

基于 CFD-DEM 方法的矿浆泵磨损特性研究^①

李 钟¹, 金 伟², 王予琪², 杨 浩², 张 明¹, 彭赛锋¹

(1.长沙矿冶研究院有限责任公司 深海矿产资源开发利用技术国家重点实验室,湖南 长沙 410012; 2.浙江理工大学,浙江 杭州 310018)

摘要: 基于 CFD-DEM 耦合的方法,同时结合 Archard 磨损模型,对小流量矿浆泵在不同流量、不同颗粒粒径等工况下进行数值模拟,分析了泵内颗粒运动规律、颗粒在不同流域的分布情况以及颗粒与泵过流部件的碰撞规律,研究了矿浆泵内过流部件尤其是蜗壳的磨损特性。结果显示,蜗壳存在一定堵塞,蜗壳靠近隔舌段颗粒形成低速堵塞区,蜗壳的磨损主要集中在上半部分及隔舌附近的位置;随着流量增大,颗粒速度增大,颗粒与壁面碰撞时动能增大,矿浆泵体磨损情况增强;小粒径颗粒工况下磨损情况更严重。

关键词: 矿浆泵; 蜗壳; 磨损; CFD-DEM 耦合; 粗颗粒

中图分类号: TD857

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.01.004

文章编号: 0253-6099(2023)01-0016-05

Research on Wear Characteristics of Slurry Pump Based on CFD-DEM Method

LI Zhong¹, JIN Wei², WANG Yuqi², YANG Hao², ZHANG Ming¹, PENG Saifeng¹

(1.State Key Laboratory of Exploitation and Utilization of Deep-sea Mineral Resources, Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy Co Ltd, Changsha 410012, Hunan, China; 2.Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China)

Abstract: By using CFD-DEM coupling approach and Archard wear model, a slurry pump with small flow was numerically simulated under the conditions including different flow rates and particle sizes. Based on the analysis of the movement law of particles in the pump, the distribution of particles in different regions of pump and the collision between particles and wetted parts of the pump, the wear characteristics of wetted parts in the slurry pump, especially the volute were studied. The results show that there is some blockage in the volute approaching the tongue region due to a slow flow rate of particles. It is found that wear of the volute is mainly concentrated on the upper part and near the tongue region. With the increase in the flow rate and velocity of particles, the kinetic energy of the particles collide with the pump wall increases, resulting in serious wear on the body of slurry pump. And the wear will become more serious by the particles with small grain size.

Key words: slurry pump; volute; wear; CFD-DEM coupling; coarse grain

矿浆泵是采矿系统中输送固体物料的重要动力核心。由于输运介质中含有大量硬质固体颗粒,在运行过程中会撞击矿浆泵冲刷弯头内壁面和泵内过流部件,造成过流部件材料磨损,降低泵的使用寿命。

随着 CFD 数值模拟技术发展,对矿浆泵内部流场进行仿真分析从而获得泵的结构参数以及性能的研究逐渐增加^[1-6],但目前小流量粗颗粒矿浆泵的磨损特性

以及工况、颗粒参数与磨损量之间的定量关联还不清楚。本文研究了矿浆泵过流部件的整体磨损特性以及不同流量、颗粒粒径和颗粒浓度下的泵磨损。

1 矿浆泵参数与几何模型

在初算模型泵水力参数的基础上,对流动形状进行绘形,设计叶片的型线,通过二维和三维绘图来辅助

① 收稿日期: 2022-08-07

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC2801701-01); 中国五矿集团科技专项——战略前沿技术研究(2019ZXA02)

作者简介: 李 钟(1984—),男,广西柳州人,工程师,主要研究方向为深海采矿矿浆输送技术和装备。

通信作者: 金 伟(1995—),男,浙江台州人,硕士研究生,主要研究方向为固液离心泵两相流动。

校核流道的过流面积。矿浆泵主要参数如表 1 所示。

表 1 矿浆泵参数

参数	单位	取值
流量	m ³ /h	50
额定转速	r/min	1 480
叶片数	片	8
叶轮进口直径	mm	40
叶轮出口直径	mm	50
叶轮出口宽度	mm	40
叶片厚度	mm	12

对矿浆泵叶轮进行设计,泵流动域的三维模型如图 1 所示。矿浆泵设计为 8 叶片,叶片数量较多,可以提高流体流动稳定性、提升叶片做功能力。

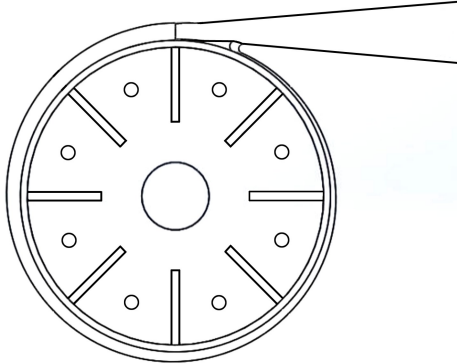


图 1 矿浆泵流动域三维模型

2 计算模型和方法

2.1 磨损模型

数值模拟中,计算壁面磨损所使用的磨损模型是 Archard 基于颗粒和壁面之间的接触力学提出的磨损模型,其表达式为^[7-9]:

$$W = Ks \frac{P}{P_m} \quad (1)$$

式中 W 为磨损体积,mm³; s 为滑动距离,mm; P 为施加的载荷,N; P_m 为壁面材料硬度,N/mm²。 P 和 P_m 的比值被看作是真实的接触面积。 K 为与材料本身相关的无量纲磨损常数,它可由 Prasad^[10] 数据计算得出, $K = 3.685 \times 10^{-4}$ 。

2.2 固液两相计算模型

采用 CFD-DEM 耦合的方法求解两相流场,流场满足连续性方程和动量方程,颗粒场满足颗粒运动方程^[11-12]。液相连续性方程为:

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f V_f) = 0 \quad (2)$$

式中 ρ_f 为液相密度; V_f 为液相速度。

由动量守恒定律,液相动量方程为:

$$\frac{\partial (\rho_f V_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f V_f^2) = \nabla p + \nabla \cdot (\mu_f \cdot \nabla V_f) + \rho_f g + F \quad (3)$$

式中 μ_f 为液相黏度; F 为体积力; p 为静压力; g 为重力加速度。

颗粒的运动方程满足牛顿第二定律,同时考虑了颗粒的自转,具体表达形式为:

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_j (F_{n,ij} + F_{\tau,ij}) + F_{fp,i} + m_i g \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} I_i \omega_i = \sum_j (r_i \times F_{\tau,ij} + M_i) \quad (5)$$

式中 m_i 、 v_i 分别为颗粒 i 的质量和速度; $F_{n,ij}$ 为颗粒 i 和颗粒 j 之间的法向接触力; $F_{\tau,ij}$ 为切向接触力; I_i 为颗粒 i 的转动惯量; ω_i 为颗粒 i 的角速度; r_i 为颗粒半径; $F_{fp,i}$ 为来自液相对颗粒 i 的作用力; M_i 为滚动摩擦力矩。

3 计算结果分析

3.1 矿浆泵过流部件磨损分析

以颗粒体积浓度 10%、颗粒粒径 10 mm、流量 50 m³/h 为例,分析矿浆泵过流部件磨损情况。蜗壳磨损情况如图 2 所示,可见磨损主要集中在蜗壳上半部分及隔舌位置。将模型简化为 XY 面上的二维模型,待流动稳定后,1.48~1.50 s 内颗粒与蜗壳碰撞位置分布如图 3 所示,可以观察到磨损面积较大的蜗壳上半部分碰撞较多。

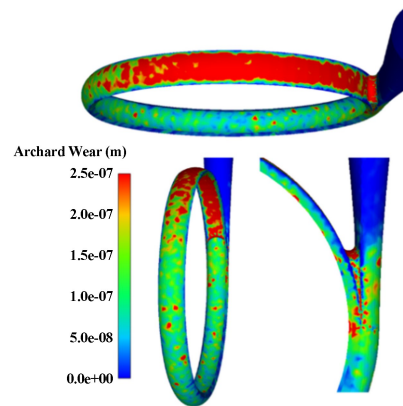


图 2 矿浆泵蜗壳磨损情况

1.50 s 时矿浆泵内颗粒矢量分布及速度分布如图 4 所示。可见靠近蜗壳上半部分严重磨损区域存在高速颗粒与蜗壳发生碰撞;在蜗壳靠近隔舌位置存在大量

颗粒与蜗壳碰撞,此处磨损较为严重。由于管径及重力作用,蜗壳存在一定堵塞,蜗壳靠近隔舌段颗粒形成低速堵塞区,该区域颗粒碰撞次数较多,磨损量较大。

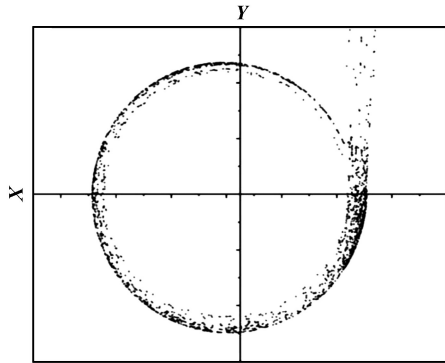
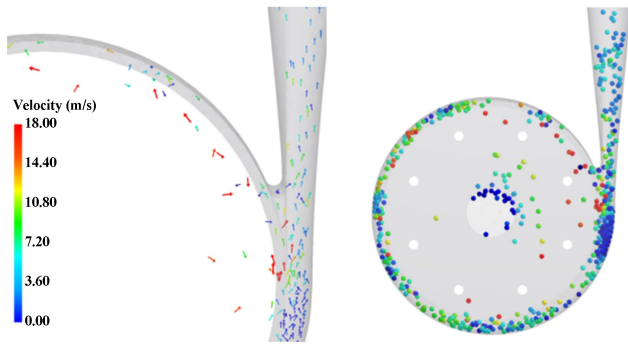


图3 0.02 s内颗粒与蜗壳碰撞位置分布



(a) 矢量分布; (b) 速度分布

图4 1.50 s时矿浆泵内颗粒矢量分布及速度分布

矿浆泵内过流部件与颗粒碰撞次数如图5所示。可见颗粒与蜗壳碰撞次数远高于颗粒与叶片碰撞次数。

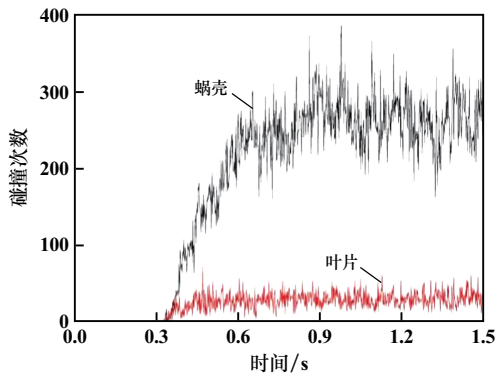


图5 矿浆泵内过流部件与颗粒碰撞次数

3.2 不同流量下矿浆泵磨损情况

在体积浓度10%、颗粒粒径10 mm工况下,研究了不同流量下的矿浆泵磨损情况,结果如图6所示。可以发现,随着流量增大,壁面磨损程度增大。随着流量增大,颗粒获得的流体作用力增大,颗粒速度随之增

大,这就导致颗粒与壁面碰撞时携带了更大的动能。另外,颗粒速度增大,颗粒冲击壁面的频率增大,当颗粒速度非常大时,颗粒冲击壁面引起的磨损尤其严重。

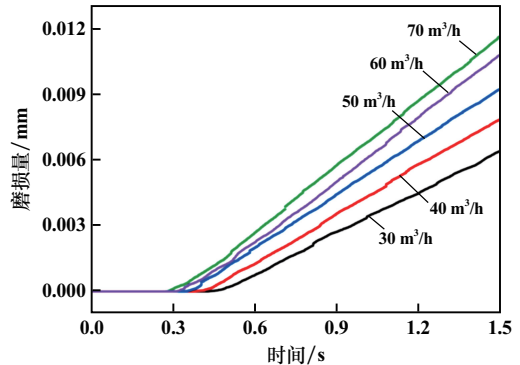


图6 不同流量下矿浆泵累计磨损情况

图7为不同流量下蜗壳累计磨损量。可以发现,流量越大,越早开始发生磨损,蜗壳磨损量明显随时间增大而增大。

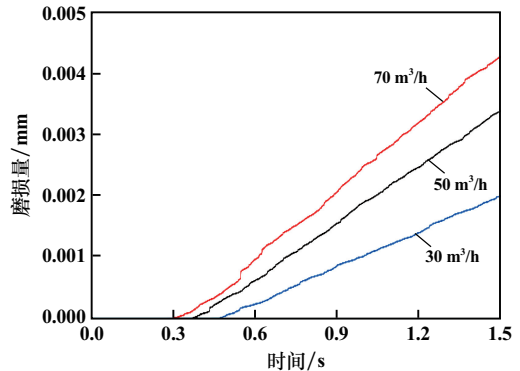


图7 不同流量下蜗壳累计磨损量

不同流量下蜗壳磨损情况如图8所示。随流量增加,蜗壳主要磨损部位未发生明显改变,但严重磨损区域面积增大,磨损量增加。

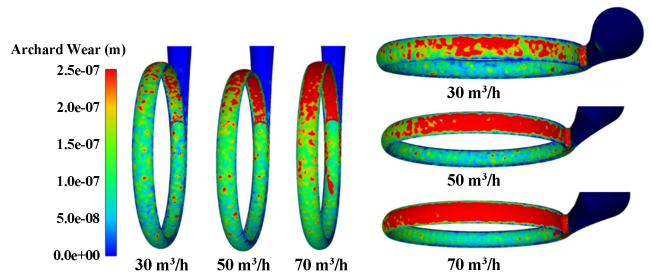


图8 不同流量下蜗壳磨损情况

图9为不同流量下矿浆泵隔舌位置磨损情况。可以看到,随流量增大,隔舌位置严重磨损面积明显增大。与流量50 m³/h对比,流量70 m³/h时隔舌位置磨损情况明显更严重。

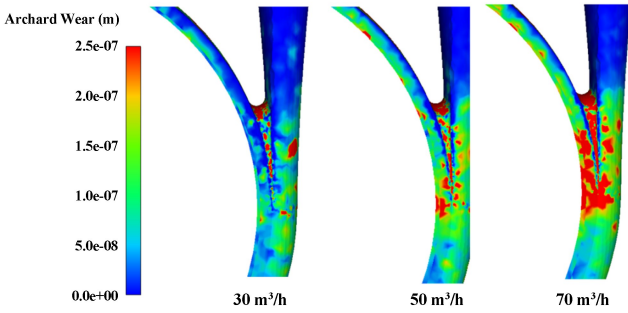


图 9 不同流量下矿浆泵隔舌磨损情况

图 10 为不同流量下矿浆泵内颗粒位置及速度分布情况。随流量增大,蜗壳靠近隔舌区域堵塞情况逐渐严重,流量 $70 \text{ m}^3/\text{h}$ 时该区域堵塞情况较严重且面积较大,对应隔舌区域开始出现严重磨损。同时蜗壳流道颗粒速度随流量增大而增大,蜗壳上半部分严重磨损区域高速颗粒数量增加,对应蜗壳上半部分严重磨损区域面积增大。

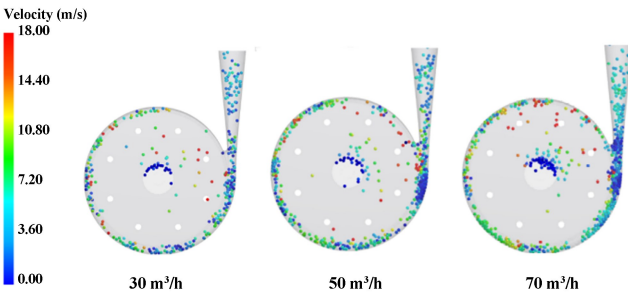


图 10 不同流量下颗粒在矿浆泵内的位置及速度分布

3.3 不同颗粒粒径下矿浆泵磨损情况

对比了体积浓度 10%、流量 $50 \text{ m}^3/\text{h}$ 时颗粒粒径 5 mm 和 10 mm 的泵体过流部件磨损情况及颗粒碰撞情况,结果如图 11~12 所示。可以发现,颗粒粒径 5 mm 的泵体磨损程度和碰撞次数远大于颗粒粒径 10 mm 的工况,且颗粒粒径 5 mm 时颗粒与泵过流部件碰撞次数随时间波动较大。

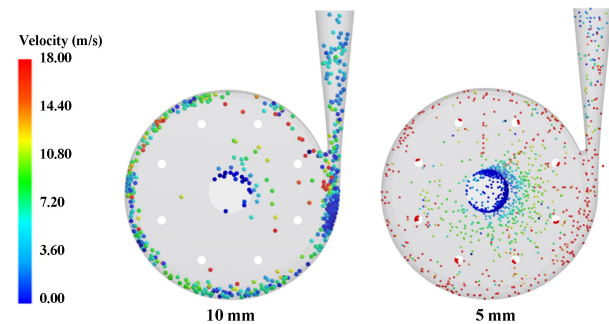
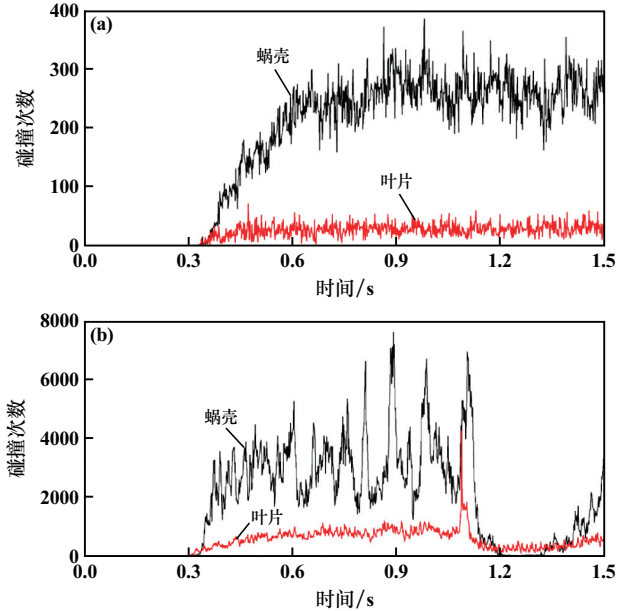


图 11 不同粒径颗粒在矿浆泵内的位置及速度分布

不同粒径颗粒在矿浆泵内的平均速度及平均动能

如图 13 所示。颗粒粒径 5 mm 时,由于颗粒粒径较小,颗粒从流性较好,颗粒从流体得到的动能较大。同样流量下,颗粒粒径 5 mm 时的速度明显高于颗粒粒径 10 mm 且相对获得较大动能。且粒径较小,泵内不存在堵塞现象。由于泵内存在大量高速颗粒与泵体多次发生碰撞,泵体内严重磨损面积较大。



(a) 颗粒粒径 10 mm; (b) 颗粒粒径 5 mm

图 12 不同粒径颗粒与泵过流部件碰撞次数

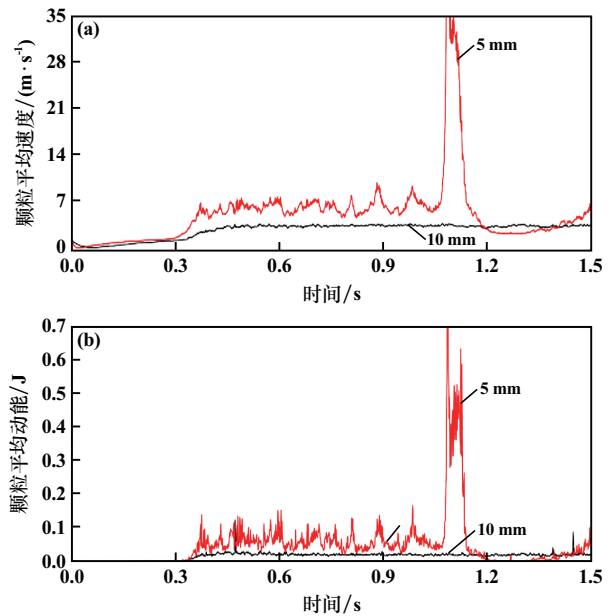


图 13 不同粒径颗粒在矿浆泵内的平均速度及平均动能

4 结 论

基于 CFD-DEM 耦合的方法,分析了不同流量、不同颗粒粒径工况下颗粒在矿浆泵内的运动和分布规律

以及过流部件的磨损特性,得出以下结论:

1) 对比矿浆泵内不同部位的磨损情况,发现磨损较严重的位置为蜗壳上半部分及隔舌附近,这是由于蜗壳上半部分有大量高速颗粒与其发生碰撞,且大量颗粒集中在隔舌附近。

2) 矿浆泵泵体磨损随流量增加而增强。这是由于随着流量增加,颗粒速度增大,与壁面碰撞时动能更大。

3) 流量 $50 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,对比了颗粒粒径 5 mm 和 10 mm 时的磨损情况,发现小粒径颗粒工况下磨损更严重。这是由于同样流量下小粒径颗粒从流性更好,速度明显高于大粒径颗粒,小粒径颗粒相对获得较大动能。且小粒径颗粒在泵内发生堵塞的可能性更低,与泵体发生碰撞次数更多。

4) 矿浆泵泵体磨损不仅与碰撞次数相关,也与碰撞前动能有关,更高的碰撞频率和更高的动能造成的损伤更严重。

参考文献:

- [1] Tarodiya R, Gandhi B K. Numerical simulation of a centrifugal slurry pump handling solid-liquid mixture: Effect of solids on flow field and performance[J]. *Advanced Powder Technology*, 2019,30(10):2225-2239.
- [2] Chandel S, Singh S N, Seshadri V. A Comparative Study on the Performance Characteristics of Centrifugal and Progressive Cavity Slurry Pumps with High Concentration Fly Ash Slurries[J]. *Particulate Science & Technology*, 2011,29(4):378-396.
- [3] Bajawi H Y, Salim B, Suhubani Z. Performance of a Centrifugal Slurry Pump[J]. *Research Journal of Applied Sciences Engineering & Technology*, 2014,7(8):1573-1581.

- [4] Tarodiya R, Gandhi B K. Effect of particle size distribution on performance and particle kinetics in a centrifugal slurry pump handling multi-size particulate slurry[J]. *Advanced Powder Technology*, 2020,31(12):4751-4767.
- [5] 曾义聪,陈奇,谢秋敏,等. 颗粒粒径对海洋采场矿泵固液两相流影响的分析[J]. *徐州工程学院学报(自然科学版)*, 2013,28(2):46-52.
- [6] 廖姣,赖喜德,廖功磊,等. 基于固液两相流的离心泵内部流场数值分析[J]. *热能动力工程*, 2017,32(5):95-99.
- [7] FENG Xin, LI Xiangyang, CHENG Jingcai, et al. Numerical simulation of solid-liquid turbulent flow in a stirred tank with a two-phase explicit algebraic stress model[J]. *Chemical Engineering Science*, 2012,82:272-284.
- [8] 李良超,徐斌,杨军. 基于计算流体力学模拟的下沉与上浮颗粒在搅拌槽内的固液悬浮特性[J]. *机械工程学报*, 2014,50(12):185-191.
- [9] 王长安. 密相液-固两相三维湍流流动的研究及其在泵叶轮内流场计算与分析中的应用[D]. 西安:西安交通大学化工学院, 1996.
- [10] Prasad B K, Prasad S V, Das A A. Mechanisms of material removal and subsurface work hardening during low-stress abrasion of a squeeze-cast aluminium alloy- Al_2O_3 fibre composite [J]. *Materials Science & Engineering A*, 1992,156(2):205-209.
- [11] Itoh K, Nishigaki S, Honda I, et al. Performance of Solid-Liquid Two Phase Jet Pump Vacuuming Up Beach Sand[C]//ASME 2010 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2010:503-509.
- [12] ZHANG Y, LI Y, CUI B, et al. Numerical simulation and analysis of solid-liquid two-phase flow in centrifugal pump[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2013,26(1):53-60.

引用本文:李钟,金伟,王予琪,等. 基于CFD-DEM方法的矿浆泵磨损特性研究[J]. *矿冶工程*, 2023,43(1):16-20.

(上接第15页)

- [4] 宋成年,邓洋,刘德兵,等. 基坑不同水位降速下土石围堰松散粘质边坡渗流特性与开挖稳定性研究[J]. *水电能源科学*, 2021,39(2):69-73.
- [5] 黄叶宁,孙旭曙,迟健,等. 某水电站溢洪道开挖边坡渗流场变化规律及稳定性研究[J]. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2018,40(6):26-29.
- [6] 张信贵,许胜才,易念平. 基于流固耦合理论的饱和-非饱和土开挖边坡稳定性分析[J]. *水利水运工程学报*, 2016(3):10-19.
- [7] 谢强,田大浪,刘金辉,等. 土质边坡的饱和-非饱和渗流分析及特殊应力修正[J]. *岩土力学*, 2019,40(3):879-892.
- [8] 蔡军,许胜才. 基于FLAC^{3D}软件FISH语言二次开发的降雨工

- 况下航道工程开挖边坡渗流场的分析[J]. *水电能源科学*, 2021,39(10):156-159.
- [9] 查俊,蔡军,许胜才,等. 基于FLAC^{3D}二次开发的连续强降雨工况路堑高边坡支护效果研究[J]. *矿冶工程*, 2022,42(4):25-29.
- [10] 段跃华,何忠明,李健. 基于FLAC^{3D}的改扩建高速公路高边坡施工方案优选[J]. *公路工程*, 2014,39(3):60-64.
- [11] 唐登科,查明高,程国想. 乐昌至广州高速公路起点改扩建方案研究[J]. *中外公路*, 2012,32(4):5-8.

引用本文:谢韬,蔡军,范理云,等. 强降雨条件下隧道洞口边坡开挖渗流特征以及支护方案研究[J]. *矿冶工程*, 2023,43(1):12-15.