

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.02.028

高边坡阻拦网抗冲击性能数值模拟及工程应用*

任李林¹, 叶小兴¹, 曹庆彬², 何理², 张亮³, 钟冬望², 赵永明², 蔡路军²

(1. 中铁广州工程局集团市政环保工程有限公司, 咸阳 712000;

2. 武汉科技大学湖北省智能爆破工程技术研究中心, 武汉 430065;

3. 西成铁路客运专线陕西有限责任公司, 西安 710000)

摘要: 阐明冲击速度、滚石尺寸及冲击角度等多参数对柔性阻拦网动力响应的耦合作用机制, 对于高边坡爆破施工滚石防护结构优化设计意义重大。基于能量法建立了高边坡滚石冲击阻拦网的力学分析模型, 推导出最大冲击力与滚石质量、速度及角度的理论关系, 即 $F_{\max} = v_0 \cos \alpha \sqrt{mk}$; 并构建了滚石冲击阻拦网的数值计算模型, 分别计算了多组单参数单独作用和滚石质量、速度及角度相互耦合作用下的滚石冲击阻拦网的数值模拟, 揭示了各参数单独及耦合作用对阻拦网变形的影响规律。结果表明: 最大冲击力与滚石质量呈平方根关系, 与速度呈线性正比; 竖向角度增大使冲击点外移导致变形减小, 滚石半径与变形量呈线性正相关, 而速度增长会使材料屈服、系统刚度增强, 变形增速趋缓; 在多参数共同作用中, 参数重要性排序为: 冲击速度(33.96%)、滚石半径(32.11%)和竖向角度(30.91%)。在此基础上研发了双道拦截网体系, 工程实例应用表明: 该体系通过首道网耗散动能、次道网完成拦截, 表现出优异的地形适应性和防护效能。

关键词: 高边坡; 柔性阻拦网; 抗冲击; 耦合作用; 数值模拟

中图分类号: U746.5 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2026)02-0267-11

Numerical Simulation and Engineering Application of Impact Resistance Performance of Barrier Nets for High Slopes

REN Li-lin¹, YE Xiao-xing¹, CAO Qing-bin², HE Li², ZHANG Liang³,
ZHONG Dong-wang², ZHAO Yong-ming², CAI Lu-jun²

(1. China Railway Guangzhou Engineering Bureau Group Municipal Environmental Protection Engineering Co., Ltd., Xianyang 712000, China; 2. Hubei Provincial Intelligent Blasting Engineering Technology Research Center, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China; 3. Xicheng Railway Passenger Line Shaanxi Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

Abstract: Understanding the coupled effects of impact velocity, rockfall dimensions, and impact angle on the performance of flexible barrier nets is crucial for optimizing the design of rockfall protection systems during high-slope blasting operations. Employing energy method principles, this study establishes a mechanical model for analyzing rockfall impacts on protective barrier nets along high slopes, deriving theoretical correlations between maximum impact force and key parameters, including rockfall mass, velocity, and impact angle, expressed as $F_{\max} = v_0 \cos \alpha \sqrt{mk}$. Additional-

收稿日期 (Date of reception): 2025-10-09

网络首发日期 (Published online): 2025-10-31

作者简介: 任李林 (1996-), 男, 高级工程师, 从事爆破工程技术方面的研究, (E-mail) 1243954907@qq.com。

通信作者: 叶小兴 (2001-), 男, 硕士研究生, 主要从事爆破技术研究, (E-mail) 202307703128@wust.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金 (52274136, 51904210); 湖北省自然科学基金项目 (2024AFB766)

About the author: REN Li-lin (1996-), male, senior engineer, mainly engaged in blasting engineering technology, (E-mail) 1243954907@qq.com.

Corresponding author: YE Xiao-xing (2001-), male, master's candidate, mainly engaged in blasting technology, (E-mail) 202307703128@wust.edu.cn.

Fund Programs: National Natural Science Foundation of China (52274136, 51904210), Hubei Provincial Natural Science Foundation Project (2024AFB766)

ly, a numerical model simulating rockfall impacts on barrier nets was developed, with comprehensive simulations performed to analyze both isolated single-parameter effects and coupled interactions among rock mass, velocity, and impact angle, elucidating their individual and combined influences on barrier net deformation patterns. Results demonstrate that the peak impact force follows a square-root dependence on rockfall mass while maintaining direct linear proportionality to velocity. Increasing vertical impact angles induces outward displacement of impact points, consequently diminishing net deformation. The deformation magnitude is linear, whereas higher impact velocities induce material yielding and subsequent stiffness enhancement, thereby decelerating deformation progression. Parameter sensitivity analysis reveals the following significance ranking for multi-factor interactions: impact velocity (33.96%), rockfall radius (32.11%), and vertical impact angle (30.91%). Based on these findings, a dual-layer interceptor net system was designed and implemented. Field applications confirm the system's effectiveness in dissipating kinetic energy through the primary net and in successfully intercepting rockfalls by the secondary net, demonstrating superior terrain adaptability and protective capabilities.

Key words: high slope; flexible barrier net; impact resistance; coupling effect; numerical simulation

高陡边坡爆破施工过程中,山坡周围环境复杂,爆破扰动造成的滚石危害可能对民房、结构设施等造成破坏^[1],因此滚石防护成为确保工程安全的关键环节。柔性阻拦网凭借其轻质、高韧性、易于安装和维护等优势,已成为滚石防护工程中的首选方案,其抗滚石冲击性能直接影响防护工程的安全性和可靠性^[2]。传统防护网布设方法多基于经验沿保护区域周边布置,往往忽视滚石运动特性的定量分析和拦截效率的系统评估,导致防护效果与经济成本之间难以实现最优平衡^[3]。

在落石冲击阻拦网的研究方面,国内外学者从多个角度展开了深入探讨。余志祥等对中国西部某山区道路上的柔性落石防护屏障的实际保护性能进行了现场调查^[4],调查的柔性落石防护屏障总面积约为 20 000 m²,揭示了灵活岩落防护屏障的五种典型失效模式,包括钢柱屈曲、连接失效、环网破坏、钢缆绳断裂和锚固点失效。陈名英以长九神山灰岩矿为背景^[5],采用理论分析与模型构建相结合的方法,揭示了露天爆破开采中滚石的产生机理,进而建立了边坡滚石运动学简化模型,计算了不同高程下的滚石运动距离并预测了其影响范围。Keskin 和 Inan 指出^[6],滚落岩石的初始速度、重量、类型及形状,与构成边坡的岩石类型共同控制着滚石的运动特征,这些参数直接影响滚石的弹跳高度、运行轨迹及最终冲击能量。为探究地质条件对爆炸滚石的影响,孙波采用 LS-DYNA 软件模拟了花岗岩、白云岩和大理岩边坡在同等爆炸作用下的动力学响应^[7]。其模拟结果揭示了一个共性规律与一个关键差异:滚石的速度演化过程及破坏区速度分布在三类岩体中呈现一致性;然而,不同岩体中的滚石速度却存在显著差别。在理论分析方面,线性粘弹性接触理论、赫兹弹性接触理论等被广泛应用于滚石冲击过程的

建模中;网的材料性能是影响柔性阻拦网抗冲击能力的基础因素,材料性能作为决定柔性阻拦网抗冲击能力的基础因素,其弹性模量、屈服强度及各向异性特征对能量吸收与耗散具有显著影响^[8]。结构参数优化也取得重要进展,如张永康通过 LS-DYNA 数值模拟发现^[9],合理的网孔尺寸可有效提升阻拦网的能量耗散效率。在冲击力模型方面,学者们发展了一系列算法,例如,王东坡等基于能量比例系数建立了考虑冲击角度的计算模型^[10],而王星等则通过理论推导提出了脉冲算法与弹塑性算法^[11],其数值模拟结果与国际主流算法具有较好一致性,但脉冲算法结果相对保守。在数值模拟方面,刘成清和陈玉满基于 Hertz 接触力学、运动学以及土体的线弹性本构模型^[12],对滚石运动全过程进行了公式化推导,并借助 ANSYS/LS-DYNA 对 R7/3/300 型网片进行了数值验证,证明其具有良好的拦截效果。实际应用中,王东坡等针对传统帘式网维护难、成本高等问题^[13],提出一种改进型开口帘式网,通过现场试验和数值模拟研究了其耗能机制与优化路径;崔廉明等采用有限元分析方法分析了环形网的耗能性能^[14],为其工程应用提供了理论支持。在大皇山露天矿高陡边坡的爆破施工中,陈晶晶通过于 +96 m 和 +51 m 两个清扫平台上布设安全防护网^[15],有效防控了大块石体直接滚落至山下的风险。

在柔性阻拦网的动力响应分析中,多因素耦合作用对冲击过程中的位移、冲击力及能量转化具有重要影响,是优化设计、提升防护效果的关键。研究表明,滚石质量与柔性阻拦网的变形程度呈正相关,而滚石速度显著影响冲击能量的传递效率^[16]。此外,滚石形状的复杂性也会对冲击力分布特征产生明显影响^[17]。滚石的转动效应亦不可忽视:转动速度越高,与网片之间的滑移及摩擦耗能越多。考虑

滚石转动效应后,各构件的内力放大系数大于仅考虑平动的计算结果,在实际的设计及计算中,宜考虑转动效应的影响^[18]。左明宇对比有无转动工况^[19],确定了滚石转动对防护网的作用机制,并引入螺旋弹簧活塞杆结构对环形被动柔性防护网进行优化,为工程设计提供了新思路。宋男男等将落石简化为刚性球体^[20],运用 ANSYS/LS-DYNA 研究了不同形状和冲击角度下落石冲击荷载对柔性被动防护系统结构的动力响应。李华东等通过显式动力分析模拟了多落石不同运动模式下的冲击过程^[21],发现随初始动能增大,防护网达到最大位移的时间总体缩短,而最大冲击力的出现时间则逐渐延后。研究还指出,在冲击过程中,滚石运动状态(滚动或弹跳)对钢丝绳网和钢柱的能量吸收具有显著影响,尤其在网体破裂时,滚动状态下钢柱的能量急剧上升。

尽管已有研究在单一或少数因素方面取得了进展,实际工程中滚石冲击却是多参数耦合作用的结果,目前仍缺乏对多因素交互影响机制的系统性分析。而物理实验虽被视为金标准,但其成本高、周期长、具破坏性且工况有限,难以覆盖所有参数组合(如滚石形状、速度、冲击位置等),因而在揭示普适规律方面存在局限。基于此,本研究将采用理论分析与数值模拟相结合、工程实践验证的方法,系统探究柔性阻拦网在滚石冲击下的动力响应。首先基于能量法推导分析滚石直径/质量、滚石冲击速度、滚石冲击角度等变量与最大冲击力之间的简易力学关系式,从理论上揭示各变量的影响规律;进而利用 LS-DYNA 开展显式动力有限元分析,不仅验证理论关系,重点在于深入研究上述变量在单独作用及相互耦合情况下对阻拦网变形的影响机制;最终根据理论分析与模拟结果,指导该工程桐木车站站场路基工程的阻拦网布设方案。研究成果旨在为高陡边坡爆破区滚石防护工程的设计提供理论支撑与参数依据,为柔性阻拦网结构的精准优化与工程设计提供可靠的理论依据。

1 简化力学模型

典型的阻拦网系统(常用于边坡防护、落石拦截、机场跑道应急拦阻等)是一个复杂的柔性结构,主要由以下几个核心部分组成:支撑绳、网片、减压环、锚固系统、其他构件组成。

阻拦网系统的力学行为极其复杂,其核心特性可以概括为柔性、大变形和非线性,与传统刚性防护结构(如混凝土挡墙)不同,阻拦网系统通过其柔性

来“以柔克刚”,不直接阻止冲击物的运动,而是通过允许自身发生可控的、大范围的变形来延长冲击时间,从而显著降低冲击峰值荷载。见图1。

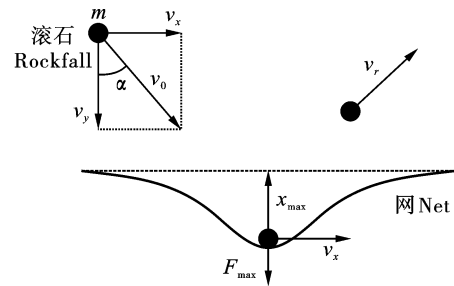


图1 滚石运动

Fig. 1 Rockfall motion

基于能量法,推导简化力学模型,并作出如下假设:

(1) 滚石简化为质量为 m 、初速度为 v_0 的刚体。

(2) 网系统简化为一个等效刚度为 k 的线性弹簧。这个刚度 k 代表了从冲击点至锚固点的整个系统(包括网片、支撑绳、减压环等)的综合刚度。实际系统是高度非线性的,此处的 k 是一个等效近似值,通常取吸能过程中的平均刚度或根据试验数据反算。

(3) 完全非弹性碰撞,在达到最大位移的瞬间,滚石与网具有相同的速度(为零),且不发生反弹。

(4) 忽略其他能量耗散(如摩擦、声能、阻尼)、重力在冲击过程中的影响。

滚石的初动能

$$E_k = \frac{1}{2}mv_0^2 \quad (1)$$

在网的变形达到最大值 $x_{\max}$ 时,滚石的竖直速度为零,水平速度 v_x 并非为0,滚石的残余动能为

$$E_{kx} = \frac{1}{2}mv_x^2 \quad (2)$$

忽略摩擦在中级过程中的影响,水平速度不会因为碰撞而减小,则

$$v_x = \sin(\alpha)v_0 \quad (3)$$

网的弹性势能达到最大为

$$E_s = \frac{1}{2}kx_{\max}^2 \quad (4)$$

根据能量守恒定律,冲击过程机械能守恒,动能全部转化为最终的弹性势能

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}kx_{\max}^2 + \frac{1}{2}mv^2 \sin^2 \alpha \quad (5)$$

解得

$$x_{\max} = v_0 \cos \alpha \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (6)$$

对于线性弹簧最大冲击力 $F_{\max}$ 与最大位移 $x_{\max}$ 满足胡克定律

$$F_{\max} = kx_{\max} \quad (7)$$

将式(6)代入式(7)

$$F_{\max} = KV_0 \cos \alpha \sqrt{\frac{m}{k}} = v_0 \cos \alpha \sqrt{mk} \quad (8)$$

从这个公式可以看出,阻拦网的最大冲击力 $F_{\max}$ 与以下因素有关

① $F_{\max} \propto \sqrt{m}$: 滚石的质量越大,网受到的最大冲击力也越大,关系是平方根关系;

② $F_{\max} \propto v_0$: 初速度越大,最大冲击力也越大,速度的影响非常显著,最大冲击力与速度成正比;

③ $F_{\max} \propto \sqrt{k}$: 刚度 k 越大,系统“越硬”,最大冲击力 $F_{\max}$ 就越大,但所需的拦截位移 $x_{\max}$ 越小。反之,刚度 k 越小,系统“越软”,冲击力越小,但所需位移越大。阻拦网系统的核心设计思想就是通过采用较低的刚度(柔性系统)和允许大变形来显著降低冲击力;

④ $F_{\max} \propto \cos \alpha$: 竖直角度越小,网受到的冲击力越大。

实际的阻拦网系统刚度 k 不是常数,初始刚度很低,随着减压环启动、绳索绷紧,刚度会增加,减压环的塑性变形、摩擦、网绳之间的机械干涉等会耗散大部分能量。

考虑能量耗散后,修改的能量公式为

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = E_d + \frac{1}{2}kx_{\max}^2 + \frac{1}{2}mv_x^2 \quad (9)$$

式中, E_d 是耗散的能量。有了耗能装置,储存的弹性变形能更少,因此产生的最大冲击力 $F_{\max}$ 也会比理论计算值更低。

2 数值模拟

2.1 数值模型建立及模拟结果

为研究阻拦网在冲击作用下的动力响应,本文将滚石简化为具有一定质量、速度与几何外形的冲击体,考虑到绝大多数岩质滚石刚度远高于柔性阻拦网,其自身变形可忽略,故将滚石视为不发生变形的刚体。在显式动力学分析中,刚体无需划分精细网格,也不参与复杂的材料本构计算,从而显著节省计算资源。

考虑实际滚石的复杂性,简化数值计算模型,建立小球落网模型。其中,采用 solid 单元,半径为 100 mm;网采用 LS-DYNA 中的 Cable 索单元,网状 1000 mm × 1000 mm,间隔 50 mm,横竖各 20 根线体;周边四根边索采用圆形截面,半径为 16 mm;内部网线同样为圆形截面,半径设为 8 mm。模型整体结构如图 2 所示,图(a)中 α 为速度在竖直方向上的夹角。

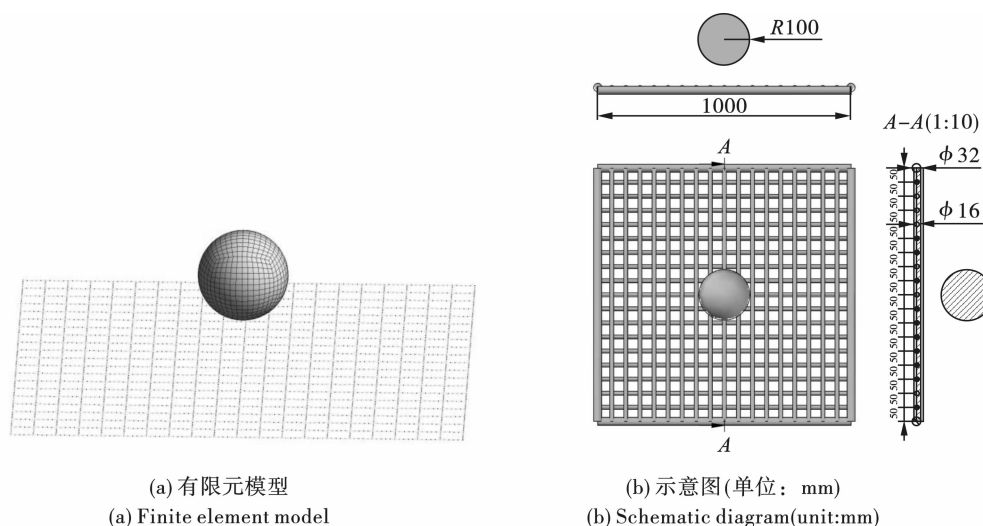


图 2 小球落网有限元模型及其示意图

Fig. 2 Finite element model and schematic diagram of the ball-net impact

小球材料为岩石,网材料为钢丝,参数如表 1 所示。

阻拦网的边界约束通过 * BOUNDARY_SPC_SET 关键字实现,将周边四个固定点设置为完全约束,确保其在模拟过程中不发生位移。

为更真实地模拟大尺寸滚石冲击过程,本文采用多点冲击模型,在该模型中,滚石会同时与多根网绳发生接触,形成分布式的多个接触点。通过 * CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE 关键字定义滚石与阻拦网之间的面-面接触关系,该

接触算法可有效处理复杂几何外形之间的碰撞。多点接触能够将冲击力以分布力的形式通过多个节点传递至整个阻拦网系统,更真实地反映冲击过程中力的均匀分布与网的整体响应,有利于准确计算网的变形与内力分布,并可模拟网片完全包裹滚石的工况。

表 1 材料参数
Table 1 Material properties

材料 Material	密度 Density/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	弹性模量 Elastic modulus/Pa	泊松比 Poisson's ratio
岩石 Rock	2.39	2.79E9	0.28
钢丝 Steel wire	7.85	2.00E11	0.30

小球 10 m 高度自由落体,其末速度约为 14 m/s,故在模型中为小球施加垂直于网面的初始速 14m/s。设置总求解时间为 0.1 s,时间步长为 0.67,并通过 LS-DYNA 进行显式动力学求解。

为分析阻拦网的动态响应过程,提取 0 s、0.02 s、0.04 s、0.06 s、0.08 s 及 0.1 s 时刻的网变形形态如图 3。图 4 中曲线反映了网的最大变形随时间的变化规律。

从网的变形过程图 3 及相应位移曲线图 4 可以看出,小球在 $t = 0.007 \text{ s}$ 时与网发生接触;在 $t = 0.03 \text{ s}$ 时,网的最大变形达到峰值,其值为 0.1457 m;随后在 $t = 0.08 \text{ s}$ 左右,小球与网分离。

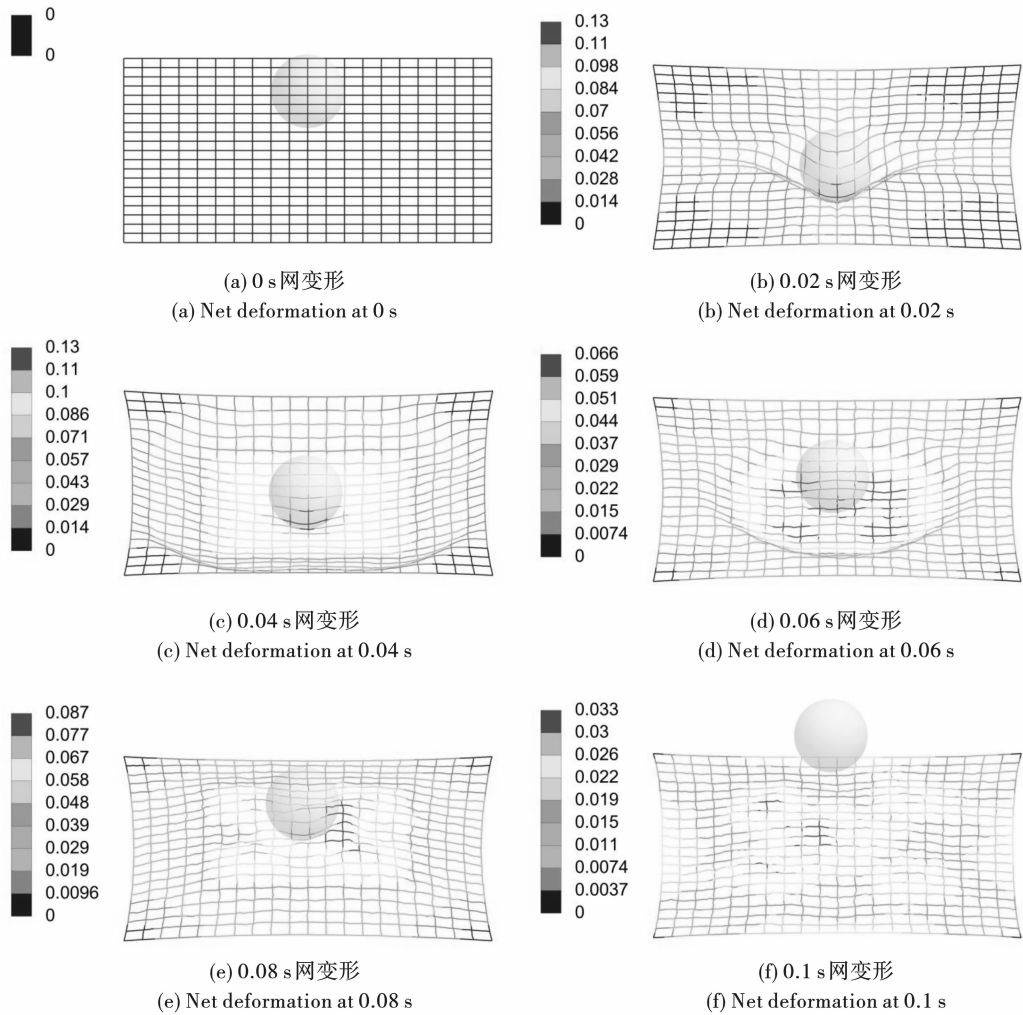


图 3 0~0.1 秒时刻网的变形图(单位:m)
Fig. 3 Deformation of the net at 0~0.1 s(unit:m)

2.2 单个参数变化对网最大变形的影响

(1) 冲击角度

为进一步研究滚石速度方向变化对防护网最大变形的影响,考虑竖直冲击角度(竖直冲击角度:垂

直于阻拦网网面的水平方向变化的角度,如图 1 中的 α 变化的影响。

过大的竖直冲击角度可能导致滚石不会撞击阻拦网,无法形成有效冲击,因此不具有实际研究价

值。综合考虑后,将竖直方向冲击角度的研究范围设定为 0° 至 60° 较为合理,以此范围为基础,以 2° 为间隔,均匀选取 31 个工况点进行计算,分析竖直角度变化对阻拦网最大变形的影响,结果如图 5 所示。

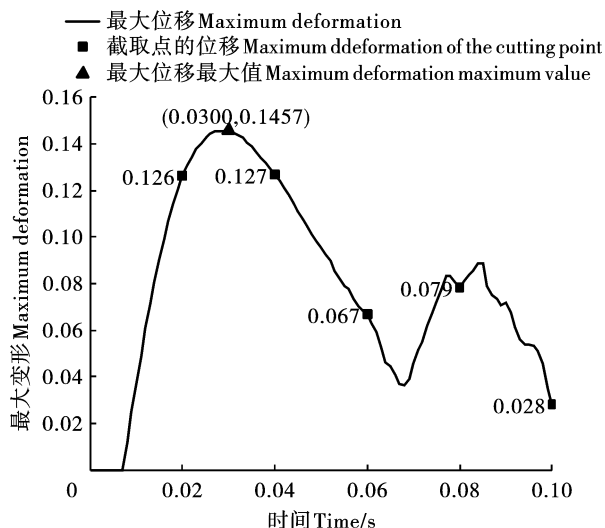


图 4 网变形的最大变形曲线

Fig. 4 Maximum displacement curve of net deformation

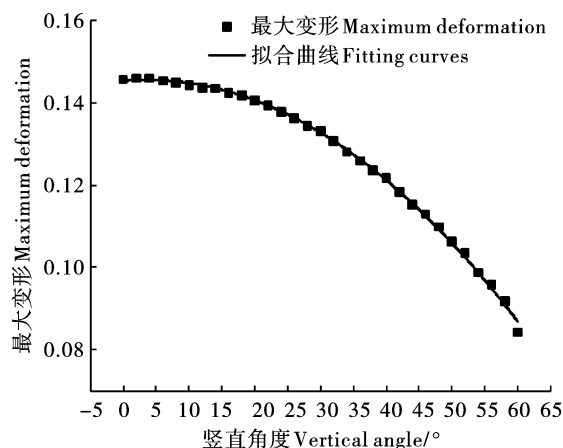


图 5 竖直角度变化产生的最大变形及其变化趋势图

Fig. 5 Maximum deformation as a function of vertical angle

从图 5 可以看出,随着竖直方向冲击角度的增大,滚石与阻拦网的接触位置由网中心逐渐向边缘移动。在相同冲击条件下,阻拦网的最大变形随之减小,且越靠近边缘区域,变形量减小趋势越显著,整体变化呈现近似抛物线的递减规律。网的最大变形值从 0.1460 m 逐渐减小至 0.0842 m。

(2) 滚石半径

滚石的半径直接影响其与阻拦网的接触面积,进而对网的最大变形产生显著影响。为系统研究该因素,将滚石半径取值范围设定为 60 ~ 100 mm,以 2 mm 为间隔,共选取 21 组不同半径进行数值计算,获得的网体最大变形结果如图 6 所示。

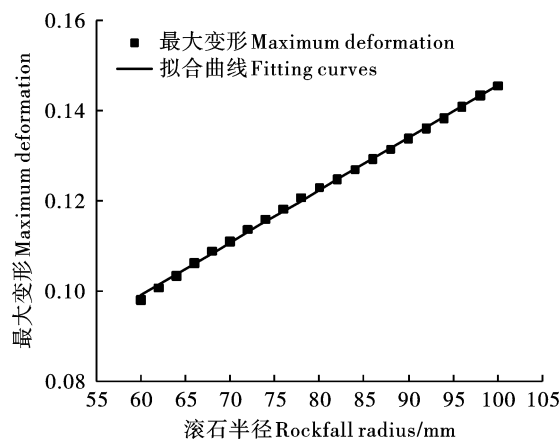


图 6 滚石半径变化产生的最大变形及其变化趋势图

Fig. 6 Maximum deformation as a function of rockfall radius

滚石半径与网的最大变形呈现出明显的线性正相关关系,即半径越大,网的变形也相应增大。模拟结果显示,随着滚石半径从 60 mm 增大至 100 mm,网的最大变形由 0.0981 m 显著增加至 0.1457 m。

(3) 冲击速度

为进一步研究冲击速度对网体变形的影响,系统改变了滚石的冲击速度,选取速度范围为 2 ~ 15 m/s,以 0.5 m/s 为间隔,共计 27 组不同工况进行计算,获得的网体最大变形随速度的变化关系如图 7 所示。

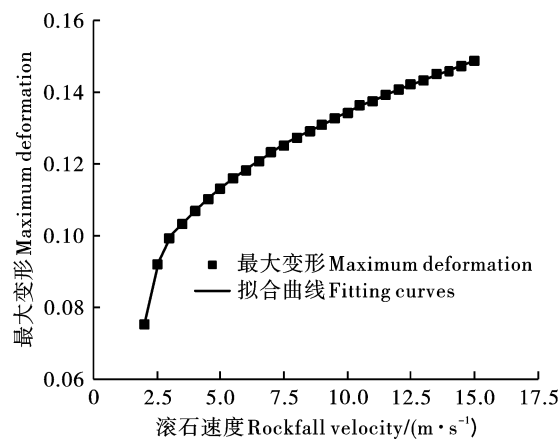


图 7 滚石速度变化产生的最大变形及其变化趋势图

Fig. 7 Maximum deformation as a function of rockfall velocity

当冲击速度较小时,冲击力较小,滚石撞击阻拦网主要引起钢丝的弹性变形。在此阶段,网的最大变形随速度变化较为显著。而当速度较大时,冲击力显著增大,钢丝除弹性变形外还进入塑性屈服阶段,系统的刚度增强,使得网的最大变形随速度增加的幅度趋于平缓。因此,速度与网变形之间的关系并非如式(8)所呈现的简单线性关系。总体而言,

在低速冲击下,材料处于弹性阶段,变形对速度变化响应更为敏感;而在高速冲击下,材料发生屈服,系统刚度提高,网的最大变形随速度增长的速率明显减缓。

2.3 多因素相互作用下的综合影响

为系统研究多参数耦合作用下阻拦网的抗冲击性能,本研究设计了多组数值模拟工况。其中,滚石半径 R 的取值范围为 $60 \sim 100 \text{ mm}$,冲击速度 V 设定为 $2 \sim 15 \text{ m/s}$,竖直方向速度角度范围为 $0^\circ \sim 60^\circ$ 。以上述参数范围内随机生成 40 组不同参数组合,并计算各工况下阻拦网的最大变形量,结果如表 2 所示。

对表 2 中的数据进行分析,旨在探究多参数耦合作用下各因素对阻拦网最大变形的影响规律。通过拟合分析,建立了各参数与最大变形之间的定量关系曲线,为便于比较不同量纲参数的影响程度,将滚石半径、冲击速度及竖直角度这三个自变量的取值范围分别归一化至 $0 \sim 1$ 区间,并将各参数与最大变形的关系汇总于同一图中,结果如图 8 所示。

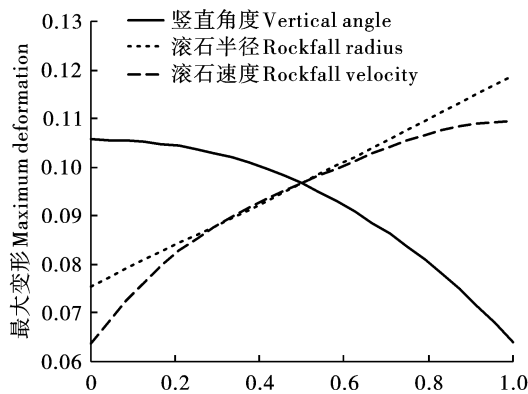


图 8 不同参数相互作用影响下的变形关系
Fig. 8 Deformation relationship with interactive effects of different parameters

在多参数耦合作用下,各因素对防护网最大变形的影响规律如下:随着竖直角度的增大,滚石冲击位置趋向防护网边缘,导致网的最大变形显著减小;随着滚石半径和冲击速度的增大,防护网的最大变形均呈现明显增大的趋势。

为量化各输入参数对防护网最大变形的相对重要性,采用基于方差分解的 Sobol 全局灵敏度分析方法,计算得到了滚石半径、冲击速度及竖直角度四个关键参数对最大变形的影响占比,其结果如图 9 所示。

根据图 9 所示的结果,竖直角度、滚石半径和冲击速度对防护网变形的影响最为显著,其影响占比分别为 30.91% 、 32.11% 和 33.96% 。

表 2 不同参数相互影响下的变形汇总

Table 2 Summary of deformation under the interaction of different parameters

组号 Group number	竖直角 Vertical angle/ $^\circ$	滚石半径 Rockfall radius/mm	滚石速度 Rockfall velocity/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大变形 Maximum deformation/m
1	23.3	94.5	10.5	0.122
2	17.3	91.5	4.2	0.096
3	33.8	71.5	3.5	0.069
4	5.3	84.5	11.5	0.119
5	44.3	86.5	13.6	0.101
6	38.3	68.5	9.5	0.080
7	47.3	85.5	7.2	0.083
8	35.3	81.5	13.2	0.105
9	6.8	60.5	12.6	0.091
10	0.8	89.5	7.5	0.114
11	3.8	66.5	9.9	0.095
12	41.3	93.5	14.9	0.114
13	48.8	65.5	8.2	0.065
14	36.8	74.5	3.8	0.071
15	12.7	64.5	5.5	0.076
16	18.8	92.5	13.9	0.132
17	45.8	70.5	8.9	0.074
18	42.8	83.5	6.2	0.084
19	15.7	77.5	10.2	0.106
20	59.3	78.5	4.8	0.056
21	2.3	90.5	11.2	0.126
22	29.3	82.5	10.9	0.106
23	27.8	69.5	12.9	0.098
24	54.8	97.5	4.5	0.076
25	14.3	62.5	2.2	0.049
26	51.8	87.5	3.2	0.058
27	32.3	99.5	12.2	0.125
28	57.8	61.5	15.2	0.056
29	26.3	75.5	2.8	0.068
30	56.3	67.5	6.9	0.056
31	39.8	63.5	14.2	0.081
32	11.3	76.5	11.9	0.110
33	53.3	73.5	8.5	0.068
34	8.3	80.5	2.5	0.074
35	30.8	98.5	5.9	0.105
36	24.8	88.5	14.6	0.125
37	21.8	72.5	9.2	0.093
38	9.7	95.5	6.5	0.115
39	20.3	79.5	5.2	0.088
40	50.3	96.5	7.9	0.091

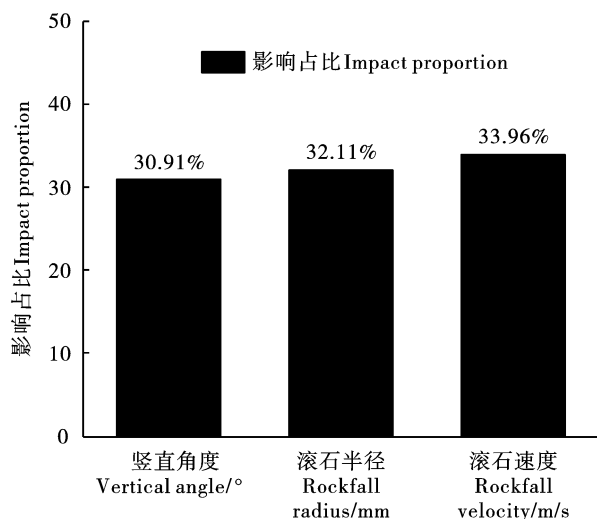


图9 各参数对最大变形影响占比图

Fig. 9 Sensitivity of maximum deformation to various parameters

在实际工程中,滚石的冲击角度和半径往往具有一定的不确定性,难以精确控制。然而,可以通过调整滚石的下坠高度,合理限制其冲击速度,从而有效降低冲击力,减轻对阻拦网的破坏,为进一步增强防护系统的可靠性,可依据阻拦网材料的屈服应力-应变特性及其与变形行为的关系,反演推断出导致网体发生破坏的滚石临界动能阈值。基于该阈值,可科学地确定阻拦网与开挖顶面之间的合理布设距离,从而在保障防护效果的同时,兼顾工程的经济性与安全性。

3 工程实例

西康高铁 DK130 + 700 - 950 段位于桐木车站站场大里程端,与在建陈家庄隧道相接。该段开挖方量约 34.7 万 m^3 ,地面高程介于 540 ~ 570 m 之间,相对高差 20 ~ 30 m,属起伏较大的丘陵地貌。

桐木车站路基地形陡峻,开挖区东、西两侧山脚处分布有大量民房。施工区岩性软硬不均,岩体节

理裂隙发育规模有限,密集带分布不均,且存在较多岩石凸起体,导致岩块易沿节理面崩落,崩落方向指向两侧山沟里的村落聚集区。坡表覆盖碎石土,受爆破振动影响易发生失稳,进而引发坡面砾石、块石滚落,严重威胁坡脚居民生命财产安全。

数值模拟揭示了滚石冲击下柔性网的动力响应规律,并成功应用于西康高铁桐木车站工程。数值结果表明,冲击速度(33.96%)、滚石半径(32.11%)及垂直角度(30.91%)是影响变形的关键参数,而水平角度可忽略。据此,工程采用双网拦截体系:首层网针对高速冲击耗能,二层网应对大粒径滚石,并通过动态下移布设适应冲击点外移趋势。见图 10。

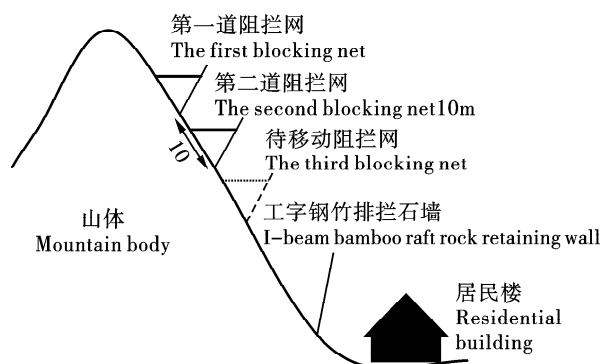


图10 路基落石拦截防护断面示意图

Fig. 10 Schematic of the subgrade rockfall barrier section

具体措施包括:于小里程右侧房屋后方陡峭区段布设被动防护网、工字钢竹排架拦石墙及浆砌片石防护墙进行多级拦截。其中被动防护网按每 10 m 一级设置,共设两道,并随开挖进程每下挖 10 m 向下移设一次(实际移设根据防护网损坏情况确定,损坏严重时新建被动防护体系);左侧房屋后方设置一道工字钢竹排架拦石墙及一道浆砌片石挡墙;右侧房屋后方设一道工字钢竹排架拦石墙;同时于上山便道外侧加设防护土墙,综合形成立体拦护系统。见图 11。



(a) 山体周边环境

(a) Schematic of the mountainous surroundings



(b) 阻拦网防护布置

(b) the barrier net protection layout

图11 山体周边环境及阻拦网防护布置图

Fig. 11 Schematic of the mountainous surrounding environment and the barrier net protection layout

在开挖施工过程中,尽管已设有预留岩墙作为初步防护,仍不可避免地发生滚石现象,绝大多数滚石冲击能量被第一层防护网有效拦截;部分尺寸较大的滚石在冲击中导致第一层防护网发生局部破

坏,但在耗散部分动能后,均被第二层防护网成功阻滞。该结果验证了多层柔性防护体系在分级耗能拦截方面的有效性。见图12。



(a) 第一层防护网防护效果
(a) Protective effect of the first layer net



(b) 第二层防护网防护效果
(b) Protective effect of the second layer net

图12 防护效果

Fig. 12 Protective effect

在该工程实践中,所采用的防护系统表现出以下显著优势:首先,系统具备较高的防护能级,通过支撑绳的力传递机制与减压环的塑性变形相结合,可有效吸收高达数千千焦的冲击能量;其次,系统展现出优异的地形适应性,其柔性结构能够顺应起伏的坡面地形,最大限度地减少开挖工程量,有利于生态环境保护;最后,系统施工便捷,模块化组件的设计便于运输和安装,且维护成本较低,适合随开挖面高程降低下移防护体系的动态施工流程,在实际应用中表现出良好的可操作性和防护效果。

4 结论

基于能量法导出了阻拦网受到的最大冲击力与滚石半径、速度和速度方向的关系式,并通过 LS-DYNA 模拟了不同参数单独和相互作用下小球落网的最大位移,揭示了各参数对阻拦网变形的影响规律,得到如下结论:

(1)建立了高边坡滚石冲击阻拦网的理论分析模型,阻拦网所受最大冲击力与滚石质量呈平方根关系,与冲击速度呈线性正比,与竖直角度成负相关。系统刚度是影响冲击响应的重要参数:系统刚度越大,冲击力越大而拦截位移越小;反之,低刚度柔性系统通过允许结构发生大变形,可显著降低冲击力,体现了“以柔克刚”的设计理念。

(2)揭示了多参数耦合作用下网体变形的响应机制,竖直角度增大导致冲击点向网边缘移动,从而使变形减小;滚石半径与变形量呈线性正相关;速度提高则促使材料进入屈服阶段,系统刚度增强,变形

随速度增长的速率趋于减缓。在多参数共同作用中,其影响重要性依次为:冲击速度(33.96%)、滚石半径(32.11%)和竖直角(30.91%)。

(3)西康高铁桐木车站段的工程实践表明,双道拦截网防护体系具有良好的高边坡滚石防护效果:第一道防护网有效耗散大部分冲击动能,第二道网则进一步拦截并阻止滚石侵入。该体系表现出高能量吸收能力、优异的地形适应性与施工便捷性,尤其适用于高陡边坡随开挖面高程降低下移防护体系的动态施工流程,具有良好的技术经济效益与工程推广价值。

参考文献 (References)

- [1] 高文学,万元林,刘运通,等. 高边坡危岩体爆破及其控制技术[J]. 爆破,2005(2):1-3,16.
- [1] GAO Wen-xue, WAN Yuan-lin, LIU Yun-tong, et al. Blasting and controlling technique of high and steep rock slope [J]. Blasting, 2005(2):1-3,16. (in Chinese)
- [2] 刘成清,张华鑫. 抗落石冲击被动柔性防护网的设计选型[J]. 华东交通大学学报,2022,39(5):36-44.
- [2] LIU Cheng-qing, ZHANG Hua-xin. Design selection of passive flexible rockfall barrier for resisting rockfall impact[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(5):36-44. (in Chinese)
- [3] LI Yu-chen, JIANG Nan, CHEN Jun-li, et al. A quantitative optimization method for rockfall passive nets on high-steep slopes: case study of the Feishuiyan slope[J]. Landslides, 2024, 21(8):1987-2006.
- [4] YU Z X, ZHAO L, LIU P Y, et al. Studies on flexible

- rockfall barriers for failure modes, mechanisms and design strategies: a case study of Western China[J]. *Landslides*, 2019, 16(2): 347-362.
- [5] 陈名英, 刘建程, 熊峻巍, 等. 长九神山灰岩矿爆破开采滚石控制研究[J]. *爆破*, 2021, 38(3): 113-119.
- [5] CHEN Ming-ying, LIU Jian-cheng, XIONG Jun-wei, et al. Study on rockfall control in blasting mining of Changjiu Shenshan Limestone Mine[J]. *Blasting*, 2021, 38(3): 113-119. (in Chinese)
- [6] Ina KESKIN, Al POLAT. Kinematic analysis and rockfall assessment of rock slope at the UNESCO World Heritage city (Safranbolu/Turkey)[J]. *Iranian Journal of Science and Technology-Transactions of Civil Engineering*, 2022, 46: 367-384.
- [7] 孙 波, 石少卿, 汪 敏, 等. 不同地质条件对爆炸落石速度影响的数值模拟[J]. *爆破*, 2009, 26(4): 26-28, 80.
- [7] SUN Bo, SHI Shao-qing, WANG Min, et al. Numerical simulation of influence on explosion rockfall velocity at different geology condition[J]. *Blasting*, 2009, 26(4): 26-28, 80. (in Chinese)
- [8] N SINGH, K SINGH. Review on impact analysis of FRP composites validated by LS - DYNA[J]. *Polymer Composites*, 2015, 36(10): 1786-1798.
- [9] ZHANG Yong-kang, LI Yu-long. Analysis of the anti-bird impact performance of typical beam-edge structure based on ANSYS/LS-DYNA[J]. *Advanced Materials Research*, 2008, 29(33-37): 395-400.
- [10] 王东坡, 张鸿雁, 李 伟, 等. 基于能量比例系数的滚石冲击力计算方法研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(2): 317-326.
- [10] WANG Dong-po, ZHANG Hong-yan, LI Wei, et al. Study on calculation method of rockfall impact force based on proportional coefficient of energy[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(2): 317-326. (in Chinese)
- [11] 王 星, 周天跃, 师江涛, 等. 基于自由落体的落石冲击土层的理论及 LS-DYNA 模拟研究[J]. *北京交通大学学报*, 2019, 43(4): 9-17.
- [11] WANG Xing, ZHOU Tian-yue, SHI Jiang-tao, et al. Theoretical and LS-DYNA simulation study of based on the theory of free-fall rockfall's impact on soil layer[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2019, 43(4): 9-17. (in Chinese)
- [12] 刘成清, 陈玉满. 基于滚石运动参数的防护网数值模拟[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(18): 7422-7428.
- [12] LIU Cheng-qing, CHEN Yu-man. Numerical simulation of protective net based on rolling stone motion parameters[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(18): 7422-7428. (in Chinese)
- [13] 王东坡, 何启维, 刘彦辉, 等. 滚石冲击改进型开口帘式网耗能机制研究[J]. *岩土力学*, 2021, 42(12): 3356-3365, 3450.
- [13] WANG Dong-po, HE Qi-wei, LIU Yan-hui, et al. Research on the energy dissipation mechanism of rockfall impacts on the improved rockfall attenuator barrier[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(12): 3356-3365, 3450. (in Chinese)
- [14] 崔廉明, 石少卿, 汪 敏, 等. 落石冲击作用下环形网耗能性能数值分析[J]. *后勤工程学院学报*, 2014, 30(3): 13-17, 40.
- [14] CUI Lian-ming, SHI Shao-qing, WANG Min, et al. Numerical analysis of energy dissipation performance of ring net impacted by rockfall[J]. *Journal of Logistical Engineering University*, 2014, 30(3): 13-17, 40. (in Chinese)
- [15] 陈晶晶, 林万青, 刘 翼. 露天矿山高陡边坡安全爆破施工技术[J]. *爆破*, 2025, 42(2): 105-110.
- [15] CHEN Jing-jing, LIN Wan-qing, LIU Yi. Safety-controlled blasting technology for high-steep slopes in open-pit mines[J]. *Blasting*, 2025, 42(2): 105-110. (in Chinese)
- [16] WANG Xiao-yu. Research of rock breaking mechanism of hydraulic impact rotating jumbolter based on LS-DYNA[J]. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 2016, 13(12): 9529-9534.
- [17] LIU Si-yu, QU Zhi-peng, LV Ming-yun, et al. Damage and failure mechanism of bullets impact sapphire based on LS-DYNA[C]//*Proceedings of the 4th Annual International Conference on Material Engineering and Application (ICMEA 2017)*. Atlantis Press, 2018: 178-182.
- [18] 雷 凡, 彭 武, 胡 阳, 等. 考虑滚石转动效应的被动柔性防护系统设计方法[J]. *防灾减灾工程学报*, 2024, 44(5): 1030-1040.
- [18] LEI Fan, PENG Wu, HU Yang, et al. Design method of passive safety net system considering the angular velocity effect of rolling boulders[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2024, 44(5): 1030-1040. (in Chinese)
- [19] 左明宇. 考虑转动效应的抛体冲击环形被动柔性结构性能分析及优化设计[D]. 成都: 四川师范大学, 2021.
- [19] ZUO Ming-yu. Performance research and optization of passive flexible barrier with ring-net under projectile impact considering rotating effects[D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2021. (in Chinese)
- [20] 宋男男, 王林峰, 宋小波, 等. 落石冲击作用下柔性被动防护系统结构的动力响应分析[J]. *安阳工学院学报*

- 报,2017,16(6):92-95,102.
- [20] SONG Nan-nan, WANG Lin-feng, SONG Xiao-bo, et al. Dynamic response analysis of a flexible passive protection system structure under rockfall impact[J]. Journal of Anyang Institute of Technology, 2017, 16(6): 92-95, 102. (in Chinese)
- [21] 李华东,左明宇,李 浦,等. 多落石冲击被动柔性防护体系的动力响应分析[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(6): 1297-1305.
- [21] LI Hua-dong, ZUO Ming-yu, LI Pu, et al. Dynamic response analysis of passive flexible protection system under impact of rockfalls[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55(6): 1297-1305. (in Chinese)
-
- (上接第 202 页)
- [14] DEVI C, VIJAYAN D S, NAGALINGAM R, et al. A review of the implementations of glass fiber in concrete technology[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 62: 2010-2015.
- [15] 任延檬,洪亚强,李 浩,等. 耐碱玻璃纤维混凝土的高温劈裂抗拉性能[J]. 消防科学与技术, 2015, 34(9): 1138-1141.
- [15] REN Yan-meng, HONG Ya-qiang, LI Hao, et al. Splitting tensile properties of alkali resistant glass fiber reinforced concrete after high temperature[J]. Fire Science and Technology, 2015, 34(9): 1138-1141. (in Chinese)
- [16] ISLAM S U, WASEEM S A. Self-healing assessment and biresponse optimization of hybrid fiber-reinforced bioconcrete[J]. Journal of Structural Design and Construction Practice, 2025, 30(3): 1-20.
- [17] 沈 武,杨鼎宜,骆静静,等. 耐碱玻璃纤维混凝土的长期力学性能研究[J]. 混凝土, 2017(6): 102-106.
- [17] SHEN Wu, YANG Ding-yi, LUO Jing-jing, et al. Research of the long-term mechanical properties of alkali resistant glass fiber concrete[J]. Concrete, 2017(6): 102-106. (in Chinese)
- [18] TIBEBU A, MEKONNEN E, KUMAR L, et al. Compression and workability behavior of chopped glass fiber reinforced concrete[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 62: 5087-5094.
- [19] ULU A, TUTAR A I, KURKLU A, et al. Effect of excessive fiber reinforcement on mechanical properties of chopped glass fiber reinforced polymer concretes[J]. Construction and Building Materials, 2022, 359: 129486.
- [20] 张兰芳,尹玉龙,刘晶伟,等. 玄武岩纤维增强混凝土力学性能的研究[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(11): 2834-2837.
- [20] ZHANG Lan-fang, YIN Yu-long, LIU Jing-wei, et al. Mechanical properties study on basalt fiber reinforced concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014, 33(11): 2834-2837. (in Chinese)
- [21] 许 凯,黄 艳,鲁光涛,等. 爆炸荷载作用下 BFRC 梁的压电骨料损伤评估研究[J]. 爆破, 2022, 39(4): 17-24, 79.
- [21] XU Kai, HUANG Yan, LU Guang-tao, et al. Damage evaluation of BFRC beams under blast loadings using piezoelectric smart aggregates[J]. Blasting, 2022, 39(4): 17-24, 79. (in Chinese)
- [22] 胡玲玲,贾永胜,孙金山,等. 冲击荷载下高韧性水泥基复合材料动态力学特性与微结构演化研究[J]. 爆破, 2022, 39(1): 1-8.
- [22] HU Ling-ling, JIA Yong-sheng, SUN Jin-shan, et al. Study on dynamic mechanical properties and microstructure evolution of high-toughness cement-based composites under impact loading[J]. Blasting, 2022, 39(1): 1-8. (in Chinese)
- [23] AHMAD J, GONZ LEZ-L ZCANO R A, MAJDI A, et al. Glass fibers reinforced concrete: overview on mechanical, durability and microstructure analysis[J]. Materials, 2022, 15(15): 5111.
- [24] BRANSTON J, DAS S, KENNO S Y, et al. Mechanical behaviour of basalt fibre reinforced concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016, 124: 878-886.
- [25] 邓宗才,薛会青,张鹏飞,等. 耐碱玻璃纤维混凝土的抗弯冲击性能研究[J]. 公路, 2007(12): 184-187.
- [25] DENG Zong-cai, XUE Hui-qing, ZHANG Peng-fei, et al. Research on flexural impact behavior of alkali-resistance glass fibers reinforced concrete [J]. Highway, 2007(12): 184-187. (in Chinese)
- [26] XIE Lei, SUN Xiao-yan, YU Zhi-wu, et al. Experimental study and theoretical analysis on dynamic mechanical properties of basalt fiber reinforced concrete[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 62: 105334.
- [27] 马 钢,高松涛,王卓然,等. 低速冲击下纤维混凝土梁的动力学特征与断裂耗能研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(8): 208-216.
- [27] MA Gang, GAO Song-tao, WANG Zhuo-ran, et al. Dynamic characteristics and fracture energy dissipation of fiber reinforced concrete beams under low-velocity impact[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(8): 208-216. (in Chinese)