

文章编号:1673-9469(2026)04-0098-06

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2026.04.012

泥石流弯道侵蚀机制试验研究

孟昊阳¹, 刘剑^{1*}, 陈华勇², 王睿敏¹, 王芳¹, 辛岸佳¹

(1. 河北工程大学 地球科学与工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所
山地自然灾害与工程安全全国重点实验室, 四川 成都 610299)

摘要: 为揭示泥石流弯道侵蚀机制, 通过水槽试验, 对泥石流弯道运动特征、凹岸侵蚀形态及剪切力进行分析。结果表明: 弯道顶冲部位受侵蚀作用最剧烈, 上游侵蚀程度明显大于下游; 侵蚀深度和超高是影响凹岸土体失稳的重要因素; 水力侵蚀与重力侵蚀的动态耦合关系影响泥石流侵蚀作用; 弯道中上游凹岸为高剪切力区, 下游为低剪切力区, 最大剪切力出现在泥石流顶冲部位附近; 弯道泥石流流速与泥石流剪切力同步变化, 泥石流顶冲部位泥石流流速衰减率最大, 泥石流侵蚀作用最强; 弯道环流加剧了泥石流的侵蚀作用。

关键词: 泥石流; 弯道侵蚀; 剪切力; 流速衰减率

中图分类号: TV149

文献标识码: A

Experimental Study on the Erosion Mechanism of Debris Flow Bends

MENG Haoyang¹, LIU Jian^{1*}, CHEN Huayong², WANG Ruimin¹, WANG Fang¹, XIN Anjia¹

(1. School of Earth Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China;
2. State Key Laboratory of Mountain Hazards and Engineering Safety, Institute of Mountain Hazards and Environment,
Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610299, China)

Abstract: To reveal the erosion mechanism of debris flow bends, this study conducted flume experiments, focusing on analyzing the movement characteristics of debris flow in bends, the erosion patterns of concave banks, and shear stress. The results indicate that: the apex of the bend experiences the most intense erosion, and the erosion intensity in the upstream is significantly greater than that in the downstream. The erosion depth and super-elevation are important factors affecting the instability of soil on concave banks. The dynamic coupling relationship between hydraulic erosion and gravitational erosion influences debris flow erosion. The concave banks in the upper and middle reaches of the bend are high shear stress areas, while the lower reaches are low shear stress areas, and the maximum shear stress occurs near the apex of the debris flow. The flow velocity of the debris flow in the bend varies synchronously with its shear force, with the highest velocity decay rate and the strongest debris flow erosion both occurring at the apex. The circulation within the bend exacerbates the erosion effect of the debris flow.

Key words: debris flow; bend erosion; shear force; velocity attenuation rate

泥石流具有速度快、冲击力强、侵蚀剧烈等特点, 运动过程中裹挟大量物源, 危险性高。发生于甘肃省积石山县的祁家沟泥石流沿程裹挟的固体物源量达 $4.635 \times 10^5 \text{ m}^3$, 冲出沟口后造成多处房

屋被埋、多人失踪^[1]。

目前, 关于弯道泥石流的研究多集中于弯道超高与流速的关系^[2-4], 且泥石流侵蚀机制研究多基于顺直沟道假设^[5], 弯道内的侵蚀机制少有研

收稿日期: 2025-04-08 修回日期: 2025-04-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U21A2008); 邯郸市科学技术研究与发展计划项目 (23422093034); 河北省重点研发计划项目 (21374104D); 河北省高等学校科学技术研究项目 (ZD2021309)

第一作者: 孟昊阳 (2000—), 男, 河北保定人, 硕士研究生, 从事泥石流侵蚀方面的研究。

* 通信作者: 刘剑 (1983—), 男, 山西忻州人, 博士, 副教授, 从事水土化学力学效应研究。

究。相较于顺直沟道,泥石流在弯道内侵蚀作用更剧烈^[6]。泥石流流体在离心力作用下易偏向弯道凹岸一侧,对该侧的侵蚀破坏更严重^[7-9]。水流对弯道侵蚀的研究较多,研究时可借鉴相关成果^[10]。Osman 等^[11]通过旋转崩塌模型,计算了河岸侧向冲刷宽度,分析了河岸侧向侵蚀对边坡稳定性的影响;Yu 等^[12]通过水槽试验,揭示了弯曲沟道崩岸与河床演变的相互作用和耦合机制;黄鹏^[13]分析了山洪对弯道各段挡墙基底的冲击作用,发现冲刷程度为弯道出口>弯道顶点>弯道进口;全炳欣等^[14]分析了弯道路基沿程冲刷特征,发现弯道凹岸一侧路基泥砂冲刷深度沿水流方向逐渐增大,出弯道后有所减小;谢亚光等^[15]发现弯道凹岸不同部位崩塌体通过影响纵向流速最大区域的分布,进而影响水流壁面剪切力;Lai 等^[16]建立了二维动床耦合模型,可用于模拟水流、泥沙共同作用下岸滩崩落过程。与水流相比,泥石流容重大、流速快、裹挟大颗粒多,借鉴时需注意水流与泥石流的差别。

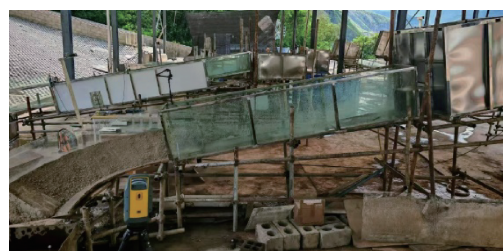
本文通过水槽试验,对泥石流作用下弯道凹岸的侵蚀空间差异开展研究,分析了弯道不同部位的侵蚀特征及剪切力变化规律,揭示了泥石流弯道侵蚀机制,以期防治泥石流弯道侵蚀引发的灾害提供理论依据。

1 试验设计和方法

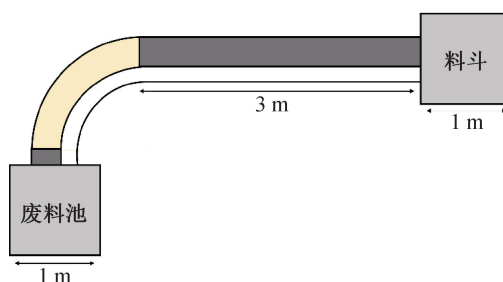
本次试验在中国科学院东川泥石流观测研究站进行。试验装置主要由料斗、直道段水槽、弯道段水槽和废料池组成,见图1。料斗尺寸为1 m×1 m×1 m,为确保每次试验泥石流流量相同,料斗闸门开启高度均设为20 cm;直道段水槽尺寸为3.0 m×0.5 m×0.6 m,两侧为全透明钢化玻璃;弯道段水槽宽0.5 m、高0.6 m,曲率半径为1.25 m,两侧为有机玻璃,可观测水槽内部试验现象;废料池尺寸为1.0 m×1.0 m×0.4 m。

试验设备主要为GoPro摄像机、三轴力传感器等。GoPro摄像机用于监测泥石流在弯道内的运动过程,据此计算泥石流流速。试验在弯道内均匀布置4个LH-SZ-02型号的三轴力传感器(图2),用于测量泥石流剪切力,传感器量程为50 N,精度为 1×10^{-3} N。在弯道上、中、下游共设置9个断面监测最大侵蚀深度,以检验三轴力传感器的监测结果。

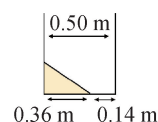
试验所用凹岸土体取自云南省昆明市东川区



(a) 试验装置照片



(b) 水槽横断面示意



(c) 直道段横截面

图1 试验装置及水槽横断面示意图

Fig. 1 Experimental set-up and schematic diagram of the cross-section of the flume



图2 三轴力传感器及断面位置示意图

Fig. 2 Triaxial force sensors and schematic diagram of the cross-section position

蒋家沟泥石流沟。本试验主要观测泥石流侵蚀现象,故将泥石流简化为泥浆,使用筛网筛去粒径大于20 mm的颗粒,并用粒径小于2 mm的颗粒重新配制。配制后泥石流体积为 0.04 m^3 ,密度为 1.4 g/cm^3 ,含水率为54.3%。

2 泥石流弯道运动与侵蚀特征

泥石流进入弯道后,在离心力的作用下回升高,凹岸侧流体增厚,泥位高于凸岸,形成弯道超高,见图3(a)。泥石流在弯道流动时,凹岸土体坡脚被不断切割,稳定性减弱并最终失稳,见图3(b)。该侵蚀破坏过程可分为2个阶段:坡脚侵蚀

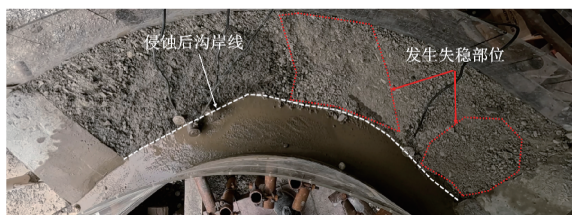
阶段(0.0~1.2 s),坡脚土体液化、抗剪强度降低,坡脚不断后退;土体失稳崩滑阶段(1.2~6.3 s),坡脚大幅后退,土体在自重作用下大规模失稳。失稳土体部分被泥石流裹挟冲出沟道,部分则淤积在沟道内。泥石流侵蚀结束后,凹岸形态见图 3(c)。



(a) 弯道超高



(b) 侵蚀过程中凹岸土体失稳



(c) 侵蚀结束后凹岸形态

图 3 弯道侵蚀特征

Fig. 3 Erosion characteristics of debris flow bends

泥石流侵蚀过程中,凹岸土体失稳主要发生在弯道中上游,且侵蚀强度呈现明显的空间不均匀分布:中游最剧烈,上游次之,下游几乎不受影响。这是由于离心力使泥石流在弯道内产生超高现象,而超高与坡脚的侵蚀深度共同决定凹岸土体是否发生失稳。

图 4 显示,泥石流侵蚀深度自弯道上游向下游先增大再减小,呈类似“凸”形分布。泥石流侵蚀深度在 1 断面后急剧增加,在 4 断面达到最大值,之后逐渐下降,7 断面后降幅趋缓。以上规律与黄鹏^[13]得到的结论,即山洪冲击弯道时侵蚀强度为弯道出口>顶点>进口有所差异。这是由于泥石流比水流流速快、直进性强,进入弯道后直接冲击凹岸,使其流速急剧降低、动能显著衰减。经过弯道顶冲点后,重力对泥石流的加速作用小于弯道阻力,导致流速无法恢复至顶冲前水平。

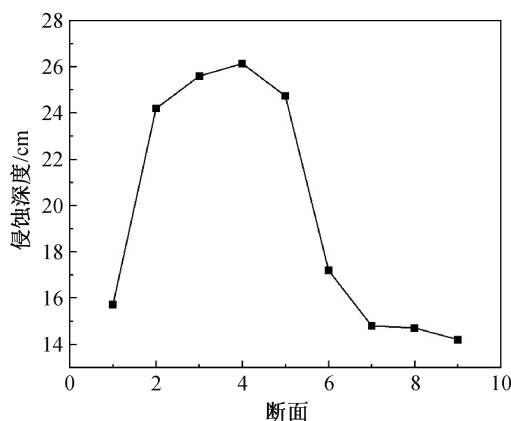


图 4 各断面侵蚀深度

Fig. 4 Erosion depth of each section

水流弯道侵蚀中的“底端控制”概念指出,侵蚀过程由水力侵蚀与重力侵蚀共同作用。水力侵蚀对沟岸侵蚀起主导作用,沟岸失稳反过来影响水流运动。基于此概念,本文将泥石流弯道侵蚀过程分为 3 个阶段:坡脚侵蚀阶段,泥石流侵蚀坡脚土体,导致坡脚增大;平衡阶段,泥石流侵蚀量和失稳土体补给量动态平衡,坡脚和底部高程不变;水力侵蚀下降阶段,失稳土体补给量大于泥石流侵蚀量,土体在坡脚堆积。

3 泥石流剪切力变化规律

图 5 为三轴力传感器测得的泥石流剪切力沿程变化情况。整个冲击过程可分为 3 个阶段:Ⅰ阶段为泥石流龙头冲击引起的剪切力上升阶段;Ⅱ阶段为泥石流持续冲刷阶段,剪切力相对稳定;Ⅲ阶段为泥石流剪切力衰减阶段,直至侵蚀结束。沿弯道自上游至下游,泥石流剪切力先增大后减小,2 号传感器测得的剪切力最大,其峰值约为其他传感器的 2~6 倍。分析其原因,泥石流具有明显的直进性,进入弯道后直接冲击 2 号传感器所在位置,导致该处顶冲作用显著、剪切力最大。经过顶冲点后,泥石流流体变薄、流速降低,3 号、4 号传感器记录的剪切力明显下降。

4 泥石流弯道侵蚀机制

4.1 流速对泥石流弯道侵蚀影响

泥石流撞击凹岸土体后,流体厚度迅速减小,流动状态由直线运动转为紧贴岸壁的离心加速运动。泥石流进入弯道后,主流逐渐偏向凹岸,并在到达凹岸中游或顶冲点附近时形成与凹岸切线的最大夹角,泥石流剪切力达到峰值,对应的泥石流

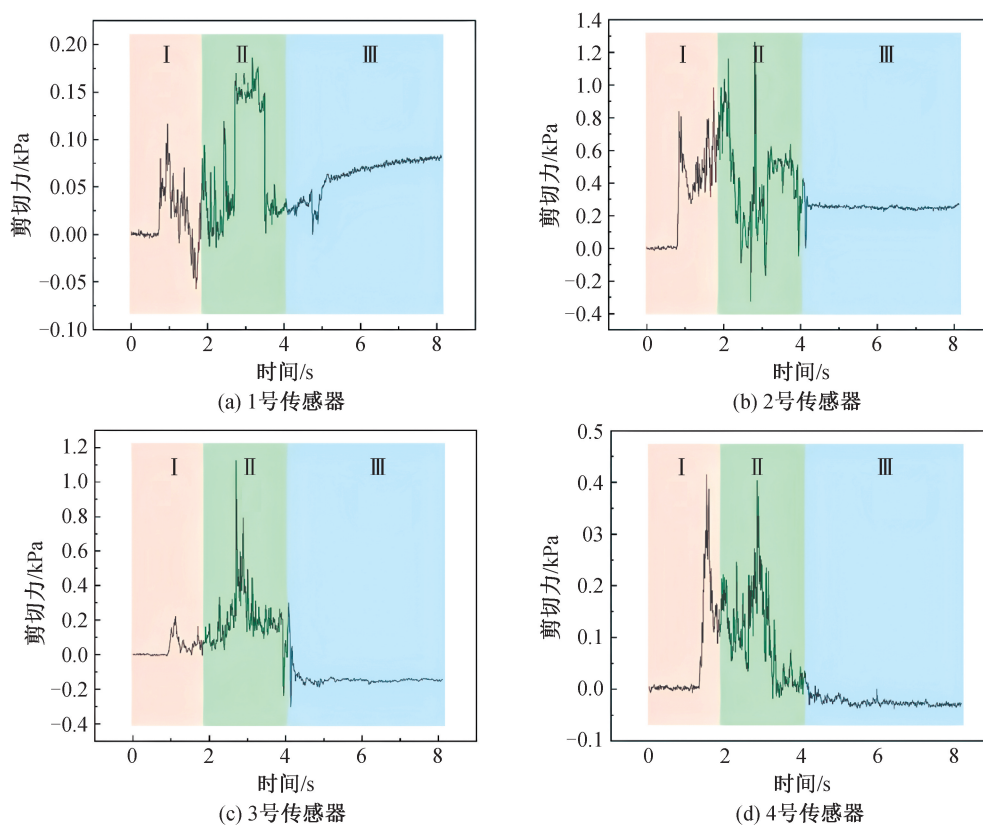


图5 泥石流剪切力沿程变化情况

Fig. 5 Variation of debris flow shear force along the bends

侵蚀深度最大。之后,尽管主流仍靠近凹岸,但与凹岸切线的夹角逐渐减小,泥石流侵蚀作用随之减弱。泥石流顶冲弯道时,凹岸顶冲部位形成的侵蚀坑会显著改变泥石流运动方向,降低泥石流流速,如图6所示。



图6 侵蚀坑

Fig. 6 Erosion pit

根据录像计算得到泥石流经过1号、2号、3号、4号传感器时的瞬间流速分别为1.63、1.54、0.80、0.57 m/s,弯道出口处瞬时流速为0.34 m/s。由此可知,泥石流进入弯道后流速逐渐减小。为体现衰减趋势,本文提出泥石流流速衰减率 A ,计算见式(1)。

$$A = \frac{v_1 - v_2}{v_1} \quad (1)$$

式中, v_1 为泥石流进入弯道时的流速,m/s; v_2 为泥

石流顶冲凹岸后的流速,m/s。

经计算,泥石流流经1号、2号、3号、4号传感器时流速衰减率分别为5.7%、48.2%、28.9%、37.7%,流经弯道全过程的流速衰减率为78.5%。对比发现,流经2号传感器时流速衰减最显著。泥石流侵蚀本质是泥石流流体与凹岸土体动量交换的过程,流体动能转化为凹岸土体起动动能,因此2号传感器所在位置(泥石流顶冲部位)受到的侵蚀作用最剧烈。泥石流在3号和4号传感器处的流速已显著降低,侵蚀作用相对较弱。另外,2号传感器测得的峰值剪切力最大,为1.26 kPa,而4号传感器为0.4 kPa,衰减了68.25%,与流速变化趋势高度一致。

4.2 环流对泥石流弯道侵蚀的影响

与水流类似,泥石流经过弯道时受离心力作用在弯道底部产生环流,引起横向不平衡输沙,导致泥石流中固体物质与被侵蚀土体向凹岸一侧运移。环流作用于泥石流弯道侧蚀主要有2种形式:(1)环流直接横向淘刷凹岸土体,导致坡脚被侵蚀后退,弯道凹岸土体稳定性降低;(2)部分凹岸土体失稳后沿某一滑动面发生滑移、崩塌,坠至坡脚

或沟道内,随泥石流流向下游运移。在泥石流流侵蚀过程中,泥石流动力轴线逐渐向凹岸偏移,环流强度逐渐降低,侵蚀作用随之减弱。

5 结论

泥石流流经弯道时,对凹岸不同部位的侵蚀作用不同。本文通过水槽试验,得到以下结论:

1)泥石流顶冲凹岸部位受侵蚀作用最强,上游侵蚀作用大于下游;水力侵蚀与重力侵蚀的动态耦合关系共同决定了泥石流侵蚀强度。

2)泥石流在弯道运动过程中,弯道凹岸中上游为高剪切力区,下游为低剪切力区,泥石流顶冲点附近剪切力最大。

3)泥石流弯道流速与剪切力变化相同,泥石流顶冲点附近流速衰减率最大,对侵蚀作用最强;受离心力影响,泥石流在凹岸底部形成环流,加剧了泥石流侵蚀作用。

4)弯道内设置防护设施时,应注重顶冲点的防护,如设置挡墙等,减少泥石流可获取的物源量,从而减小泥石流的危害。

参考文献:

- [1] 叶豪,王乃昂,赵力强,等. 积石山 $M_s6.2$ 级地震同震泥流动力学过程模拟研究[J]. 冰川冻土, 2025, 47(2):430-440.
Ye Hao, Wang Naiang, Zhao Liqiang, et al. Dynamic process simulation of coseismic mudflow triggered by the Jishishan $M_s6.2$ earthquake [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2025, 47(2):430-440.
- [2] 黄远红,赵晋恒,胡凯衡,等. 泥石流流体性质与弯道幅度角对超高影响的实验研究[J]. 自然灾害学报, 2017, 26(5):110-118.
Huang Yuanhong, Zhao Jinheng, Hu Kaiheng, et al. Investigation of influence of debris-flow properties and channel's turning angle on its super-elevation by flume experiments [J]. Journal of Natural Disasters, 2017, 26(5):110-118.
- [3] 李龙. 泥石流弯道超高实验研究[D]. 成都:成都理工大学, 2017.
Li Long. Experimental study about superelevation of the debris flow in bend [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017.
- [4] 刘清华,唐川,余斌. 基于流深和弯道超高的泥石流淤积范围划分[J]. 山地学报, 2018, 36(4):581-588.
Liu Qinghua, Tang Chuan, Yu Bin. Delineation of debris flow inundation range based on flow depth and curve superelevation [J]. Mountain Research, 2018, 36(4):581-588.
- [5] Song Pengjia, Yang Jun, Choi C E, et al. Experimental investigation on scouring v. s. mass failure of unsaturated soil bed: implications for debris flow initiation and erosion [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2024, 129(4):e2023JF007275.
- [6] 马超,王玉杰,王彬. 北京市密云区典型泥石流侵蚀过程分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(4):10-16.
Ma Chao, Wang Yujie, Wang Bin. Erosion processon of a typical debris flow in Miyun County, Beijing [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(4):10-16.
- [7] 孙宇鹏. 弯道型排导槽构造对泥石流流动特性的影响研究[D]. 杭州:中国计量大学, 2023.
Sun Yupeng. Study on the influence of bend-type drainage channel configuration on the flow characteristics of debris flow [D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2023.
- [8] 汪鹏. 弯道堆积对豫西矿渣泥石流放大效应影响研究[D]. 开封:河南大学, 2022.
Wang Peng. Research on the influence of the accumulation of bends on the amplification effect of slag and debris flow in western Henan [D]. Kaifeng: Henan University, 2022.
- [9] 施犇奔. 泥石流弯道运动特征与危险性评价[D]. 绵阳:西南科技大学, 2023.
Shi Benben. Characteristics of debris flow movement in the bend and risk assessment [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2023.
- [10] 王延贵. 冲积河流岸滩崩塌机理的理论分析及试验研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2003.
Wang Yangui. Study on mechanism of bank failure in the alluvial river [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2003.
- [11] Osman A M, Thorne C R. Riverbank stability analysis. I: theory [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1988, 114(2):134-150.
- [12] Yu Minghui, Wei Hongyan, Wu Songbai. Experimental study on the bank erosion and interaction with near-bank bed evolution due to fluvial hydraulic force [J]. International Journal of Sediment Research, 2015, 30(1):81-89.
- [13] 黄鹏. 山洪作用下河湾段路基挡墙破坏机理研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2023.
Huang Peng. Failure mechanism of subgrade retaining wall in curved channel section under mountain flood action [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2023.
- [14] 全炳欣,赵俊刚,郭向红,等. 河流弯道水流对路基冲

- 刷分析研究[J]. 中外公路, 2021, 41(S2): 15-19.
- Quan Bingxin, Zhao Jungang, Guo Xianghong, et al. Analysis and study on scour of subgrade by river bend water[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(S2): 15-19.
- [15] 谢亚光, 余明辉, 胡鹏, 等. 弯道凹岸不同部位崩塌体对近岸水流结构影响的试验研究[J]. 水科学进展, 2019, 30(5): 727-737.
- Xie Yaguang, Yu Minghui, Hu Peng, et al. Experimental study on the effects of slump block at different locations upon the flow structure near the outer bank [J]. Advances in Water Science, 2019, 30(5): 727-737.
- [16] Lai Y G, Thomas R E, Ozeren Y, et al. Modeling of multilayer cohesive bank erosion with a coupled bank stability and mobile-bed model [J]. Geomorphology, 2015, 243: 116-129.
- (责任编辑 周雪梅)
-
- (上接第 87 页)
- Zhang Shuangzhuo, Gao Guiqing, Lai Jinxing, et al. Analysis of effect of different reinforcement methods of MJS on reducing impact of pipe jacking construction [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(5): 183-191.
- [13] 张云龙. 浅埋大断面矩形顶管顶进力计算模型研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2023.
- Zhang Yunlong. Calculation model of jacking force for shallow buried rectangular box jacking [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2023.
- [14] 喻军, 龚晓南. 考虑顶管施工过程的地面沉降控制数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S1): 2605-2610.
- Yu Jun, Gong Xiaonan. Numerical analysis of surface settlement control considering pipe jacking construction process [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S1): 2605-2610.
- [15] 马险峰, 陈飞, 吴冰, 等. 顶管电缆隧道施工对邻近建筑物和地下管线的扰动影响[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(21): 9074-9080.
- Ma Xianfeng, Chen Fei, Wu Bing, et al. Effect of pipe jacking cable tunnel construction on adjacent buildings and underground pipelines [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(21): 9074-9080.
- [16] 刘群. 相似理论在装置改造上的应用[J]. 化工设计, 2004, 14(2): 46-48+2.
- Liu Qun. Application of similar theory to plant revamp [J]. Chemical Engineering Design, 2004, 14(2): 46-48+2.
- (责任编辑 周雪梅)

(上接第 97 页)

- Wang Zhen, Zhong Zilan, Huang Jingqi, et al. Deformation and damage evolution of critical cross section of mountain tunnels under strike-slip fault movement [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(S1): 425-433.
- [19] 查文华, 刘新权, 姚苏琴, 等. 露转地逆倾分步开采对含断层高陡边坡稳定性的影响[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(20): 8403-8409.
- Zha Wenhua, Liu Xinquan, Yao Suqin, et al. Influence of step-by-step excavation from open-pit to underground with reverse tendency on stability of high and steep slopes with faults [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(20): 8403-8409.
- [20] 徐卫亚, 周家文, 邓俊晔, 等. 基于 Dijkstra 算法的边坡极限平衡有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1159-1172.
- Xu Weiya, Zhou Jiawen, Deng Junye, et al. Slope stability analysis of limit equilibrium finite element method based on the Dijkstra algorithm [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(8): 1159-1172.
- [21] 李鹏, 蔡美峰, 郭奇峰, 等. 煤矿断层错动型冲击地压研究现状与发展趋势[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(3): 1-17.
- Li Peng, Cai Meifeng, Guo Qifeng, et al. Research situations and development tendencies of fault slip rockburst in coal mine [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(3): 1-17.
- (责任编辑 周雪梅)