

双入口条件互异对三通冲蚀影响数值模拟研究

付文聪

成都理工大学能源学院(页岩气现代产业学院), 四川 成都

收稿日期: 2025年9月29日; 录用日期: 2025年11月26日; 发布日期: 2025年12月9日

摘要

为研究分析天然气输送过程中三通管“两进一出”工况下入口条件互异对三通管的冲蚀影响, 基于混合物多相流模型和离散相模型, 研究了三通管中气-液-固三相的流动, 结合E/CRC冲蚀模型, 分析了入口速度、入口液相体积分数和管径互异对三通管冲蚀的影响。结果表明: 主管和支管入口流速差异影响了流场主导模式, 从而改变了冲蚀形态和冲蚀速率的变化趋势; 主管和支管入口液相体积分数差异改变了下壁面高速区域的流速, 导致随着支管入口液相体积分数增加, 冲蚀形态由椭圆向钟形扩展, 并使冲蚀速率随之增加; 主管和支管管径差异改变了三通管下壁面高速区域的流速和颗粒分散程度, 导致随着支管管径逐渐增大, 呈现出“冲蚀面积增大-冲蚀速率降低”的逆向关系。可见主管和支管入口条件互异会改变三通管流场分布, 从而影响三通管冲蚀部位、冲蚀形状和冲蚀速率。

关键词

三通管, 天然气管道, 冲蚀, 数值模拟

Numerical Simulation Study on Erosion Effects of Differential Dual Inlet Conditions in Tee Pipes

Wencong Fu

College of Energy (Modern Shale Gas Industry College), Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan

Received: September 29, 2025; accepted: November 26, 2025; published: December 9, 2025

Abstract

To investigate the erosion effects caused by differential inlet conditions in tee pipes under the “two-inlet-one-outlet” configuration during natural gas transportation, this study analyzed gas-liquid-solid three-phase flow in tee pipes using the mixture multiphase flow model and discrete phase

model (DPM), combined with the E/CRC erosion model. The impacts of inlet velocity differences, liquid-phase volume fraction variations, and diameter discrepancies between the main and branch pipes on erosion were systematically examined. The results demonstrate that: Velocity differences between the main and branch pipes alter flow field dominance patterns, consequently modifying erosion morphology and rate trends. Liquid-phase volume fraction variations between inlets change flow velocity in high-speed regions along the lower wall surface. As the branch pipe's liquid-phase volume fraction increases, the erosion morphology expands from elliptical to bell-shaped, accompanied by increased erosion rates. Diameter discrepancies between pipes affect both flow velocity in high-speed regions and particle dispersion on the lower wall. With increasing branch pipe diameter, an inverse relationship emerges: expanded erosion areas coincide with reduced erosion rates. These findings reveal that differential inlet conditions between main and branch pipes significantly modify flow field distribution in tee pipes, ultimately influencing erosion location, morphology, and rate characteristics.

Keywords

Tee Pipe, Natural Gas Pipeline, Erosion, Numerical Simulation

Copyright © 2025 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

气井出砂是气藏开发过程中一种常见的现象[1],在气井出砂过程中砂粒会冲刷地面天然气输送管线,造成管线磨损甚至刺漏失效[2]。三通管作为天然气管道系统的重要部位,由于流体交汇和流向变化,易受到固体颗粒的冲蚀[3]-[8]。因此,有必要对三通管件的冲蚀规律进行研究,目前针对三通管件的冲蚀规律研究主要采用冲蚀理论分析、实验验证和数值模拟方法进行研究。钱东良等[9]通过建立 CFD 仿真模型,对三通管在不同流向及安装位置下的冲蚀破坏位置进行了分析,研究发现,三通管件的两侧壁面及迎流壁面是冲蚀易发区域,同时,部分沉积于管道底部的砂粒也会对管壁造成一定程度的冲蚀。许留云等[10]采用 DPM 模型对催化裂化油浆、水、柴油和汽油等四种不同流体介质在三通管中的冲蚀磨损进行了数值模拟研究,研究结果表明,流体粘度与密度比值的平方根与流体对管道的冲蚀磨损速率呈正比关系。Hong 等[11]采用 CFD-DEM 耦合方法,研究了重力方向、输送参数以及颗粒性质对三通管接头处冲蚀分布的影响,研究结果显示,重力方向对截面速度分布具有显著影响,特别是在高流速和高颗粒浓度条件下,磨损率最大的区域位于支管内,距离三通连接处约为管径的四分之三处。Zhao 等[12]通过采用流动回路系统研究了液固两相流中盲三通管的冲蚀现象,并结合样品表面形貌及颗粒冲击行为的分析,探讨了其冲蚀破坏机制,研究表明,在实验条件下,颗粒能够随二次流动冲击下游管道的内部,当颗粒粒径增大或液体流速提高时,颗粒在惯性力的作用下会开始对管道外部产生冲蚀,由于颗粒以低角度撞击管壁,其冲蚀破坏机制主要表现为微切削作用。李美求[13]基于冲蚀环境中的表面形貌建立仿生三通物理模型,并利用 Fluent 和 ANSYS 软件研究光滑内壁与局部仿生形貌 T 型三通的耐冲蚀性能,结果表明,仿生形貌能显著提升 T 型三通的耐冲蚀性能,其中横槽效果最佳,点坑最差,纵槽居中,仿生形貌对出口平均流速影响较小,且与相贯区域保持适当距离时,不会显著削弱疲劳寿命,同时增强了结构的耐冲蚀能力。祝效华等[14]基于两相流颗粒冲蚀理论建立三通冲蚀数值计算模型,预测了三通易发生冲蚀磨损的部位,并研究了方位夹角、流体入口流量、固相颗粒体积分数、颗粒直径和流体密度对三通冲蚀速率

的影响，结果表明，Y型三通和歧型三通的最大冲蚀均发生在支管与主管的相贯线上，两种三通的最大冲蚀速率随入口流量和颗粒体积分数增加而增大，随颗粒直径增加而减小，Y型三通的最大冲蚀速率随空间夹角和压裂液密度增加而增大，而歧型三通在夹角60°时冲蚀最严重，且流体密度影响较小。

综上，前人对于三通管件的流场分布和冲蚀规律进行了大量研究并得出了相关结论，但是对于三通管“两进一出”工况下，两个入口条件彼此不同时三通管的冲蚀规律研究较少。事实上，天然气输送过程中，三通管两个入口的条件存在一定差异，这对于冲蚀分布和冲蚀速率存在一定影响。因此，本文基于混合物多相流模型和离散相模型，采用流体力学软件对三通管内的气-液-固三相流体流动进行仿真模拟，采用E/CRC冲蚀模型计算冲蚀速率，分析了分支管和主管一侧流入，主管另一侧流出工况下，两个入口流体速度、液相体积分数和管径互异对冲蚀结果的影响，为三通管冲蚀预测和天然气管道安全运行提供了理论基础。

2. 数学模型

在天然气输送过程中管道中的流体包括天然气、少量的水、固体砂粒颗粒三相，且流体流动属于高雷诺数条件下的湍流[15]，根据管道中多相流动特性，将气体和液体视为连续相，将固体砂粒颗粒视为离散相。故三通管中气、水混合物携砂冲蚀管壁的计算模型应该包括混合物多相流模型、湍流模型、砂粒颗粒离散相模型、冲蚀模型。

2.1. 混合物多相流模型

混合物多相流模型包括连续性方程、动量方程和能量方程[16]。

连续性方程为：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{u}_m) = 0 \quad (1)$$

$$\mathbf{u}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k}{\rho_m} \quad (2)$$

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (3)$$

式中：t为时间，s； ρ_m 为混合物密度，kg/m³； \mathbf{u}_m 为混合物平均速度，m/s； α_k 为k相的体积分数，无量纲； ρ_k 为k相的密度，kg/m³； \mathbf{u}_k 为k相的速度，m/s。

动量方程为：

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \mathbf{u}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{u}_m \mathbf{u}_m) &= -\nabla p + \nabla \cdot \mu_m \left[(\nabla \mathbf{u}_m + \nabla \mathbf{u}_m^\top) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{u}_m I \right] \\ &+ \rho_m \mathbf{g} + \mathbf{F} - \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \mathbf{u}_{dr,k} \mathbf{u}_{dr,k} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k \quad (5)$$

$$\mathbf{v}_{dr,k} = \mathbf{u}_k - \mathbf{u}_m \quad (6)$$

式中：p为压力，Pa； μ_m 为混合物粘度，Pa·s；I为单位向量，无量纲； \mathbf{g} 为重力加速度，m/s²； \mathbf{F} 为体积力，N/m³； $\mathbf{u}_{dr,k}$ 为k相漂移速度，m/s； μ_k 为k相粘度，Pa·s。

能量方程为：

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k E_k) + \nabla \cdot \sum_{k=1}^n [\alpha_k \mathbf{u}_k (\rho_k E_k + p)] = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_E \quad (7)$$

式(7)中: E_k 为 k 相的比能量, J/kg; k_{eff} 为有效导热系数, W/(m·K); T 为温度, K; S_E 为体积热源, J。

2.2. 湍流模型

结合实际流体流动情况, 选取 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型, RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型相比于标准 $k-\varepsilon$ 模型, 加入了湍流漩涡的影响作用, 更全面地描述流动中的湍流结构[17]。

RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型为:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (9)$$

式中: k 为湍动能, J; ρ 为连续相密度, kg/m³; u_i 为流速第 i 个分量, m/s; μ_{eff} 为有效粘度, Pa·s; α_k 和 α_ε 分别为 k 和 ε 的普朗特常数, 无量纲; G_k 为由平均速度梯度所产生的湍流动能; G_b 为由浮力影响所产生的湍流动能; ε 为湍流耗散率, 无量纲; Y_M 代表可压缩湍流中脉动膨胀对总耗散率的影响; S_k 、 S_ε 为源项; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 和 $C_{3\varepsilon}$ 为常数, 无量纲; R_ε 为修正项。

2.3. 砂粒颗粒离散相模型

在砂粒随流体冲蚀管壁的过程中, 通过在拉格朗日参考系下对颗粒上的力平衡进行积分[18], 来预测离散相砂粒的运动轨迹, 得到砂粒的离散方程为:

$$m_p \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = m_p \frac{\mathbf{u} - \mathbf{u}_p}{\tau_r} + m_p \frac{\mathbf{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \mathbf{F} \quad (10)$$

$$\tau_r = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \frac{24}{C_d R_e} \quad (11)$$

$$R_e = \frac{\rho d_p |\mathbf{u}_p - \mathbf{u}|}{\mu} \quad (12)$$

式中: m_p 为颗粒质量, kg; \mathbf{u} 为流体相速度, m/s; \mathbf{u}_p 为颗粒速度, m/s; τ_r 为松弛时间, s; ρ_p 为颗粒密度, kg/m³; ρ 为流体密度, kg/m³; \mathbf{F} 为附加力, N; μ 表示流体粘度, Pa·s; C_d 为曳力系数, 无量纲; R_e 为相对雷诺数, 无量纲; d_p 为颗粒直径, m。

2.4. 冲蚀模型

管壁的冲蚀结果与砂粒的性质、碰撞角度与管壁材料等因素有关, 考虑以上因素建立冲蚀模型[19], 如下式所示:

$$ER = \sum_{p=1}^N \frac{m_p C(d_p) f(\gamma) \mathbf{u}_p^{b(u)}}{A} \quad (13)$$

$$1.559e^{-6} B^{-0.59} F_s = C(d_p) \quad (14)$$

式中: ER 为冲蚀速率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; m_p 为颗粒质量, kg ; $C(d_p)$ 为粒径函数; $f(\gamma)$ 为颗粒冲击角函数; A 为壁上单元面的面积, m^2 ; $b(u)$ 为颗粒相对速度的函数; B 为布氏硬度, MPa ; F_s 为颗粒形状系数, 无量纲; γ 为颗粒冲击角, rad 。

3. 数值模型

3.1. 几何模型

三通主要分为 T 型、歧型和 Y 型三种类型, 本文重点针对 T 型三通进行模拟分析。T 型三通管的几何模型如图 1 所示, 其中管直径 $D = 100 \text{ mm}$, 为使流动充分发展, 主管长度 $L_1 = 3000 \text{ mm}$, 分支管长度 $L_2 = 1500 \text{ mm}$ 。天然气和水的混合物从主管左侧入口 1 和分支管入口 2 流入, 从主管段右侧出口流出。重点考虑入口 2 处流入的砂粒对管壁的冲蚀影响, 而入口 1 处则不引入砂粒颗粒, 在入口 2 处进行砂粒颗粒的添加。

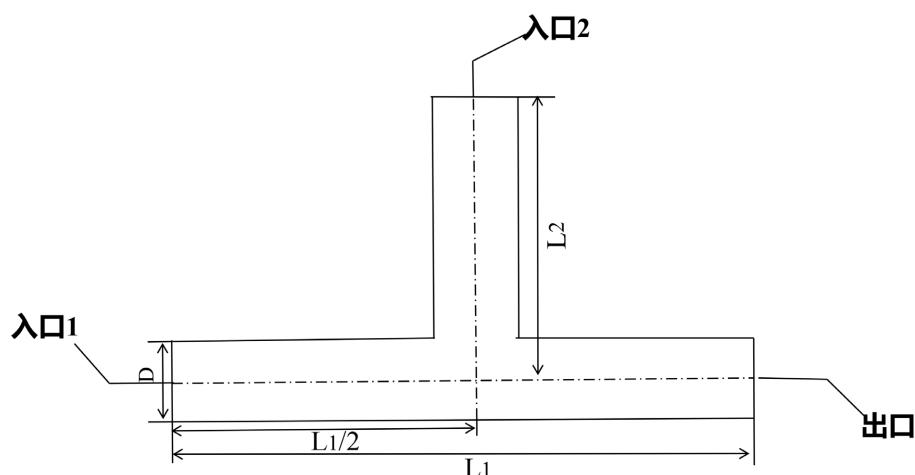


Figure 1. Geometric model of the tee pipe

图 1. 三通管几何模型

3.2. 网格划分与无关性分析

对几何模型采用四面体网格和棱柱网格进行网格划分, 并采用金字塔网格进行过渡, 边界层划分 5 层, 厚度调节因子为 2.5, 狹窄区域分辨率为 0.7, 如图 2 所示。为减少网格数量对模拟结果的影响, 提高计算精度, 以最大冲蚀速率为指标进行网格无关性分析, 如图 3 所示。分析结果表明, 当网格数量大于 15 万时, 计算结果相对稳定, 综合考虑计算精度和计算效率选择网格数量为 166,764 的网格。

3.3. 模型参数及边界条件设置

在模拟过程中, 湍流模型选用 RNG $k-\varepsilon$ 模型, 流体为气液混合物, 气相为甲烷, 密度为 0.6679 kg/m^3 , 液相为水, 密度为 998.2 kg/m^3 。采用 Coupled 算法进行压力与速度耦合计算, 多相流模型中, 入口为速度入口, 液相与气相入口速度相同, 液相均匀分散于气相中, 忽略水气间相间作用力, 将流体视为气液混合的单相流体, 两相共享同一压力场和速度场, 并忽略相对滑移速度, 出口为压力出口, 壁面无滑移。通过 DPM 模型追踪颗粒运动, 固体颗粒形状系数为 0.2, 密度为 2500 kg/m^3 , 粒径为 $200 \mu\text{m}$, 颗粒质量流量为 0.03 kg/s , 从入口 2 表面法向射入, 速度和气水混合物的入口速度相同, 管壁为合金钢, 密度为 7860 kg/m^3 , 壁面条件为反弹, 出口边界条件为消失, 湍流弥散模型选择离散随机游走模型。

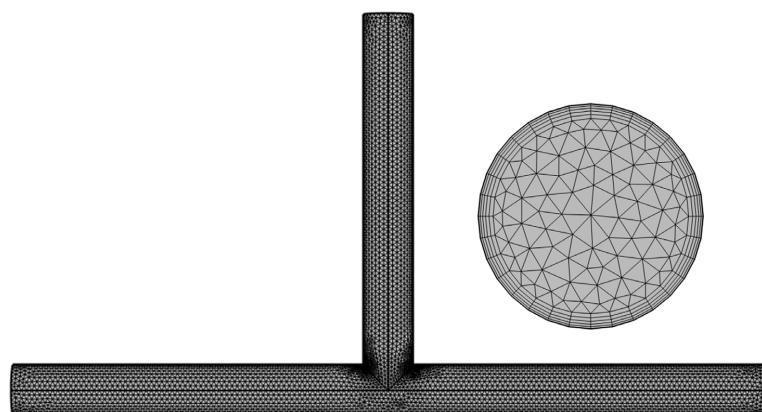
**Figure 2.** Mesh generation

图 2. 网格划分

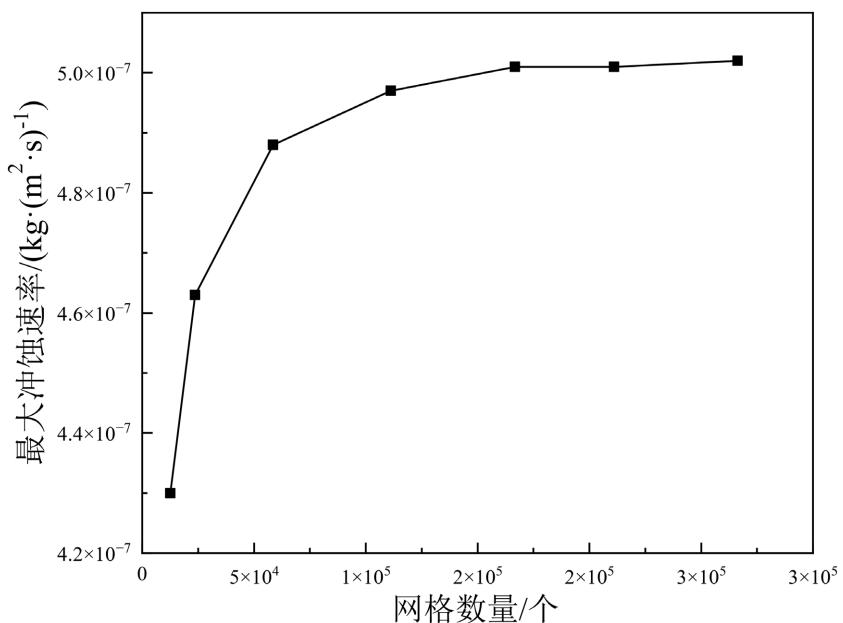
**Figure 3.** Grid independence analysis

图 3. 网格无关性分析

4. 数值模拟结果与分析

4.1. 入口速度互异三通冲蚀特征分析

固定主管入口速度为 8 m/s、主管和支管入口液相体积分数均为 6%，出口压力及其他条件保持不变，分别设置支管入口的速度为 1~12 m/s 共 12 组工况观察对比三通冲蚀结果。如图 4 所示，冲蚀主要发生在主管下管壁处。当支管入口流速较低时(1 m/s)，冲蚀部位距离三通管交汇处较远，冲蚀形状呈现不规则特征；分析其对应的流场如图 5 所示，发现此时交汇处的流场主要受主管入口水平方向流场的影响，主管下壁面高速流动区域较大，砂粒颗粒能够被带到距离交汇点较远的位置。随着支管入口流速的逐渐增大(2~4 m/s)，冲蚀部位逐渐靠近三通交汇处，冲蚀形状由不规则变为锥形，且锥形尖端逐渐缩小；在流场中表现为主管上部的二次流动低速区域[20]开始增大，而主管下壁面的高速流动区域逐渐减小。进一步增大支管入口流速(5~12 m/s)时，冲蚀部位进一步向交汇处靠拢，冲蚀形状由锥形逐渐演变为“钟形”，

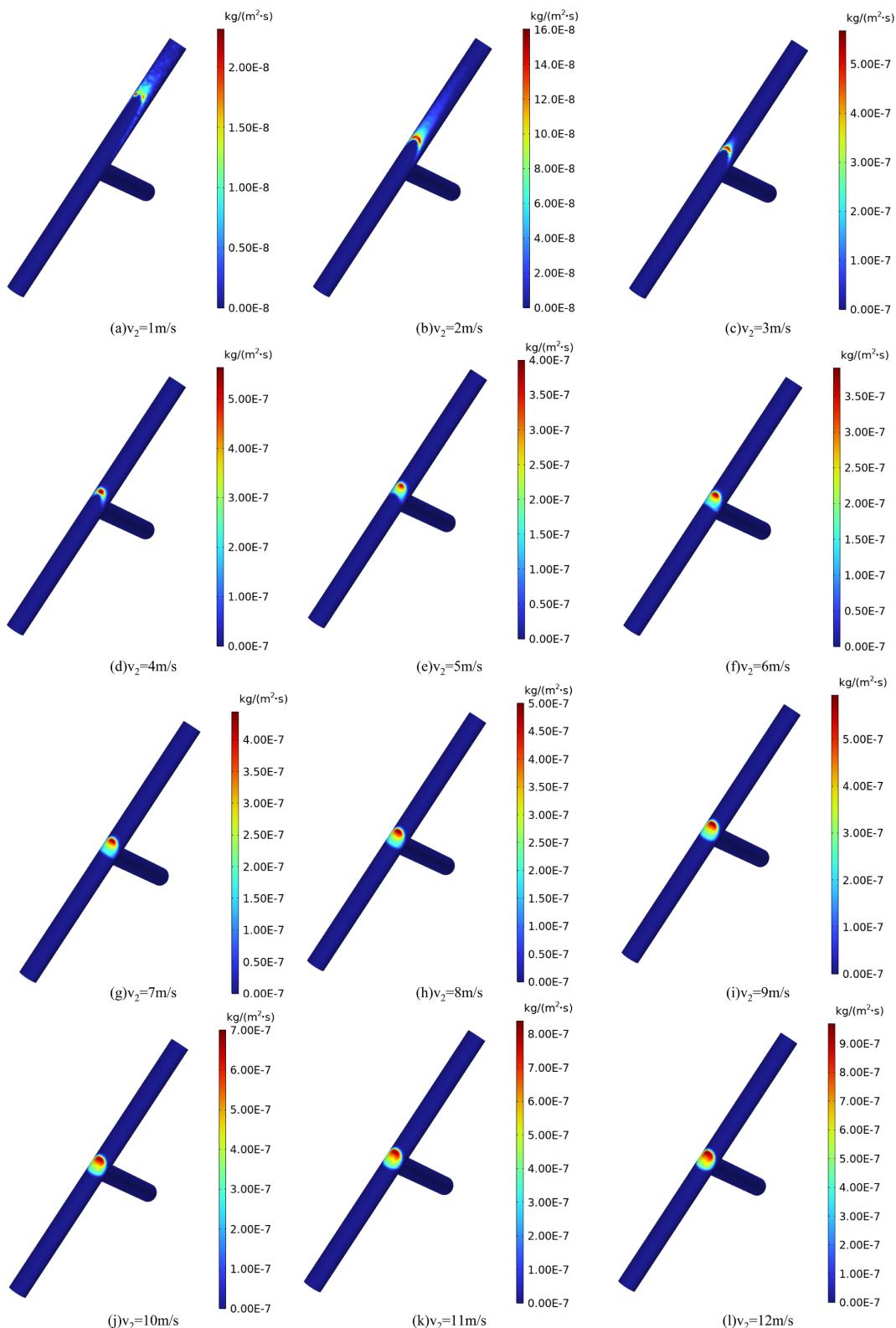


Figure 4. Erosion contour map of the tee pipe with a fixed main pipe inlet velocity of 8 m/s and varying branch pipe inlet velocities

图 4. 固定主管入口速度为 8 m/s, 不同支管入口速度下三通冲蚀云图

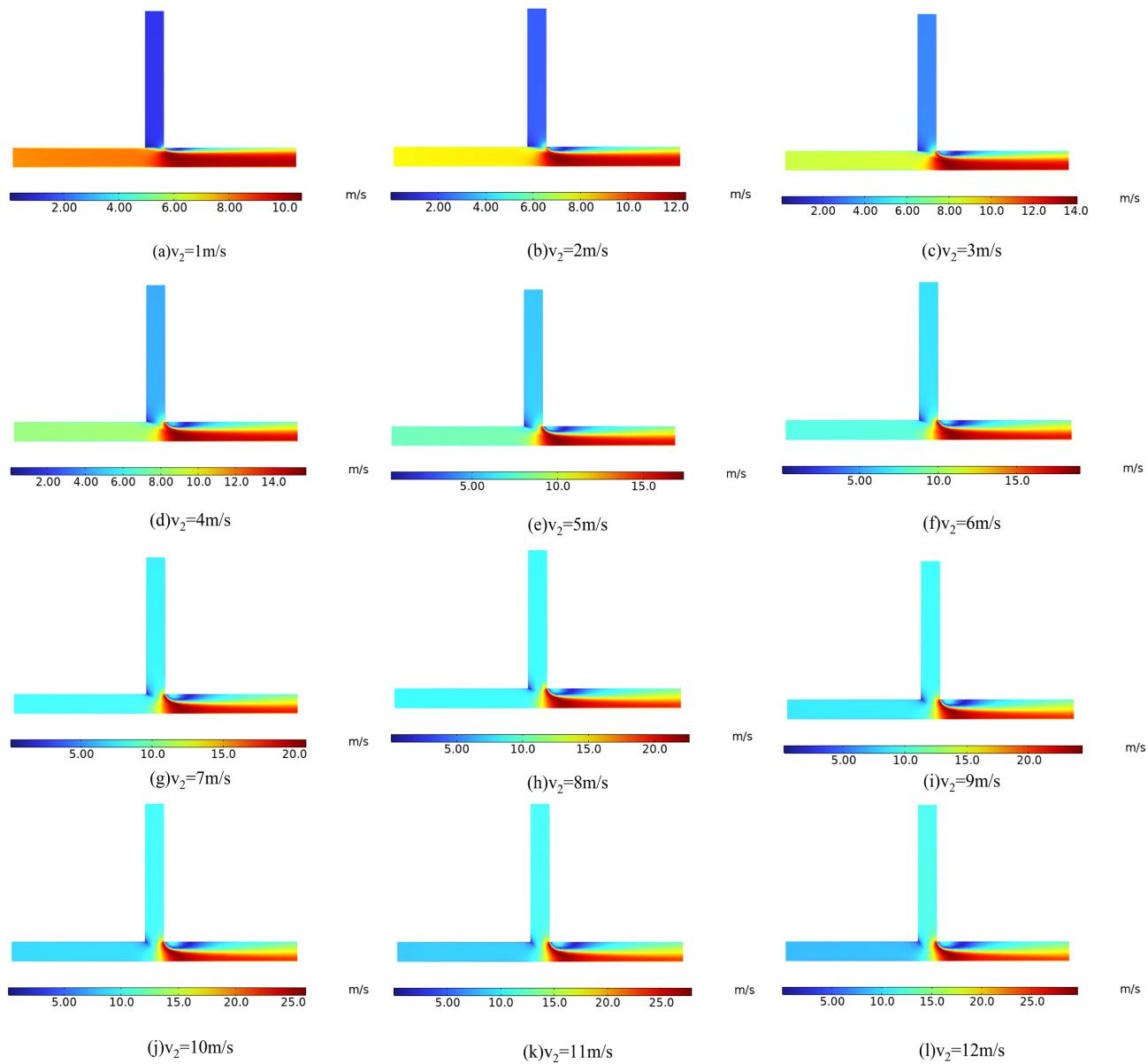


Figure 5. Flow field characteristics of the tee pipe with a fixed main pipe inlet velocity of 8 m/s and varying branch pipe inlet velocities
图 5. 固定主管入口速度为 8 m/s，不同支管入口速度下三通流场特征

最终呈现椭圆形；交汇处的流场逐渐由支管入口垂直方向流场的影响主导，主管上部的低速区域显著扩展，而主管下壁面的高速流动区域明显缩减，砂粒颗粒的运移距离变短。

图 6~8 分别为不同支管入口速度下颗粒的最大冲蚀速率变化、冲击角分布和颗粒的冲击速度分布。随着支管入口速度增大，冲蚀速率先增大后减小再增大。当支管入口速度由 1 m/s 增加到 4 m/s 时，与管壁碰撞的颗粒数目逐渐增加，颗粒的冲击角逐渐增大，颗粒冲击速度增加且颗粒冲击速度分布更加集中，冲蚀面积减小，冲蚀速率增大；当支管入口速度由 5 m/s 增加到 6 m/s 时，颗粒冲击角呈增大趋势，较多颗粒冲击角位于冲击角极大值附近，颗粒冲击速度变化不大但颗粒冲击速度分布更为分散，冲蚀面积增大，冲蚀速率呈现出减小趋势；当支管入口速度由 7 m/s 增加到 12 m/s 时，颗粒的冲击角逐渐增大，颗粒冲击速度增大，冲蚀速率增大。

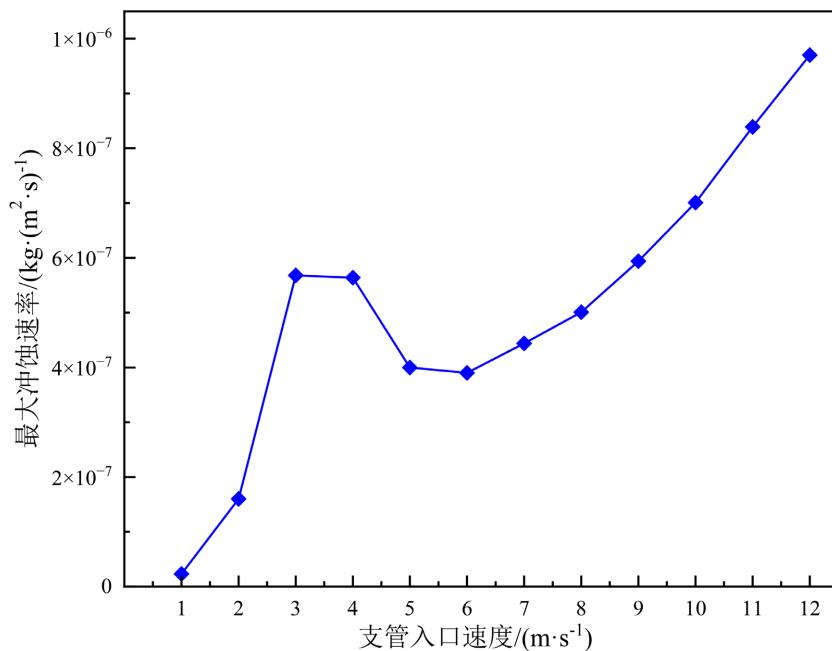


Figure 6. Variation of maximum erosion rate in the tee pipe with a fixed main pipe inlet velocity of 8 m/s and varying branch pipe inlet velocities

图 6. 固定主管入口速度为 8 m/s, 不同支管入口速度下最大冲蚀速率变化

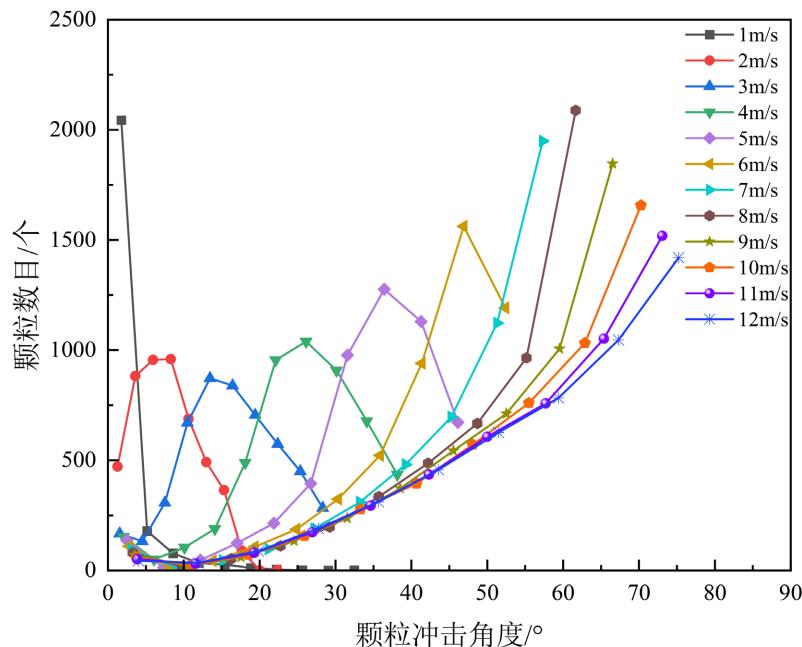


Figure 7. Particle impact angle distribution in the tee pipe with a fixed main pipe inlet velocity of 8 m/s and varying branch pipe inlet velocities

图 7. 固定主管入口速度为 8 m/s, 不同支管入口速度下颗粒冲击角分布

4.2. 入口液相体积分数互异三通冲蚀特征分析

固定主管入口液相体积分数为 6%、主管和支管入口速度均为 8 m/s, 出口压力及其他条件保持不变, 分别设置支管入口的液相体积分数为 2%、4%、6%、8%、10%、12% 观察对比三通冲蚀结果。如图 9

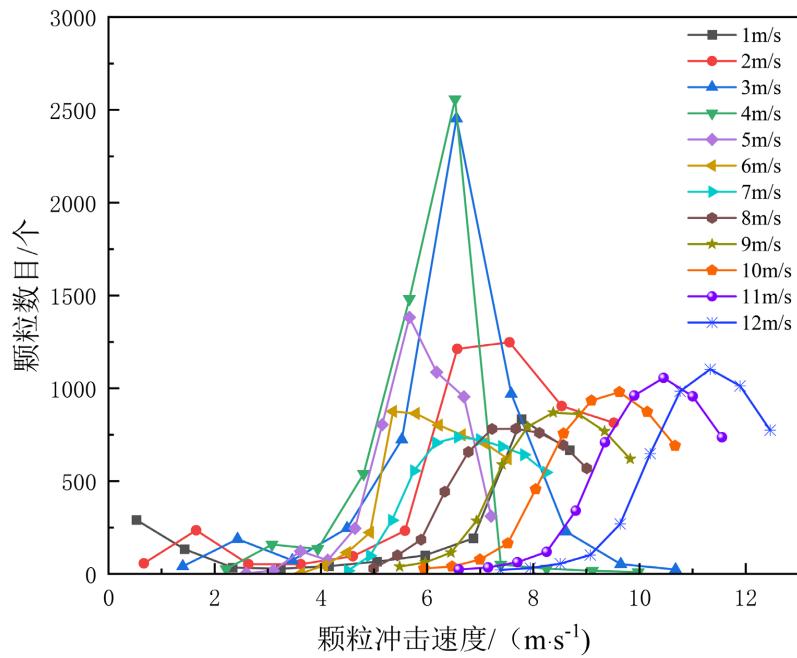


Figure 8. Particle impact velocity distribution in the tee pipe with a fixed main pipe inlet velocity of 8 m/s and varying branch pipe inlet velocities

图 8. 固定主管入口速度为 8 m/s, 不同支管入口速度下颗粒冲击速度分布

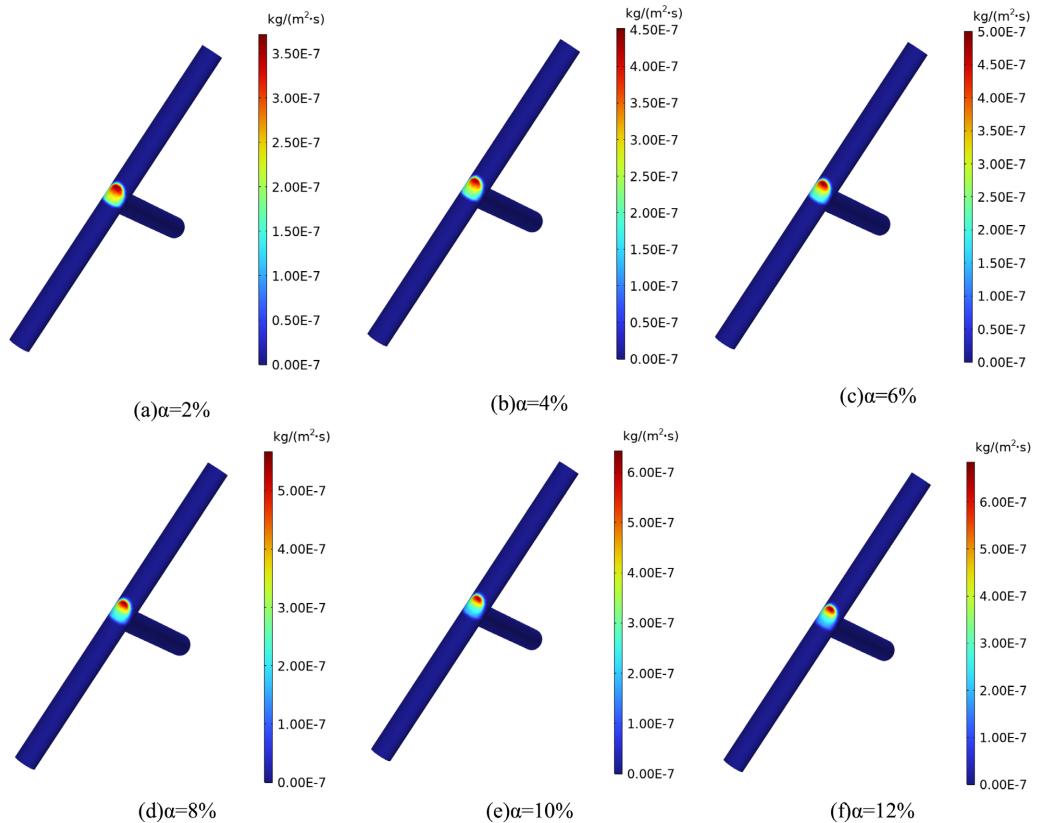


Figure 9. Erosion contour map of the tee pipe with a fixed main pipe inlet liquid volume fraction of 6% and varying branch pipe inlet liquid volume fractions

图 9. 固定主管入口液相体积分数为 6%, 不同支管入口液相体积分数下三通冲蚀云图

所示，随着支管入口液相体积分数增加，冲蚀形状由椭圆形逐渐变为“钟形”，冲蚀部位略有前移。根据流场云图如图 10 所示，发现随着支管入口液相体积分数增加，支管流入汇合处的流体动量增加，使得主管下壁面高速区域被压缩，但主管和支管的流体混合界面上的剪切作用增强，剪切效应会将高速区速度进一步提高，使得砂粒颗粒运移得更远。

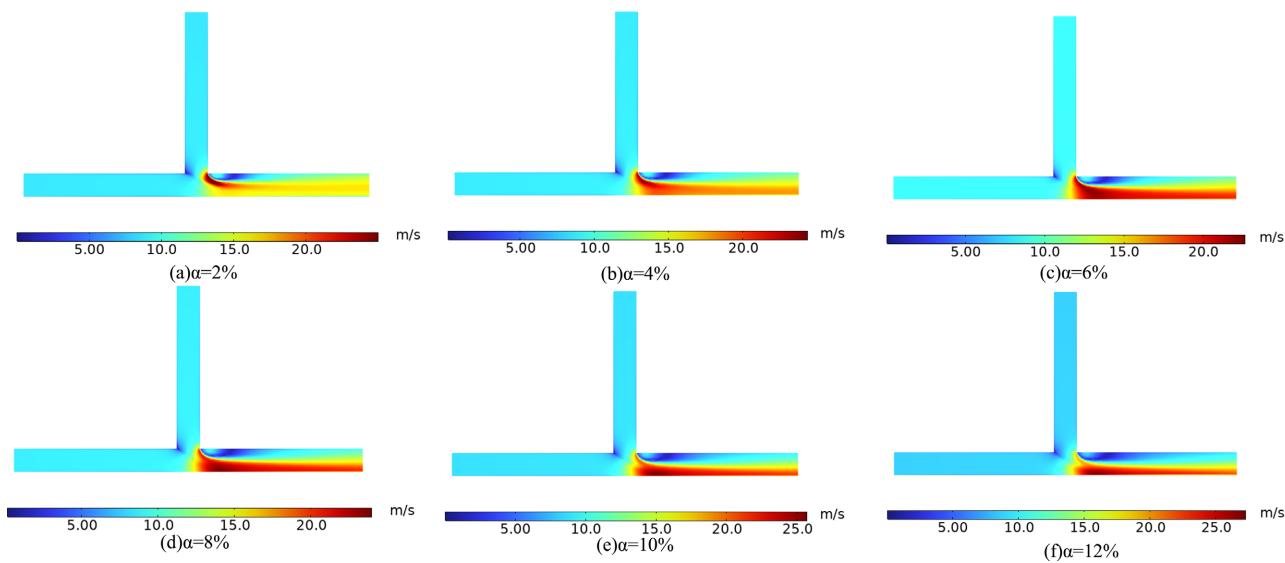


Figure 10. Flow field characteristics of the tee pipe with a fixed main pipe inlet liquid volume fraction of 6% and varying branch pipe inlet liquid volume fractions

图 10. 固定主管入口液相体积分数为 6%，不同支管入口液相体积分数下三通流场特征

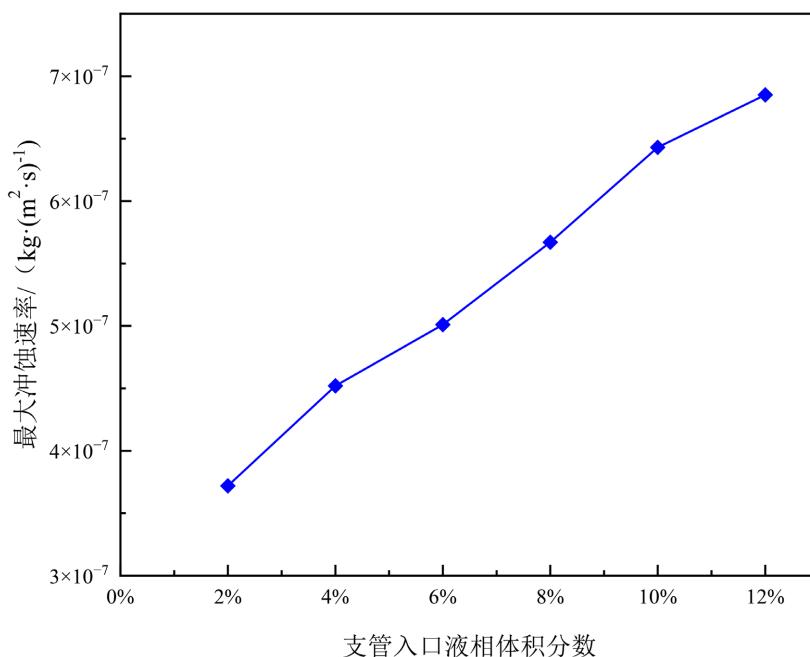


Figure 11. Variation of maximum erosion rate in the tee pipe with a fixed main pipe inlet liquid volume fraction of 6% and varying branch pipe inlet liquid volume fractions

图 11. 固定主管入口液相体积分数为 6%，不同支管入口液相体积分数下最大冲蚀速率变化

图 11~13 为不同支管入口液相体积分数下三通管的最大冲蚀速率变化、不同支管液相体积分数下颗

粒的冲击角和冲击速度分布。可以看出，随着支管液相体积分数增加，冲蚀速率逐渐增大。这是因为随着支管入口液相体积分数的增加，下壁面的高速区流速提高，导致颗粒冲击速度增大、冲击角略有减小，同时颗粒冲击速度的分布范围变得更为分散，在这些因素的综合作用下，尽管冲击角的减小和颗粒冲击速度分布的分散可能降低冲蚀强度，但部分颗粒的冲击速度显著提升会提高冲蚀强度，最终使得冲蚀速率整体呈现增加趋势。

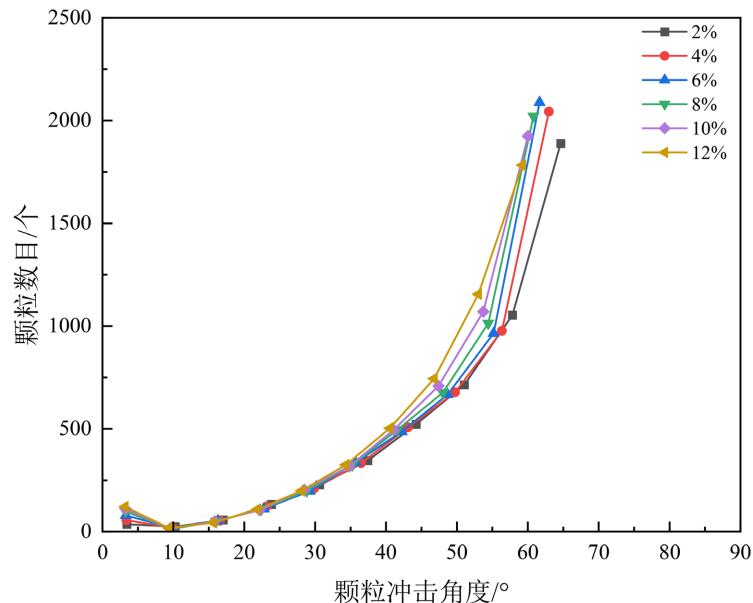


Figure 12. Particle impact angle distribution in the tee pipe with a fixed main pipe inlet liquid volume fraction of 6% and varying branch pipe inlet liquid volume fractions

图 12. 固定主管入口液相体积分数为 6%，不同支管入口液相体积分数下颗粒冲击角分布

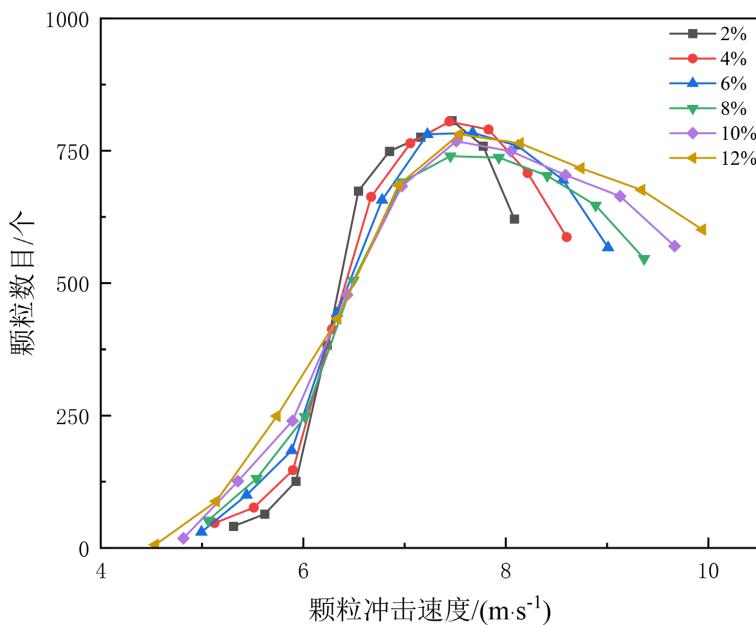


Figure 13. Particle impact velocity distribution in the tee pipe with a fixed main pipe inlet liquid volume fraction of 6% and varying branch pipe inlet liquid volume fractions

图 13. 固定主管入口液相体积分数为 6%，不同支管入口液相体积分数下颗粒冲击速度分布

4.3. 管径互异三通冲蚀特征分析

固定主管和支管入口速度为 8 m/s、液相体积分数均为 6%，出口压力及其他条件保持不变，分别设置支管管径为 50 mm、60 mm、70 mm、80 mm、90 mm、100 mm，观察对比三通管冲蚀结果。如图 14 所示，随着管径增加，主要冲蚀部位面积逐渐变大略有前移，冲蚀形状由椭圆形变为钟形。图 15 为不同支管管径的流场分布，由图可知，当支管管径变大时，主管下壁面高速区速度增大，颗粒运移距离变远。

图 16 为不同支管管径对应的最大冲蚀速率，由图可知，随着支管管径变大冲蚀速率逐渐减小。如图 14、图 17 和图 18 所示，随着支管管径增大，虽然部分颗粒的速度得到提升，但是由于颗粒冲击角减小和冲蚀面积显著增大，冲蚀速率减小。

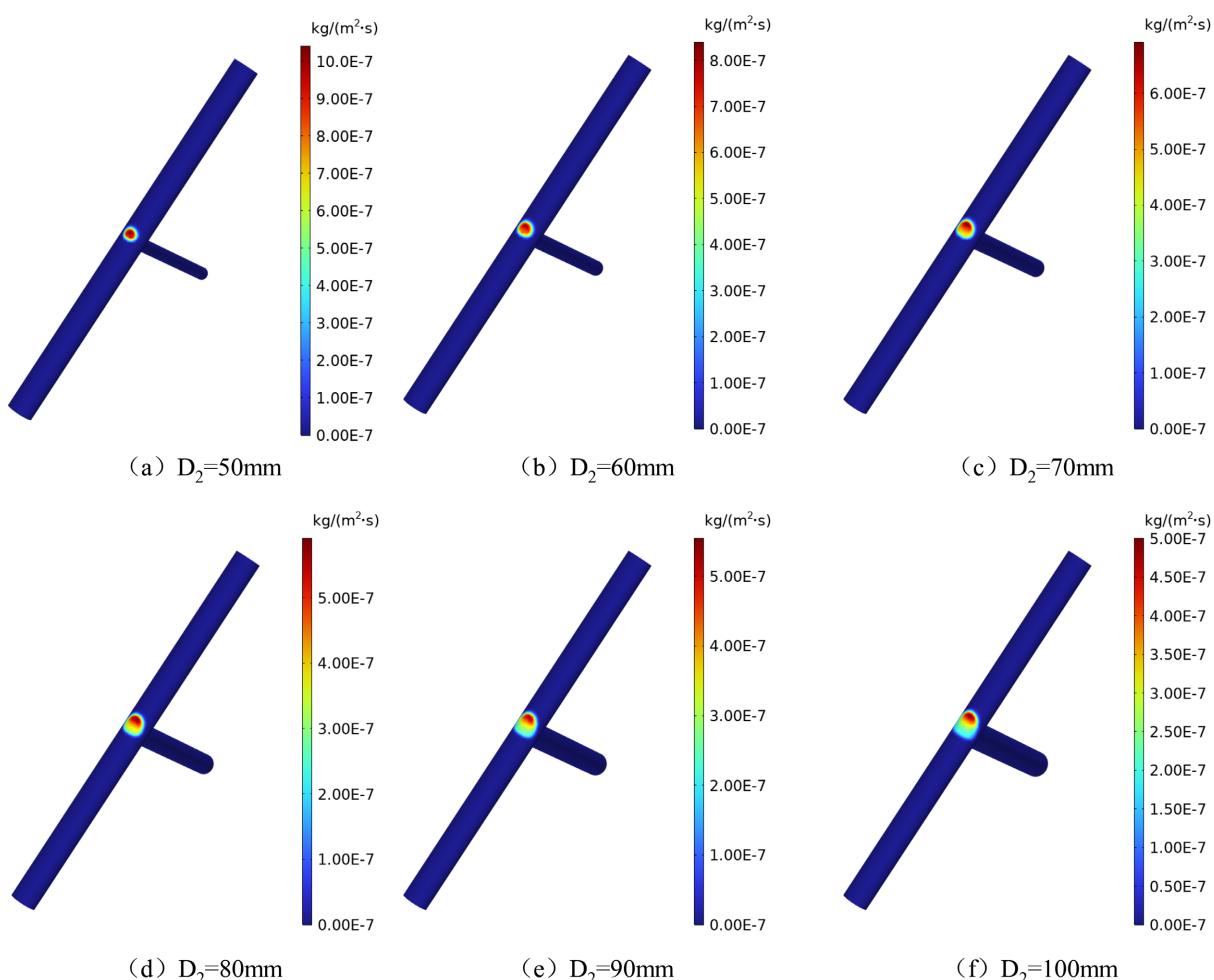


Figure 14. Erosion cloud diagram of the tee pipe with a fixed main pipe diameter of 100 mm and varying branch pipe diameters
图 14. 固定主管管径为 100 mm，不同支管管径下三通冲蚀云图

5. 结论

利用混合物多相流模型和离散相模型对输送天然气的三通管其“两进一出”工况下的气 - 液 - 固三相流动进行了数值仿真，并结合 E/CRC 冲蚀模型计算了固体颗粒对管壁的冲蚀，分析了主管和支管入口速度、入口液相体积分数和管径不同对三通流场和冲蚀结果的影响，得到以下结论：

- (1) 从三通支管进入的固体颗粒会对三通造成一定冲蚀，冲蚀主要部位位于三通的下管壁面且冲蚀

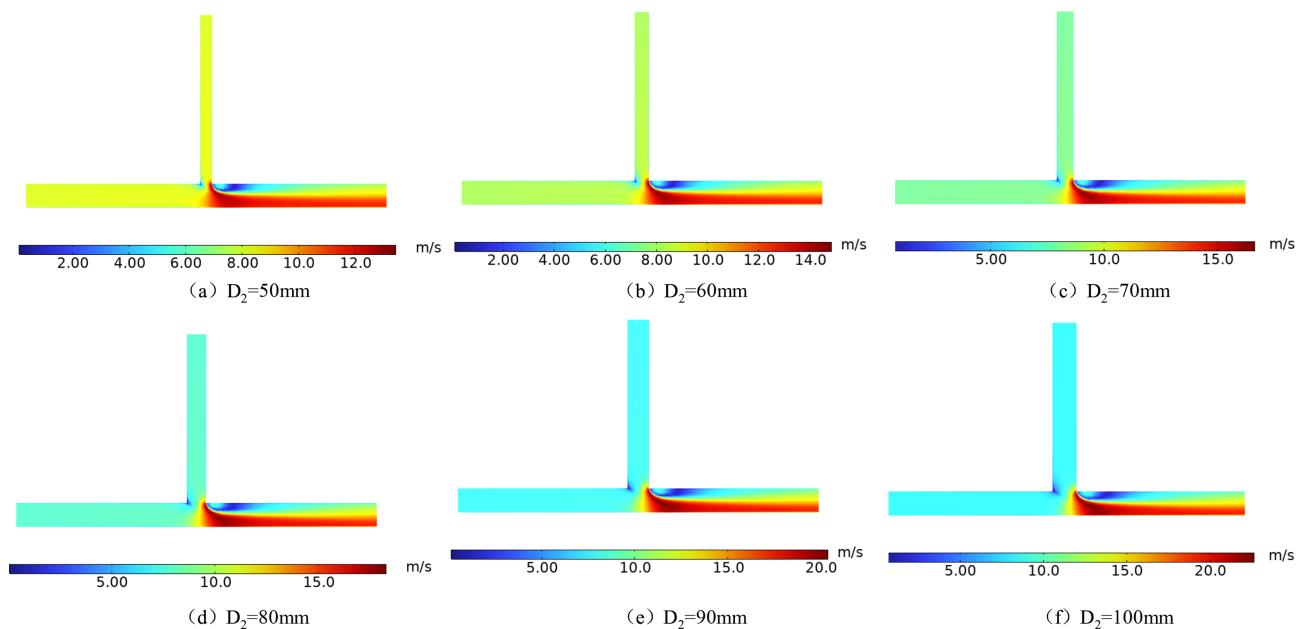


Figure 15. Flow field characteristics of the tee pipe with a fixed main pipe diameter of 100 mm and varying branch pipe diameters
图 15. 固定主管管径为 100 mm，不同支管管径下三通流场特征

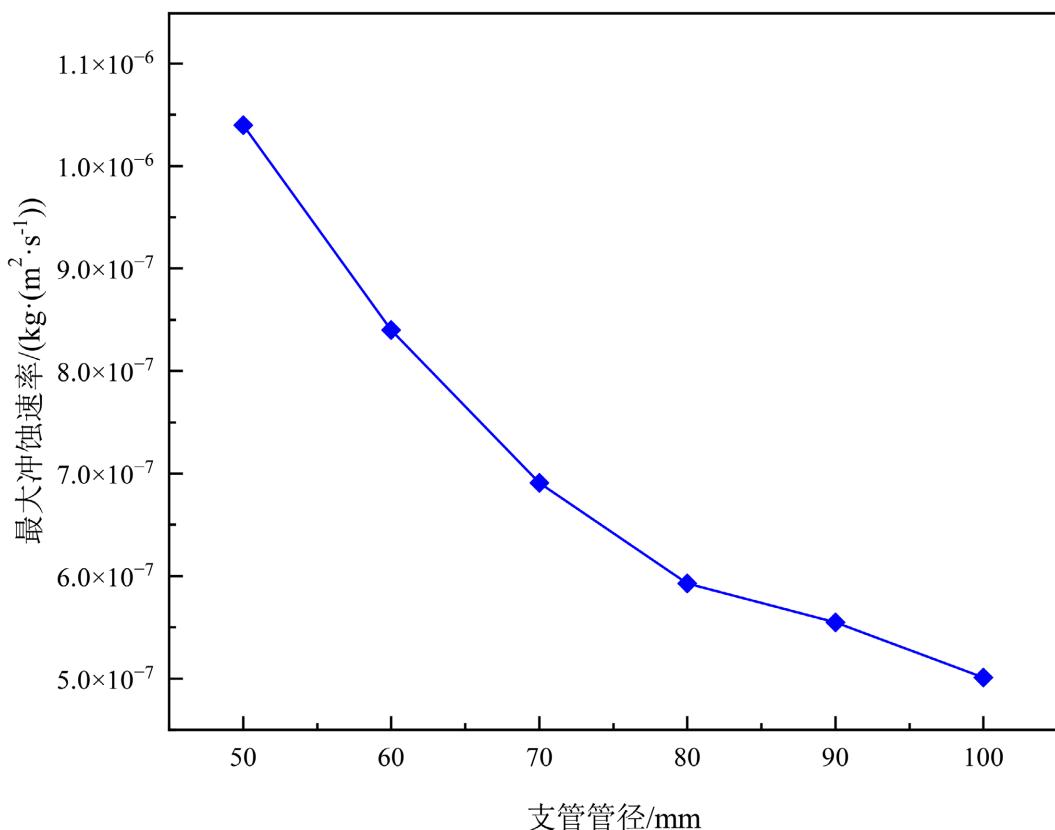


Figure 16. Variation of maximum erosion rate in the tee pipe with a fixed main pipe diameter of 100 mm and varying branch pipe diameters
图 16. 固定主管管径为 100 mm，不同支管管径下最大冲蚀速率变化

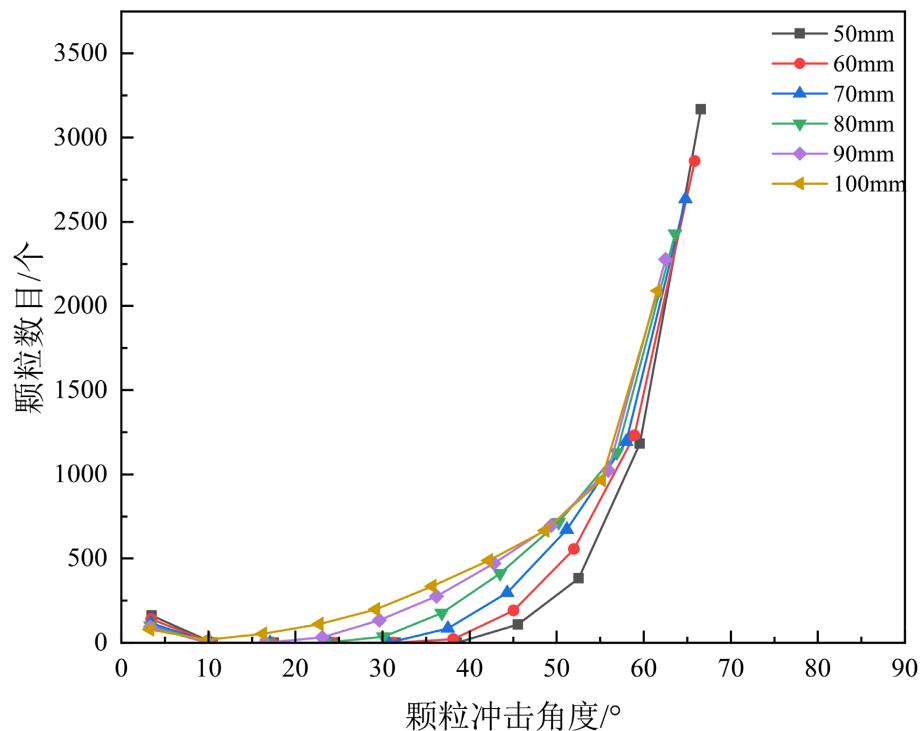


Figure 17. Particle impact angle distribution in the tee pipe with a fixed main pipe diameter of 100 mm and varying branch pipe diameters

图 17. 固定主管管径为 100 mm, 不同支管管径下颗粒冲击角分布

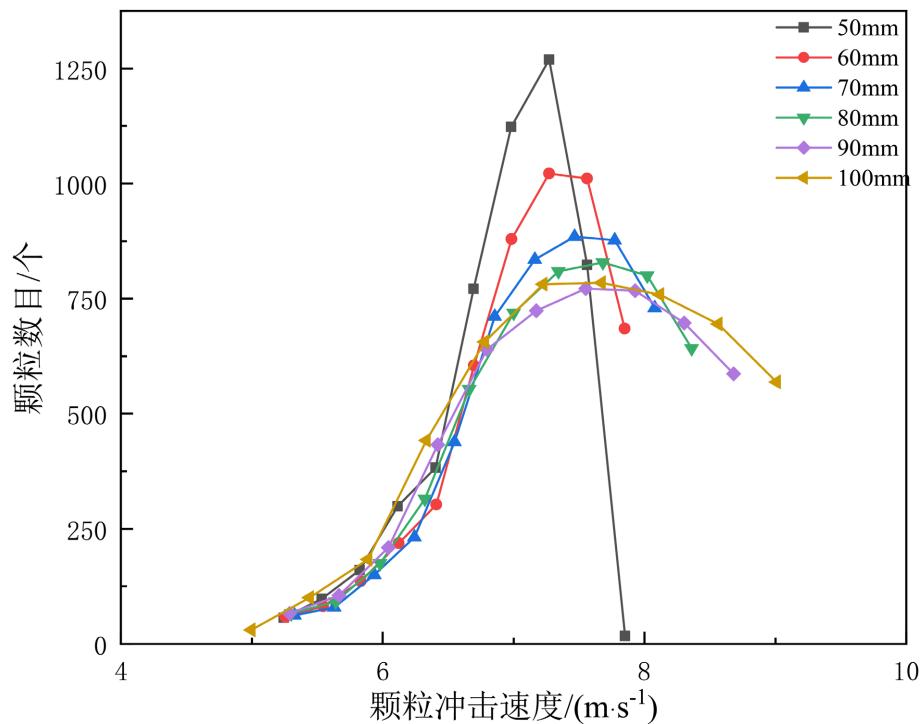


Figure 18. Particle impact velocity distribution in the tee pipe with a fixed main pipe diameter of 100 mm and varying branch pipe diameters

图 18. 固定主管管径为 100 mm, 不同支管管径下冲击角变化

形状不固定，包括锥形、“钟形”和椭圆型等。

(2) 主管和支管入口流速差异改变流场主导模式影响冲蚀结果：支管低速时，主管水平流场主导，冲蚀远离交汇处且形状不规则；支管高速时，支管垂直流场占优，冲蚀向交汇处集中，冲蚀形态演变为钟形或椭圆形。冲蚀速率随着支管入口速度增加，呈现出先增后减再增的非线性变化。

(3) 主管和支管入口含液率差异改变下壁面高速区流速影响冲蚀结果：支管入口液相动量增强会导致混合界面剪切作用加剧，高速区流速提升，冲蚀形态由椭圆向钟形扩展。冲蚀速率随着支管入口液相体积分数增加而逐渐增加。

(4) 主管和支管管径差异改变下壁面高速区流速和颗粒分散程度影响冲蚀结果：支管截面积增大导致下壁面高速区流速增加，颗粒运移距离延长，颗粒的冲蚀形态由圆形变为“钟形”，颗粒更加分散，冲蚀面积扩大，形成“冲蚀面积增大 - 冲蚀速率降低”的逆向关系。

参考文献

- [1] Wen, Y., Liu, L., Huang, Y., Liu, H. and Sui, M. (2023) Cause Analysis and Preventive Measures for Sand Production in Gas Wells of Sulige Gas Field. *ACS Omega*, **8**, 30590-30597. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c03864>
- [2] 林楠, 黄辉, 李仕力, 等. 天然气集输场站管线弯头冲蚀磨损数值模拟研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(21): 8543-8549.
- [3] Shan, Y., Jing, J., Zhang, Z., Sun, J., Wang, N., Zhuang, L., et al. (2024) Investigation of Erosion Behavior of Particle-Fluid Flow in Offshore Platform T-Pipes. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, **209**, Article ID: 105174. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2024.105174>
- [4] Hong, B., Li, Y., Li, X., Ji, S., Yu, Y., Fan, D., et al. (2021) Numerical Simulation of Gas-Solid Two-Phase Erosion for Elbow and Tee Pipe in Gas Field. *Energies*, **14**, Article No. 6609. <https://doi.org/10.3390/en14206609>
- [5] Ashrafizadeh, H., Karimi, M. and Ashrafizadeh, F. (2013) Failure Analysis of a High-Pressure Natural Gas Pipe under Split Tee by Computer Simulations and Metallurgical Assessment. *Engineering Failure Analysis*, **32**, 188-201. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.03.013>
- [6] Zhang, J., Zhang, H., Liu, Y. and Zhang, C. (2021) Erosion Wear Characteristics of Tee Tubes with Gas-Solid Two-Phase Flow. *Journal of Pressure Vessel Technology*, **143**, Article ID: 064502. <https://doi.org/10.1115/1.4051068>
- [7] 韩难难, 刘斌, 张涛, 等. 西部某天然气田三通管件腐蚀失效分析[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2015, 27(6): 600-607.
- [8] 许留云, 胡珑艺, 李翔. 三通管内冲蚀磨损的数值计算与试验研究[J]. 化工技术与开发, 2017, 46(10): 57-60.
- [9] 钱东良, 纪苏丹, 刘刚, 等. 含砂输气管线三通部位的冲蚀仿真模拟[J]. 石油机械, 2014, 42(10): 111-116.
- [10] 许留云, 李翔, 李伟峰, 等. 三通管中不同流体介质冲蚀磨损的数值模拟[J]. 当代化工, 2014, 43(12): 2718-2720.
- [11] Hong, S., Peng, G., Yu, D., Chang, H. and Wang, X. (2023) Investigation on the Erosion Characteristics of Liquid-Solid Two-Phase Flow in Tee Pipes Based on CFD-DEM. *Journal of Marine Science and Engineering*, **11**, Article No. 2231. <https://doi.org/10.3390/jmse11122231>
- [12] Zhao, X., Cao, X., Zhang, J., Cao, H., Zhang, J., Peng, W., et al. (2023) Experimental and Numerical Investigation of Erosion in Plugged Tees for Liquid-Solid Flow. *International Journal of Multiphase Flow*, **160**, Article ID: 104348. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2022.104348>
- [13] 李美求, 潘力. 内壁仿生的T型三通冲蚀模拟及应力分析[J]. 中国科技论文, 2019, 14(2): 199-203.
- [14] 祝效华, 张覃, 张洋铭, 等. 高压管汇三通冲蚀磨损特性研究[J]. 表面技术, 2021, 50(7): 258-265.
- [15] 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.
- [16] 邓福成, 黄斌, 尹彪, 等. 天然气水合物开采中冲缝管套冲蚀研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(3): 1023-1032.
- [17] Abu-Hamdeh, N.H., Almitani, K.H., Gari, A.A., Alimoradi, A. and Sun, C. (2021) FVM Method Based on K-E Model to Simulate the Turbulent Convection of Nanofluid through the Heat Exchanger Porous Media. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **144**, 2689-2698. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-10538-9>
- [18] 刘孝洋, 吴茂洲. 力分解式动量方程实验仪研究[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(11): 71-74.
- [19] 赖芬, 王凤鸣, 朱相源, 等. 基于E/CRC磨损模型的离心泵壁面磨损特性研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2021, 42(5): 719-728.

-
- [20] Wang, H., Yu, Y., Yu, J., Xu, W., Li, X. and Yu, S. (2019) Numerical Simulation of the Erosion of Pipe Bends Considering Fluid-Induced Stress and Surface Scar Evolution. *Wear*, **440-441**, Article ID: 203043.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203043>