

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2025.06.002

隧道危岩落石综合防御体系构建及防护装置设计研究

齐根飞

(中铁十八局集团第四工程有限公司, 天津 300350)

摘要: 针对危岩落石防御体系进行了研究, 尤其关注铁路隧道进出口处的落石防护问题。首先, 通过对成贵铁路隧道危岩落石的危险性进行分析, 识别了影响危岩落石形成的内在和外部因素。其次, 提出了一个包括主动防护网、拦石墙、被动柔性防护网、钢轨栅栏和明洞接长等5层防护措施的综合防御体系。此外, 引入了一种新型钢管状元件设计, 该设计利用其独特的结构特性, 在轴向载荷作用下实现压缩塑性变形, 以增强落石防护系统的效能。

关键词: 铁路隧道; 危岩落石; 防御体系; 被动柔性防护网; 钢轨栅栏

中图分类号: U456.3⁺³

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2025)06-0009-06

引文格式: 齐根飞. 隧道危岩落石综合防御体系构建及防护装置设计研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2025, 39(6): 9-14.

Research on the Construction of a Comprehensive Defense System for Dangerous Rocks and Rockfall in Tunnels with a Design of Protective Devices

QI Genfei

(China Railway 18th Bureau Group Fourth Engineering Co., Ltd., Tianjin 300350, China)

Abstract: A research has been conducted on the defense system against dangerous rocks and rockfalls, with a particular focus on the prevention from falling rocks at the entrances and exits of railway tunnels. Firstly, an analysis has been made of the hazards of the rockfall in Chengdu-Guiyang railway tunnel, thus identifying both internal and external factors affecting the formation of rocks and rockfall. Subsequently, a comprehensive defense system is proposed, incorporating such five layers of protective measures as active protection nets, stone barrier walls, passive flexible protection nets, rail barriers, and the extension of open tunnels. In addition, a novel design of steel tubular elements has been introduced, which utilizes its unique structural characteristics so as to achieve a compressive plastic deformation under axial load, thus enhancing the effectiveness of the rockfall protection system.

Keywords: railway tunnel; dangerous rockfall; defense system; passive flexible protection net; rail fence

0 引言

危岩落石是指在山区或崖壁处, 岩石因受到地震、雨水浸润、风化等自然因素的作用, 使得岩石表面裂缝增加或岩层松动^[1], 最终导致岩石从山体或崖壁上脱落, 以及碎石和砾石滚落、滑坡等自然现象^[2]。危岩落石不仅对人民群众的生命安全构成巨大的威

胁, 同时也会对交通运输、电力、水利等基础设施的运行造成巨大的影响^[3]。在铁路交通运输中, 危岩落石是常见的事故隐患。同时, 因铁路交通运输具有高速、连续、密集等特殊特性^[4], 一旦发生危岩落石, 不仅可能直接撞击列车, 导致列车脱轨, 还可能对铁路信号系统造成干扰或破坏, 引发系统故障^[5]。这些无疑会威胁铁路线路的正常运行, 甚至可能对乘客和工

收稿日期: 2024-04-23

作者简介: 齐根飞, 男, 中铁十八局集团第四工程有限公司工程师, 主要研究方向为土木工程, E-mail: 931128280@qq.com

作人员的生命安全造成威胁。据统计,全球范围内铁路交通运输中,每年因危岩落石造成的事故和损失都是巨大的。由此可见,对铁路危岩落石防御体系进行研究具有重要意义^[6]。

很多学者针对铁路危岩落石隐患,提出了多种防御措施^[7],如增设防护网、挡石墙,或运用爆破治理、地质勘探等技术手段进行防御^[8]。然而,在具体实践中,每种防御措施都有其适用范围和局限性,因此,本文拟对铁路隧道危岩落石综合防御体系进行研究,以使其发挥更高的效益,为铁路危岩落石防御体系的优化和提升提供参考。

1 工程背景

以成贵铁路云贵段隧道洞口及洞顶 10~16 标段部分危岩落石为分析对象(见图 1)。其中尖坡隧道坡顶环山体干砌片石围墙确认为文物,需重点保护,但同时存在剥落倒塌风险,形成落石危及下方行车安全。工程主要危岩落石隐患如下:

1) 狮子山口隧道进口。该进口上方陡崖高约 35 m,陡崖呈倒悬,岩性为灰岩夹泥岩,以薄至中厚层状为主,微弱风化,局部溶蚀剧烈,竖向节理裂隙发育,存在倒悬岩体。

2) 白杨林隧道进口。白杨林隧道进口危岩落石属上方陡崖+下方斜坡型,陡崖为断层形成,崖面节理裂隙发育,局部形成了倒悬体,下方斜坡自然坡度为 30°~50°,坡面堆积体以落石为主。为了确保上部危岩落石整治与下方桥梁同步施工安全,对白杨林隧道进口的危岩落石进行分期分批的动态设计。

3) 尖坡隧道进、出口。尖坡隧道全长 168 m,穿越圆锥形山体,隧道进、出口斜坡陡峭,高差约 70 m,且斜坡危岩裸露,受节理裂隙切割,存在零星危岩,隧道右侧坡顶处存在环山体干砌片石围墙,也形成危石威胁下方隧道进、出口,隧道进、出口因危岩落石存在安全隐患。

4) 冯家堰隧道进口。该隧道进口地势较为陡峭,上覆第四系坡积粉质黏土,下伏基岩为二叠系下统茅口组灰岩、白云质灰岩,二叠系上统龙潭组泥岩、泥质粉砂岩,洞顶及边坡存在危岩落石安全隐患。

5) 坪上隧道出口。该洞口位于飞仙关组泥质砂岩、砂质泥岩(20~40 m),以软质岩为主,左侧洞顶上方 10~40 m 坡顶及坡面分布危岩落石,危岩体多呈多面体。隧道出口设计明洞长 17 m,采用桥台进洞。

6) 文阁隧道出口。该出口位于陡崖下方,岩体为灰岩,中厚层状构造,节理裂隙发育,局部含较多

泥质,岩体风化易形成倒悬岩,陡崖及坡面均有危岩落石分布。

上述隧道进出口的危岩落石情况较为复杂,基于此,拟对隧道危岩落石风险及综合防御体系进行构建与应用。



图 1 成贵铁路云贵段隧道

Fig. 1 Tunnel in Yunnan-Guizhou section of Chengdu-Guiyang railway

2 危岩落石风险分析及防护

2.1 成贵铁路隧道危岩落石危险性分析

危岩落石的形成是多种因素综合作用的结果,大体可归纳为内外两方面影响因素。内在影响因素方面,如地形地貌、地层岩性和地质构造等,是危岩落石形成的物质基础。外部影响因素方面,包括降雨作用、地震作用、地下水作用、风化侵蚀作用、植物的根劈作用、卸荷作用和人为作用等,是导致危岩失稳破坏的重要因素。此外,这些外部影响因素会进一步加速内部因素恶化。由此内、外因素相互作用和影响,导致危岩落石的形成。因此,对危岩形成的各种因素进行分析,确定采取合适的措施,以减少危岩的形成和降低对人类活动的威胁。在地形地貌因素上,高山峡谷地区、江河湖海冲刷严重的地区、长期上升剧烈的分水岭区、山区河流的凹岸边坡、陡峭山坡及人工切坡造成的高边坡等都是危岩发育常见区。坡度越陡峭、斜坡高度越大,其临空面越有利于危岩崩塌。在地层岩性因素上,危岩多发育于厚层状、块状且较为坚硬的脆性岩体上,如灰岩、砂岩、砾岩、花岗岩、厚板岩、辉绿岩、辉长岩等。软硬岩体相间的组合岩层有利于危岩发育。在地质构造因素上,地质构造活动对危岩落石灾害的形成有着重要的控制作用。当区域性构造线与边坡方向平行时,易形成危岩落石灾害,并且分布范围较为广泛。在外部影响因素上,降雨作用、地震作用、地下水作用、风化侵蚀作用、植物的根劈作用、卸荷作用及人为作用等因素,进一步加速了内部因素的恶化,最终诱发危岩的失稳破坏。这些因素相互作用、相互影响,从而导致了成贵铁路危岩的形成和发展。所以对于成贵铁路的危岩治理,

为了保证防御体系的有效性，根据上述因素作用的复杂多变，采取多种综合手段，包括防护网、爆破拆除、加固支护、抽水降渗等措施。同时，需要进行严密地监测和预警，及时发现和处置潜在危险。

2.2 铁路隧道进出口落石防御体系要素构成分析

成贵铁路隧道落石防御体系，是采取一系列措施，以防止山体岩石滑落，从而保护人员和设施安全的系统性工程。首先，对山体的地质构造、地质构造特征和岩性进行详细评估，识别山体的岩石类型、断层、节理和裂隙等，确定可能发生滑坡、滑动、落石等自然灾害的区域和情况。其次，采用不同的监测技术，例如遥感技术、激光雷达、地震监测和人工监测等，实时监测山体的运动和岩石的破裂、松动和滑落等情况，及时预警可能出现的灾害。包括采取措施来保持山体稳定，例如种植防护林带、增强岩石结构、加固土石堆和堤坝、灌浆和固化等。这些措施均有助于减少落石和其他自然灾害的发生。再次，制定应急预案和紧急疏散计划等，以应对突发事件和减轻损失。例如，建立紧急报警系统、设置紧急疏散路线和设施，

以及准备救援物资和设备等。落石防御体系是一个长期的系统性工程，且需要进行定期维护和保养，其主要构成要素包括检查和维护监测设备、维修和更换损坏的预防措施、更新和修复应急设备和设施等。

2.3 危岩落石综合防御体系构建及应用

原设计中施工尖坡隧道进口里程为D3K432+600，明暗分界里程为D3K432+620，洞门采用双耳墙明洞门。明挖段及明暗分界处直立开挖面采用喷砼防护，洞口永久仰坡W2地层采用浆砌片石嵌补后喷混植生，土层中边坡高度小于3.0 m采用植草防护，高度大于3.0 m采用人字形骨架护坡。尖坡隧道坡顶存在环山体干砌片石古城墙，该古城墙为保护文物，不可采用清除办法进行处理，洞顶上方零星危石清理完成后造成大面积基岩裸露，存在危岩落石隐患。为保证安全，将洞顶上方危石较集中处采用主动防护网保护，并且在出口方向洞顶上方增设一拦石墙，此外拦石墙下设有被动柔性防护网和钢轨栅栏，并对隧道进出口明洞进行了接长，构成该隧道洞口危岩落石综合防御体系，如图2所示。

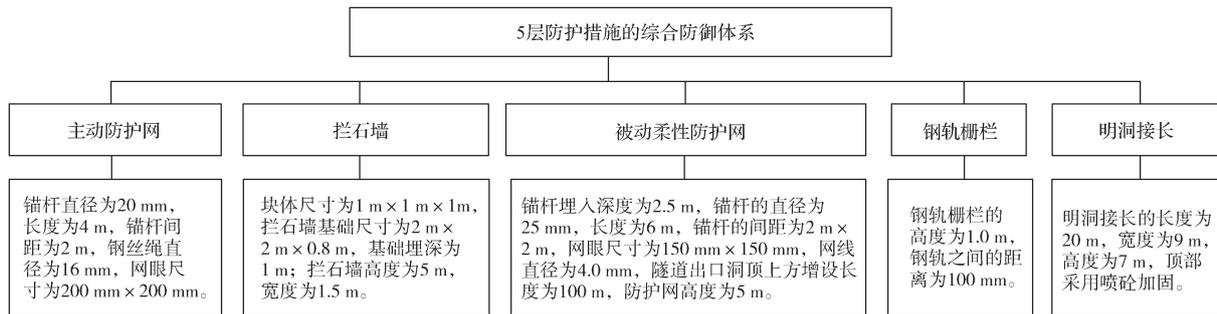


图 2 5层防护措施的综合防御体系结构框图

Fig. 2 Comprehensive defense system structure block diagram with 5-layer protective measures

1) 第一层防护：主动防护网。其主要作用是防止大块危岩直接掉落到铁路线路上，从而保护隧道进口的安全，现场设置见图3。



图 3 尖坡主动防护网现场设置

Fig. 3 On-site installation of active protection nets for sharp slopes

如图3所示，首先使用锚杆固定主动防护网，锚杆直径为20 mm，长度为4 m，锚杆间距为2 m。主动

防护网使用高强度钢丝绳编织而成，钢丝绳直径为16 mm，网眼尺寸为200 mm x 200 mm。主动防护网的上端与隧道进口的喷砼防护面相连，下端采用地钉固定。

2) 第二层防护：拦石墙。其主要作用是防止危岩落石穿过主动防护网，从而保护隧道进口安全。具体构建如下：其中拦石墙采用混凝土预制块砌筑，块体尺寸为1 m x 1 m x 1 m；拦石墙采用钢筋混凝土基础，基础尺寸为2 m x 2 m x 0.8 m，基础埋深为1 m；拦石墙高度为5 m，宽度为1.5 m，与隧道进口的喷砼防护面相连。

3) 第三层防护：被动柔性防护网。被动柔性防护网设置在拦石墙上方，起到缓冲作用和吸收能量的作用，能够有效缓解落石的冲击力并吸收能量，防止落石对下方施工区域和铁路线路造成破坏。根据实际情况，被动柔性防护网采用带有锚杆的网式结构，锚杆埋入地层深度应不少于2.5 m，锚杆直径为

25 mm，长度为 6 m，锚杆间距为 2 m × 2 m。柔性防护网的网眼尺寸为 150 mm × 150 mm，网线直径为 4.0 mm，使用高强度钢丝制成。本防御体系中，在隧道出口的洞顶上方增设一道被动柔性防护网，长度为 100 m，防护网高 5 m。

4) 第四层防护：钢轨栅栏。钢轨栅栏设置在被动柔性防护网上方，起进一步防护作用，能有效防止较大落石穿透被动柔性防护网，对下方施工区域和铁路线路进行保护。钢轨栅栏采用标准的铁路用钢轨，通过专门的连接件连接，钢轨栅栏的高度为 1.0 m，钢轨之间的距离为 100 mm。

5) 第五层防护：明洞接长。为了保证隧道进、出口的安全性，需要对明洞进行加长，从而将危岩控制范围内的地质构造体和岩体全部控制在洞内，避免危岩落石对隧道进、出口造成损害。设置明洞接长的长度为 20 m，宽度为 9 m，高度为 7 m，顶部采用喷砼加固，侧面采用喷混凝土进行加固，地面铺设钢筋混凝土路面。

2.4 危岩落石综合防御体系效果分析

隧道危岩落石防御体系综合工程包括 5 层防护措施：主动防护网、拦石墙、被动柔性防护网、钢轨栅栏和明洞接长。各层措施相互补充，共同构成了一个完整的防护体系，能够有效地保护成贵铁路隧道进出口的安全，确保铁路线路的正常运行。根据统计，在防御体系运行前，隧道附近危岩落石发生频率为每月 6 起。在防御体系运行后，因为防御体系的应用，危岩落石未再发生，表明该措施的应用有效，隧道运行及通行安全得到了保障。

3 新型钢管状元件落石防护设计

落石灾害评估为城市规划、工程布局和落石灾害减灾提供了重要依据。落石特征是落石评估的重要因素，其特征包括落石速度、落石高度、落石空间频率、落石撞击点和落石停止点。基于此，本文提出了一种新的钢制阻尼装置，以实现更有效、更坚固、更轻量的模块化落石缓冲垫，以减缓落石冲击的速度和减少落石冲击的力度。

3.1 系统设计

将设计的折叠管状元件放置在落石防护区域上，以最大限度地减少冲击块产生的冲击力。从撞击开始，下落岩体的动能不可逆地转化为防护装置的变形能。管状元件分组组装，形成模块化垫层，作为颗粒材料（沙子、砾石、膨胀黏土或泡沫玻璃）的更可靠、更高效的替代品。系统采用 3 根直径 16 mm 的高强度镀锌钢丝保证整体响应的可靠性。新

型钢管状元件的密度为 7 800 kg/m³，弹性模量为 2.1 × 10⁵ MPa，泊松比为 0.25，屈服强度为 235 MPa，切线模量为 10.0 × 10³ MPa，整体钢管状元件落石防护结构如图 4 所示。

由于其优异的冲击质量减速效果，钢管状倒塌结构被广泛研究和用于冲击分析以及耐撞性应用^[9]。薄壁金属板梁或柱式结构在用于能量吸收范围时表现出两种基本机制，这取决于冲击的方向。如果冲击沿着元件的纵轴或以小于 10° 的角度发生，则显示轴向塌陷模式。相反，在沿角度超过 10° 的方向发生冲击的情况下，塌陷是通过弯曲来控制的，如图 5 所示。

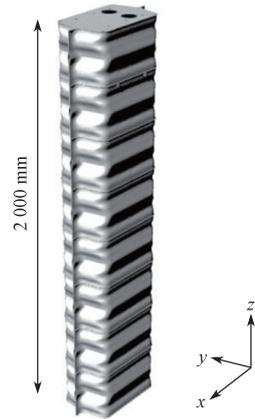


图 4 新型钢管状元件落石防护结构

Fig. 4 A new type of rock falling protective structure with steel tubular element

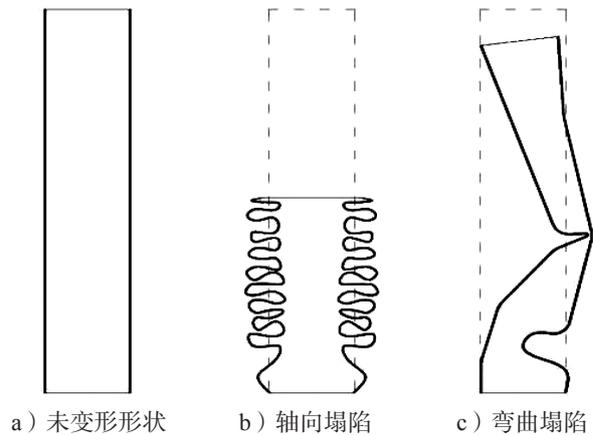


图 5 薄壁管状元件的塌陷模式剖面图

Fig. 5 Sectional view of collapse mode of thin-walled tubular components

新型钢管状元件落石防护设计整体布置见图 6。

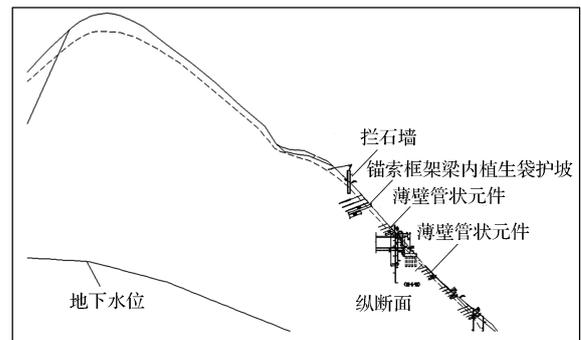


图 6 新型钢管状元件落石防护设计整体布局示意图
Fig. 6 Schematic diagram of the overall layout of the new steel pipe top element rockfall protection design

基于上述原因，新型钢管形状的元素被设计成在轴向载荷作用下能够获得压缩塑性变形，具有特定的横截面和长度，且在变形过程中不需要任何额外引导的装置。这种管状元素的轴向塌陷是由其边缘的波浪形状触发的，这种设计促进了系统的整体折叠，从而使参与塑性变形的材料量最大化。每个管状元素都包含多个半球体压缩部分，这些半球体互相作用并与相邻的壁面相交，从而确定了相应的边缘。在整个折叠过程中，不同部分的材料不会相互干涉或穿透。

值得注意的是，在手风琴式变形之后，突出或收缩的压痕会改变其在角部的方向，从而避免了材料间的干扰。因此，管状元素在响应冲击时显示出较小的波动和稳定的力度，有效减少了落石事件中因顶部冲击块质量产生的速度和冲击力。这种阻尼元件^[10]的可预测变形机制允许精确计算产生的反作用力，从而提高了垫层和落石防护廊道设计过程的可靠性。图7a展示了一旦下落的质量停止后阻尼系统的变形情况。根据设计要求，管状元素在第一次冲击过程中显示出折叠和屈曲的失效模式。如图7b所示，放置在落体中心下方的管状元素会沿其纵轴直线塌陷，而其他位置的管状元素则根据其位置跟随冲击器两侧的引导而变形。



a) 第一次冲击变形 b) 第二次冲击变形

图7 真实规模测试变形图片

Fig. 7 Real scale test deformation images

3.2 能量分析

在性能分析过程中，需要考虑的能量主要有总能量、总动能、沙漏能。考虑沙漏能是为了确保数值计算的稳定性及精确度，为了避免沙漏能变形严重导致的分析结果失真，规定沙漏能不超过总能量的10%的情况下是合理的。数值仿真中，落石形状为球体，其半径 $R=0.4\text{ m}$ ，密度 $\rho=3\ 000\text{ kg/m}^3$ ，质量 $m=804\text{ kg}$ ，速度 $v=30\text{ m/s}$ ，仿真计算时间 $t=0.25\text{ s}$ 。以 360 kJ 的初始动能和距实践中心 1 m 的位置情况下，模拟正面桩基变化情况。碰撞过程中，落石与试件的能量均会发生变化。图8所示为系统总能量以及构件内能随时间的变化规律图。

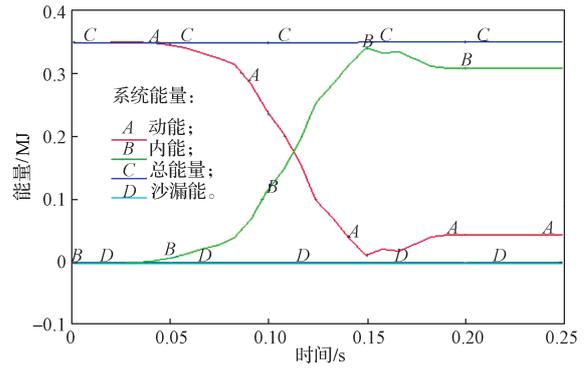


图8 系统能量变化曲线

Fig. 8 System energy change curves

由图8可知，在同种冲击动能和碰撞情况下，整个变化过程中能量都是守恒的，总能量稍微有些波动，但波动幅度在4%以下，系统的动能随着时间历程逐步减小到一个最小值，即在0.08 s时开始急剧下降，在0.15 s时降至最低值，然后略有增长；内能逐渐增大到一个最大值，然后略有下降，最后趋于平稳。

构件单元位移随时间变化曲线见图9。

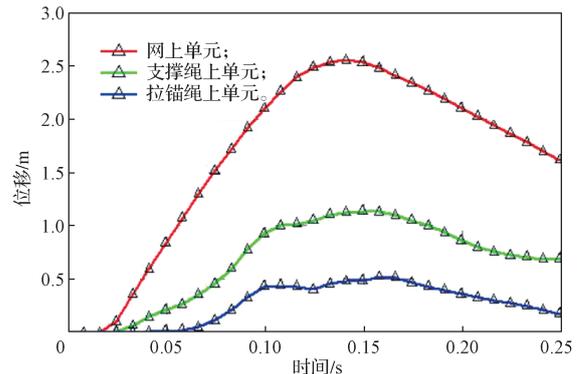


图9 构件单元变形曲线

Fig. 9 Deformation curves of component units

由图9可知，构件变形量都随时间的增加而逐步增加，达最大值后开始缓慢降低。据分析，新型钢管状元素的最大变形量减少了0.33 m，当支撑绳的尺寸变大时，元素整体的变形量减小，整体的变形性能下降。这是因为构件四周的截面积变大了，对构件的支撑加固作用增大，导致物体碰撞构件时整体的变形量减小。

4 结语

通过对成贵铁路隧道危岩落石风险的分析与综合防御体系的构建，本文为铁路危岩落石防御提供了实用的解决方案，经分析表明：

1) 新型钢管状元素的设计在同种冲击动能、同种碰撞情况下，整个能量变化过程中能量都是守恒的，总能量稍微有些波动，但波动幅度在4%以下；

2) 新型钢管状元件最大变形量减少了 0.33 m;

3) 新型钢管状元件的设计显著提高了防护系统的性能, 能够有效地减缓落石冲击产生的力和速度, 能保障铁路运输的安全。

由此, 根据上述分析结果可发现, 所提出的隧道危岩落石综合防御体系构建及防护装置设计研究, 不仅对于铁路危岩落石防御体系的优化有重要意义, 也为其他类似的地质灾害防护提供了有价值的参考。

参考文献:

- [1] 张海锋, 李向阳, 杨明, 等. 旅游景区公路边坡危岩落石灾害防治措施研究[J]. 福建建材, 2023(2): 78-80, 93.
ZHANG Haifeng, LI Xiangyang, YANG Ming, et al. Study on Prevention and Control Measures of Dangerous Rocks and Falling Rocks on Highway Slopes in Tourist Attractions[J]. Fujian Building Materials, 2023(2): 78-80, 93.
- [2] 王东. 山区铁路高边坡危岩落石病害防治技术研究[J]. 工程技术研究, 2023, 8(1): 205-207.
WANG Dong. Research on Prevention and Control Technology of Dangerous Rockfall Disease on High Slope of Mountain Railway[J]. Engineering and Technological Research, 2023, 8(1): 205-207.
- [3] 钟昌桂, 张磊, 周良. 高速铁路隧道洞口危岩落石灾害评价方法及工程对策研究[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(6): 84-91.
ZHONG Changgui, ZHANG Lei, ZHOU Liang. A Study on Evaluation Method and Engineering Countermeasures of Dangerous Rockfall Disaster at Tunnel Portal of High-Speed Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(6): 84-91.
- [4] 王森. 砂泥岩互层陡立边坡危岩落石整治方案研究[J]. 山西建筑, 2022, 48(23): 80-83.
WANG Sen. Study on the Remediation Scheme of Dangerous Rockfall on Steep Slopes with Interbedded Sandstone[J]. Shanxi Architecture, 2022, 48(23): 80-83.
- [5] 李恭晨. 高速铁路浅埋隧道入口危岩落石分析及防护设计[J]. 铁道勘察, 2022, 48(6): 83-88.
LI Gongchen. Protection Design of High-Speed Railway Shallow Buried Tunnel Entrance for Dangerous Rock Fall[J]. Railway Investigation and Surveying, 2022, 48(6): 83-88.
- [6] 张宏. 宝台山隧道进出口危岩落石防治措施研究[J]. 铁路技术创新, 2022(5): 6-11.
ZHANG Hong. Research on Prevention and Control Measures of Rockfall at the Entrance of Baotai Mountain Tunnel[J]. Railway Technical Innovation, 2022(5): 6-11.
- [7] 于进泉, 蒲春林, 马康, 等. 桐新高速四平隧道危岩落石运动特征及危害性研究[J]. 铁道建筑技术, 2022(10): 111-115.
YU Jinquan, PU Chunlin, MA Kang, et al. Study on Motion Characteristics and Hazards of the Dangerous Rock Mass in Siping Tunnel of Tongzi-Xinpu Expressway[J]. Railway Construction Technology, 2022(10): 111-115.
- [8] 汪莹鹤, 李时亮, 李炜, 等. 张吉怀铁路土峪隧道危岩落石特征及防护措施研究[J]. 铁道标准设计, 2023, 66(11): 126-133.
WANG Yinghe, LI Shiliang, LI Wei, et al. Study on the Characteristics and Protection Design of Tuyu Tunnel Rockfall on Zhangjiajie-Jishou-Huaihua Railway[J]. Railway Standard Design, 2023, 66(11): 126-133.
- [9] 张婉琪, 尹冠生, 姚如洋, 等. 一种新的内翻管理论模型及其耐撞性研究[J]. 力学学报, 2024, 56(3): 785-799.
ZHANG Wanqi, YIN Guansheng, YAO Ruyang, et al. A Novel Theoretical Model and Crashworthiness Research for Internal Inversion Tube[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2024, 56(3): 785-799.
- [10] 张瑞甫, 张璐琦, 潘超, 等. 考虑正常使用功能的非线性黏滞阻尼惯容系统多指标减震控制[J]. 工程科学与技术, 2023, 55(5): 14-22.
ZHANG Ruifu, ZHANG Luqi, PAN Chao, et al. Multi-Objective Seismic Control Effect of Inerter System with Nonlinear Viscous Damping Considering Functionality of Buildings[J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, 55(5): 14-22.

(责任编辑: 廖友媛)