

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202104002

李娟, 何亮, 荀晓慧. 强震作用下崩塌滚石冲击耗能损伤演化分析 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(2): 157-163.

LI Juan, HE Liang, XUN Xiaohui. An evolution analysis of the impact energy damage of collapsed rolling stones under strong earthquakes[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(2): 157-163.

强震作用下崩塌滚石冲击耗能损伤演化分析

李娟¹, 何亮², 荀晓慧³

(1. 四川省煤田地质工程勘察设计院, 四川 成都 610072; 2. 华杰工程咨询有限公司, 北京 100029; 3. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059)

摘要: 强震触发崩塌滚石冲击耗能损伤是防护工程设计的重要指标。为探索冲击过程中滚石耗能损伤演化过程, 采用热力学定律分析了冲击过程中能量的传递与耗散, 通过定义冲击耗能损伤因子 D 、 $D_{\max}$, 建立了滚石冲击耗能损伤理论模型与适用模型。结合工程实例, 反算极限冲击力对模型进行论证与分析, 提出模型的推广应用。结果表明: 滚石冲击耗能损伤过程满足热力学第一定律, 能量主要贡献于防护工程弹塑性势能的积聚, $D_{\max}$ 受滚石质量、弹性模量、抛射初速度、最大冲击力、有效作用面积等的影响; 最大冲击力持续增加, 极限冲击耗能损伤因子增大, 达到线性函数与抛物线函数图像交点 $C(1\ 031\ \text{kN}, 0.996\ 5)$ 时曲线出现拐点。模型推广得到广义范围下的冲击耗能损伤演化函数曲线, 冲击耗能损伤全过程在损伤响应、损伤线性、损伤渐进三个阶段的临界位置出现 2 次损伤拐点; 随滚石质量增加, 最大冲击力增大, 极限冲击耗能损伤因子曲线先呈抛物线减小, 再呈线性增加, 最后呈抛物线逐渐增加直到无限趋近于 1。从能量角度定量分析其损伤本质, 对探究滚石运动过程能量耗散机制及防护工程的设计具有重要意义。

关键词: 崩塌; 滚石; 冲击耗能损伤; 损伤拐点; 弹塑性势能; 力学特性

中图分类号: U418.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)02-0157-07

An evolution analysis of the impact energy damage of collapsed rolling stones under strong earthquakes

LI Juan¹, HE Liang², XUN Xiaohui³

(1. Sichuan Institute of Coal Field Geological Engineering Exploration and Designing, Chengdu, Sichuan 610072, China; 2. Chelbi Engineering Consultants, Inc, Beijing 100029, China; 3. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: The impact energy dissipation damage of rockfall triggered by strong earthquake is an important indicator of protection engineering design. In order to explore the evolution process of the rolling stone energy consumption damage during the impact process, the law of thermodynamics was used to analyze the energy transfer and dissipation during the impact. By defining the impact energy dissipation damage factor D and $D_{\max}$, the theoretical model and applicable model of the rock impact energy dissipation damage are established. Combining engineering examples and back-calculating the ultimate impact force to demonstrate and analyze the

收稿日期: 2021-04-02; 修订日期: 2021-06-12

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1501000); 四川省教育厅科研计划重点项目(18ZA0045)

第一作者: 李娟(1983-), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事地质灾害勘查及设计。E-mail: 332535445@qq.com

通讯作者: 何亮(1994-), 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事工程项目管理及招标。E-mail: 787211279@qq.com

model, a generalization and application of the model is proposed. The damage process of the impact energy of the rolling stone satisfies the first law of thermodynamics. The energy mainly contributes to the accumulation of the elastoplastic potential energy of protective engineering. $D_{\max}$ is affected by the rolling stone mass, elastic modulus, initial velocity of ejection, maximum impact force, and effective area, etc. The maximum impact force continues to increase, and the limit impact energy dissipation damage factor increases. When the curve reaches the intersection point C (1 031 kN, 0.996 5) of the linear function and the parabolic function image, the curve has an inflection point. The model is extended to obtain the evolution function curve of the impact energy dissipation damage in a generalized range. In the whole process of the impact energy dissipation damage, there are two damage inflection points at the critical position of the three stages of damage response, damage linearity, and damage progression. As the mass of the rolling stone increases, the maximum impact force increases, and the limit impact energy dissipation damage factor curve first decreases parabolically, then increases linearly, and finally increases parabolically until it reaches infinitely close to 1. A quantitative analysis of the damage nature from the view of energy point is of great significance in the exploration of energy dissipation mechanism of the rolling rock movement process and the design of protection engineering.

Keywords: collapse; rolling rock; impact energy damage; damage inflection point; elastoplastic potential energy; mechanical properties

强震触发崩塌滚石产生的冲击能是防护工程设计的核心依据,对探究滚石运动过程能量耗散机制及防护工程的设计具有重要意义。Wang 等^[1]结合 LS-DYNA 数值模拟,归纳总结了国内外落石冲击力计算方法,证明了落石冲击过程伴随着能量耗散。落石重量、高度、冲击角度是决定其冲击力的重要影响因素^[2-3]。Caviezel 等^[4]采用“Chant Sura”试验重建了落石轨迹,对其冲击持续时间和力进行了深入分析。Dorren 等^[5]分析了单棵树消散落石冲击释放的能量,多元线性回归表明,撞击高度将影响树木消散的落石能量。Zhang 等^[6]利用粒子流方法对碰撞中的落石进行三维建模,引入落石碰撞的恢复系数来描述其冲击特性。Zhu 等^[7]认为砾石垫被广泛用于吸收落石冲击能量,研究了其能量消耗和缓冲效果受砾石垫厚度等的影响原理。杨璐等^[8]将滚石视为刚性球体研究其对棚洞的冲击力,结果表明棚洞为弹塑性材料,滚石冲击过程中混凝土棚洞能吸收及消耗其冲击能。王星等^[9]对比分析国内外已有滚石冲击力算法,提出了最大脉冲算法、弹塑性算法、LS-DYNA 算法,并验证了其适用性。强震触发的崩塌滚石的运动特征、消能方式等较复杂,与地震烈度、滚石规模、坡面形态等均相关^[10-15]。

传统的崩塌滚石冲击过程研究多集中于滚石运动过程中冲击力的计算等方面,未定量从能量角度对其耗能损伤本质进行分析。文章根据岩体能量耗散

下的损伤强度准则^[16],并结合热力学第一定律^[17],综合定义了冲击耗能损伤因子,建立了基于强震作用下崩塌滚石冲击耗能损伤演化模型,并结合工程实例提出了模型的推广应用。

1 崩塌滚石冲击耗能演化分析

强震为崩塌滚石运动提供源动力,滚石以跳跃、滚动、滑动等形式运动,通过弹跳、撞击等方式逐渐消能^[10-11]。基于热力学第一定律^[17],滚石运动过程中重力势能减小,动能增加,摩擦力等阻碍滚石运动的外力做负功,其能量增大。根据热力学第二定律^[17],在开放系统的消能过程中,一部分能量以摩擦生热等散失,转换成弹性势能与塑性势能,塑性势能在滚石内部不断积聚产生塑性区,滚石发生破碎。当滚石冲击防护工程,速度减至 0 时,初始阶段具有的重力势能和动能全部转化为耗散的热能、滚石的弹塑性势能、防护工程的弹性势能或塑性势能(当防护工程为柔性被动防护网等,其塑性势能可忽略不计),如图 1 所示。

基于三维空间下的滚石运动过程,定义以达到防护工程水平面为参考面,各部分能量计算如下所示:

初始动能:

$$E_{k0} = \frac{1}{2}mv_0^2 \quad (1)$$

式中: E_{k0} ——初始动能/J;

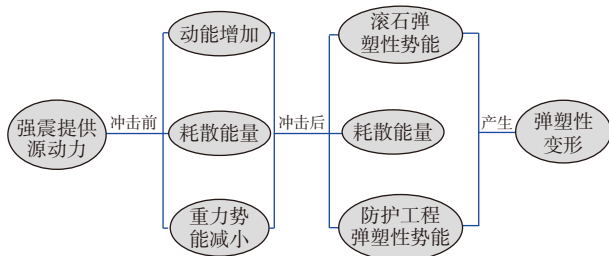


图1 崩塌滚石冲击耗能演化过程

Fig. 1 Evolution process of the impact energy consumption of collapsed rocks

m ——滚石质量/kg;

v_0 ——滚石初始速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)。

重力势能:

$$E_p = \int_0^h mgdh \quad (2)$$

式中: E_p ——重力势能/J;

g ——重力加速度, 取 9.8 m/s^2 ;

h ——高度/m。

耗散能量: 主要为滚石运动过程中, 受到摩擦阻力、空气阻力、树木等阻碍产生的能量, 用 Q 表示。

滚石弹塑性势能: 在应力空间下计算弹塑性势能^[18], 分别用 U^e 、 U^m 表示。

$$U^e = \frac{1}{2}\sigma_1\varepsilon_1^e + \frac{1}{2}\sigma_2\varepsilon_2^e + \frac{1}{2}\sigma_3\varepsilon_3^e \quad (3)$$

式中: U^e ——滚石弹性势能/J;

σ_i ——应力($i=1, 2, 3$)/MPa;

ε_i^e ——弹性应变($i=1, 2, 3$)。

引入广义胡克定律^[18]:

$$\varepsilon_i^e = \frac{1}{E}[\sigma_i - \mu(\sigma_j + \sigma_k)] \quad (4)$$

式中: E ——弹性模量/GPa;

μ ——泊松比。

由式(3)(4)可得:

$$U^e = \frac{1}{2E}[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)] \quad (5)$$

$$U^m = \int_v \sigma_j \varepsilon_j dv \quad (6)$$

式中: U^m ——滚石塑性势能/J;

σ_j ——塑性应力/MPa;

ε_j ——塑性应变。

防护工程弹塑性势能: 分别用 $\overline{U^e}$ 、 $\overline{U^m}$ 表示。

强震作用下崩塌滚石从启动-冲击防护工程整个过程, 满足热力学第一定律^[17], 结合式(1)~(6)可得崩塌滚石冲击能量演化方程:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}mv_0^2 + \int_0^h mgdh = & Q + \frac{1}{2E}[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \\ & 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)] + \\ & \int_v \sigma_j \varepsilon_j dv + \overline{U^e} + \overline{U^m} \end{aligned} \quad (7)$$

由式(7)可知, 整个过程中满足能量耗散与能量守恒^[19]理论。通过分析能量演化过程可知: 当滚石冲击防护工程, 部分能量转换成防护工程的弹塑性势能, 防护工程对其进行拦挡、消能。通过弹塑性力学单独研究防护工程耗能演化, 因作为开放系统, 能量耗散为不可逆过程^[20], 其次防护工程为棚洞、装板拦石墙、柔性被动防护网等, 因拦挡方式、材料本身的差异性等因素, 不易建立广泛适用的冲击耗能损伤模型。结合热力学第一定律研究滚石冲击防护工程过程, 可建立防护工程冲击耗能损伤模型。

2 冲击耗能损伤模型的建立

防护工程通过拦挡滚石, 对滚石冲击作用消能。消耗的这部分能量主要贡献于防护工程弹塑性势能的积聚, 是防护工程设计的重要指标之一。根据岩体能量耗散下的损伤强度准则^[16], 结合能量守恒定律, 综合定义防护工程产生的弹塑性势能占初始总能量的百分比, 为冲击耗能损伤因子 D 。

$$D = \frac{\overline{U^e} + \overline{U^m}}{\frac{1}{2}mv_0^2 + \int_0^h mgdh} \quad (8)$$

将式(7)代入式(8)可得:

$$D = 1 - \frac{1}{\frac{1}{2}mv_0^2 + \int_0^h mgdh} \left\{ Q + \frac{1}{2E}[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)] + \int_v \sigma_j \varepsilon_j dv \right\} \quad (9)$$

式(9)为崩塌滚石冲击耗能损伤理论模型。由模型可知, 当强震作用下提供的初始速度与高度一定, 运动过程中是否具有能量耗散, 对冲击耗能损伤因子具有较大影响。当 $Q \rightarrow 0$, 此时滚石腾空越过树木与斜坡, 因重力 G 远大于 $f_{\text{空气阻力}}$, 可视为仅受重力作用下的平抛运动或自由落体运动, 为理想状态下的运动, 滚石冲击防护工程前动能达到最大值, 冲击耗能损伤因子增大, $\lim_{Q \rightarrow 0} D = D_{\text{max}}$ 。当 $Q \rightarrow Q_{\text{max}}$, 滚石在阻力作用下, 恰好冲击防护工程时停止运动, 为冲击临界状态, $\lim_{Q \rightarrow Q_{\text{max}}} D = 0$ 。实际过程中对崩塌滚石灾害防护工程设计, 只需要考虑满足其最大冲击情况, 即: $\lim_{Q \rightarrow 0} D = D_{\text{max}}$, 便可满足结构安全性。

$$D_{\max} = 1 - \frac{1}{\frac{1}{2}mv_0^2 + \int_0^h mg dh} \left\{ \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)] + \int_v \sigma_j \varepsilon_j dv \right\} \quad (10)$$

由式(10)可知,当滚石做平抛或自由落体运动冲击防护工程(棚洞或装板拦石墙)时,棚洞比装板拦石墙的受力面积大,其冲击耗能损伤大,因此以棚洞为防护工程研究其滚石冲击耗能损伤具有一定的代表性。假设滚石的几何形态可简化为标准的立方体,当滚石与防护工程(棚洞)碰撞时,可视为立方体正面与其接触,应力状态为 $\sigma_1=\sigma_2=0$, $\sigma_3=\sigma_z$ 。大部分能量以弹性势能存储至材料本身,是后期滚石发生突变破坏的源动力。小部分以塑性势能形式存在,形成耗散能。根据文献[21]对大理岩(硬岩)及砂岩(软岩)变形破坏弹性势能与耗散能量(主要为塑性势能)的统计,可近似得到塑性势能与弹性势能比值(表1)。

表 1 岩石变形破坏各部分能量平均比值

Table 1 The average energy ratio of each part of rock deformation and failure

岩性	弹性势能/J	塑性势能/J	比值
大理岩(硬岩)	0.084 2	0.041 0	0.487
砂岩(软岩)	0.041 0	0.039 5	0.963

滚石岩性分别为硬岩和软岩情况下,可得到 2 个 $D_{\max}$ 计算公式:

$$D_{\max} = \begin{cases} 1 - \frac{1.487\sigma_3^2}{E(mv_0^2 + 2\int_0^h mg dh)} \\ 1 - \frac{1.963\sigma_3^2}{E(mv_0^2 + 2\int_0^h mg dh)} \end{cases} \quad (11)$$

式(11)为滚石冲击耗能损伤适用模型,在强震或非强震作用下,滚石仅初始速度、动能等存在差异。因此,在一定程度上,该模型可广泛适用于工程中崩塌滚石冲击耗能损伤的研究,从能量耗散演化本质揭示冲击耗能损伤机理。

3 模型的论证与分析

运用反算法反算极限冲击力,假设冲击耗能损伤适用模型成立,式(11)中其它参数均为已知量,以 σ_3 为未知变量 x ,可得到以 x 为自变量的函数方程组:

$$f(x) = \begin{cases} 1 - \frac{1.487x^2}{E(mv_0^2 + 2\int_0^h mg dh)} \\ 1 - \frac{1.963x^2}{E(mv_0^2 + 2\int_0^h mg dh)} \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中 x^2 为二次抛物线函数,以国际单位制取值, $x = \frac{F}{A_0}$, F 为冲击力, A_0 为冲击力的有效作用面积, $x \in \left(\frac{mg}{A_0}, \frac{F_{\max}}{A_0}\right)$ 。函数 $f(x)$ 一阶微分方程 $\frac{df(x)}{dx} < 0$ 为凸函数,截距为 1。函数图像如图 2 所示。

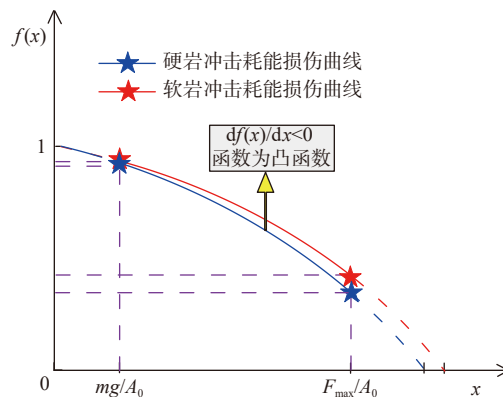


图 2 $f(x)$ 函数图像

Fig. 2 $f(x)$ function image

2017 年四川九寨沟发生 M_s 7.0 级地震,触发了较多崩塌滚石灾害^[22-23]。九寨沟某处崩塌滚石灾害点,岩性为石炭系下统益哇组(C_{1v})深灰色中厚层-块状致密灰岩(硬岩),发育 30 余处滚石灾害,滚石体积大小不均。为简化计算过程,选择 5 处发育自同一处危岩体且运动特征明显的滚石,距拟设棚洞顶部高度 10 m,滚石岩土力学参数为: $E=30$ GPa, $\rho=2.33$ g/cm³。统计滚石质量并按大小进行编号,运用 image-pro 对有效作用面积进行统计,结果见表 2。

表 2 崩塌滚石参数统计表

Table 2 Statistics of parameters of collapsed rocks

编号	质量/kg	初始高度/m	有效作用面积/m ²
G01	0.206×10^3	10	0.162
G02	0.418×10^3	10	0.206
G03	0.603×10^3	10	0.312
G04	0.820×10^3	10	0.396
G05	1.018×10^3	10	0.468

根据文献[24]中通过 DDA 监测得到的地震作用下崩塌滚石抛射初始速度随时间变化的数据,引入 $T=23$ s 监测块 3 的抛射初始速度 $v_0=1$ m/s,并将表 2 中滚石 G01—G05 对应参数代入式(12),解得 5 个方程:

$$\begin{cases} f(F_1) = 1 - 4.957 \times 10^{-14} F_1^2 \\ f(F_2) = 1 - 1.430 \times 10^{-14} F_2^2 \\ f(F_3) = 1 - 4.285 \times 10^{-15} F_3^2 \\ f(F_4) = 1 - 2.009 \times 10^{-15} F_4^2 \\ f(F_5) = 1 - 1.132 \times 10^{-15} F_5^2 \end{cases} \quad (13)$$

运用假设法进行模型论证。假设本文所建立的滚石冲击耗能损伤适用模型成立, 即必有通过文献 [24] 计算结果在反算的极限冲击力范围内, 在如图 2 所示且基于式 (13) 计算出的最大冲击力变化范围内。通过式 (12) 中 x 取值范围, 计算出不同质量下的极限冲击力, 与文献 [24] 计算的冲击力进行对比, 如图 3 所示。

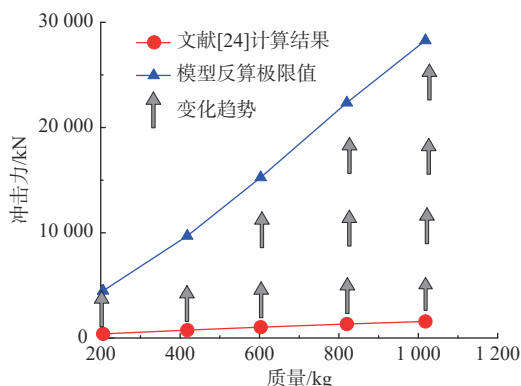


图 3 滚石质量与冲击力关系图

Fig. 3 Relationship between the quality of the rolling stone and the impact force

由图 3 可知, 文献 [24] 计算的最大冲击力, 在模型式 (12) 由冲击耗能损伤反算的冲击力范围内, 且模型反算的极限冲击力远大于文献 [24] 的计算结果, 因此假设成立。当滚石发育自同一危岩体, 即初始高度一定时模型成立, 此适用模型能充分考虑滚石冲击耗散能量损伤, 可用于计算冲击耗能损伤因子 $D_{\max}$ 。根据图 3 计算结果, 计算 G01—G05 冲击耗能损伤因子 $D_{\max}$, 结果依次对应图中 A—E 点, 如图 4 所示。

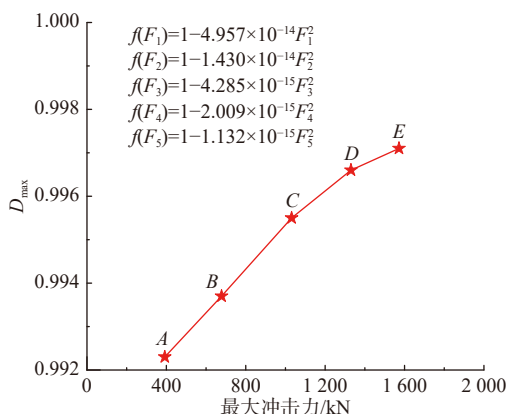


图 4 最大冲击力与 $D_{\max}$ 关系图

Fig. 4 Relationship between the maximum impact force and $D_{\max}$

通过最大冲击力与最大冲击耗能损伤因子函数曲线可知, 滚石冲击耗能损伤过程中, 大部分能量将

主要贡献于防护工程积聚弹塑性势能, 剩余部分能量用于滚石磨损、破碎等。由图 4 可知, 曲线 A—E 随最大冲击力增大, 最大冲击耗能损伤因子增大。A—C 段曲线呈线性递增, 最大冲击力与 $D_{\max}$ 为一次单调递增函数, 当最大冲击力持续增加, 达到 C 点 (最大冲击力为 1 031 kN、 $D_{\max}=0.9965$) 时一次函数出现拐点, C—E 段呈一阶偏导数持续减小的二次抛物线函数, 且随冲击力逐渐增大, 有持续减小趋势。

4 模型的推广应用

崩塌滚石冲击耗能损伤适用模型中的最大损伤因子 $D_{\max}$, 主要受滚石质量、高度、弹性模量、抛射初速度、最大冲击力、有效作用面积等的影响。根据文中对模型的论证与分析可知, 当最大冲击力为 0 时, $D_{\max}=1$, 因文献 [24] 中提出的最大冲击力与重力呈线性关系, 重力为 0, 式 (12) 便无意义。同时由图 4 中最大冲击力与 $D_{\max}$ 关系可知, 当冲击力增大, $D_{\max}$ 增大, 因此在最大冲击力趋于 0 时, $D_{\max}$ 无限趋近于 1, 曲线在到达 A 点前必有一段呈抛物线变化趋势。当在 C 点时出现拐点, 由一次线性函数向二次抛物线函数转变, $D_{\max}$ 持续增大。根据式 (13) 可知, 因一阶偏微分方程值为负, 其曲线斜率逐渐减小, 系数幂绝对值增大, 因此在 E 点后 $D_{\max}$ 呈抛物线无限趋于 1。根据上述分析, 可建立推广应用下的滚石冲击耗能损伤演化曲线, 如图 5 所示。

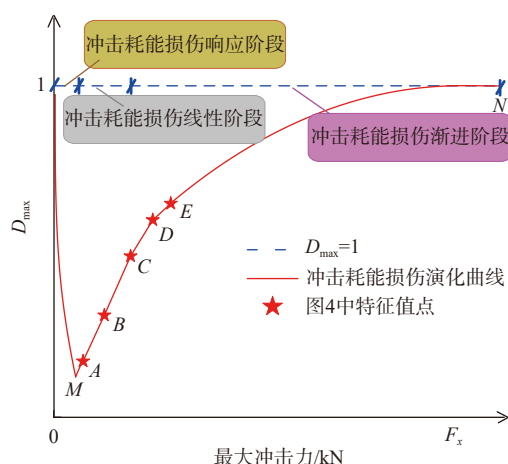


图 5 滚石冲击耗能损伤演化曲线

Fig. 5 Damage evolution curve of the rock impact energy consumption

根据图 5 可知, 最大冲击耗能损伤因子 $D_{\max}$ 随最大冲击力变化呈先减小后增大的趋势。因此其冲击耗能损伤过程可分为冲击耗能损伤响应阶段 (O—

M 阶段)、冲击耗能损伤线性阶段($M-C$ 阶段)、冲击耗能损伤渐进阶段($C-N$ 阶段)。因受滚石质量、冲击力等影响,在最大冲击力持续增大过程中,曲线先呈二次抛物线减小,此时防护工程所积聚的能量相应减小。其滚石弹塑性势能等逐渐汇聚,且主要用于其弹性势能增加,此阶段滚石主要以弹跳的方式逐渐耗能,直到静止^[10-11];当最大冲击力增大至 M 点时,曲线第一次出现损伤拐点, $D_{\max}$ 达到最小值,曲线开始呈线性递增趋势,此时防护工程损伤所需耗能增加,滚石弹跳高度相应逐渐减小;到达 C 点时,曲线第二次出现损伤拐点,呈抛物线增大且曲线斜率减小, $D_{\max}$ 变化趋势逐渐减缓,直到无限趋近于 1。

5 结论

(1) 滚石冲击耗能损伤过程中,能量主要贡献于防护工程弹塑性势能的积聚,少部分能量用于滚石磨损、破碎等。最大损伤因子 $D_{\max}$ 受滚石质量、高度、弹性模量、抛射初速度、最大冲击力、有效作用面积等的影响。

(2) 模型的论证与分析表明最大冲击力与 $D_{\max}$ 为增函数,当最大冲击力持续增加,达到 C 点(最大冲击力为 1 031 kN、 $D_{\max}=0.996\ 5$)时曲线出现拐点, $C-E$ 段呈一阶偏导数持续减小的二次抛物线函数。

(3) 随滚石质量增加,最大冲击力增大,冲击耗能损伤因子曲线先呈抛物线减小,再呈线性增加,最后呈抛物线增加逐渐无限趋于 1。冲击耗能损伤过程在 M 、 C 点出现 2 次冲击耗能损伤拐点,可分为冲击耗能损伤响应阶段($O-M$ 阶段)、损伤线性阶段($M-C$ 阶段)、损伤渐进阶段($C-N$ 阶段)。

参考文献 (References):

- [1] WANG X, XIA Y X, ZHOU T Y. Theoretical analysis of rockfall impacts on the soil cushion layer of protective structures[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2018, 2018: 1-18.
- [2] 王林峰, 刘丽, 唐芬, 等. 基于落石棚洞冲击试验的落石冲击力研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2018, 38(6): 973-979. [WANG Linfeng, LIU Li, TANG Fen, et al. Research on impact force of falling rocks based on impact test of rock shed cave[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2018, 38(6): 973-979. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 吴建利, 胡卸文, 梅雪峰, 等. 落石冲击混凝土板与缓冲层组合结构的动力响应[J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(1): 78-87. [WU Jianli, HU Xiewen, MEI Xuefeng, et al. Dynamic response of RC slab with cushion layer composed of sandy soil to rockfall impact[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(1): 78-87. (in Chinese with English abstract)]
- [4] CAVIEZEL A, DEMMEL S E, RINGENBACH A, et al. Reconstruction of four-dimensional rockfall trajectories using remote sensing and rock-based accelerometers and gyroscopes[J]. *Earth Surface Dynamics*, 2019, 7(1): 199-210.
- [5] DORREN L K A, BERGER F. Stem breakage of trees and energy dissipation during rockfall impacts[J]. *Tree Physiology*, 2006, 26(1): 63-71.
- [6] ZHANG Y L, LIU Z B, SHI C, et al. Three-dimensional reconstruction of block shape irregularity and its effects on block impacts using an energy-based approach[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51(4): 1173-1191.
- [7] ZHU C, WANG D S, XIA X, et al. The effects of gravel cushion particle size and thickness on the coefficient of restitution in rockfall impacts[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2018, 18(6): 1811-1823.
- [8] 杨璐, 李士民, 吴智敏, 等. 滚石对棚洞结构的冲击动力分析[J]. *交通运输工程学报*, 2012, 12(1): 25-30. [YANG Lu, LI Shimin, WU Zhimin, et al. Dynamic analysis of rock-fall impact on shed tunnel structure[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2012, 12(1): 25-30. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 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. [WANG Xing, ZHOU Tianyue, SHI Jiangtao, 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 with English abstract)]
- [10] 裴向军, 黄润秋, 裴钻, 等. 强震触发崩塌滚石运动特征研究[J]. *工程地质学报*, 2011, 19(4): 498-504. [PEI Xiangjun, HUANG Runqiu, PEI Zuan, et al. Analysis on the movement characteristics of rolling rock on slope caused by intensive earthquake[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2011, 19(4): 498-504. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 袁博, 祝介旺. 滚石冲击下棚洞破坏动力响应分析及改进对策——以川藏公路(安久拉山南麓)门式棚洞为例[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(6): 57-66. [YUAN Bo, ZHU Jiewang. Dynamic response analyses

- and improvement countermeasures of shed-tunnel destruction under rolling stone impact: A case study of the shed-tunnel in the southern foot of the Anjiula Mountain on the Sichuan-Tibet Highway[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(6): 57 – 66. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 崔圣华, 裴向军, 黄润秋. 直线型斜坡滚石运动速度特征研究[J]. *工程地质学报*, 2013, 21(6): 912 – 919. [CUI Shenghua, PEI Xiangjun, HUANG Runqiu. Analysis on velocity characteristics of rock-fall on slope[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2013, 21(6): 912 – 919. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 程强, 苏生瑞. 汶川地震崩塌滚石坡面运动特征[J]. *岩土力学*, 2014, 35(3): 772 – 776. [CHENG Qiang, SU Shengrui. Movement characteristics of collapsed stones on slopes induced by Wenchuan earthquake[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(3): 772 – 776. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 吴建利, 胡卸文, 梅雪峰, 等. 高位落石作用下不同缓冲层与钢筋混凝土板组合结构动力响应[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(4): 114 – 122. [WU Jianli, HU Xiewen, MEI Xuefeng, et al. Dynamic response of RC plate with different cushion layers under the high-level rockfall impact[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(4): 114 – 122. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(17): 3003 – 3010. [XIE Heping, JU Yang, LI Liyun. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(17): 3003 – 3010. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 秦允豪. 热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011: 189–304. [QIN Yunhao. Hot learning[M]. Beijing: Higher Education Press, 2011: 189 – 304. (in Chinese)]
- [17] 杨桂通. 弹塑性力学引论[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2013: 40 – 94. [YANG Guitong. Introduction to elasticity and plasticity[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 40 – 94. (in Chinese)]
- [18] 腾保华, 吴明和. 大学物理学(上册)[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2017: 3 – 125. [TENG Baohua, WU Minghe. University physics (Volume up)[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2017: 3 – 125. (in Chinese)]
- [19] 何亮, 魏玉峰, 潘远阳, 等. 基于能量耗散机制的粗粒土圆度损伤特性分析[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(5): 120 – 126. [HE Liang, WEI Yufeng, PAN Yuanyang, et al. Analyses of roundness damage characteristics of coarse-grained soil based on energy dissipation mechanism[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(5): 120 – 126. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 赵忠虎, 谢和平. 岩石变形破坏过程中的能量传递和耗散研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2008, 40(2): 26 – 31. [ZHAO Zhonghu, XIE Heping. Energy transfer and energy dissipation in rock deformation and fracture[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2008, 40(2): 26 – 31. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 程强, 胡朝旭, 杨绪波. 九寨沟地震区公路沿线地质灾害发育规律及防治对策[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2018, 29(4): 114 – 120. [CHENG Qiang, HU Chaoxu, YANG Xubo. Development law and prevention countermeasures of geological hazards along the highway in Jiuzhaigou earthquake area[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2018, 29(4): 114 – 120. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 何宇航, 裴向军, 梁靖, 等. 基于Rockfall的危岩体危险范围预测及风险评价——以九寨沟景区悬沟危岩体为例[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(4): 24 – 33. [HE Yuhang, PEI Xiangjun, LIANG Jing, et al. Risk assessment and range prediction of dangerous rock massbased on rockfall: A case study of the Xuangou collapse[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(4): 24 – 33. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 黄小福, 张迎宾, 赵兴权, 等. 地震条件下危岩崩塌运动特性的初步探讨[J]. *岩土力学*, 2017, 38(2): 583 – 592. [HUANG Xiaofu, ZHANG Yingbin, ZHAO Xingquan, et al. A preliminary study of kinetic characteristic of rock-fall under seismic loading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(2): 583 – 592. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 陈驰, 刘成清, 陈林雅, 等. 落石作用于钢筋混凝土棚洞的冲击力研究[J]. *公路交通科技*, 2015, 32(1): 102 – 109. [CHEN Chi, LIU Chengqing, CHEN Linya, et al. Study on impact force of rock-fall onto rock shed tunnel[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2015, 32(1): 102 – 109. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 汪美华