

压裂泵泵阀冲蚀磨损的数值模拟

胡锦涛^{1a,1b}, 李蓉², 李登^{1a,1b}, 胡毅^{1a,1b}, 刘铮^{1a,1b}, 王晓川^{1a,1b}

(1. 武汉大学 a. 动力与机械学院 b. 水射流理论与新技术湖北省重点实验室, 武汉 430072;
2. 江汉石油管理局第四机械厂, 湖北 荆州 434022)

摘要: **目的** 研究压裂泵作业过程中泵阀阀隙流场的冲蚀磨损特性, 探究其主要影响因素与影响规律。**方法** 基于固液两相流基本理论与冲蚀模型, 采用计算流体力学 (CFD) 方法模拟泵阀阀隙流场的冲蚀磨损行为, 探究支撑剂粒径、质量流量、泵阀半锥角、阀座孔入口半径、阀盘升程等参数对泵阀冲蚀特性的影响。**结果** 泵阀的冲蚀磨损主要表现为支撑剂对阀盘边缘处的直接冲击与对阀座锥面处的切削作用。支撑剂粒径由 0.062 5 mm 增大到 0.375 mm 时, 最大冲蚀速率增大了 4.80 倍, 继续增大到 1.5 mm 时, 最大冲蚀速率减小了 76.12%; 当其质量流量由 5 g/s 增大到 25 g/s 时, 最大冲蚀速率增大了 3.84 倍。当泵阀半锥角由 30° 增大到 50°, 阀盘升程由 5 mm 增大到 15 mm 时, 最大冲蚀速率分别减小了 95.55% 与 92.57%; 随着阀座孔入口半径由 30 mm 增大到 50 mm, 最大冲蚀速率增大了 10.47 倍。同时, 阀盘升程的增大还会显著影响冲蚀磨损区域的分布。**结论** 压裂泵泵阀的最大冲蚀速率随支撑剂粒径的增大先增大后减小, 随阀座半锥角与阀盘升程的增大而减小, 随支撑剂质量流量与阀座孔入口半径的增大而增大。其中, 泵阀结构参数对泵阀冲蚀磨损的影响更为显著。

关键词: 压裂泵泵阀; 冲蚀磨损; 数值模拟; 固液两相流; 流动规律; 颗粒运动行为

中图分类号: TH117.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)08-0225-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.08.018

Numerical Simulation for Erosive Wear of the Fracturing Pump Valve

HU Jin-cheng^{1a,1b}, LI Rong², LI Deng^{1a,1b}, HU Yi^{1a,1b}, LIU Zheng^{1a,1b}, WANG Xiao-chuan^{1a,1b}

(1. a. School of Power and Mechanical Engineering, b. Hubei Key Laboratory of Waterjet Theory and New Technology, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. SJ Petroleum Machinery Co., Jiangnan Petroleum Administration, Hubei Jingzhou 434022, China)

ABSTRACT: In this paper, the erosive wear characteristics of pump valve gap flow field in the operation process of fracturing pump valve, including the main influence factors and their influence law was studied. Based on the theory of the solid-liquid two-phase flow and the erosion model, the computational fluid dynamics (CFD) method was used to simulate the erosive wear

收稿日期: 2021-08-15; 修订日期: 2021-10-13

Received: 2021-08-15; Revised: 2021-10-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52074194)

Fund: National Natural Science Foundation of China (52074194)

作者简介: 胡锦涛 (1997—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为多相流及流固耦合振动。

Biography: HU Jin-cheng (1997-), Male, Doctoral student, Research focus: multiphase flow and fluid-structure interaction vibration.

通讯作者: 王晓川 (1983—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为射流理论与新技术、非常规油气开发与储运。

Corresponding author: WANG Xiao-chuan (1983-), Male, Doctor, Professor, Research focus: theory and new technology of water jet, Development, storage and transportation of unconventional oil and gas.

引文格式: 胡锦涛, 李蓉, 李登, 等. 压裂泵泵阀冲蚀磨损的数值模拟[J]. 表面技术, 2022, 51(8): 225-232.

HU Jin-cheng, LI Rong, LI Deng, et al. Numerical Simulation for Erosive Wear of the Fracturing Pump Valve[J]. Surface Technology, 2022, 51(8): 225-232.

behavior in pump valve gap flow field. The effect of particle size, particle mass flow rate, semi-cone angle, seat inlet radius and valve disc lift were analyzed. According to the results, the erosion mainly consisted of the direct impact on the edge of the valve plane and the cutting action on the cone of the valve seat. With particle size increasing from 0.062 5 mm to 0.375 mm, maximum erosion rate of the pump valve increased by 4.80 times. While particle size increased to 1.5 mm, maximum erosion rate reduced by 76.12%. When particle mass flow rate increased from 5 g/s to 25 g/s, the maximum erosion rate increased by 3.84 times. As the semi-cone angle increased from 30° to 50° and the valve disc lift increased from 5 mm to 15 mm, the maximum erosion rate reduced by 95.55% and 92.57%, respectively. With the seat inlet radius increasing from 30 mm to 50 mm, maximum erosion rate increased by 10.47 times. At the same time, the distribution of erosion wear area is significantly affected by the increase of valve disc lift. It is concluded that maximum erosion rate of pump valve first increases and then decreases with the increase of particle size, and it increases with the increase of particle mass flow rate and inlet radius of valve while it decreases with the increase of semi-cone angle and valve disc lift. The effect of pump valve structure parameters on valve erosion wear is more significant.

KEY WORDS: fracturing pump valve; erosive wear; numerical simulation; solid-fluid two-phase flow; flow behaviors; particle movement behavior

压裂泵是油气开发增产过程中输运压裂液的核心设备,其工作状况与寿命直接影响着油气田钻井压裂作业的效率与成本。作为压裂泵的关键部件,泵阀的冲蚀磨损是导致压裂泵失效的主要原因。在压裂泵作业过程中,压裂液携带的高强度高密度支撑剂会以一定速度或角度冲击泵阀表面,产生严重的冲蚀磨损^[1-4]。因此,对泵阀的冲蚀磨损特性及其主要影响因素开展研究具有重要意义。

鉴于现有的技术手段很难在实验室条件下满足阀隙流场的冲蚀磨损试验要求,目前多采用数值模拟^[5-10]为主、试验测试^[11-14]为辅的思路开展相关研究。在数值模拟方面,Gocha等^[5]对冲蚀模拟中的颗粒输运、壁面侵蚀、动态壁面变形等模型进行了研究,结果表明,侵蚀模型系数、网格参数等对CFD计算结果存在较大影响。莫丽等^[6-7]利用CFD技术探究了升程、锥角、凡尔胶皮突出高度等因素对阀隙过流面积、流速的影响。韩传军等^[9]对3种开度下的泵阀排出端流场进行了仿真模拟,在腔体内部发现了部分涡流与回流。在试验方面,Joffe等^[11]对全尺寸阀门在实际运行条件下的磨损进行了试验,明确了冲蚀磨损是阀门失效的主要原因,并探究了泥浆密度、锥角等因素对冲蚀速率的影响。Yang等^[12-13]采用PIV技术测量了不同锥角的钻井泵阀在不同升距下的阀隙流场,探究了阀隙流速特性对冲蚀磨损的影响。

目前对压裂泵泵阀冲蚀磨损问题的研究大多聚焦阀隙流场中流体的流动特性,忽略了颗粒运动行为的影响,使得计算结果在指导现场实际应用方面具有一定局限性。本文基于固液两相流理论与冲蚀模型,对阀隙流场进行数值模拟,分析冲蚀磨损特性,探究支撑剂粒径、质量流量对冲蚀现象的影响规律,探索泵阀半锥角、阀座孔入口半径与阀盘升程等结构参数的优化方案,为压裂泵泵阀设计与磨损防护提供依据。

1 数值模拟

1.1 计算模型

压裂泵泵阀阀隙流场内介质为水基压裂液与支撑剂组成的固液两相流,数值模拟中求解此类问题多采用双欧拉方法与欧拉-拉格朗日方法。本文重点关注颗粒运动行为对冲蚀磨损的影响,因此,选择欧拉-拉格朗日方法对连续相控制方程与离散相运动方程进行求解^[15]。

1.1.1 连续相模型

假设压裂液为不可压缩流体,其连续性方程与运动方程可表达为:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial p}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} - \overline{\rho u'_i u'_j} \right) \quad (2)$$

式中: u_i 与 u_j 为流速分量; ρ 与 μ 分别为流体密度与动力黏度; p 为当地压强; x_i 为流场坐标。其中, $-\overline{\rho u'_i u'_j}$ 为雷诺时均处理时产生的未知量雷诺应力项,需引入湍流模型封闭方程组。本文选用SST $k-\omega$ 湍流模型进行计算。相较于Standard $k-\varepsilon$ 模型,该模型更适用于计算冲蚀磨损问题^[16]。

1.1.2 离散相模型

将支撑剂视作大小均匀的球形颗粒并忽略颗粒间的碰撞,本文采用遵循欧拉-拉格朗日方法的离散相模型(Discrete Phase Model, DPM)描述流场内固体颗粒的运动。DPM模型考虑了连续相与离散相的耦合作用,其笛卡尔坐标系下的运动方程^[17-20]可描述为:

$$\frac{\partial v_p}{\partial t} = F_d(u - u_p) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_{\text{other}} \quad (3)$$

式中: u_p 与 u 分别为离散相和连续相的速度; F_d 为粒子的单位曳力; F_{other} 为其他作用力, 如浮力、附加质量力等; ρ_p 与 ρ 分别为离散相和连续相的密度。

1.1.3 冲蚀模型

计算冲蚀磨损时, 还需引入合适的磨损模型预测材料表面的磨损情况。本文选用 Finnie 模型, 该模型认为, 固体颗粒对靶面的冲蚀磨损主要源于小冲击角下颗粒对靶面的犁、削作用^[21], 在计算时充分考虑了固体颗粒的质量、靶面材料的性质与冲击角度等因素, 具体计算公式如下。

$$\begin{cases} W = \frac{m_p u_p^2}{\sigma_f h_c K} \left(\sin 2\theta - \frac{6}{K} \sin^2 \theta \right) & \tan \theta < \frac{K}{6} \\ W = \frac{m_p u_p^2}{\sigma_f h_c K} \left(\frac{K \sin^2 \theta}{6} \right) & \tan \theta > \frac{K}{6} \end{cases} \quad (4)$$

式中: W 为磨损造成的靶面材料体积损失; m_p 与 u_p 分别为固体颗粒的质量与速度; σ_f 为流动应力; h_c 为切削深度; K 为固体颗粒所受曳力的相关系数; θ 为固体颗粒对靶面的冲击角度。

1.2 几何建模与条件设置

本文以压裂泵中常用的盘型锥阀^[22]为研究对象, 在提取流场时对其结构做简化处理, 忽略密封圈、导向爪等部件的影响。简化后的结构及几何参数如图 1a 所示。其中, 阀座孔入口半径 $R_r=40$ mm, 泵阀半锥角 $\alpha=45^\circ$, 阀盘升程 $h=15$ mm。提取后的流体域三维模型如图 1b 所示。

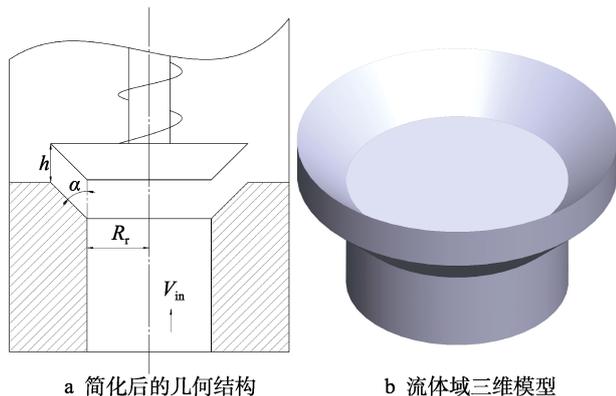


图 1 几何模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of geometric model:a) simplified geometry; b) three dimensional model of fluid domain

在计算过程中, 水基压裂液的动力黏度与密度分别设定为 10 mPa·s 与 1 000 kg/m³, 支撑剂颗粒的密度与粒径分别设定为 2 650 kg/m³ 与 0.5 mm, 其初始速度的大小、方向与压裂液相同。入口边界条件采用速度入口 (Velocity inlet), 出口边界条件采用自由出口 (Outflow), 其余壁面条件均设置为 Wall 壁面。

在 DPM 模型中, 颗粒注入类型选择 surface 型, 壁面条件设置为 reflect 类型。在求解时, 压力、动能、湍流耗散率均采用二阶迎风格式进行离散, 体积分数采用 QUICK 格式表示。

1.3 网格划分与无关性分析

在数值模拟中, 网格的数量与疏密程度会对计算结果的精度及计算效率产生影响。本文基于 ANSYS Meshing 软件, 采用非结构化四面体网格对流体域三维模型进行网格划分, 并对壁面、阀盘等部位进行局部加密, 以增强计算结果的可靠性。同时, 为减小网格数引起的离散误差, 采用 6 组不同数量的网格进行计算, 并以流速最大值及最大冲蚀速率作为无关性分析的判断依据。如图 2 所示, 当网格数量超过 25 万时, 流速最大值与最大冲蚀速率均趋于稳定。综合考虑计算精度与求解资源, 本文最终选用网格数量在 25 万左右第 5 套网格进行后续计算。

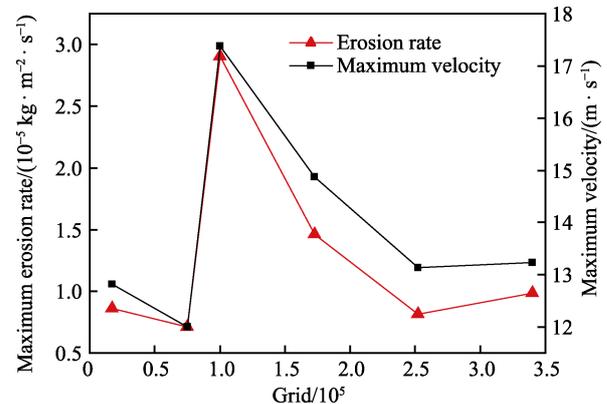


图 2 网格无关性分析

Fig.2 Mesh grid independence analysis

2 计算结果分析

2.1 压裂泵泵阀冲蚀磨损特性

压裂液中支撑剂对泵阀表面的冲击是造成压裂泵泵阀磨损失效的直接原因, 其运动行为在很大程度上取决于阀隙流场内的流动特性。为了探究泵阀冲蚀磨损特性, 本节分别对初始流速为 5 m/s 时阀隙流场内的流动规律与支撑剂的运动行为进行分析。

阀隙流场的流体域模型为轴对称模型, 因此, 本文在分析流动规律时选取流体域中 YOZ 截面作为研究对象。计算得到的阀隙流场 YOZ 截面的速度云图与压力云图如图 3 所示。在阀隙入口处, 泵阀结构突变, 导致流道方向改变、过流面积变小, 使得压裂液无法及时排出而开始逐渐减速, 在阀盘中部流速近乎为零。阀盘中部压强逐渐增大后, 与阀隙入口处产生了一定的压力梯度, 随后, 压裂液开始由高压区向低压区流动, 进入阀隙。压裂液流速在阀盘两底角处达到最大值。可见, 阀盘边缘处的结构突变不仅导致压裂

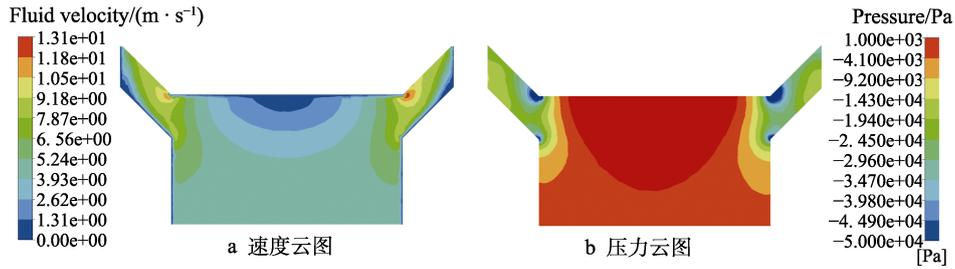


图3 YOZ截面的速度与压力云图

Fig.3 Velocity and pressure cloud map of the YOZ plane: a) velocity cloud map; b) pressure cloud map

液的流动方向发生改变，还使得局部区域压强减小，压裂液流速明显增大，流动状态趋于复杂。上述流速分布情况与 Yang 等^[12]、殷鑫^[13]通过 PIV 试验方法得到的结论较为吻合，从侧面验证了本文数值模拟结果的可靠性。

压裂液流动状态的变化对其所携带支撑剂的运动行为产生了较为明显的影响。如图 4a 所示，颗粒在压裂液的携带下于 0.018 2 s 左右时到达阀盘处，随后，大部分颗粒随压裂液一同减速，聚集在阀盘中部处，最长可停留 0.087 s；仅有少部分颗粒随压裂液直接进入阀隙流场内。为进一步探究颗粒的运动行为，选取部分典型支撑剂颗粒的运动行为进行分析，其运动轨迹与速度变化情况如图 4b、c 所示。7#颗粒在压裂液的携带下以较高的速度直接进入阀隙，在出口处与阀座锥面发生切削作用。其运动速度在进入阀隙前不断增大，在阀盘底角处达到最大值后开始下降。11#颗粒在进入阀隙前由于惯性力的作用直接冲击阀盘边缘，发生冲蚀磨损；进入阀隙后以一定的角度冲击阀座锥面，产生切削作用。其运动速度在第一次冲击阀盘时小幅降低，在第二次冲击阀座锥面时随着运动方向的改变呈现出加速趋势。51#颗粒同样在阀盘边缘处发生直接冲击，但由于冲击角度较小，其速度降幅较小；在进入阀隙后其直接随压裂液离开流场，未发生二次冲击。65#颗粒在压裂液的携带下进入阀盘中部的“停滞区”，其速度在这一阶段大幅下降；随后，

在后续压裂液的作用下，65#颗粒重新加速，运动至阀盘边缘处后进入阀隙，并对阀座锥面产生切削作用。

上述对阀隙流场内的流动规律与颗粒运动行为的分析说明，支撑剂的速度变化情况与压裂液在流场内的流速分布规律呈现出高度相关性，二者均在阀盘结构突变处产生明显变化。支撑剂对泵阀表面的冲击主要表现为对阀盘边缘处的直接冲击与对阀座锥面的切削作用，与图 5a 所示计算得到的冲蚀速率云图吻合较好。如图 5b、c 所示，在实际使用过程中，泵阀的磨损主要出现在阀座锥面处与阀盘边缘处的凡尔胶皮上，与计算结果较为一致，验证了泵阀的冲蚀磨损现象与阀盘结构突变引起的压裂液流动变化及支撑剂运动行为密切相关。

2.2 支撑剂粒径与质量流量对泵阀冲蚀磨损的影响

支撑剂的粒径与质量流量均会对压裂液中支撑剂的输送产生重要影响，从而影响压裂的增产增注效果^[23-24]，而粒径与质量流量也极易对冲蚀磨损情况产生严重影响。本节基于单一变量原则，针对支撑剂粒径与质量流量对冲蚀磨损的影响规律进行分析。

取质量流量为 5 g/s，入口流速分别为 5、10、15 m/s，对不同支撑剂粒径下的泵阀冲蚀磨损进行数值模拟。计算得到的支撑剂粒径对最大冲蚀速率和流速最大值的影响规律如图 6 所示。如图 6a 所示，当支撑剂

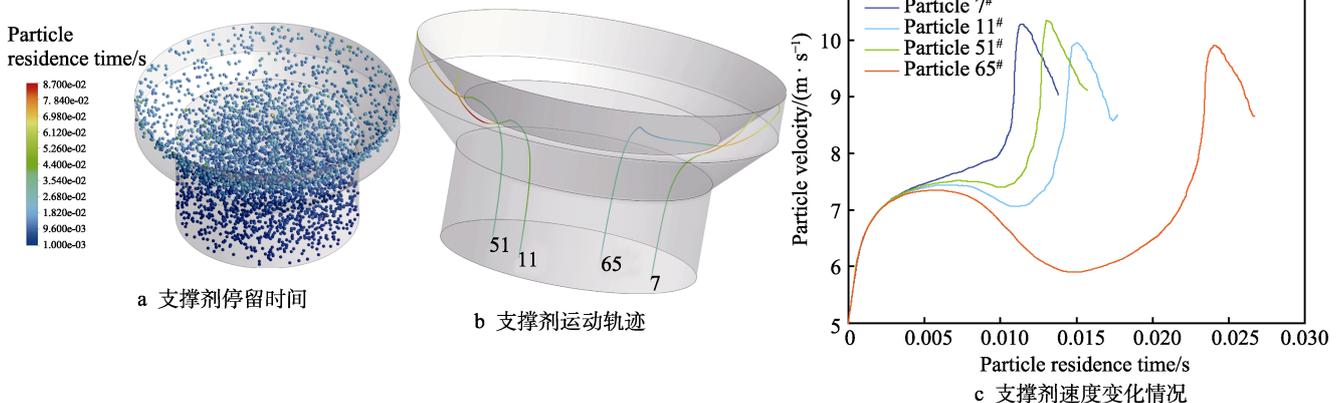


图4 阀隙流场内支撑剂的运动行为

Fig.4 Movement behavior of particle in the fluid field of valve gap: a) particle residence time; b) trajectories of particle; c) velocity variation of particle

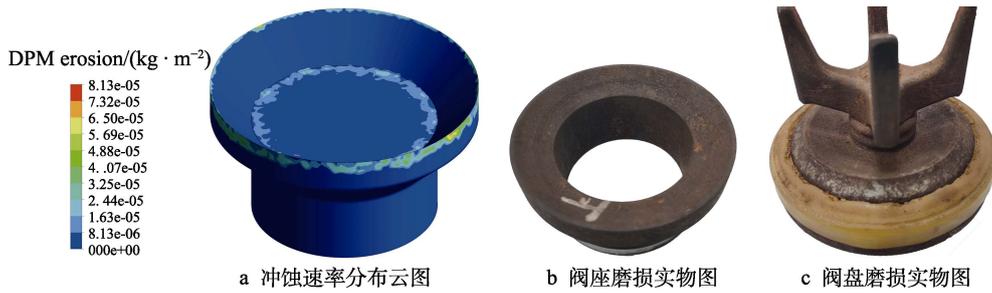


图 5 压裂泵泵阀冲蚀速率分布云图、阀座和阀盘磨损实物图

Fig.5 Erosion rate distribution cloud map of the fracturing pump valve, wear physical drawing of valve seat and disc: a) erosion rate distribution cloud map; b) wear physical drawing of valve seat; c) wear physical drawing of valve disc

粒径由 0.062 5 mm 增大到 0.375 mm 时, 3 种不同入口流速下计算得到的最大冲蚀速率平均增大了 4.80 倍; 粒径进一步增大到 1.5 mm 时, 最大冲蚀速率平均减小了 76.12%。基于上文提到的冲蚀模型可知, 磨损量与颗粒质量、颗粒运动速度的平方成正比, 最大冲蚀速率是二者共同作用的结果。通过对不同支撑剂粒径下的阀隙流场流速最大值的对比发现, 由于流场内支撑剂体积分数较小, 其粒径变化引起的流速最大值变化幅度较小, 可基本忽略。当支撑剂粒径在 0.062 5~0.375 mm 时, 随着粒径的增大, 颗粒质量增大, 导致颗粒具有的动能增大, 最大冲蚀速率随之增

大, 这与钟功祥等^[25]、钟林等^[26]在研究四通管与排污阀冲蚀磨损问题时得到的结果较为吻合。而当支撑剂粒径超过 0.375 mm 时, 颗粒质量的明显增大导致其惯性作用增强, 压裂液的携带作用减弱, 颗粒运动速度减小。此时, 支撑剂粒径增大导致的质量变化不足以弥补其速度损失, 故而冲蚀速率逐渐减小。

取支撑剂粒径为 0.5 mm, 入口流速分别为 5、10、15 m/s, 对不同支撑剂质量流量下的泵阀冲蚀磨损进行数值模拟。计算得到的质量流量对最大冲蚀速率的影响规律如图 7 所示。当质量流量由 5 g/s 增大到 25 g/s 时, 3 种不同入口流速下计算得到的最大冲蚀速率平均

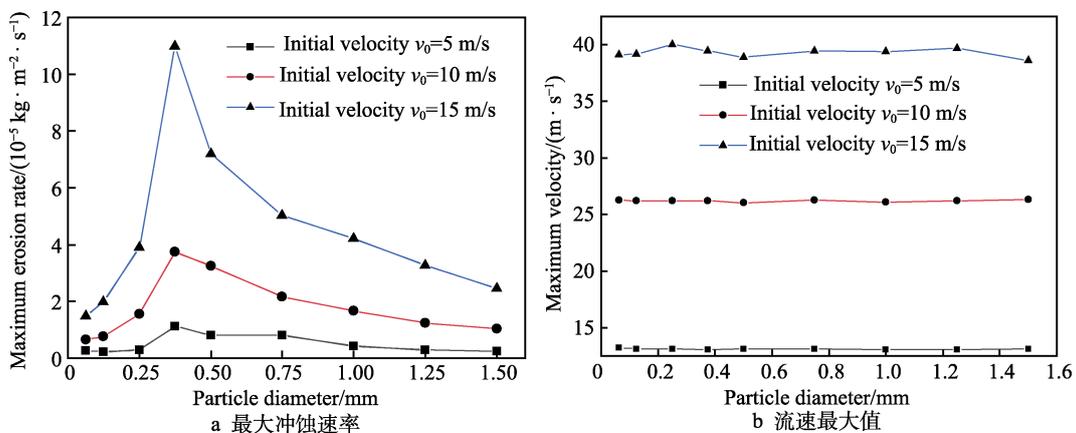


图 6 支撑剂粒径对最大冲蚀速率与流速最大值的影响

Fig.6 The effect of particle diameter on the maximum erosion rate and maximum velocity

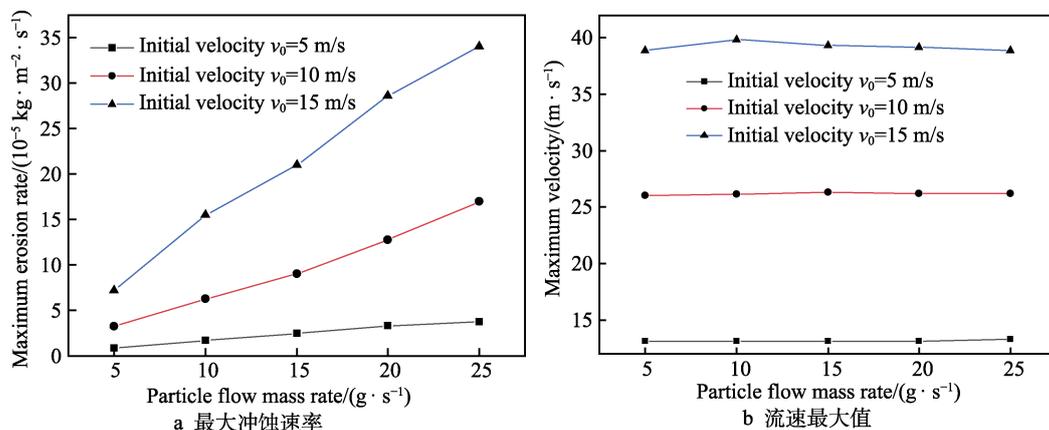


图 7 支撑剂质量流量对最大冲蚀速率与流速最大值的影响

Fig.7 The effect of particle mass flow rate on the maximum erosion rate and maximum velocity

增大了 3.84 倍。如图 7b 所示，在本文考虑的质量流量范围内，支撑剂体积分数相对较小，并未对流速最大值产生明显影响，表明最大冲蚀速率的改变与质量流量变化引起的阀隙流场内流速最大值的变化无关。当支撑剂质量流量增大时，单位时间内冲击泵阀表面的颗粒数量在一定范围内呈线性增加，冲击次数的增加导致最大冲蚀速率增大。与支撑剂粒径的影响相比，质量流量对最大冲蚀速率的影响程度更大，在压裂作业中更应注意控制质量流量，避免造成严重的冲蚀磨损。

2.3 结构参数对泵阀冲蚀磨损的影响

鉴于泵阀结构对阀隙流场的速度分布与颗粒运动行为具有较大影响，本节基于单一变量原则，取入口流速为 5 m/s、支撑剂粒径为 0.5 mm、质量流量为 5 g/s，对泵阀的半锥角、阀座孔入口半径、阀盘升程等结构参数开展计算与分析，探究其对泵阀冲蚀磨损

的影响，为后续优化提供依据。

如图 8 所示，在阀座孔入口半径与阀盘升程一定的情况下，当泵阀的半锥角由 30°变为 50°时，其阀隙流场内的流速最大值由 33.62 m/s 减小至 14 m/s 左右，颗粒的运动速度也随之明显减小，最大冲蚀速率减小了 95.55%。其中，当半锥角由 30°变为 35°时，流速最大值与最大冲蚀速率均发生显著变化。当半锥角为 30°时，冲蚀磨损现象发生的位置更靠近阀盘结构突变处；而在其他情况下，冲蚀磨损向出口处扩散。可见，改变半锥角的大小可以影响阀隙流道的方向与过流面积，有效减小结构突变对阀隙流场内的流动规律及支撑剂运动行为的影响。

如图 9 所示，当阀座孔入口半径由 30 mm 增大到 50 mm 时，阀隙流场内的流速最大值与最大冲蚀速率均明显增大，后者增大了 10.47 倍。由于入口半径的增大使压裂液进入阀隙前的流通面积增大，固体颗粒直接随压裂液进入阀隙的概率增大，单位时间

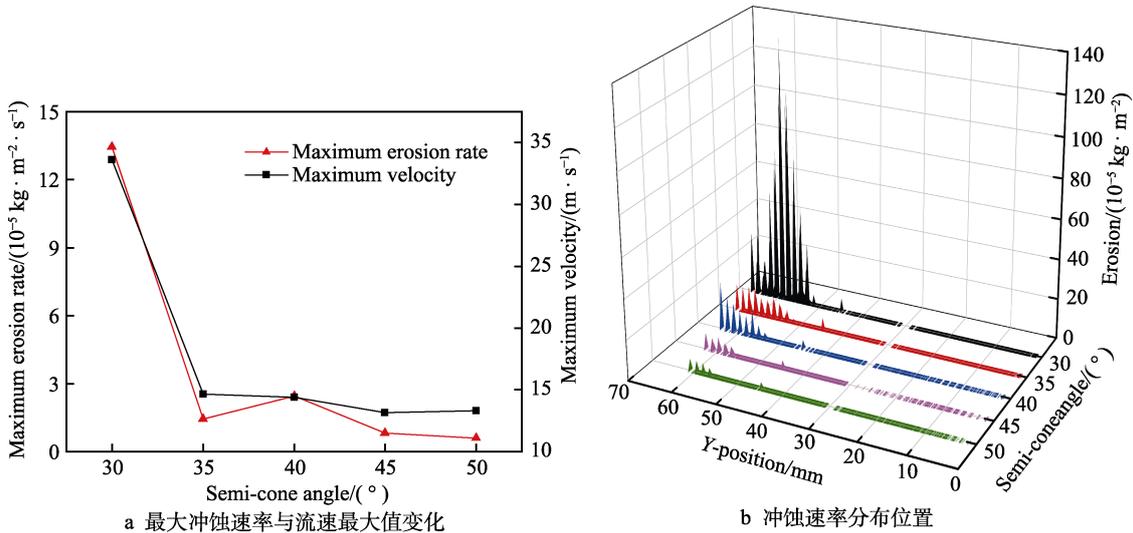


图 8 泵阀半锥角对流速最大值与冲蚀速率的影响

Fig.8 The effect of semi-cone angle of pump valve on the maximum velocity and the erosion rate: a) change of maximum erosion rate and maximum velocity; b) distribution location of erosion rate

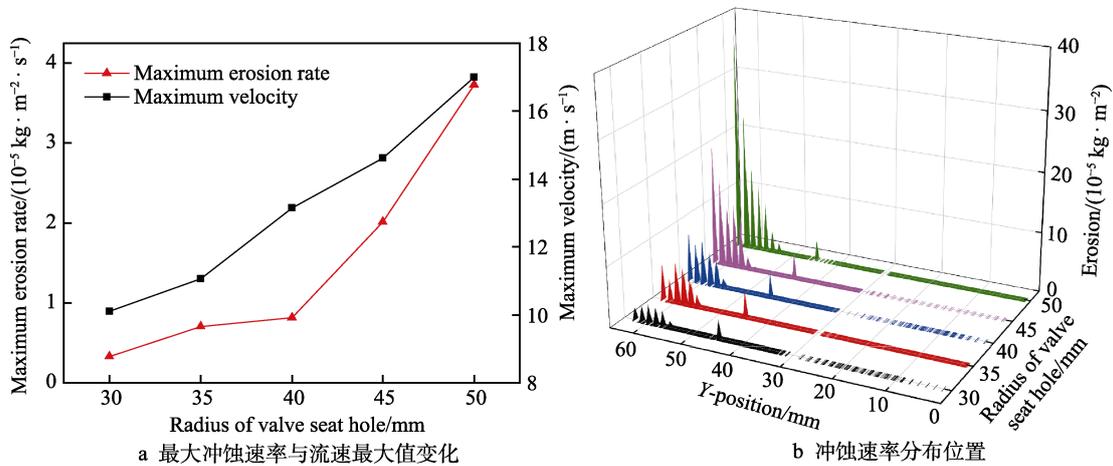


图 9 阀座孔入口半径对流速最大值与冲蚀速率的影响

Fig.9 The effect of radius of valve seat hole on the maximum velocity and the erosion rate: a) change of maximum erosion rate and maximum velocity; b) distribution location of erosion rate

内对阀座锥面的切削次数明显增加, 该位置的最大冲蚀速率随之增大; 入口半径的变化对阀盘边缘处的直接冲击则没有较明显的影响。同时, 阀座孔入口半径的影响程度明显小于泵阀半锥角。

相较于泵阀的半锥角与阀座孔入口半径, 阀盘升程除了对最大冲蚀速率及流速最大值具有较大影响外, 还明显改变了冲蚀磨损发生的位置。如图 10 所示, 当阀盘升程由 5 mm 增大到 15 mm 时, 其流速最大值由 32.84 m/s 减小至 13.14 m/s, 最大冲蚀速率降

低了 92.57%。当阀盘升程为 10~15 mm 时, 冲蚀磨损主要发生在阀盘边缘与阀座锥面靠近出口端部分, 且后者处的最大冲蚀速率更大、分布更广泛; 而当升程 ≤ 7.5 mm 时, 阀隙流场的流道明显变小, 导致同等体积下的颗粒数量增多, 单位时间内固体颗粒撞击阀座锥面的次数增加, 最大冲蚀速率相应增大。此时, 颗粒对阀座锥面的撞击范围随之增大, 冲蚀磨损部位逐渐向下扩散, 阀座锥面上的磨损更加靠近入口端, 分布情况趋于复杂。

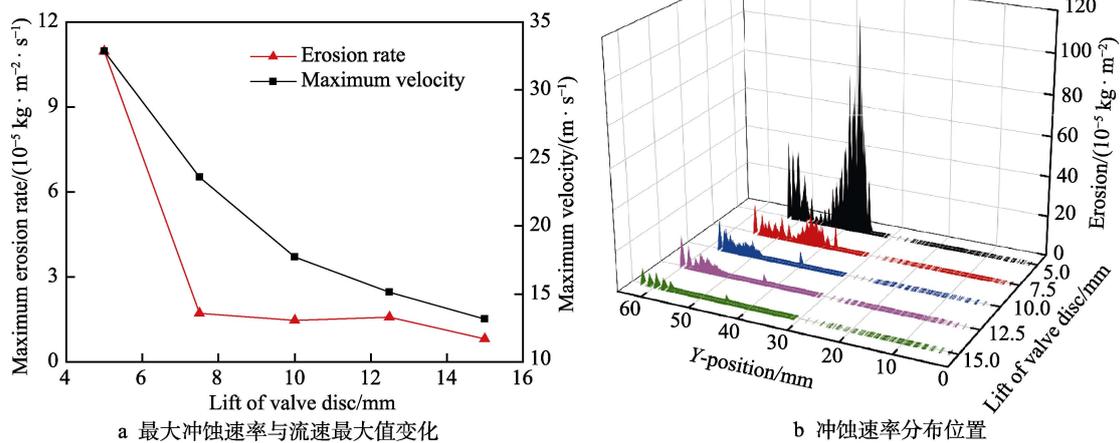


图 10 阀盘升程对流速最大值与冲蚀速率的影响

Fig.10 The effect of lift of valve disc on the maximum velocity and the erosion rate: a) change of maximum erosion rate and maximum velocity; b) distribution location of erosion rate

综上所述, 在满足工艺要求与生产需要的前提下, 可以通过增大泵阀的半锥角 (特别是避免将半锥角设定为 30°)、减小阀座孔入口半径、减小阀盘上部弹簧压力以增大其升程等方法有效改善固液两相流对阀盘边缘处的冲蚀磨损, 延长易损件的寿命。同时, 在设计压裂泵泵阀时, 应结合不同的结构参数对不同位置的阀体结构进行强化处理, 对高危区域进行针对性保护。

3 结论

1) 压裂泵泵阀的冲蚀磨损现象与阀隙流场内的压裂液流动状态变化及支撑剂的运动行为相关。冲蚀主要发生在阀盘边缘与阀座锥面处, 其中, 阀盘边缘处的冲蚀主要由颗粒直接反复冲击导致, 阀座锥面处的冲蚀则源自颗粒的切削作用。

2) 泵阀的最大冲蚀速率随支撑剂粒径的增大先增大后减小, 随支撑剂质量流量、阀座孔入口半径的增大而增大, 随泵阀半锥角与阀盘升程的增大而减小。泵阀结构参数对最大冲蚀速率的影响明显大于支撑剂参数。

3) 支撑剂参数不影响冲蚀磨损发生的位置, 泵阀半锥角与阀座孔入口半径对冲蚀磨损发生位置的影响相对较小, 阀盘升程的增大会显著改变冲蚀磨损发生的部位, 使得磨损区域逐渐下移, 分布情况趋于复杂。

参考文献:

- [1] PENG Wen-shan, CAO Xue-wen. Numerical Simulation of Solid Particle Erosion in Pipe Bends for Liquid-Solid Flow[J]. Powder Technology, 2016, 294: 266-279.
- [2] ZHANG Ji-xin, KANG Jian, FAN Jian-chun, et al. Study on Erosion Wear of Fracturing Pipeline under the Action of Multiphase Flow in Oil & Gas Industry[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 32: 334-346.
- [3] 易先中, 彭灼, 周元华, 等. 高压压裂液对 JY-50 压裂弯管冲蚀行为影响的数值模拟[J]. 表面技术, 2019, 48(2): 144-151.
- [4] YI Xian-zhong, PENG Zhuo, ZHOU Yuan-hua, et al. Numerical Simulation for Erosion Behavior of High-Pressure Fracturing Fluids on JY-50 Fracturing Bend Pipe [J]. Surface Technology, 2019, 48(2): 144-151.
- [5] SHAH S N, JAIN S. Coiled Tubing Erosion during Hydraulic Fracturing Slurry Flow[J]. Wear, 2008, 264(3-4): 279-290.
- [6] CHOCHUA G G, SHIRAZI S A. A Combined CFD-Experimental Study of Erosion Wear Life Prediction for Non-Newtonian Viscous Slurries[J]. Wear, 2019, 426-427: 481-490.
- [6] 莫丽, 王晓兵, 王军. 基于 CFD 的压裂泵泵阀结构特性分析[J]. 机械设计, 2015, 32(6): 75-78.
- MO Li, WANG Xiao-bing, WANG Jun. Structural Analysis for Fracturing-Pump-Valve Based on CFD Simulation [J]. Journal of Machine Design, 2015, 32(6): 75-78.

- [7] 莫丽, 王晓兵, 王军, 等. 基于 CFD 压裂泵阀结构冲蚀流场研究[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(2): 629-635.
MO Li, WANG Xiao-bing, WANG Jun, et al. CFD-Based Research on the Erosion of the Fracturing Pump Valve Structure[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(2): 629-635.
- [8] SHENG Mao, HUANG Zhong-wei, TIAN Shou-ceng, et al. CFD Analysis and Field Observation of Tool Erosion Caused by Abrasive Waterjet Fracturing[J]. Petroleum Science, 2020, 17(3): 701-711.
- [9] 韩传军, 刘洋, 李蓉, 等. 基于 CFD 的三缸柱塞泵泵阀失效机理研究[J]. 石油机械, 2011, 39(S1): 9-11.
HAN Chuan-jun, LIU Yang, LI Rong, et al. Research on Failure Mechanism of Triplex Piston Pump Valve Based on CFD[J]. China Petroleum Machinery, 2011, 39(Sup1): 9-11.
- [10] 钟功祥, 徐运来. 钻井泵泵阀流场动态仿真分析[J]. 机械设计与制造, 2017(6): 143-146.
ZHONG Gong-xiang, XU Yun-lai. Dynamical Simulation and Analysis of the Flow Field for Drilling Pump Valve [J]. Machinery Design & Manufacture, 2017(6): 143-146.
- [11] JOFFE S H D, ALLEN C. The wear of Pump Valves in Fine Particle Quartzite Slurries[J]. Wear, 1990, 135(2): 279-291.
- [12] YANG Guo-an, YIN Xin, SONG Zheng, et al. Particle Image Velocimetry Measurement of the Flow Field in the Play of the Drilling Pump Valve[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 23(1): 27-37.
- [13] 殷鑫. 钻井泵阀隙流场 PIV 实验研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2010.
YIN Xin. Experimental Research with PIV on the Flow Field in Valve Play of Drilling Pump Valve[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2010.
- [14] 杜明超, 李增亮, 董祥伟, 等. 菱形颗粒冲击材料表面冲蚀磨损特性分析[J]. 摩擦学学报, 2020, 40(1): 1-11.
DU Ming-chao, LI Zeng-liang, DONG Xiang-wei, et al. Analysis of Material Surface Erosion Characteristics Due to Rhomboid-Shaped Particle Impact[J]. Tribology, 2020, 40(1): 1-11.
- [15] 赵健, 张贵才, 徐依吉, 等. 固液两相流粒子冲蚀钻头内流道磨损[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(5): 1228-1236.
ZHAO Jian, ZHANG Gui-cai, XU Yi-ji, et al. Bit Internal Flow Passage Erosion by Solid-Liquid Two-Phase Flow Impact of Particles[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(5): 1228-1236.
- [16] 刘琦, 毛少华, 刘胜, 等. 湍流模型对弯管磨损计算的影响分析[J]. 中国舰船研究, 2019, 14(4): 85-90.
LIU Qi, MAO Shao-hua, LIU Sheng, et al. Analysis on the Influence of Turbulence Model on Elbow Erosion Calculation[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2019, 14(4): 85-90.
- [17] 乔小溪, 单斌, 陈平. 固-液两相流黑水管道冲蚀磨损的数值模拟研究[J]. 摩擦学学报, 2020, 40(6): 726-734.
QIAO Xiao-xi, SHAN Bin, CHEN Ping. Simulation Study on the Erosive Wear of the Black Water Pipeline with Solid-Liquid Flow[J]. Tribology, 2020, 40(6): 726-734.
- [18] ZHU Hong-jun, WANG Jian, BA Bin, et al. Numerical Investigation of Flow Erosion and Flow Induced Displacement of Gas Well Relief Line[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015, 37: 19-32.
- [19] LIN Nan, LAN Hui-qing, XU Yu-gong, et al. Effect of the Gas Solid Two-Phase Flow Velocity on Elbow Erosion [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 26: 581-586.
- [20] 孙飞, 冯永保, 胡宇, 等. 基于 CFD 的伺服滑阀冲蚀磨损特性分析[J]. 表面技术, 2016, 45(12): 84-90.
SUN Fei, FENG Yong-bao, HU Yu, et al. CFD-Based Characteristic Analysis of Erosion Wear of Servo Slide Valve[J]. Surface Technology, 2016, 45(12): 84-90.
- [21] FINNIE I. Erosion of Surfaces by Solid Particles[J]. Wear, 1960, 3(2): 87-103.
- [22] 李继志. 石油钻采机械概论[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2011.
LI Ji-zhi. Introduction to Petroleum Drilling and Production Machinery[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2011.
- [23] 潘林华, 张焯, 王海波, 等. 页岩复杂裂缝支撑剂分流机制[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2020, 44(1): 61-70.
PAN Lin-hua, ZHANG Ye, WANG Hai-bo, et al. Mechanism Study on Proppants' Division during Shale Complex Fracturing of Shale Rocks[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2020, 44(1): 61-70.
- [24] 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.
ZHU Xiao-hua, ZHANG Qin, ZHANG Yang-ming, et al. Study on Erosion Wear Characteristics of High Pressure Manifold Tee[J]. Surface Technology, 2021, 50(7): 258-265.
- [25] 钟功祥, 胥卜轩, 谢锐, 等. 压裂液对四通管冲蚀磨损的仿真分析[J]. 机械科学与技术, 2021, 40(4): 534-541.
ZHONG Gong-xiang, XU Bo-xuan, XIE Rui, et al. Simulation Analysis of Erosion Wear Induced by Hydraulic Fracturing Fluid in Cross-Pipe[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2021, 40(4): 534-541.
- [26] 钟林, 冯桂弘, 张计春, 等. 基于 CFD 数值模拟的排污阀冲蚀磨损影响规律[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(2): 151-157.
ZHONG Lin, FENG Gui-hong, ZHANG Ji-chun, et al. Influence Law of Erosion Wear of Blowdown Valve Based on CFD Numerical Simulation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39(2): 151-157.