锥阀式充填泵阀隙流场的冲蚀磨损特性研究*

黄腾龙[1,2]，曾凯[1,2]，石勇[1,2]，段胜胜[1,2]，段弘宇[1,2]，吕伟鹏[1,2]

（1.长沙矿山研究院有限责任公司， 湖南 长沙 410012；
2.湖南省矿山固废综合利用工程技术研究中心， 湖南 长沙 410012）

摘要：针对锥阀充填泵在工作过程中导致锥阀磨损的问题，利用 Navier-Stokes 方程、k-ε 湍流模型和阀隙两相流的冲蚀磨损模型，基于计算流体力学(CFD)软件，建立了从30°到90°共13组不同锥角的锥阀阀隙流场计算模型，研究了不同锥角的锥阀阀隙流场速度和冲蚀磨损特性，分析了料浆质量分数、颗粒粒径和锥阀角度3个因素对锥阀阀隙磨损的影响。研究结果表明：锥阀阀隙流场最大流速为8.28 m/s，出现在靠近锥阀底角和阀门间隙的位置；锥阀阀隙流场最大流速随着锥角的增加而降低，当锥角从30°增加到90°的过程中，最大流速从28.698 m/s降低至6.766 m/s，降低了76.42%；尾砂颗粒对锥阀的磨损主要发生在锥阀阀盘端面边缘，冲蚀磨损区域离散分布在阀盘边缘点，最大冲蚀速率为 9.4×10^{-4} kg/(m^2·s)，磨蚀磨损都集中在阀盘端面边缘，最大磨蚀速率为 1.83×10^{3} kg/(m^2·s)；最大冲蚀磨损速率与料浆质量分数、颗粒粒径和锥阀角度均成负相关；最大磨蚀磨损速率与料浆质量分数和颗粒粒径成正相关，与锥阀角度成负相关。工业验证表明，选取60°作为锥阀设计锥角，可以有效地增加锥阀的使用寿命，提高锥阀充填泵的稳定性。

关键词：充填泵锥阀；阀隙流场；磨损速率；锥阀角度；计算流体力学

中图分类号：TD853.34 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2025)08-0226-10

Study on Erosion Wear Characteristics of Valve Gap Flow Field in Taper Valve Filling Pump

HUANG Tenglong[1,2], *ZENG Kai*[1,2], *SHI Yong*[1,2], *DUAN Shengsheng*[1,2], *DUAN Hongyu*[1,2], *LYU Weipeng*[1,2]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.Hunan Engineering and Technology Research Centre for Comprehensive
Utilization of Mine Solid Waste, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: The taper valve is easy to wear during the working process of the taper valve filling pump. In view of the problem, using the Navier-Stokes equation, k-ε turbulence model and the erosion wear model of valve gap two-phase flow, based on computational fluid dynamics (CFD) software, a total of 13 groups of valve gap flow field calculation models with different taper angles from 30 ° to 90 ° were established. The valve gap flow field velocity and erosion wear characteristics of taper valve with different taper angles were studied. The effects of slurry mass fraction, particle size and taper angle on the wear of taper valve gap were analyzed. The results show that the maximum flow velocity of the taper valve gap flow field is 8.28 m/s, which appears near the bottom angle of the taper valve and the valve gap. The maximum flow velocity of the taper valve flow field decreases with the increase of the taper angle. When the taper angle increases from 30° to 90°, the maximum flow velocity decreases from 28.698 m/s to 6.766 m/s, with a decreasing rate of 76.42%. The wear of the taper valve by the tailings particles mainly occurs at the edge of the end face of the taper valve disc. The erosion wear area is discretely distributed at the edge of the valve disc, and the maximum erosion rate is 9.4×10^{-4} kg/(m^2·s). The erosion wear is concentrated at the edge of the end face of the valve disc, and the maximum erosion rate is 1.83×10^{3} kg/(m^2·s). The maximum erosion wear rate is negatively correlated with slurry mass fraction, particle size and taper valve angle. The maximum abrasion wear rate is positively correlated with the slurry mass fraction and particle size, and negatively correlated with the taper angle. The industrial verification shows that the selection of 60° as the design angle of the taper valve can effectively increase the service life of the taper valve and improve the stability of the taper valve filling pump.

Key words: Filling pump taper valve, Valve gap flow field, Erosion rate, Taper angle, Computational fluid dynamics

---

* **收稿日期**：2024-09-09
基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFC2904003)；湖南省高新技术产业科技创新引领计划项目(2022GK4057)
作者简介：黄腾龙(1988—)，男，福建仙游人，硕士，工程师，主要从事充填技术和矿山智能化技术研究。E-mail:467552558@qq.com

0 引言

近年来,在国家发展绿色矿山政策的导向下,充填采矿法得到了广泛的应用。随着充填工艺的更新迭代[1],膏体胶结充填已成为充填采矿的主要工艺[2-3]。膏体充填工艺的核心流程为:将选厂尾砂经过浓密机脱水浓缩后形成高浓度尾砂浆,将其与胶结剂按比例混合搅拌后得到充填料浆,最后通过自流或泵送的方式输送至井下采空区进行充填[4-6]。充填泵作为充填料浆泵送的动力源,是充填输送系统的核心装备,其部件繁多,在工作时各零部件的受力也极为复杂,而锥阀作为充填泵的主要运动部件,其往复运动频率高,且直接暴露在尾砂中,工作环境恶劣,是充填泵中最易磨损的元件。锥阀磨损导致充填泵的工作效率下降、可靠性降低,而锥阀阀隙流场流速、颗粒冲蚀与磨蚀是导致磨损的关键因素,故研究其工作状态,优化其设计参数,是提升锥阀充填泵稳定性的关键[7-8]。

随着工业化进程的快速发展,国内外的泵送领域也引进了数值模拟手段。ZHANG 等[9]基于离散元法(DEM)结合遗传算法 NSGA-Ⅱ对 S 分配管进行参数优化,得到 S 管最优参数,大幅度降低了平均磨损率和最大磨损量。JIANG 等[10]建立了泵送系统吸料过程额定数值模型,探究了吸料过程中料斗内部流场分布特征及混凝土中气泡分布的变化规律,得到了料斗底部存在“流动死区”的结论。除此之外,数值模拟的耦合技术也逐渐被探索运用。WANG 等[11]将小颗粒和大颗粒混合作为固相介质,通过计算流体动力学-离散元法(CFD-DEM)和 Archard 磨损模型进行模拟,结果表明,大颗粒对性能下降的影响大于小颗粒,泵内流道磨损程度随颗粒比变化明显。TANG 等[12]采用 CFD-DEM 耦合方法,结合磨粒磨损和冲击磨损预测模型,对离心泵的磨损特性进行了研究,结果表明,随着颗粒球度的增大,泵的冲击磨损率先减小后增大,而磨粒磨损率则稳定增大。丁啸等[13]利用动网格及 UDF 技术,研究了往复泵内阀球的运动特性,发现阀球受阀隙流速与液动力影响很大,运动升程呈现先增大后减小的趋势。LIAO 等[14]为了解管道主要磨损区域和量化磨损程度,采用 CFD-DEM 耦合技术模拟粗骨料的不规则形状,发现最明显的磨损出现在管道的弯曲部分,泵送速度和体积分数是管道磨损的关键。ZHANG 等[15]为解决传统 CFD 方法不能准确模拟弯管中大颗粒的问题,基于改进的 CFD-DEM 模型,研究了大颗粒对湍流的影响,结果表明,在较高的输送浓度下,大颗粒对湍流的影响效果显著,壁面上的颗粒碰撞频率与磨损率无线性相关性。LI 等[16]采用计算流体力学与离散元法耦合的方法,研究了泵内的颗粒分布、磨损失效及颗粒通过性能,发现低速颗粒在第一级入口处会形成颗粒堆积,颗粒受力的变化与颗粒和壁面碰撞的次数密切相关。

上述关于充填泵的研究主要集中在泵送压力、主缸换向冲击及主缸行程优化等方面,为泵的压力损失与流量调控提供了一定的参考,但目前对于锥阀充填泵在工作过程中导致锥阀磨损的研究较少。基于此,为准确描述锥阀间隙流场状态、了解冲蚀磨损特性及锥阀磨损的影响因素,利用计算流体力学软件,搭建锥阀计算模型,分析不同锥角下锥阀阀隙流场的流速及磨损速率,以期为增加锥阀使用寿命、提高锥阀充填泵的稳定性提供参考。

1 CFD 数值模拟方法

1.1 液相模型

基于对料浆流体介质的考虑,锥阀流体域计算采用的数值格式为欧拉与拉格朗日方法耦合[17],采用 Navier-Stokes 方程[18]进行计算,连续型方程及动量方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla(\rho\vec{u})=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\vec{u})+\nabla\cdot(\rho\vec{u}\vec{u})=-\nabla P+\nabla\cdot(\bar{\tau})+\rho\vec{g}+\vec{S}_{\mathrm{M}} \tag{2}$$

式中:ρ 为液体密度;t 为时间;$\vec{u}$ 为瞬时速度矢量;P 为压力;$\bar{\tau}$ 为应力张量;$\rho\vec{g}$ 为重力;$\vec{S}_{\mathrm{M}}$ 为由于固相而增加的动量。

应力张量的计算公式为:

$$\bar{\tau}=\mu\left[(\nabla\vec{u}+\nabla\vec{u}^{\mathrm{T}})-\frac{2}{3}\nabla\cdot\vec{u}\boldsymbol{I}\right] \tag{3}$$

式中:μ 为分子黏度;$\boldsymbol{I}$ 为微元张量。

为准确模拟料浆流动情况,本研究采用标准 k-ε 模型进行求解[19],方程如下:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho k\,u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k-\rho\varepsilon+S_k \tag{4}$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho\varepsilon\,u_i)}{\partial x_i}=$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}G_k-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}+S_\varepsilon \quad (5)$$

式中：G_k 为由于平均速度梯度产生的湍流动能；$C_{1\varepsilon}$、$C_{2\varepsilon}$ 为常数；u_i、u_t 为 i、t 方向上的速度分量；x_i、x_j 为空间坐标；k 为湍动能；ε 为耗散率；σ_k、σ_ε 为 k、ε 的湍流普朗特数；S_k 和 S_ε 分别表示湍动能 k 输运方程和湍流耗散率 ε 输运方程中的源项。

1.2 离散相模型

ANSYS Fluent 软件通过积分颗粒上的力平衡来预测离散相颗粒的轨迹[20]，在拉格朗日坐标系下对颗粒的运动方程进行积分，得到颗粒的运动轨迹。根据牛顿第二定律，提出了质点运动的控制方程：

$$\frac{\mathrm{d}\vec{u}_\mathrm{p}}{\mathrm{d}t}=\vec{F}_\mathrm{D}+\vec{F}_\mathrm{P}+\vec{F}_\mathrm{VM}+\vec{F}_\mathrm{B} \quad (6)$$

式中：$\vec{u}_\mathrm{p}$ 为颗粒速度；$\vec{F}_\mathrm{D}$ 为拖曳力，是作用在颗粒上的主要流体动力；$\vec{F}_\mathrm{P}$ 为压力梯度力，是由流动中的压力变化引起的；$\vec{F}_\mathrm{VM}$ 为虚拟质量力；$\vec{F}_\mathrm{B}$ 为颗粒所受浮力。

$\vec{F}_\mathrm{D}$、$\vec{F}_\mathrm{P}$、$\vec{F}_\mathrm{VM}$ 和 $\vec{F}_\mathrm{B}$ 的计算公式如下：

$$\vec{F}_\mathrm{D}=\frac{3\mu}{4\rho_\mathrm{p}d_\mathrm{p}^2}C_\mathrm{D}Re_\mathrm{s}(\vec{u}-\vec{u}_\mathrm{p}) \quad (7)$$

$$\vec{F}_\mathrm{P}=\left(\frac{\rho}{\rho_\mathrm{p}}\right)\nabla P \quad (8)$$

$$\vec{F}_\mathrm{VM}=\frac{1}{2}\frac{\rho}{\rho_\mathrm{p}}\frac{\mathrm{d}(\vec{u}-\vec{u}_\mathrm{p})}{\mathrm{d}t} \quad (9)$$

$$\vec{F}_\mathrm{B}=\frac{(\rho_\mathrm{p}-\rho)\vec{g}}{\rho_\mathrm{p}} \quad (10)$$

式中：C_D 为阻力系数；Re_s 为颗粒雷诺数；d_p 为颗粒直径；ρ_p 为颗粒密度。

1.3 颗粒冲蚀模型

结合料浆固液两相流动力学的几何特征，应用 E/CRC 研究中心提出的预测模型[21]：

$$R_\mathrm{e}=\sum_{P=1}^{N}\frac{m_\mathrm{p}C\,(BH)^{-0.59}\,F_\mathrm{S}f(\theta)v_\mathrm{p}a}{A_\mathrm{f}} \quad (11)$$

式中：R_e 为以单位时间内单位面积壁面材料去除的质量为单位给出的侵蚀速率；m_p 为颗粒质量流率；C 为经验常数，取 2.17×10^{-7}；BH 为壁面材料的布氏硬度；F_S 为颗粒形状系数，对于形状为理想的圆形的颗粒，$F_\mathrm{S}=0.2$；v_p 为颗粒撞击速度；a 为经验常数，取 2.41；A_f 为单元壁面的面积；$f(\theta)$ 为冲击角的函数。

$f(\theta)$ 的计算公式如下：

$$f(\theta)=5.40\theta-10.11\theta^2+10.93\theta^3-6.33\theta^4+1.42\theta^5 \quad (12)$$

2 计算模型建立与边界条件

2.1 锥阀阀隙流场的假设与简化

锥阀有进料锥阀和出料锥阀，而出料锥阀流场压力更大，工况更复杂，本文以出料锥阀阀隙流场为仿真对象。充填泵正常作业，当一侧料缸由吸料状态切换为泵送状态时，对应一侧的出料锥阀会在很短的时间内关闭，使料缸与充填管道间的连接断开，防止管内物料被重新吸回料缸中，降低吸料效率，在这个过程中，出料锥阀的阀体与阀座之间的流体域会因为阀体的运动发生复杂的变化。

锥阀由阀体、阀座和油缸组成[22]。锥阀在往复运动过程中受到流体压力、重力及油缸推力的影响，在保障仿真精度的前提下权衡时间，对锥阀物理模型进行了适当的简化，去除了间隙内多余的圆角特征，并截取阀前流场区域，只讨论更有风险的阀前部分，简化后的阀隙模型如图 1 所示。



(a) 锥阀三维模型　(b) 阀隙流体域模型　(c) 流体域模型剖视图

图 1 阀隙模型

Fig.1 Valve gap model

基于 Herschel-Bulkley 模型对锥阀阀隙流场作出如下假设：

(1) 阀隙流体中的膏体物料是具有一定屈服应力的非牛顿流体，黏度非定常；

(2) 膏体是连续的不可压缩流体，其密度不随压力的变化而变化；

(3) 膏体流动的应力-应变关系，随其非线性程度的变化呈现幂律关系；

(4) 阀隙流道内各质点的流速、流量、压力分布沿阀体对称分布。

Herschel-Bulkley 的数学表达式如下：

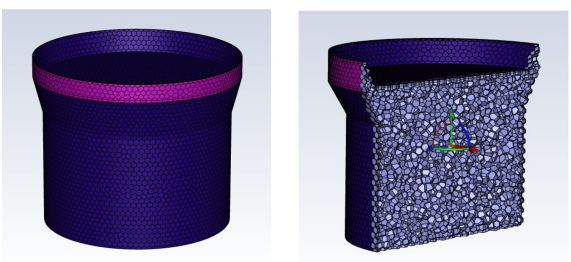
$$\tau=\tau_0+(\eta_0\cdot\gamma^n) \tag{13}$$

式中：τ 为流体应变；τ_0 为截距项；η_0 为流体切变黏度；γ 为应变速率；n 为流变指数。

当流体剪切力足够大，流变指数 $n<1$ 时，流体的黏度会减小，料浆变得具有流动性，此时剪切应力与剪切速度成正比关系。流变指数 $n>1$ 时，流体黏度增加，流体性质趋于黏稠，其流变模型特性与膏体料浆非常相似。

2.2　网格模型建立

应用 SpaceClaim 三维实体建模软件建立锥阀阀隙流体域 CAE 模型，通过组分创建定义流体域的进口、出口及壁面。将建立好的流体域模型导入到 Fluent meshing 中做网格处理，选用 Curvature & Proximity 作为面网格尺寸函数，考虑更高的网格精度，选取多面体网格为体网格类型，最大网络长度为 5 mm，划分结果如图 2 所示。



(a) 阀隙网格模型　　(b) 阀隙网格模型剖视图

图 2　阀隙模型网格划分

Fig.2　Mesh division of valve gap model

2.3　求解器及边界条件设置

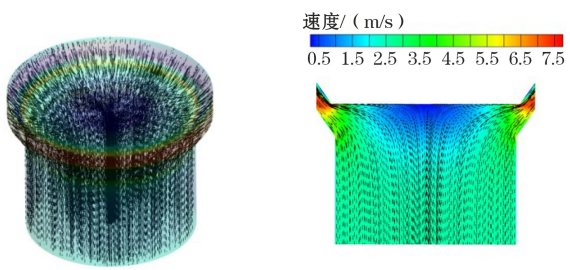
锥阀间隙流场仿真设置如下：多相流模型选用 VOF 模型，体积分数离散格式采用显式，能量模型关闭，黏性模型选择标准 k-ε 模型及标准壁面函数。材料方面，定义质量分数为 65% 的尾砂浆体与空气，其中尾砂浆体的密度为 1 600 kg/m^3，黏度为 0.001 kg/(m·s)。入口边界条件设为速度入口，速度大小为 1.7 m/s，出口为压力出口，压力值为 4 MPa，壁面采用无滑移静止壁面条件。锥阀冲蚀磨损特性分析：利用建立的阀隙流场网格模型，在模型处选择欧拉模型并设置为两相流，湍流计算采用标准 k-ε 模型；定义固相材料为密度 2 680 kg/m^3 的尾砂，尾砂颗粒粒径为 0.048 mm，流体域入口处水与颗粒的速度相同，均为 1.7 m/s，体积分数设置为 0.4。在 DPM 模型中，将入口定义为颗粒喷射源，颗粒初始喷射速度为 1.7 m/s，单位时间内的颗粒喷射流量为 40 kg/s。

为了提高收敛效率，采用 SIMPLE 算法求解压力场和速度场。压力项采用标准离散格式，对流项采用二阶迎风离散格式。收敛条件中体积残差小于 1×10^{-5}，迭代次数为 5 000 次，DPM 模型连续阶段的迭代次数为 10 次。

3　仿真结果与分析

3.1　锥阀间隙流场仿真求解计算与结果分析

通过 Fluent 求解计算得到锥阀阀隙流场迹线图和速度云图，分别如图 3 和图 4 所示。



(a) 阀隙流场迹线轴测图　　(b) 阀隙流场迹线剖视图

图 3　锥阀阀隙流场迹线图

Fig.3　Trace diagrams of taper valve gap flow field

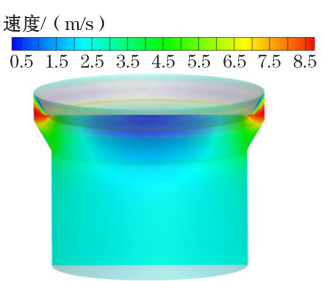


图 4　锥阀阀隙流场速度云图

Fig.4　Velocity cloud diagram of taper valve gap flow field

通过分析流场迹线图可知，膏体从锥阀阀座通孔处进入，在通道截面恒定的条件下，流体微元呈直线运动，随后在膏体到达锥阀阀盘后，开始向间隙处涌出，进入阀隙后的流体速度由于过流截面突然收缩而激增。分析流场速度分布云图，可以观察到流体速度在 0～8.28 m/s 的范围内变化，锥阀远端的流体速度接近边界条件中设置的入口初始速度 1.7

m/s,顺着流体流动方向,流速开始降低,流速最小值出现在壁面及锥阀阀体端面中心区域。壁面流速为零,是因为膏体物料输送过程中壁面的润滑层不产生滑移,而阀体端面中心区域速度降低是流体撞击到边界后造成的动能损失所致。最大流速出现在靠近锥阀底角和阀门间隙的位置,随着间隙面积的减小,流体速度从阀座边角处向阀体与阀座间的间隙流中间区域逐渐增大,最终达到流体域内最大值8.28 m/s。

一般情况下,流体速度的增加会增大尾砂颗粒对锥阀阀体表面的冲击力,从而提升冲蚀速率。为了能够更好地体现锥阀分配系统的稳定性,需要准确了解锥阀设计参数与阀隙流场流速之间的关系,从而选取合适的锥阀角度。

3.2 不同锥角锥阀阀隙流场速度对比分析

在保证锥阀阀体与阀座间距恒定的条件下,改变锥阀的角度,建立了从30°到90°共13组不同锥角的锥阀阀隙流场模型,利用Fluent软件对13组阀隙流场进行仿真分析,旨在明确锥阀结构在工作过程中的流体域状况,探究锥阀角度与阀隙流场速度之间的关系。不同锥角的锥阀阀隙流场速度分析结果如图5所示。

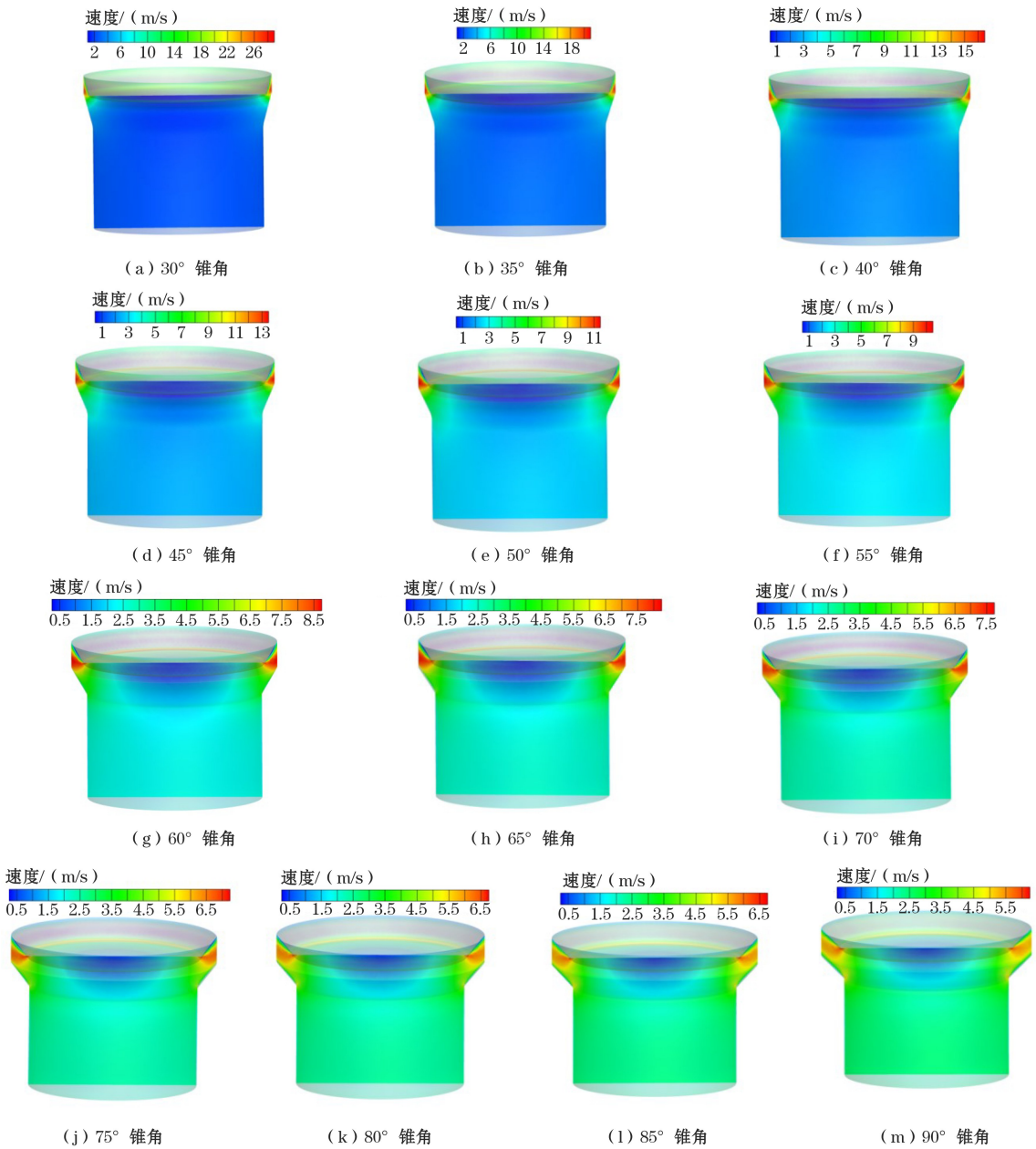


图5 不同锥角锥阀阀隙流场速度云图

Fig.5 Velocity cloud diagrams of taper valve gap flow field with different taper angles

将图 5 中不同锥角锥阀阀隙流场速度云图中的最大流速值进行对比,结果如图 6 所示。

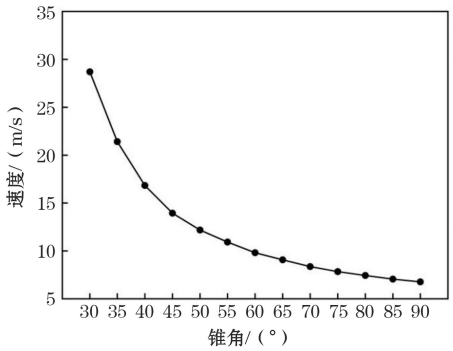


图 6 不同锥角的锥阀阀隙流场最大速度折线

Fig.6 Maximum velocity line of taper valve gap flow field with different taper angles

分析图 5(a)和图 6 可知,随着锥角的不断增大,阀隙内流体的最大流速呈现减小趋势。锥阀角度由 30°增大到 55°的过程中,阀隙内流体的最大速度下降的幅度比较大,由 28.698 m/s 降低至 10.919 m/s,降低了 61.95%。锥阀角度由 55°增大到 90°的过程中,阀隙内流体的最大速度下降的幅度相对较小,由 10.919 m/s 降低至 6.766 m/s,降低了 38.03%。通过比较不同锥角的锥阀阀隙流场速度云图可知,锥角参数可以影响流道的方向和过流面积,进而改变流场的分布特性。随着锥角的增大,阀隙内最大流速分布区域显著减小,这为充填泵锥阀的设计提供了重要参考。通过选择适宜的锥角,可以显著改善充填泵锥阀的密封性能,减轻冲蚀磨损,从而有效提高锥阀的工作效率和使用寿命。

3.3 锥阀冲蚀磨损特性

锥阀阀隙流场内颗粒的流速及运动轨迹如图 7 所示。

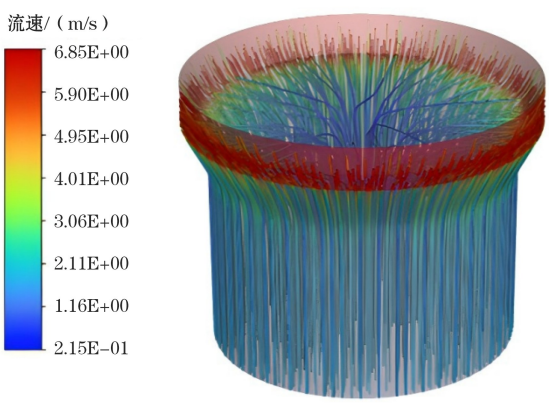


图 7 阀隙流场颗粒流速及运动轨迹

Fig.7 Particle velocity and movement trajectory in valve gap flow field

颗粒流速与运动轨迹在即将进入锥阀闭合形成的窄隙流道前发生突变,在锥阀快速闭合过程中,通过锥阀通孔的料浆流量保持恒定,而过流截面减小,导致料浆流速增大。颗粒自入口表面沿法线方向射入流道,靠近间隙的颗粒受缝隙处高压影响高速射出阀隙区域,速度最大值出现在阀盘底面边缘处;远离间隙的颗粒运动至阀盘端面时,受边界约束,与阀盘端面发生碰撞后势能降低,在端面中心区域的颗粒流速趋于零,受阀隙处高流速流体影响,逐渐沿端面向缝隙流出。

锥阀冲蚀磨损仿真得到的冲蚀速率与磨蚀速率云图如图 8 所示。

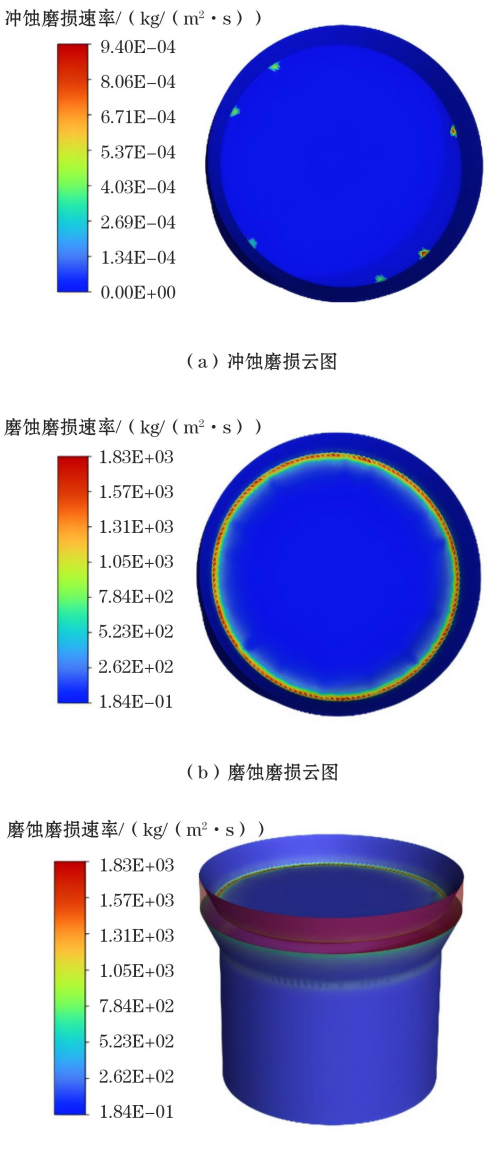


图 8 锥阀冲蚀磨损仿真云图

Fig.8 Simulation cloud diagrams of erosion wear for taper valve

从图 8 可以看出,尾砂颗粒对锥阀的磨损主要发生在锥阀阀盘端面边缘,冲蚀磨损区域较小,离散分布在阀盘边缘点,最大冲蚀磨损速率为 9.4×10^{-4} kg/(m^2 · s)。磨蚀磨损相较于冲蚀磨损更为明显,主要集中在阀盘端面边缘,最大磨蚀磨损速率为 1.83×10^{3} kg/(m^2 · s),此外锥阀阀座边缘同样出现了中等程度的磨蚀磨损。

3.4 锥阀磨损影响因素讨论

泵送尾砂的工况复杂,作业过程中影响锥阀磨损的参数很多,在验证了基于 CFD 的锥阀阀隙流场冲蚀模型后,将料浆质量分数、颗粒直径、锥阀角度这 3 个重要参数作为目标变量,研究其对锥阀阀隙磨损的影响。

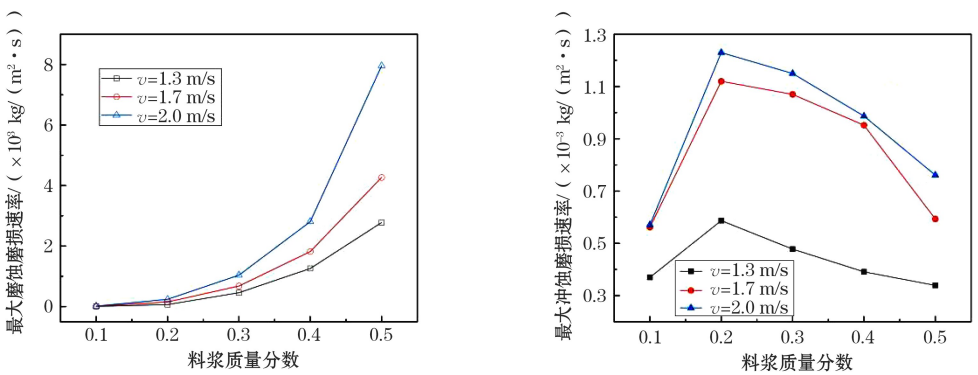
3.4.1 料浆质量分数

料浆质量分数是影响锥阀磨损的关键因素之一,尾砂浓度受膏体制备系统或尾砂浓密系统的影响,可能会出现大范围的波动,且锥阀充填泵在实际应用场景中(如洗管,清洗集料斗等),也会导致介质浓度大范围波动。

为了研究尾砂料浆质量分数对锥阀磨损的影响,将料浆质量分数作为变量,设置了从 0.1 至 0.5 共 5 个梯度,设置料浆入口流速分别为 1.3 m/s、1.7 m/s、2.0 m/s,在阀隙锥角参数和颗粒粒径不变的前提下,对锥阀阀隙流场进行冲蚀磨损仿真,结果如图 9 所示。

图 9(a)为料浆质量分数与最大磨蚀磨损速率关系曲线,从图 9(a)中可以看出,在料浆质量分数小于 0.1 的范围内,磨蚀磨损最大速率趋于零,基本不发生磨蚀磨损;当质量分数大于 0.1 时,最大磨损速率与流速、质量分数成正相关,且随着料浆质量分数的增大,最大磨蚀速率增长的速度加快,最大磨损速率为 7.96×10^{3} kg/(m^2 · s)。料浆质量分数在 0.4~0.5 区间内,流速越大引起的磨损速率变化越大。图 9(b)为料浆质量分数与最大冲蚀磨损速率关系曲线,图中 3 条曲线的最大值点出现在料浆质量分数为0.2 处,当料浆质量分数小于 0.2 时,随着料浆质量分数的增加,冲蚀磨损速率也逐渐增加;当料浆质量分数大于 0.2 时,固体颗粒数量增加,颗粒紧贴锥阀壁面形成保护层,防止流体中携带的具有动能的颗粒撞击壁面,表现为冲蚀磨损速率随着料浆质量分数的增加而降低。

对比图 9(a)和图 9(b)可知,对于稀相体系(质量分数小于 0.1)而言,影响物体过流表面磨损的重要因素是颗粒对固体壁面造成动量碰撞从而引起的冲蚀。而随着料浆质量分数的增加,介质由稀相转变为密相后,固体颗粒数量增加,当尾砂颗粒贴在锥阀阀体壁面平行运动时,会对壁面产生磨蚀,颗粒数越多,磨蚀程度越严重。



(a) 料浆质量分数对磨蚀磨损速率的影响　　(b) 料浆质量分数对冲蚀磨损速率的影响

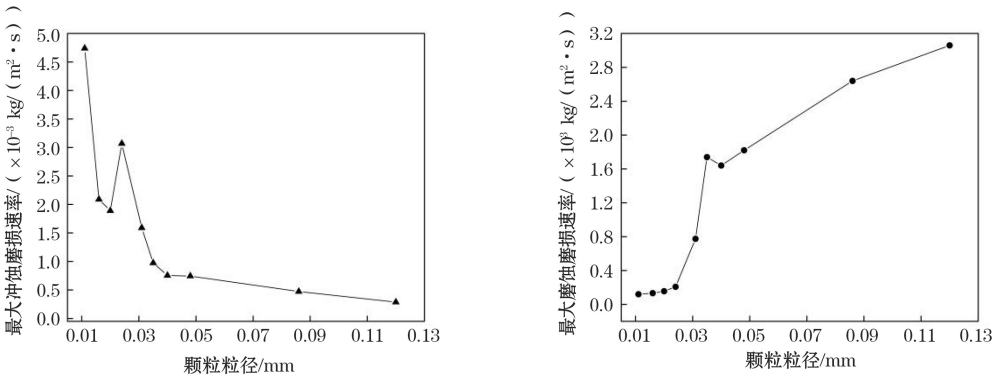
图 9 料浆质量分数对锥阀磨损速率的影响

Fig.9 Influence of slurry mass fraction on wear rate of taper valve

3.4.2 料浆颗粒粒径

选厂在选矿过程中,受磨矿设备精度及矿品种类的影响,尾砂中颗粒粒径分布不均匀,根据矿山实际情况,颗粒粒径为 0.011~0.12 mm 的较多。在锥阀阀隙锥角参数不变、料浆入口流速 $v=1.7$ m/s、料浆质量分数为 0.4 的条件下,在 0.011~0.12 mm 之间设置 10 种颗粒粒径,分析颗粒粒径对锥阀磨损速率的影响。

由于在锥阀上取一个点进行磨损分析无法体现整体磨损情况,在此取最大的冲蚀磨损速率和磨蚀磨损速率来分析颗粒粒径对锥阀的磨损效果,结果如图 10 所示。



(a) 颗粒粒径对冲蚀磨损速率的影响　(b) 颗粒粒径对磨蚀磨损速率的影响

图 10　颗粒粒径对锥阀磨损速率的影响

Fig.10　Influence of particle size on wear rate of taper valve

由图 10(a)可知,随着颗粒粒径的增大,最大冲蚀磨损速率总体呈下降趋势。由图 10(b)可知,随着颗粒粒径的增大,最大磨蚀磨损速率总体呈上升趋势。颗粒粒径与最大冲蚀磨损速率成负相关,与最大磨蚀磨损速率呈正相关。

冲蚀磨损是单个流动粒子冲击物体表面而造成表面材料的损耗,磨蚀磨损是整个流体对机械表面所造成的损耗。当料浆质量分数不变时,即颗粒总质量不变,颗粒粒径变大(单个颗粒的质量增大),意味着颗粒数量减少,锥阀单位面积内受到的颗粒碰撞次数减少,即冲蚀磨损速率减少;而单个颗粒质量增加导致其惯性力也相应增大,整体流体的惯性力也成倍增长,使得磨蚀磨损速率增加。

当颗粒粒径在 0.01～0.04 mm 之间时,锥阀的冲蚀磨损速率和磨蚀磨损速率变化显著大于颗粒粒径在 0.04～0.12 mm 内的速率变化。在小粒径范围内,颗粒粒径变化对机械磨损的影响占主导地位;随着颗粒粒径的增大,流体黏性力对颗粒的作用减弱,而剪切速率不变,导致剪切力逐渐大于流体内部的黏性力。在大粒径范围内,颗粒粒径增大使单个颗粒质量相应增加,导致剪切力的作用效果降低,磨损速率变化趋近平稳,此时颗粒质量占主导地位。

3.4.3　锥阀角度

设置颗粒粒径为 0.048 mm、料浆质量分数为 0.4、锥阀入口流速为 1.7 m/s,探究锥阀角度的变化对锥阀磨损速率的影响,结果如图 11 所示。

由图 11 可知,锥阀角度由 45°增大到 70°,锥阀的最大冲蚀磨损速率和最大磨蚀磨损速率逐渐降低且趋于平缓状态,最大磨蚀磨损速率与最大冲蚀磨损速率的最大值分别为 2.92×10^{3} kg/(m² · s)与 2.17×10^{-3} kg/(m² · s)。当锥阀角度为 60°时,最大磨蚀速率和最大冲蚀速率较小,分别为 1.2×10^{3} kg/(m² · s)和 0.7×10^{-3} kg/(m² · s);当锥阀角度由 45°增大到 60°时,最大磨蚀磨损速率和最大冲蚀磨损速率的降低效果明显,分别降低了 58.9%和 67.7%;当锥阀角度由 60°增大到 70°时,最大冲蚀磨损速率和最大磨蚀磨损速率下降速度减缓,分别降低了 2.1%和 7.9%。综上所述,当颗粒粒径为 0.048 mm、料浆质量分数为 0.4、锥阀入口流速为 1.7 m/s 时,锥阀角度的增大可以减小料浆对锥阀的磨损,在锥阀角度为 60°时效果最明显。

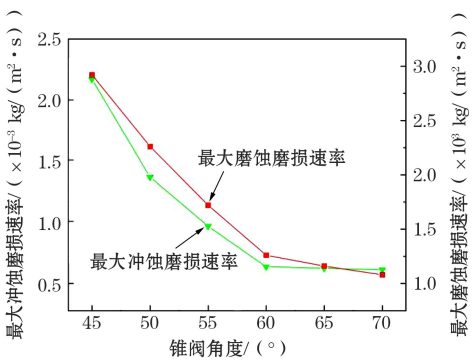


图 11　锥阀角度对锥阀磨损速率的影响

Fig.11　Influence of taper valve angle on wear rate of taper valve

4　现场工业验证

衡阳远景钨矿业有限责任公司充填系统泵送充填能力为 60 m³/h,实测的充填料浆质量浓度可达 68%～70%,充填站 2 班/d,8 h/班,日充填能力为 960 m³。现场工业试验表明,充填系统正常运行时,充填料浆输送稳定且均质性好,如图 12 所示,锥

阀阀隙边缘磨损小,未见积料现象,说明选取 60°作为锥阀锥角,可以有效地减少锥阀磨损,增加锥阀的使用寿命,提高锥阀充填泵的稳定性。



图 12 锥阀优化后的应用效果

Fig.12 Application effect of optimized taper valve

5 结论

(1) 锥阀阀隙流场的最大流速为 8.28 m/s,发生在靠近锥阀底角和阀门间隙的位置。随着锥阀角度的不断增加,阀隙内最大流速分布区域与最大流速值都呈现出逐渐减小趋势,锥阀角度从 30°增加到 55°过程中,最大流速值降低了 61.95%,从 55°增加到 90°过程中,最大流速值降低了 38.03%。

(2) 料浆中尾砂颗粒对锥阀的磨损发生在锥阀阀盘端面边缘区域。其中,冲蚀磨损区域较小,主要发生在离散分布的几个阀盘边缘点,最大冲蚀速率为 9.4×10^{-4} kg/(m^2 · s);磨蚀磨损相较于冲蚀磨损更为明显,主要集中在阀盘端面边缘,最大磨蚀速率为 1.83×10^{3} kg/(m^2 · s);

(3) 最大冲蚀磨损速率与料浆质量分数、颗粒粒径和锥角角度均成负相关;最大磨蚀磨损速率与料浆质量分数和颗粒粒径成正相关,与锥阀角度成负相关;在锥阀角度为 60°时,最大磨蚀磨损速率和最大冲蚀磨损速率较小,分别为 1.2×10^{3} kg/(m^2 · s)和 0.7×10^{-3} kg/(m^2 · s)。在矿山实际应用中,选取 60°作为锥阀设计锥角,可以有效地减少锥阀磨损,增加锥阀使用寿命,提高锥阀式充填泵的稳定性。

参考文献(References):

[1] 程海勇,吴爱祥,吴顺川,等.金属矿山固废充填研究现状与发展趋势[J].工程科学学报,2022,44(1):11-25.
CHENG Haiyong, WU Aixiang, WU Shunchuan, et al. Research status and development trend of solid waste backfill in metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022,44(1):11-25.

[2] 孙光华,王玥,任伟成.胶结充填技术在金属矿山中的应用现状与发展趋势[J].有色金属(矿山部分),2022,74(4):26-33.
SUN Guanghua, WANG Yue, REN Weicheng. Application status and development trend of cemented filling technology in metal mines[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2022,74(4):26-33.

[3] 吴爱祥,李红,程海勇,等.全尾砂膏体流变学研究现状与展望(上):概念、特性与模型[J].工程科学学报,2020,42(7):803-813.
WU Aixiang, LI Hong, CHENG Haiyong, et al. Status and prospects of researches on rheology of paste backfill using unclassified-tailings (Part 1): concepts, characteristics and models[J]. Chinese Journal of Engineering, 2020,42(7):803-813.

[4] 王华伟,左思蒙,何利勇,等.某液压锥阀内泄漏流场和空化噪声分析[J].重庆理工大学学报(自然科学),2024,38(12):216-223.
WANG Huawei, ZUO Simeng, HE Liyong, et al. Analysis of internal leakage flow field and cavitation noise in a hydraulic poppet valve[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science),2024,38(12):216-223.

[5] 张鲸波,严庆文,王洪江,等.某铅锌矿全尾砂膏体充填料浆流变性能研究[J].矿业研究与开发,2022,42(3):109-115.
ZHANG Jingbo, YAN Qingwen, WANG Hongjiang, et al. Research on rheological properties of whole tailings paste filling slurry in a mine [J]. Mining Research and Development,2022,42(3):109-115.

[6] 吴凡,韩斌,胡亚飞,等.膏体充填料浆管输摩阻损失计算及应用研究[J].采矿与安全工程学报,2021,38(6):1158-1166.
WU Fan, HAN Bin, HU Yafei, et al. Calculation and application of friction loss in slurry pipeline transportation with paste filling [J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2021,38(6):1158-1166.

[7] 白天阳,郭根苗,管伟,等.喷嘴几何结构对涡线空化特性影响的数值模拟研究[J].燃烧科学与技术,2024,30(3):295-301.
BAI Tianyang, GUO Genmiao, GUAN Wei, et al. Numerical study of effect of geometric parameters on the characteristics of vortex cavitation inside diesel injector nozzles[J]. Journal of Combustion Science and Technology,2024,30(3):295-301.

[8] 陈正甦,衡亚光,熊平,等.基于 CFD-DPM 的离心泵内颗粒性质对泵性能与磨损的影响[J].西华大学学报(自然科学版),2024,43(1):87-96+102.
CHEN Zhengsu, HENG Yaguang, XIONG Ping, et al. Influence of particle properties on the performance and wear of centrifugal pumps based on CFD-DPM[J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition),2024,43(1):87-96+102.

[9] ZHANG Wei, JIANG Shengqiang, LI Xu, et al. Multi-objective optimization of concrete pumping S-pipe based on DEM and NSGA-Ⅱ algorithm [J]. Powder Technology, 2024,434:119314.

[10] JIANG Shengqiang, HE Zehua, ZHOU Yupeng, et al. Numerical simulation research on suction process of concrete pumping system based on CFD method [J]. Powder Technology,2022,409:117787.

[11] WANG Yanping, HE Tielin, DING Qiangmin, et al. Analysis of internal flow and wear characteristics of binary mixture particles in centrifugal pump based on CFD-DEM [J]. Processes,2022,10(4):681.

[12] TANG Cheng, YANG Youchao, LIU Pengzhan, et al. Prediction of abrasive and impact wear due to multi-shaped particles in a centrifugal pump via CFD-DEM coupling method[J]. Energies,2021,14(9):2391.

[13] 丁啸,沈叶辉,陈德泉,等.往复泵进液阀阀球运动特性研究及多目标优化[J].流体机械,2024,52(5):55-63+70.
DING Xiao, SHEN Yehui, CHEN Dequan, et al. Research on valve ball motion characteristics and multi-objective optimization of reciprocating pump inlet valve [J]. Fluid Machinery,2024,52(5):55-63+70.

[14] LIAO Yuankun, CHENG Kai, SUN Wuhe, et al. Study on pumping wear characteristics of concrete pipeline based on CFD-DEM coupling [J]. Scientific Reports, 2023, 13(1):16119.

[15] ZHANG Yuanhang, WANG Xiaojie, ZHANG Xuzhen, et al. Numerical investigation of the impacts of large particles on the turbulent flow and surface wear in series-connected bends[J]. Journal of Marine Science and Engineering,2024,12(1):164.

[16] LI Yi, CHEN Jincheng, LIN Zhe, et al. Liquid-solid two-phase flow and wear characteristics in a two-stage mixed-transport pump [J]. Journal of Mechanical Science and Technology,2024,38(8):4187-4197.

[17] HOU Yujie, SONG Siyuan, SUN Jiahao, et al. Wear regularity of shotcrete conveying bend based on CFD-DEM simulation[J]. Buildings,2023,13(2):415.

[18] LI Yi, CAO Jianpeng, XIE Chaojie. Research on the wear characteristics of a bend pipe with a bump based on the coupled CFD-DEM [J]. Journal of Marine Science and Engineering,2021,9(6):672.

[19] 王志亮,伍振华,王振松,等.基于 CFD-DPM 的射流泵中 90° 弯曲流道冲蚀仿真分析[J].机床与液压,2023,51(14):174-181+232.
WANG Zhiliang, WU Zhenhua, WANG Zhensong, et al. Simulation analysis of 90° curved flow channel erosion in jet pump based on CED-DPM[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2023,51(14):174-181+232.

[20] 钟翌铭,李兵,张维勇,等.颗粒直径和固相浓度对深海采矿泵综合性能的影响[J].船舶工程,2023,45(12):37-45.
ZHONG Yiming, LI Bing, ZHANG Weiyong, et al. Effects of particle size and solid phase concentration on performance and wear of a deep-sea mining pump[J]. Ship Engineering, 2023,45(12):37-45.

[21] 梁景银,许磊,陈文飞,等.基于计算流体力学-离散单元法的 U 形管冲蚀磨损数值模拟研究[J].高技术通讯,2024,34(5):545-554.
LIANG Jingyin, XU Lei, CHEN Wenfei, et al. Numerical simulation of erosion wear of U-shaped elbow based on CFD-DEM[J]. High Technology Letters,2024,34(5):545-554.

[22] 王小林,郭进平,吴爱祥,等.基于骨料运移的高浓度充填管道磨损机制[J].中国有色金属学报,2024,34(6):2099-2111.
WANG Xiaolin, GUO Jinping, WU Aixiang, et al. Wear mechanism of high-concentration filling pipeline based on aggregate migration[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2024,34(6):2099-2111.