水-岩-土壤耦合作用下竖井围岩失稳的离散元研究①

李潇[1], 陈明[1], 田毕[1], 郭建强[1], 仝新利[1], 王珲[2], 邓旭辉[2], 唐现琼[2]
(1.湖南涟邵建设工程(集团)有限责任公司, 湖南 长沙 410125; 2.湘潭大学 机械工程与力学学院, 湖南 湘潭 411105)

摘 要: 以奥罗拉金矿地采一期竖井工程为依托,采用离散元软件 EDEM,基于光滑粒子法-离散元(SPH-DEM)耦合方法构建水-岩-土壤耦合的竖井围岩失稳模型,研究强风化围岩在渗透作用下的失稳演化过程。结果表明:竖井围岩在 2~6 s 内失稳显著,平均移动速度呈先升后降趋势,峰值达 0.155 m/s;井壁所受流体力在 0~2 s 剧烈波动后逐渐趋稳,井壁遭受大范围浅层磨蚀,最终磨损面积达 17.404 43 m^2、体积为 0.013 31 m^3;数值模拟得出竖井围岩坍塌堆积角为 25°,与工程实测结果相对误差仅 1.88%,验证了 SPH-DEM 方法的准确性和实用性。

关键词: 渗水; 围岩失稳; 竖井; 井巷工程; 井壁; 围岩稳定性; 坍塌堆积角; 动态响应; 光滑粒子法; 离散元
中图分类号: TD26;TD313 **文献标志码**: A doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.01.008
文章编号: 0253-6099(2026)01-0051-07

Discrete Element Method for Studying Instability of Shaft Surrounding Rock Under Water-Rock-Soil Coupling Effect

LI Xiao[1], CHEN Ming[1], TIAN Bi[1], GUO Jianqiang[1], TONG Xinli[1], WANG Hui[2], DENG Xuhui[2], TANG Xianqiong[2]
(1. *Hunan Lianshao Construction Engineering (Group) Co., Ltd.*, *Changsha* 410125, *Hunan*, *China*; 2. *School of Mechanical Engineering and Mechanics*, *Xiangtan University*, *Xiangtan* 411105, *Hunan*, *China*)

Abstract: For the first phase shaft project in the underground mining of Aurora Gold Mine, a discrete element method software EDEM was adopted, and a water-rock-soil coupled model for instability of shaft surrounding rock was established using the smoothed particle hydrodynamics discrete element coupling method (SPH-DEM), for investigating the instability evolution process of strongly weathered surrounding rock under effect of seepage. The results show that the surrounding rock of the shaft become significantly instable within 2-6 s, and the average moving velocity increases firstly and then decreases, peaking at 0.155 m/s; the fluid force acting on the shaft wall fluctuates sharply during 0-2 s and then gradually stabilizes. The shaft wall suffers large scale shallow abrasion, with a final wear area of 17.404 43 m^2 and volume of 0.013 31 m^3. Numerical simulation shows that the angle of repose for the collapsed shaft surrounding rock is 25°, presenting a relative error of only 1.88% compared to the on-site practical measurement, which has verified accuracy and practicability of such SPH-DEM method.

Key words: water seepage; surrounding rock instability; shaft; mine roadway engineering; shaft wall; surrounding rock stability; angle of repose; dynamic response; smoothed particle hydrodynamics(SPH); discrete element method(DEM)

竖井施工时常面临强渗水影响[1],导致竖井围岩稳定性降低[2]。一旦竖井围岩发生失稳破坏,将引发严重的工程事故[3]。因此,深入研究强渗水作用下竖井围岩变形破坏的时空演化特征,是保障安全建井的关键[4]。

针对渗水作用下矿山岩体与承载结构的失稳问题,现有研究主要集中在失稳机理理论探讨与工程响应数值模拟两方面。在失稳机理理论探讨方面,学者们通过理论分析与室内试验,深入揭示了水-岩相互作用下不同介质的强度劣化规律与损伤演化机制。例如,针对防水闸墙[5]、人工坝-煤组合体[6]及深部变粒岩[7]等对象,界定了渗透失稳的类型与临界判据,并

① **收稿日期**: 2025-08-17
基金项目: 国家自然科学基金(12172320)
作者简介: 李潇(1987—),男,湖南娄底人,工程师,主要从事采矿工程、岩土工程等方面的工作。E-mail:851660333@qq.com
通信作者: 唐现琼(1985—),男,河南鹤壁人,博士,副教授,主要从事工程结构、数值模拟方面的研究。E-mail:tangxq85@xtu.edu.cn

构建了评价指标体系[8],为理解水对岩土体及工程结构的弱化效应提供了理论基础。

在工程响应数值模拟方面,针对竖井及矿山工程中的复杂水文地质条件,多场耦合模拟技术被广泛应用。研究涵盖了渗流-应力耦合作用下竖井围岩的变形特征[9-10]、深立井筒的定向泄水模型构建[11]、水浸弱化流固耦合模拟方法[12]以及构造破碎带突涌水机理[13]与蔓延过程模拟[14]等,有效解决了特定工况下井筒稳定性分析与灾害防控难题。

然而,上述研究多侧重于单一介质(岩石或结构)在应力-渗流场中的响应,或仅关注水对岩石的化学弱化作用。对于强降雨环境下,涉及"水-岩-土壤"三相介质的耦合作用机制,特别是水流冲刷导致土体颗粒流失,进而诱发松散围岩大变形与失稳的细观演化过程,尚缺乏系统研究。传统的基于连续介质力学的数值方法在处理此类涉及大变形、颗粒运移及流-固-土非线性耦合问题时存在局限性,难以准确还原地质几何形态与微观颗粒行为的协同变化。

本文基于 EDEM 数值模拟平台,使用光滑粒子法-离散元(SPH-DEM)耦合方法构建水-岩-土壤耦合的竖井围岩失稳模型,该方法具有处理非连续介质大变形及流-固微观相互作用的显著优势,突破了传统方法难以捕捉颗粒流失与破坏细节的局限,可深入探究竖井围岩在渗透作用下的变形与演化机理。

1 工程概况

1.1 地质条件

南美洲圭亚那地盾北部的奥罗拉金矿主竖井位于RK露天采坑边缘东南约90 m处,竖井工程主井位置如图1所示。该竖井井口标高+63.58 m,井深925.58 m,井筒净直径6.4 m。其中井颈段长47.7 m,采用厚800 mm的双层钢筋混凝土支护;井筒基岩段长877.88 m,支护厚度400 mm。井颈段主要为残积土、强风化变质火山碎屑沉积岩,以碎屑、碎块状为主,工程性质差,透水性中等,局部伴有地表渗水,围岩自稳能力极差。井身段以变质火山岩、闪长岩为主,粉砂质、泥质结构,块状构造,岩石节理裂隙局部较发育。竖井场地地质构造如图2所示。

1.2 水文条件

矿区地处赤道低压带,属热带雨林气候,年内季节变化由降雨量决定,一年可分为2个大雨季和2个小雨季;其中,5~8月和11~12月为大雨季,1~4月和9~10月为小雨季,多年平均降雨量为2 436.2 mm,年最大降雨量3 061.7 mm。



图1 竖井工程主井位置

Fig. 1 Location of main shaft in project

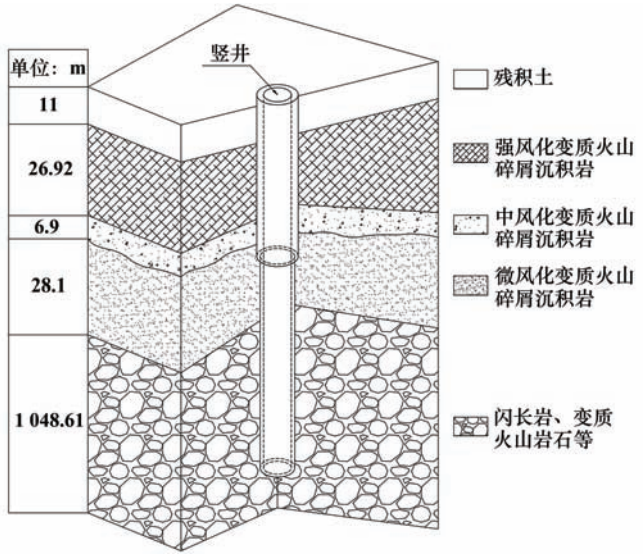


图2 竖井场地地质构造

Fig. 2 Geological structure of shaft site

高湿度和频繁降雨会致使地下水位长期处于较高水平,从而降低竖井围岩整体强度。残积土透水性较好,长期高湿度会引发残积土坍塌或滑坡;强风化层岩石结构较为松散,雨水侵蚀会导致围岩进一步软化,致使其承载能力降低;中风化层受到渗透压力影响,强度会逐渐降低,尤其在与强风化层交界处会出现局部软化;微风化层与基岩层整体相对稳定,在极端条件下才会缓慢软化和裂缝发育。

1.3 施工条件

根据地勘条件与围岩情况,施工采用正掘法[15],该方法是一种自上而下全断面开挖并同步施工的方法。短掘短砌作为正掘法的一种,可以实现"随挖随支",尤其适用于软弱、富水地层中的竖井工程。然而在井颈段实际施工时,围岩发生了失稳。在井深19.88~33.78 m处井壁遇含水泥层,井壁围岩出现大面积垮塌,局部垮塌宽度约3.7 m,形成井壁后空洞且伴随渗水。现场围

岩垮塌情况如图 3 所示。

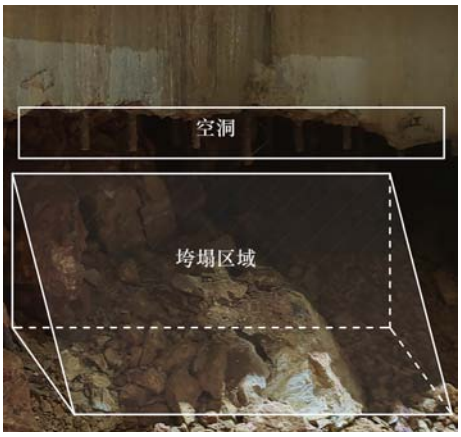


图 3　现场围岩垮塌情况

Fig. 3　Collapse of surrounding rock on site

2　数值模拟

2.1　几何模型

采用短掘短砌方法,以分段开挖-支护滞后为先行条件,构建水-岩-土壤耦合的竖井围岩失稳模型。已支护部分受到支撑作用,故将研究重点聚焦于渗流作用下未支护围岩的动态响应特性,对岩层内的裸露围岩区域进行局部建模。

竖井呈圆形结构,采用等效转换方法将截取的扇形区域近似等效为长方体。依据圣维南原理[15],将长方体模型的长度设为开挖半径加支护厚度的 3 倍,即 12 m。在短掘短砌中,一次开挖的深度即裸露围岩的高度,故裸露围岩高度设定为 2 m,支护高度选为 4 m,模型宽度取为 4 m。

局部围岩与模型如图 4 所示。

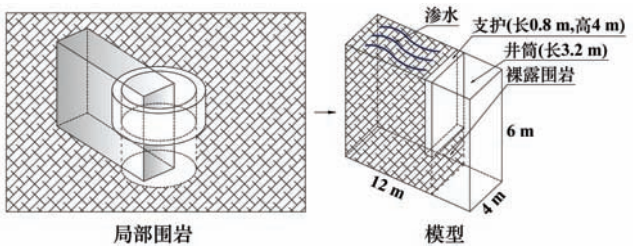


图 4　局部围岩与模型

Fig. 4　Scheme of local surrounding rock and model

2.2　模型构建

裸露围岩位于强风化岩层中,因此填充颗粒以强风化岩石颗粒为主导。受强降雨及地质作用,强风化岩层内夹杂一定比例的土壤颗粒。为准确表征实际地质条件,在模型中充分考虑土壤颗粒的分布。物质参数如表 1 所示。

表 1　物质参数

Table 1　Material parameters

类别	密度/(kg · m^{-3})	弹性模量/GPa	泊松比
土壤	1 800	3.0	0.33
强风化岩	2 060	4.8	0.28
双层钢筋混凝土支护	2 500	30.0	0.25

构建 12 m×4 m×6 m 的水-岩-土壤耦合的竖井围岩失稳模型,如图 5 所示。该模型采用 DEM 模拟土壤颗粒和石灰岩颗粒,顶部采用 SPH 模拟水粒子,以 SPH-DEM 耦合方法刻画水-岩-土壤的相互作用。

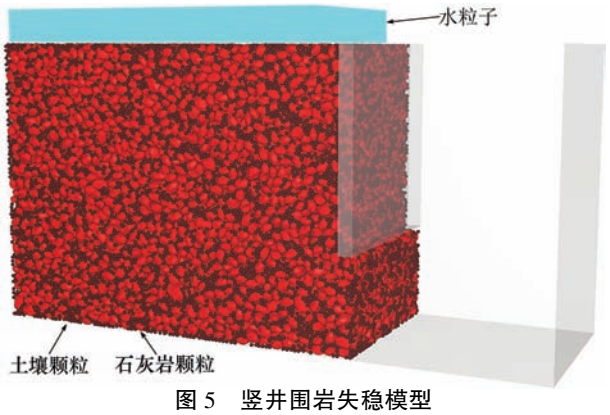


图 5　竖井围岩失稳模型

Fig. 5　Modeling of shaft surrounding rock instability

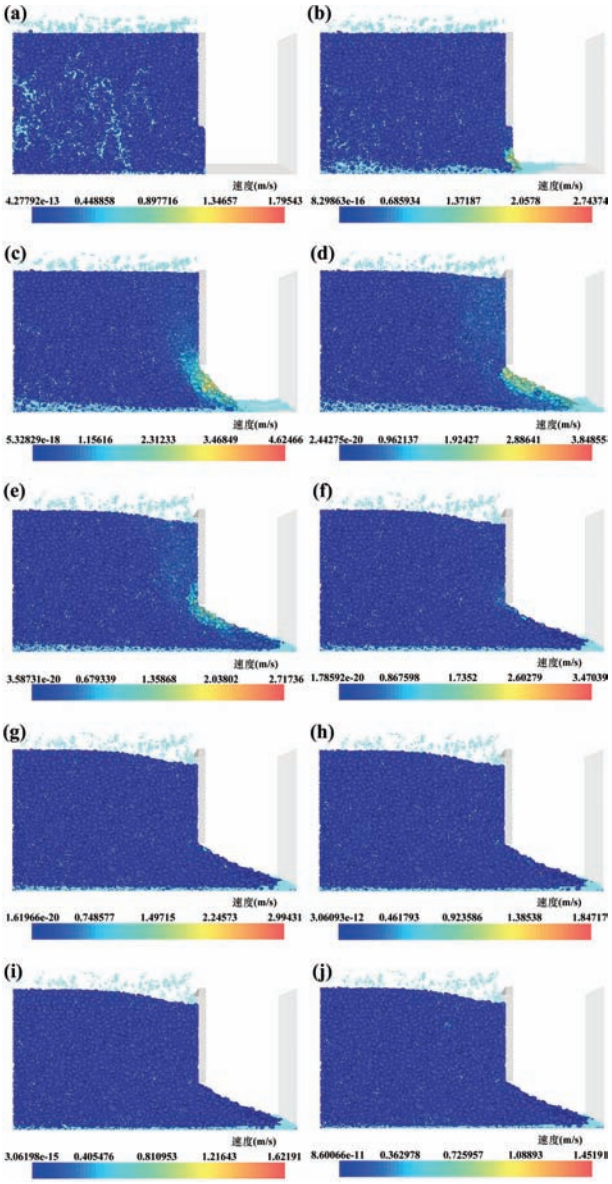
3　数值结果分析

3.1　速度分析

3.1.1　围岩速度

分析围岩在不同时段的速度变化,可以评估围岩在渗流作用下的动态响应及运动特征。提取围岩在 1~10 s的速度场,分析不同位置围岩速度大小及分布,如图 6 所示。1 s 时,渗流作用开始影响部分细小土壤颗粒,使其产生微小速度,而大部分区域处于相对稳定状态。2~6 s 时,裸露围岩底部区域率先出现速度增大的迹象,随后高速度区域逐步扩展;其间,随着水的持续渗透,围岩颗粒(土壤颗粒+石灰岩颗粒)间的咬合作用减弱,部分围岩颗粒松动并加速运动,导致失稳范围扩大;同时源于颗粒间的碰撞与摩擦作用,速度分布呈现一定波动;整体来看,该阶段围岩稳定性显著降低。7~10 s 时,围岩速度分布整体上没有出现大规模的剧烈变化,但局部区域的速度波动依然存在,表明在水-岩-土壤耦合作用下,围岩始终处于动态调整过程中。

围岩平均速度响应如图 7 所示,围岩颗粒发生移动时同时伴随着旋转,平均移动速度波动集中在 2~6 s 时段,先上升后下降,峰值为 0.155 m/s。这表明围岩失稳主要发生在 2~6 s 内,水-岩-土壤耦合作用较为显著。



(a) t=1 s; (b) t=2 s; (c) t=3 s; (d) t=4 s; (e) t=5 s
(f) t=6 s; (g) t=7 s; (h) t=8 s; (i) t=9 s; (j) t=10 s

图 6 围岩速度分布

Fig. 6 Velocity distribution of surrounding rock

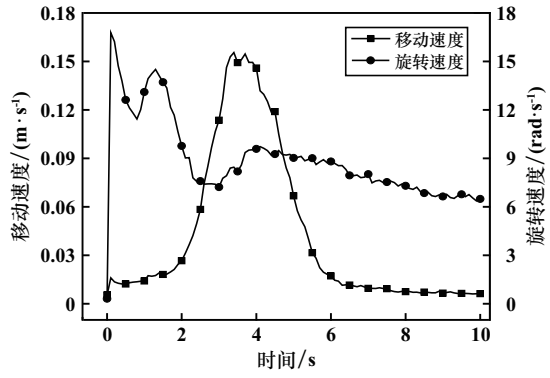
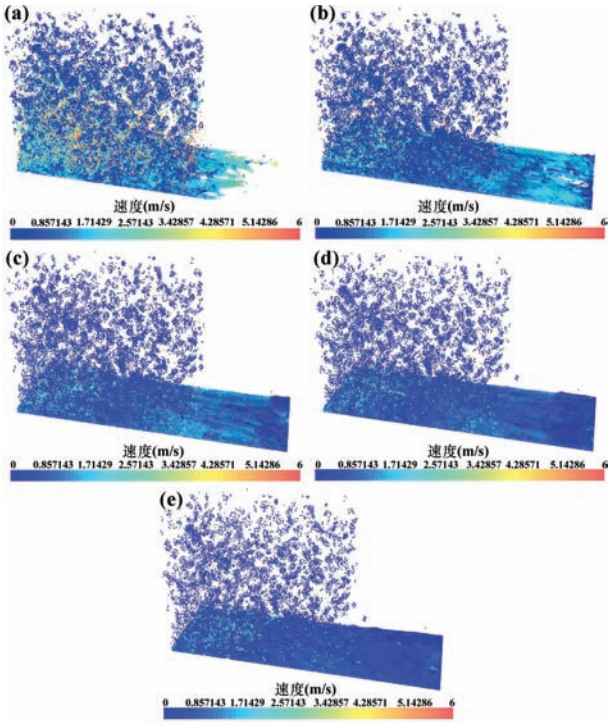


图 7 围岩平均速度响应

Fig. 7 Average velocity response of surrounding rock

3.1.2 水粒子速度

分析水粒子的速度分布可揭示水在竖井围岩中的流动特性以及水-岩-土壤耦合的相互作用。水粒子速度分布如图 8 所示。



(a) t=2 s; (b) t=4 s; (c) t= 6 s; (d) t= 8 s; (e) t=10 s

图 8 水粒子速度分布

Fig. 8 Velocity distribution of water particles

水粒子速度分布不均匀性表明水在围岩裂隙中的渗透路径和速率存在差异,这也侧面展现了围岩的裂隙构造。高速区域对应裂隙较发育的区域,水的流动更畅通;而低速区域表明围岩结构较致密,水的渗透受到限制。速度的波动和局部变化表明围岩颗粒与水之间的相互作用在不断调整,水的流动不仅影响围岩颗粒的受力状态,还导致颗粒分离和重新排列,进而影响围岩的整体稳定性。后期水粒子速度降低和分布均匀化意味着围岩逐渐趋于稳定。

为了直观展现水与围岩在不同方向的运动特征及耦合效应,绘制围岩颗粒与水粒子在 X、Y、Z 方向上的速度变化,如图 9 所示。在初期,水渗透表征为 Y 负方向的波动,在渗透压力下土壤颗粒发生微小位移,此时围岩整体保持稳定。随着渗透持续,水与土壤、石灰岩颗粒都产生 X、Y 方向的波动,且波动范围在同一个时间区段内,这表明围岩在水-岩-土壤耦合作用下发生了失稳坍塌。Z 方向围岩颗粒未发生明显运动,但水粒子在 Z 方向的速度有所波动,表征了水在围岩裂隙中的流动。

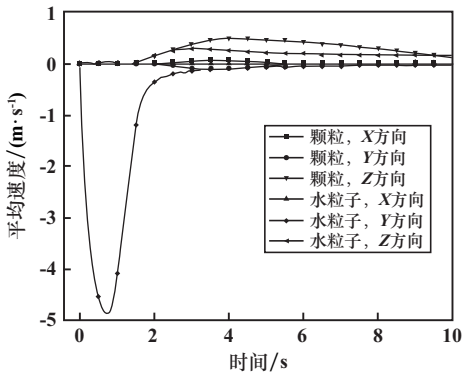
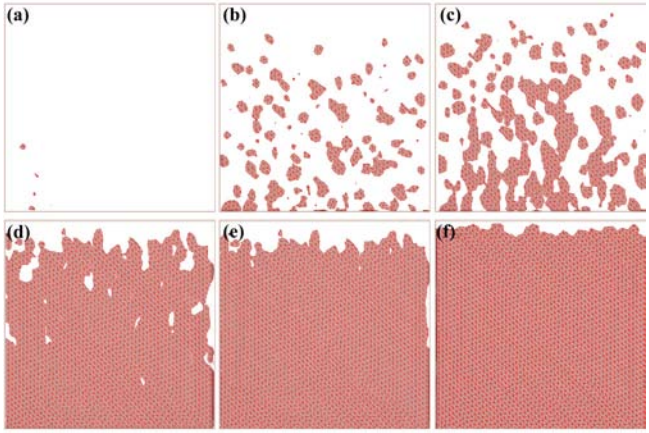


图 9　X、Y、Z 方向平均速度

Fig. 9　Average velocity in X, Y and Z directions

3.2　井壁分析

分析井壁的磨损及所受到的流体力,可以揭示竖井在水-岩-土壤耦合作用下的复杂受力环境和磨损机制。不同时间的井壁磨损区域如图 10 所示。井壁磨损表现为由局部轻微磨损向大范围破坏再到动态平衡的演化趋势。1 s 时,井壁仅个别区域出现轻微磨损,整体仍较稳定。随着水-岩-土壤耦合作用增强,2~3 s 间磨损范围扩大,部分区域开始连片,局部强度降低,失稳风险增加。至 4 s 时,井壁上部形成连续磨损带,受水流与围岩颗粒运动影响愈发严重。5 s 时,磨损基本覆盖井壁表面,失稳显著,井壁面发生较大磨损。6~10 s 时,磨损区域趋于稳定,磨损速度减缓,接触相互作用进入动态平衡状态。



(a) t=1 s; (b) t=2 s; (c) t=3 s; (d) t=4 s;
(e) t=5 s; (e) t=6~10 s

图 10　不同时间的井壁磨损区域

Fig. 10　Wear areas on shaft wall at different time

统计井壁的磨损体积、面积,可以全面量化井壁在水-岩-土壤耦合作用下的磨损程度。井壁磨损总体积、总面积如图 11 所示。井壁的磨损总体积、总面积均表现为由缓慢增长到快速扩展再到稳定的变化趋势。最终磨损总体积 0.013 31 m^3,磨损总面积 17.404 43 m^2。这一“高面积、低体积”的量化数据揭示了井壁的破坏机制:在水-岩-土壤耦合流动的作用下,井壁主要受到大范围的表面浅层冲刷与磨蚀,而非深部的局部挤压破坏;磨损总面积的增长与围岩失稳垮塌时段高度吻合,定量表征了渗流场中颗粒流对井壁产生的面状侵蚀效应。

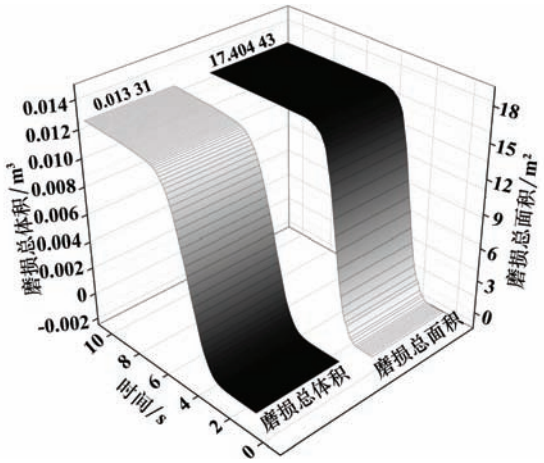


图 11　井壁磨损总体积、总面积

Fig. 11　Total volume and areas of wear on shaft wall

井壁所受 X 方向流体力如图 12 所示。X 方向的流体力在 0~2 s 剧烈波动,峰值较高,表明渗透初期水流对井壁的冲击力较大,且流动尚未稳定。2~6 s 流体力逐渐减小并趋于稳定,表明水在围岩颗粒间的流动路径逐步形成,但仍存在一定波动,流体力动态变化。6~10 s 流体力进一步降低并保持稳定,渗流场进入动态平衡状态。

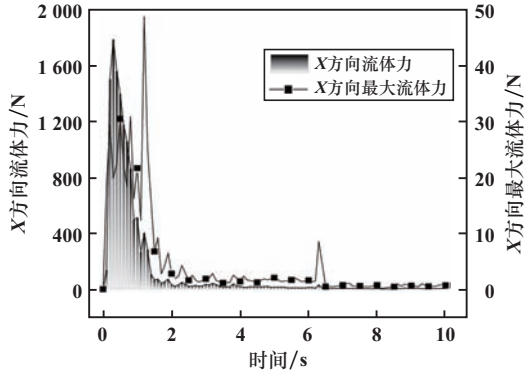


图 12　井壁所受 X 方向流体力

Fig. 12　Fluid forces in X direction acted on shaft wall

3.3　围岩失稳分析

围岩失稳演化规律可以由围岩颗粒运动轨迹来表征。围岩颗粒运动轨迹如图 13 所示。根据颗粒运动轨迹,可以追踪围岩在整个失稳过程中的运动轨迹。

围岩左半部分没有明显的长运动轨迹,表明围岩在水渗透作用下于小范围内发生位移,围岩左半部分整体处于稳定状态。围岩右半部分颗粒轨迹较长且分布较广,发生了显著的变形与位移。这反映围岩失稳主要发生在井壁区域以及裸露围岩区域,且失稳较为严重。同时还可以看到除裸露围岩发生失稳外,右侧顶部也发生了塌陷。

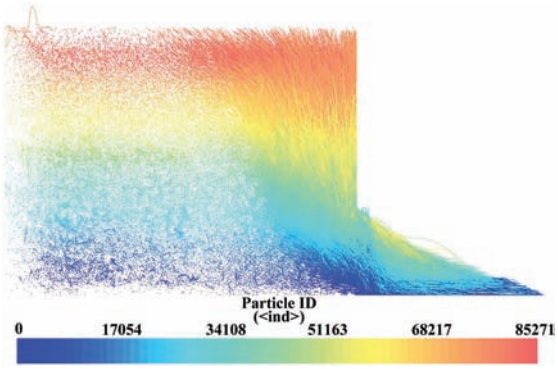


图 13 围岩颗粒运动轨迹

Fig. 13 Trajectory of surrounding rock particles

绘制围岩颗粒在 *XY* 面的分布,评估底部失稳和顶部塌陷的程度,如图 14 所示。在水-岩-土壤耦合作用下,底部裸露围岩支撑逐渐减弱,进而引发颗粒流失,出现坍塌,形成斜坡。堆积角达到了 25°,进一步说明围岩失稳程度较高。模型顶部颗粒分布较为密集,颗粒之间的紧密排列以及井壁提供了较好的支撑,但竖井围岩还是出现了轻微塌陷,塌陷角度为 9°。

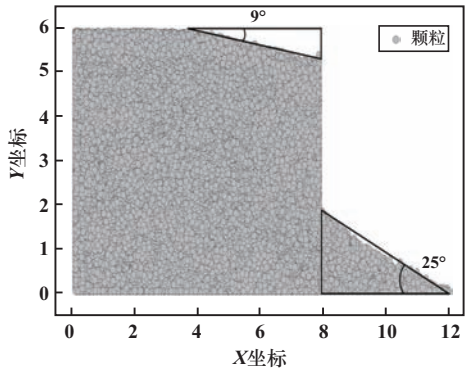


图 14 围岩颗粒在 *XY* 面的分布

Fig. 14 Distribution of surrounding rock particles on *XY* plane

3.4 工程验证

现场勘测坍塌情况如图 15 所示,其坍塌角度为 24.53°,与数值模拟相比,其相对误差为 1.88%,可见该数值模拟方法准确度较高。对工程失稳实例而言,局部垮塌宽度约 3.7 m,而基于 *XY* 面颗粒分布得到的垮塌宽度为 4 m,两者绝对误差为 0.3 m,在接受范围之内,验证了该数值方法的实用性与准确性。

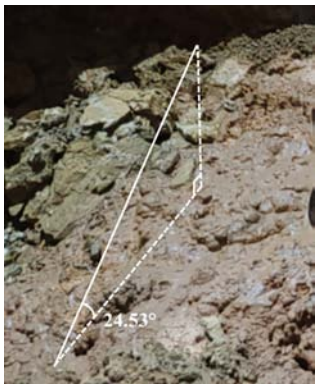


图 15 现场坍塌情况

Fig. 15 Site collapse

4 结论

1) 围岩速度在 2~6 s 内波动较大,平均移动速度先上升后下降,表明该时间段围岩失稳显著,水-岩-土壤耦合作用强烈。水的流动不仅影响围岩颗粒的受力状态,还导致颗粒分离和重新排列。

2) 井壁所受流体力在初期剧烈波动,随后逐渐减小并趋于稳定,表明水在围岩颗粒间流动路径逐渐形成。井壁磨损随时间由局部轻微磨损向大范围破坏演化,最终趋于动态平衡。

3) 围岩颗粒的大小、分布以及水的渗透特性等对围岩失稳有显著影响。围岩颗粒间的孔隙特征和裂隙发育程度影响水的渗流路径和速率,进而影响围岩的稳定性。

4) 数值模拟得出的顶部塌陷角为 9°,底部裸露围岩坍塌斜坡堆积角达 25°,垮塌宽度 4 m。通过工程勘测,实测坍塌角为 24.53°,局部垮塌宽度约 3.7 m。误差均在可接受范围内,验证了 SPH-DEM 方法的准确性和实用性。

参考文献(References):

[1] 张艺山,何祥,张妨,等. 露天转地下开采强降雨入渗特征分析及降雨入渗量预测[J]. 矿冶工程, 2024,44(6):23-27.
ZHANG Yishan, HE Xiang, ZHANG Fang, et al. Characteristics analysis and prediction of heavy rainfall infiltration after transition from open-pit to underground mining[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(6):23-27.

[2] 刘俊城,谭勇,樊冬冬. 深厚富水砂土地铁深基坑变形性状及频发地连墙渗漏灾害分析[J]. 岩土工程学报, 2025,47(3):11-22.
LIU Juncheng, TAN Yong, FAN Dongdong. Analysis of deformation behaviors of subway excavations and frequentthrough-wall leaking hazards in water-rich sandy strata[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2025,47(3):11-22.

[3] 张军伟,杨哲,毛锦波,等. 2003—2022 年我国竖井施工事故发生

规律与分布特征[J]. 现代隧道技术, 2024,61(6):1-8.
ZHANG Junwei, YANG Zhe, MAO Jinbo, et al. Patterns and distribution characteristics of shaft construction accidents in China (2003—2022)[J]. Modern Tunnelling Technology, 2024,61(6):1-8.

[4] 刘志强,宋朝阳,纪洪广,等. 深部矿产资源开采矿井建设模式及其关键技术[J]. 煤炭学报, 2021,46(3):826-845.
LIU Zhiqiang, SONG Zhaoyang, JI Hongguang, et al. Construction mode and key technology of mining shaft engineering for deep mineral resources[J]. Journal of China Coal Society, 2021,46(3):826-845.

[5] 隋旺华. 矿山采掘岩体渗透变形灾变机理及防控Ⅲ:防水闸墙围岩[J]. 煤炭科学技术, 2023,51(7):36-43.
SUI Wanghua. Catastrophic mechanism and its prevention and control of seepage deformation and failure of mining rock mass III: A review of water retention bulkhead[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7):36-43.

[6] 杨科,张寨男,华心祝,等. 倾角与含水作用下人工坝-煤组合体强度模型及失稳机制分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2025,42(3):625-635.
YANG Ke, ZHANG Zhainan, HUA Xinzhu, et al. Strength model and instability mechanism analysis of artificial dam-coal composite under the influence of dip angle and water content[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2025,42(3):625-635.

[7] 王鲁男,庞一博,尹晓萌,等. 水岩作用下变粒岩力学特性与局部损伤演化规律研究[J]. 岩土工程学报, 2025,47(3):1-10.
WANG Lunan, PANG Yibo, YIN Xiaomeng, et al. Mechanical properties and local damage evolution of granulite under water-rock interaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2025, 47(3):1-10.

[8] 刘晓民,王震宇,刘廷玺,等. 煤炭资源富集区煤-水协调共采影响因素研究[J]. 煤炭科学技术, 2024,52(增刊 2):162-174.
LIU Xiaomin, WANG Zhenyu, LIU Tingxi, et al. Study on influencing factors of coal-water coordinated co-mining in coal resource rich area[J]. Coal Science and Technology, 2024,52(S2):162-174.

[9] 臧东升,裴书锋,魏福泽,等. 复合地层输水竖井围岩与支护稳定性分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2024, 46(6):1-8.
ZANG Dongsheng, PEI Shufeng, WEI Fuze, et al. Stability analysis of surrounding rock and support of water conveyance shaft in composite formation[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition), 2024,46(6):1-8.

[10] 曾祥茜,何文社,王开喜. 渗流-应力耦合作用下的临库竖井开挖数值分析[J]. 人民黄河, 2019,41(4):139-143.
ZENG Xiangxi, HE Wenshe, WANG Kaixi. Numerical analysis of excavation for shaft near the reservoir based on seepage-stress coupling[J]. Yellow River, 2019,41(4):139-143.

[11] 赵春虎,朱明诚,姬亚东,等. 深立井筒水害定向钻孔泄水模型构建及应用[J]. 煤田地质与勘探, 2025,53(5):142-149.
ZHAO Chunhu, ZHU Mingcheng, JI Yadong, et al. Construction and application of a model for drainage via directional bore-holes against water hazards in deep vertical shafts[J]. Coal Geology & Exploration, 2025,53(5):142-149.

[12] 张村,黄玄皓,王永乐,等. 煤矿开采水浸弱化流固耦合模拟方法与工程应用[J]. 煤炭科学技术, 2024,52(4):1-11.
ZHANG Cun, HUANG Xuanhao, WANG Yongle, et al. Simulation method and engineering application of fluid solid coupling for water immersion weakening in coal mining[J]. Coal Science and Technology, 2024,52(4):1-11.

[13] 乔宇,康小兵,眭素刚,等. 岩溶富水矿山构造破碎带破坏数值模拟及突涌水成因分析[J]. 中国岩溶, 2025,44(1):1-10.
QIAO Yu, KANG Xiaobing, SUI Sugang, et al. Research on the mechanism of water surge in tectonic fracture zones of karst water-rich mines[J]. Carsologica Sinica, 2025,44(1):1-10.

[14] 武强,王潇,赵颖旺,等. 基于煤层底板标高控制区水量均衡的矿井突涌水蔓延模拟与应用[J]. 中国矿业大学学报, 2025,54(3):1-16.
WU Qiang, WANG Xiao, ZHAO Yingwang, et al. Simulation and application of mine water inrush spreading based on water balance in the control area of coal seam floor elevation[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025,54(3):1-16.

[15] 李安云,张凯,徐金峰,等. 破碎软岩斜井 TBM 开挖围岩稳定性及支护优化研究:以可可盖副斜井 TBM 掘进工程为例[J]. 隧道建设(中英文), 2023,43(11):1924-1934.
LI Anyun, ZHANG Kai, XU Jinfeng, et al. Stability of surrounding rock and support optimization of a broken soft-rock-inclined shaft bored by tunnel boring machine: A case study of Kekegai sub-inclined shaft[J]. Tunnel Construction, 2023,43(11):1924-1934.

引用本文:李潇,陈明,田毕,等. 水-岩-土壤耦合作用下竖井围岩失稳的离散元研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(1):51-57.
LI Xiao,CHEN Ming,TIAN Bi, et al. Discrete element method for studying instability of shaft surrounding rock under water-rock-soil coupling effect[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(1):51-57.

关于检测学术不端的公告

为弘扬良好学术风气,保护知识产权,防止抄袭、伪造、篡改、不当署名、一稿多投、一个学术成果多篇发表等学术不端行为,本刊与中国学术期刊(光盘版)电子杂志社合作,由中国学术期刊(光盘版)电子杂志社学术不端文献检测中心对本刊网络版刊登的文章进行系统检测,并按照“《中国学术期刊网络出版总库》删除学术不端文献暂行办法”,对出现以上学术不端行为的文章作出严肃处理。

特此公告!

矿冶工程杂志编辑部

2026 年 2 月