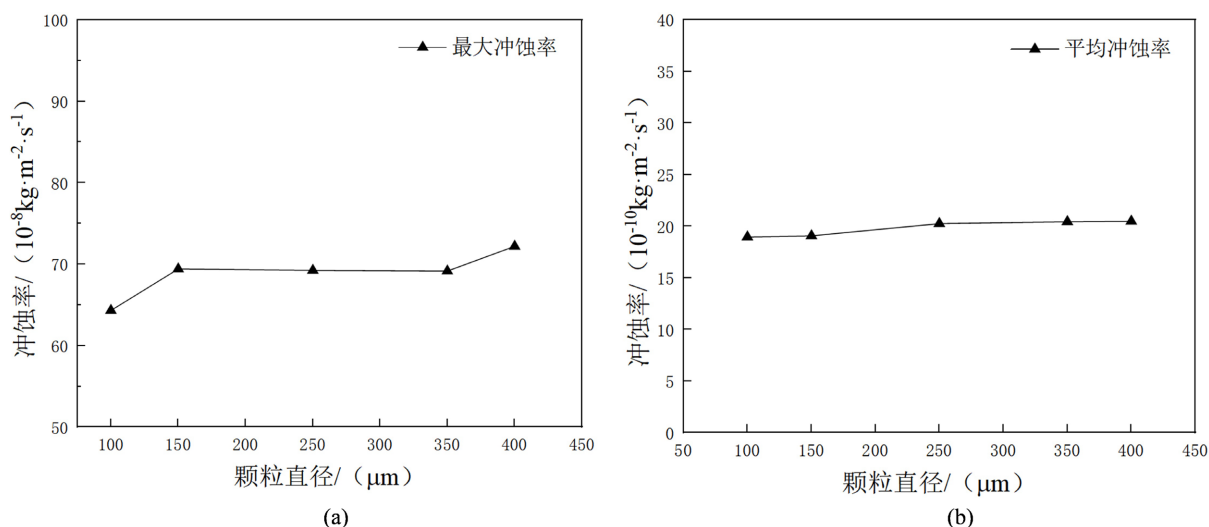


Figure 11. (a) Variation of maximum erosion rate with particle size, (b). Variation of average erosion rate with particle size
图 11. (a) 最大冲蚀率随粒径变化曲线, (b) 平均冲蚀率随粒径变化曲线

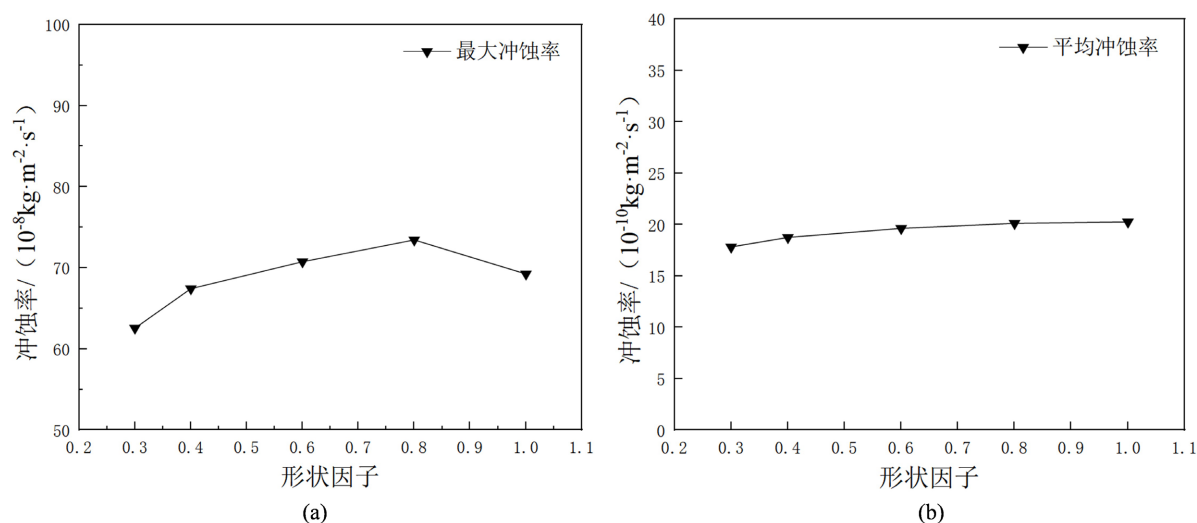


Figure 12. (a) Variation of maximum erosion rate with shape factor, (b). Variation of average erosion rate with shape factor
图 12. (a) 最大冲蚀率随形状因子变化曲线, (b) 平均冲蚀率随形状因子变化曲线

5. 结论

本文基于离散相模型(DPM), 采用 Fluent 软件对气固两相流条件下标准孔板流量计的冲蚀行为进行了数值模拟, 系统考察了颗粒质量流量、介质流速、粒径和形状因子四个关键因素对冲蚀规律的影响, 得出以下主要结论:

1) 介质流速是影响冲蚀形态的主导因素。随着流速增加, 气体对颗粒的曳力增强, 孔板下游涡流强度提升, 冲蚀轮廓逐渐扩大、冲蚀面积明显增大。相比之下, 质量流量(0.001~0.02 kg/s)、粒径(100~400 μm)和形状因子(0.3~1.0)的变化在选定的工况范围内未显著改变冲蚀轮廓的基本形态。在所有工况下, 关键冲蚀位置均集中在孔板边缘及下游侧, 该分布特征由颗粒惯性撞击与下游涡流共同决定。

2) 质量流量和介质流速是冲蚀速率的主控因素。当质量流量从 0.001 kg/s 增至 0.02 kg/s 时, 平均冲蚀率增加 19.96 倍; 当介质流速从 6 m/s 增至 15 m/s 时, 平均冲蚀率增加 13.09 倍。最大冲蚀率随质量流

量增加呈线性上升趋势, 而随流速增加呈先减后增的非单调变化——其拐点源于冲蚀区域由集中向分散再向高强度扩展的演化过程。粒径和形状因子的影响程度显著低于质量流量和介质流速, 平均冲蚀率分别变化 8.03% 和 13.63%。

3) 粒径和形状因子对冲蚀率的影响程度显著低于质量流量和介质流速, 工程中应优先控制介质流速和质量流量。当介质流速 ≥ 12 m/s 或质量流量 ≥ 0.015 kg/s 时, 冲蚀明显加剧, 需严格控制运行参数以延长设备寿命。

本研究基于固定颗粒密度、单一开孔比等条件对管道运输里的经典局部阻力构件孔板流量计的冲蚀规律进行了深入探讨。然而, 本研究仍存在一定的局限性, 仅考虑了固定的颗粒密度、单一开孔比及特定连续相。后续研究可在此基础上, 引入颗粒密度变化、开孔比变化以及更宽工况范围等变量, 更全面地反映实际工况中颗粒物性、孔板几何与操作参数耦合变化对冲蚀行为的影响。从而更真实地揭示管道运输里的经典局部阻力构件孔板流量计的冲蚀规律。

基金项目

重庆科技大学研究生创新计划项目(YKJCX2520831)。

参考文献

- [1] 宿航, 李瑞雪, 邓虎成, 等. 致密砂岩储层压裂效果地质-工程影响因素评价[J]. 石油实验地质, 2024, 46(6): 1349-1361.
- [2] 周小夏, 李根生, 马正超, 等. 干热岩柔性压裂裂缝起裂与扩展规律[J]. 石油勘探与开发: 英文版, 2024, 51(6): 1384-1394.
- [3] 谢奎, 曾小军, 王雷. 威远区块页岩气排采除砂工艺分析[J]. 钻采工艺, 2019, 42(4): 60-63.
- [4] Panda, J.N., Orquera, E.Y., Mohanty, A.A. and Egberts, P. (2021) Tribo-Corrosion Inhibition of AISI 4715 Steel Pipe Carrying Hydraulic Fracturing Fluid. *Tribology International*, **161**, Article ID: 107066. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107066>
- [5] Song, H., Liang, Z., Chen, Z. and Rahman, S.S. (2021) Numerical Modelling of Hydraulic Fracture Propagation in Poro-Viscoelastic Formation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **196**, Article ID: 107640. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107640>
- [6] 王勇, 郑鹤. 长宁页岩气区块集输站场风险评价技术研究[J]. 石油与天然气化工, 2021, 50(3): 134-138.
- [7] 李善建, 何浩轩, 王泽坤, 等. 气井井筒堵塞原因分析及解堵工艺研究进展[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2024, 39(1): 56-65.
- [8] Chen, X., McLaury, B.S. and Shirazi, S.A. (2004) Application and Experimental Validation of a Computational Fluid Dynamics (CFD)-Based Erosion Prediction Model in Elbows and Plugged Tees. *Computers & Fluids*, **33**, 1251-1272. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2004.02.003>
- [9] Pereira, G.C., de Souza, F.J. and de Moro Martins, D.A. (2014) Numerical Prediction of the Erosion Due to Particles in Elbows. *Powder Technology*, **261**, 105-117. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.04.033>
- [10] 彭文山. 含固体颗粒多相流弯管冲蚀机理研究[D]: [博士学位论文]. 东营: 中国石油大学(华东), 2017.
- [11] Khan, R., Wiczorowski, M., Seikh, A.H. and Alnaser, I.A. (2024) Experimental and Numerical Study of Erosive Wear of T-Pipes in Multiphase Flow. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, **52**, Article ID: 101683. <https://doi.org/10.1016/j.jestech.2024.101683>
- [12] 同武军, 王莹莹, 鞠少栋, 等. 笼套式水下节流阀冲蚀特性与寿命预测研究[J]. 表面技术, 2025, 54(5): 116-127.
- [13] Hong, B., Li, X., Li, Y., Li, Y., Yu, Y., Wang, Y., et al. (2021) Numerical Simulation of Elbow Erosion in Shale Gas Fields under Gas-Solid Two-Phase Flow. *Energies*, **14**, Article 3804. <https://doi.org/10.3390/en14133804>
- [14] Peng, W., Cao, X., Ma, L., Wang, P., Bian, J. and Lin, C. (2023) Sand Erosion Prediction Models for Two-Phase Flow Pipe Bends and Their Application in Gas-Liquid-Solid Multiphase Flow Erosion. *Powder Technology*, **421**, Article ID: 118421. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118421>
- [15] Biglari, F., Nadeem, A., Hasan, M., Parsi, M., Karimi, S., Vieira, R., et al. (2024) Effect of Pipe Size on Solid Particle Erosion of Elbow in Liquid-Solid Flow: Experimental and CFD Analysis. *ASME 2024 Fluids Engineering Division*

Summer Meeting Collocated with the ASME 2024 Heat Transfer Summer Conference and the ASME 2024 18th International Conference on Energy Sustainability, Anaheim, 15-17 July 2024, FEDSM2024-131003, V002T05A016.
<https://doi.org/10.1115/fedsm2024-131003>

- [16] 董刚. 材料冲蚀行为及机理研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江工业大学, 2004.
- [17] Liu, J., BaKeDaShi, W., Li, Z., Xu, Y., Ji, W., Zhang, C., *et al.* (2017) Effect of Flow Velocity on Erosion-Corrosion of 90-Degree Horizontal Elbow. *Wear*, **376**, 516-525. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.11.015>
- [18] Zhang, J.X., Bai, Y.Q., Kang, J. and Wu, X. (2017) Failure Analysis and Erosion Prediction of Tee Junction in Fracturing Operation. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **46**, 94-107. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.01.023>
- [19] Suryan, A., Kim, H.D. and Setoguchi, T. (2013) Numerical Analysis on Thermo-Fluid Dynamic Behavior of Hydrogen Gas during Fast High Pressure Filling. *Journal of Mechanical Science and Technology*, **27**, 567-573. <https://doi.org/10.1007/s12206-012-1233-6>
- [20] 王静, 李长俊, 吴瑕. 页岩气集输管道弯头气液固三相冲蚀磨损特性研究[J]. 石油机械, 2022, 50(9): 137-144.
- [21] 张继信, 樊建春, 张来斌, 等. 30CrMo 合金钢的冲蚀磨损性能研究[J]. 润滑与密封, 2012, 37(4): 15-18.
- [22] Forder, A., Thew, M. and Harrison, D. (1998) A Numerical Investigation of Solid Particle Erosion Experienced within Oilfield Control Valves. *Wear*, **216**, 184-193. [https://doi.org/10.1016/s0043-1648\(97\)00217-2](https://doi.org/10.1016/s0043-1648(97)00217-2)
- [23] Acar, D., Hussain Danesh, M. and Necati Cora, Ö. (2023) Effect of Process Parameters on the Solid Particle Erosion Resistance of Transparent Materials. *Tribology in Industry*, **45**, 604-617. <https://doi.org/10.24874/ti.1495.06.23.08>
- [24] 林楠. 输气管道中颗粒属性及流场作用对冲蚀磨损的影响研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [25] 张强, 郭爽, 任宪可, 等. 天然气携砂对缩扩管冲蚀磨损分析[J]. 天然气与石油, 2024, 42(3): 40-48.
- [26] 张矿生, 陈宝春, 吴勇, 等. 压裂液返排冲刷支撑剂颗粒的DEM-CFD模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2023, 44(4): 1009-1014.
- [27] 谢明, 唐永帆, 宋彬, 等. 页岩气集输系统的腐蚀评价与控制——以长宁-威远国家级页岩气示范区为例[J]. 天然气工业, 2020, 40(11): 127-134.
- [28] 吴猛. 长宁页岩气田地面集输与处理工艺方案研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2019.
- [29] Elghobashi, S. (1994) On Predicting Particle-Laden Turbulent Flows. *Applied Scientific Research*, **52**, 309-329. <https://doi.org/10.1007/bf00936835>
- [30] 张建平. 超音速火焰喷涂中气固两相流的数值模拟与研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [31] 张晓彤. 海上出砂气井筒冲蚀研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021.
- [32] 郑思佳. 气固两相流中采气管线关键易损件冲蚀特性研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2016.
- [33] Veiskarami, A. and Saidi, M. (2024) Numerical Analysis of Gas-Solid Flow Erosion in Different Geometries as Alternatives to a Standard Pipe Elbow. *Powder Technology*, **448**, Article ID: 120334. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.120334>
- [34] Yan, L., Ma, X., Miao, X., Wang, Y., Pang, Y. and Song, X. (2024) Numerical Investigation and Rapid Prediction of the Erosion Rate of Gate Valve in Gas-Solid Flow. *Powder Technology*, **448**, Article ID: 120285. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.120285>
- [35] 敬佳佳, 唐曦, 陈文斌, 等. 高产天然气井放喷管汇弯管冲蚀磨损特性研究[J]. 表面技术, 2021, 50(12): 329-339.
- [36] 徐鑫, 吴玉国, 孙岩. 颗粒属性对输气管道渐缩管冲蚀磨损的仿真预测[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2020, 40(3): 45-51.
- [37] 孙小喆. 气固两相流管道冲蚀安全判定边界研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.
- [38] Tang, G.A.T.K., Foo, H.C.Y., Tan, I.S., Yeong, Y.F. and Lam, M.K. (2020) Influence of Flow Limiter and Grain Shape Factor of Sand Particles on Erosion Activity in Pipeline. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **943**, Article ID: 012024. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/943/1/012024>