

弱化矿岩破碎动力系统的能量转化和时效特性^①

汪学清^{1,2}, 唐红平², 王建华², 邹煜¹

(1.中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院,北京 100083; 2.深海矿产资源开发利用技术国家重点实验室,湖南长沙 410012)

摘要: 基于弱化性质矿岩典型的非线性负指数本构关系和灾变特性,分析了灾变和非灾变两种破碎动力学模式下能量转化和时效特性随机构刚度的变化情况。结果表明,低机构刚度诱发的灾变破碎模式会急剧降低破碎动力系统的能量传递效率和破岩时效。从能量利用和破岩功效角度考虑,破碎动力系统不宜采用低机构刚度;给出了机构刚度设计适宜的选用范围。

关键词: 矿岩; 弱化特性; 破碎动力系统; 能量传递; 破岩时效

中图分类号: TD422

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2024.01.006

文章编号: 0253-6099(2024)01-0025-06

Energy Transformation and Time Effectiveness of Dynamical System for Breaking Weakened Mineral Rock

WANG Xueqing^{1,2}, TANG Hongping², WANG Jianhua², ZOU Yu¹

(1.School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2.State Key Laboratory of Exploitation and Utilization of Deep Sea Mineral Resources, Changsha 410012, Hunan, China)

Abstract: Based on typical nonlinear negative exponent constitutive relations and catastrophe characteristic of weakened mineral rock, the variation of energy transformation and time effectiveness with mechanism stiffness in catastrophic and non-catastrophic breakup were analyzed. The results show that the catastrophic breakup induced by low mechanism stiffness will dramatically reduce the energy transformation efficiency of dynamical system and time effectiveness of rock breakage. From the perspective of energy utilization and rock-breaking efficiency, it is not appropriate to equip a dynamical system for rock breakage with low mechanism stiffness. Finally, an appropriate range of mechanism stiffness is provided for reference in design.

Key words: mineral rock; weakened property; dynamical system for rock breakage; energy transformation; time effectiveness of rock breakage

矿岩的弱化特性表现在矿岩达到极限荷载后并不完全破坏,仍具有一定的承载能力,要损伤到一定程度后才整体破坏。具有弱化性质的矿岩在加载过程中经常会出现失稳(灾变)现象,动力系统的失稳灾变不仅取决于矿岩特性,也与加载系统特性(刚度)相关^[1-3]。在测试试样全应力-应变曲线试验过程中,为避免失稳灾害的发生,常采用提高试验机刚度的方法。破碎动力系统的能量传递和破碎时效是其关键指标,即尽量减少能量损失和缩短破岩时间,以最少的输入能量,实现更多、更快的矿岩破碎。破碎动力系统能量转化的前期研究工作大多简化为研究载荷-变形的线性关

系^[4-10],这些研究不能真实地描述能量转换状况。本文基于弱化矿岩典型的本构关系和灾变特性,分析了灾变和非灾变两种破碎模式的能量转化和时效特性,给出了加载系统机构刚性对系统能量传递效率和破岩时效的影响。

1 弱化特性矿岩破碎系统的灾变和破碎模式

1.1 矿岩的弱化特性和本构关系

矿岩的弱化特性可以用其本构关系来描述。

根据损伤力学^[11],破碎过程中弱化特性矿岩的非

① 收稿日期: 2023-08-29

基金项目: 国家重点实验室开放课题(2021-HYSDDYB-001); 湖南省创新专项(2019SK2271)

作者简介: 汪学清(1971—),男,山东成武人,博士(后),副教授,主要研究方向为岩石力学、矿山建设。E-mail: wxqcase@163.com

线性应力-应变关系一般可表达为:

$$\sigma = (1 - D)E\varepsilon \quad (1)$$

式中 σ 为应力; ε 为应变; D 为损伤参量; E 为弹性模量。由统计强度理论, 视其损伤 D (各微元强度) 服从 Weibull 分布^[12], 其本构特性可表达为载荷和变形的关系^[13]:

$$P = \lambda u_r e^{-u_r/u_0} \quad (2)$$

可得其刚度为:

$$K_r = \frac{dP}{du_r} = \lambda e^{-u_r/u_0} (1 - u_r/u_0) \quad (3)$$

式中 P 为载荷; u_r 为变形值; u_0 为对应于最大载荷的变形值。当 $u_r = 0$ 时, $K_r = \lambda$, 即 λ 为矿岩的初始刚度; 在 $u_r = u_0$ 处, $K_r = 0$; 在卸载区间 ($K_r < 0$), $u_r = 2u_0$ 处, 矿岩有最大的负刚度, $K_r = -0.135\lambda$ 。

最大载荷 $P_m = e^{-1}\lambda u_0 = 0.368\lambda u_0$, 对应矿岩变形的损伤能量为:

$$E_d = \int_0^{u_r} P du_r = \lambda u_0^2 \left(1 - \frac{1 + u_r/u_0}{e^{u_r/u_0}} \right) \quad (4)$$

全损伤能量为:

$$E_{id} = \int_0^{\infty} P du_r = \lambda u_0^2 \quad (5)$$

采用无量纲表达:

$$\begin{cases} \hat{u}_r = u_r/u_0 \\ \hat{P} = P/(\lambda u_0) = \hat{u}_r e^{-\hat{u}_r} \\ \hat{K}_r = K_r/\lambda = e^{-\hat{u}_r} (1 - \hat{u}_r) \\ \hat{E}_d = E_d/(\lambda u_0^2) = 1 - (1 + \hat{u}_r)/e^{\hat{u}_r} \end{cases} \quad (6)$$

实际中弱化特性矿岩变形到一定程度, 其损伤参量 D 尚小于 1 时, 已不能维持结构的平衡, 即出现整体破裂。一般可取变形达峰值载荷变形的 3 倍、损伤能达全损伤能量的 80% 时构成损伤失效。在本构曲线上, 构成整体破裂处称为破裂点, 相应的载荷、变形称为破裂点载荷 \hat{P}_b 、破裂点变形 \hat{u}_b 。

1.2 矿岩破碎动力系统及失稳灾变

矿岩破碎动力系统简化力学模型如图 1 所示。其中 u_t 为破碎动力系统的总变形; u_m 、 M_m 和 K_m 分别为破碎动力机构的变形、质量和刚度; u_r 、 M_r 和 K_r 分别为破碎矿岩的变形、质量和刚度; P 为外加载荷。

破碎动力机构具有线性特性, 其刚度 K_m 为常数; 矿岩具有非线性特性, 其刚度 $K_r = f'(u_r)$; 总变形为:

$$u_t = u_m + u_r \quad (7)$$

将系统视为一个二自由度振动系统 (图 1(a)), 根据振动理论^[14] 作准稳态处理, 在单位微元中有:

$$\frac{\delta_t u_r}{\delta_t u_t} = \frac{K_m}{K_r + K_m - M_r \omega^2} \quad (8)$$

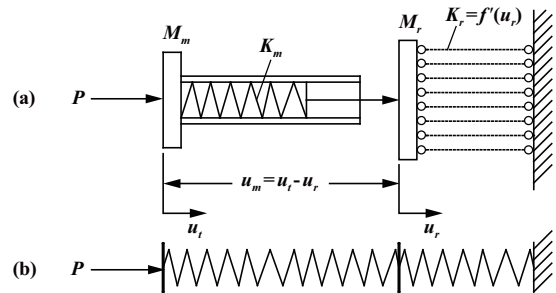
式中 ω 为加载频率, 当外加载荷趋于静载 ($\omega \rightarrow 0$) 时, 分母末项 $M_r \omega^2 \rightarrow 0$, 即可忽略质量 M_r , 视其为准静态模型 (图 1(b)); 左边的分子、分母同除以 δ_t , 给出通常灾变分析^[15] 中的变形速率关系为:

$$\frac{\dot{u}_r}{\dot{u}_t} = \frac{K_m}{K_r + K_m}, \dot{u}_r = \frac{K_m}{K_r + K_m} \dot{u}_t \quad (9)$$

由于破碎机构刚度 K_m 不为 0, 加载速率 \dot{u}_t 为常数, 当破碎机构刚度 K_m 与矿岩刚度 K_r 之和为 0 时, $\dot{u}_r \rightarrow \infty$, 即矿岩变形速率突然增大, 矿岩将产生瞬间爆裂破碎; 同时, 由于机构反应速率跟不上, 此时将伴随着机构能量的大量释放 (转化为矿岩爆裂的动能和机构的冲击振动), 此即构成了动力系统的失稳灾变现象, 其失稳判据为:

$$K_m + K_r = 0 \quad (10)$$

应当注意的是: 矿岩的灾变只是变形速率的突变, 其本构关系并未改变。由于 $K_m > 0$, 故 $K_m + K_r = 0$ 只在 $K_r < 0$ (卸载) 情况下发生。采用无量纲表达, 即发生在矿岩刚度 \hat{K}_r 由 0 到达其最大负刚度 (-0.135) 的存在域 $\hat{u}_r [1, 2]$ 区间, 对应于矿岩的本构曲线, 此区间为矿岩失稳灾变破碎的对应区间。



(a) 动力学模型; (b) 准静态模型

图 1 矿岩破碎系统动力学模型

1.3 弱化矿岩破碎的力学模式

矿岩破碎系统由外载施加能量, 通过破碎机构传递给矿岩, 转化为矿岩破碎能量, 进行矿岩破碎。弱化矿岩破碎有灾变和非灾变两种破碎力学模式。

灾变破碎是指破碎动力系统在矿岩灾变失稳区间满足灾变条件时, 矿岩自灾变点处变形速率突然增大, 急速变形至破裂点形成的矿岩瞬间破碎, 所对应的机构刚度 $0 < \hat{K}_m \leq 0.135$, 期间施载速率跟不上, 可以认为系统在灾变点失载 (外加载荷 $\hat{P} \rightarrow 0$), 其机构变形能量除部分转化为矿岩灾变点后的变形能量外, 构成能量的大量释放。

矿岩非灾变破碎是指矿岩在灾变失稳区间未构成灾变, 迨后变形至破裂点形成矿岩破碎, 其破碎产生的条件仅与矿岩变形是否达到破裂点变形相关; 对应的机构刚度 $\hat{K}_m > 0.135$, 处于大刚度区间, 机构能量不会大量释放。

灾变破碎和非灾变破碎两种破碎模式均至破裂点完成破碎, 其主要区别在于卸载点能量转化方式和最终的机构释放能量不同。两种破碎模式特性的比较如图 2 所示。

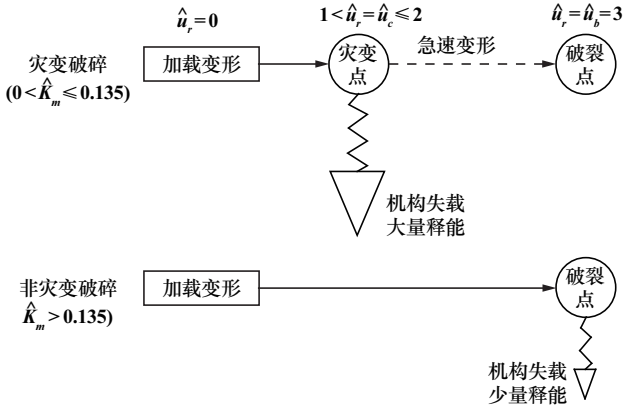


图 2 弱化矿岩两种破碎模式

2 弱化矿岩破碎系统的能量传递和破碎时效特性

2.1 弱化矿岩破碎系统的能量和变形转化

由破碎系统的准静态力学模型, 破碎系统施加能量 \hat{E}_i (外力做功) 由施载中的矿岩变形能量和机构变形能量两部分构成, 在矿岩破碎时按两种力学模式转化。

灾变破碎: 施加能量 \hat{E}_i 由灾变点的矿岩变形能量 \hat{E}_{rc} 和机构变形能量 \hat{E}_{mc} 构成, 其中机构变形能量 \hat{E}_{mc} 的一部分继后将释出作为灾变点后的矿岩变形能量 \hat{E}_{rr} , 该能量与灾变点矿岩变形能量 \hat{E}_{rc} 一起合为破裂点变形能量 \hat{E}_{rb} , 之后转化为矿岩破碎能量 \hat{E}_{rB} , 剩余部分 ($\hat{E}_{mc} - \hat{E}_{rr}$) 转化为机构(对外)释放能量 \hat{E}_{mR} 。

$$\hat{E}_i = \hat{E}_{rc} + \hat{E}_{mc}$$

$$= \left\{ \begin{matrix} \hat{E}_{rc} & \dots & \dots & \hat{E}_{rB} \\ \hat{E}_{mc} & = & \left\{ \begin{matrix} \hat{E}_{rr} \\ (\hat{E}_{mc} - \hat{E}_{rr}) & \dots & \hat{E}_{mR} \end{matrix} \right\} & \end{matrix} \right\} = \hat{E}_{rB} + \hat{E}_{mR} \quad (11)$$

非灾变破碎: 施加能量 \hat{E}_i 由矿岩破裂时的矿岩变形能量 \hat{E}_{rb} 和机构变形能量 \hat{E}_{mb} 构成, \hat{E}_{rb} 和 \hat{E}_{mb} 分别转化为矿岩破碎能量 \hat{E}_{rB} 和机构对外释放能量 \hat{E}_{mR} 。

$$\hat{E}_i = \hat{E}_{rb} + \hat{E}_{mb} = \left\{ \begin{matrix} \hat{E}_{rc} & \dots & \dots & \hat{E}_{rB} \\ \hat{E}_{mb} & \dots & \dots & \hat{E}_{mR} \end{matrix} \right\} = \hat{E}_{rB} + \hat{E}_{mR} \quad (12)$$

在能量转化过程中, 灾变破碎和非灾变破碎中的施加能量最终均转化为矿岩破碎能量和机构(对外)释放能量。

矿岩破碎能量:

$$\left\{ \begin{matrix} \hat{E}_{rc} = \int_0^{\hat{u}_c} \hat{P}(\hat{u}_r) d\hat{u}_r = 1 - \frac{1 + \hat{u}_c}{e^{\hat{u}_c}} \\ \hat{E}_{rr} = \int_{\hat{u}_c}^{\hat{u}_b} \hat{P}(\hat{u}_r) d\hat{u}_r = \frac{1 + \hat{u}_c}{e^{\hat{u}_c}} - \frac{1 + \hat{u}_b}{e^{\hat{u}_b}} \\ \hat{E}_{rb} = \int_0^{\hat{u}_b} \hat{P}(\hat{u}_r) d\hat{u}_r = 1 - \frac{1 + \hat{u}_b}{e^{\hat{u}_b}} \end{matrix} \right. \quad (13)$$

矿岩破碎能量即为矿岩变形至破裂点时产生(吸收)的变形能量:

$$\hat{E}_{rB} = \hat{E}_{rb} = \hat{E}_{rc} + \hat{E}_{rr} = 1 - \frac{1 + \hat{u}_b}{e^{\hat{u}_b}} = 0.801 \quad (14)$$

矿岩破碎能量 \hat{E}_{rB} 只取决于矿岩固有的本构特性。灾变破碎和非灾变破碎的区别在于灾变破碎时变形至灾变点后变形速率发生突变, 而非灾变破碎时不会发生突变。两者均至破裂点完成破碎, 其本构特性和破碎能量不会因灾变而改变。

机构释放能量:

$$\left\{ \begin{matrix} \hat{E}_{mc} = \frac{1}{2} \frac{\hat{P}_c^2}{\hat{K}_m} \quad (\hat{P}_c = \hat{u}_c e^{-\hat{u}_c}) \\ \hat{E}_{mb} = \frac{1}{2} \frac{\hat{P}_b^2}{\hat{K}_m} \quad (\hat{P}_b = \hat{u}_b e^{-\hat{u}_b}) \end{matrix} \right. \quad (15)$$

机构释放能量为系统施加能量和矿岩破碎能量之差。灾变破碎时亦可表达灾变机构释放能量 \hat{E}_{mc} 与灾变点后矿岩变形能量 \hat{E}_{rr} 之差; 非灾变破碎时机构释放能量即为破裂点机构变形能量 \hat{E}_{mb} :

$$\hat{E}_{mR} = \hat{E}_i - \hat{E}_{rB}$$

$$= \begin{cases} \hat{E}_{rc} + \hat{E}_{mc} - \hat{E}_{rB} = \hat{E}_{mc} - \hat{E}_{rr} & (\text{灾变}, 0 < \hat{K}_m \leq 0.135) \\ \hat{E}_{mb} & (\text{非灾变}, \hat{K}_m > 0.135) \end{cases} \quad (16)$$

机构释放能量为机构弹性变形在矿岩破碎时对外释放(逸散)的能量。由于产生灾变时机构刚度小于非灾变破碎时的机构刚度, 且灾变点载荷 \hat{P}_c 高于破裂点载荷 \hat{P}_b , 一般情况下, 灾变破碎的机构释放能量高于非灾变破碎的机构释放能量。

破碎动力系统的总变形由施载中矿岩变形和机构变形两部分构成。灾变破碎时, 总变形 \hat{u}_i 为灾变点矿岩变形 \hat{u}_c 与机构变形 \hat{u}_{mc} 之和, 其中机构变形 \hat{u}_{mc} 的一

部分将释出补偿灾变点后的矿岩变形 $\hat{u}_{rr} = \hat{u}_b - \hat{u}_c$, 合成为破裂点变形 \hat{u}_b , 剩余部分为机构残余变形 \hat{u}_{mR} ; 非灾变破碎时, 总变形 \hat{u}_t 为破裂点矿岩变形 \hat{u}_{rb} 与机构变形 \hat{u}_{mb} 之和, 其中矿岩变形 \hat{u}_{rb} 即为破裂点变形 \hat{u}_b , 机构变形 \hat{u}_{mb} 即为机构残余变形 \hat{u}_{mR} 。两种破碎模式的总变形均为矿岩破裂点变形与机构残余变形之和:

$$\hat{u}_t = \begin{cases} \hat{u}_c + \hat{u}_{mc} = \hat{u}_c + \hat{u}_{rr} + \hat{u}_{mR} = \hat{u}_b + \hat{u}_{mR} & (\text{灾变}, 0 < \hat{K}_m \leq 0.135) \\ \hat{u}_{rb} + \hat{u}_{mb} = \hat{u}_b + \hat{u}_{mR} & (\text{非灾变}, \hat{K}_m > 0.135) \end{cases} \quad (17)$$

机构变形:

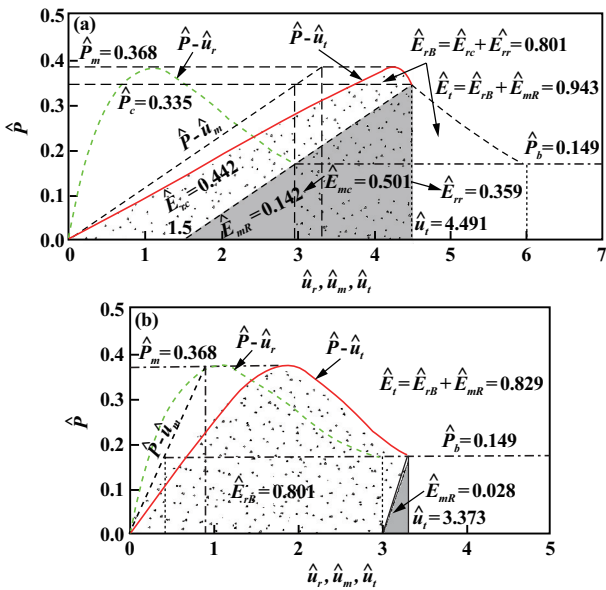
$$\hat{u}_{mc} = \hat{P}_c / \hat{K}_m, \hat{u}_{mb} = \hat{P}_b / \hat{K}_m \quad (18)$$

机构残余变形:

$$\hat{u}_{mR} = \hat{u}_t - \hat{u}_b = \begin{cases} \hat{u}_c + \hat{u}_{mc} - \hat{u}_b = \hat{P}_c / \hat{K}_m - (\hat{u}_b - \hat{u}_c) & (\text{灾变}, 0 < \hat{K}_m \leq 0.135) \\ \hat{u}_b + \hat{u}_{mb} - \hat{u}_b = \hat{P}_b / \hat{K}_m & (\text{非灾变}, \hat{K}_m > 0.135) \end{cases} \quad (19)$$

在一般情况下, 灾变时的机构残余变形大于非灾变时的机构残余变形。

灾变和非灾变破碎两种情况的载荷 (\hat{P})-变形 ($\hat{u}_r, \hat{u}_m, \hat{u}_t$) 特性及对应的能量关系如图3所示。



(a) 灾变 ($\hat{K}_m = 0.112$); (b) 非灾变 ($\hat{K}_m = 0.4$)
图3 载荷-变形特性和对应的能量

图3表明:

两种情况的矿岩破碎能量一致 ($\hat{E}_{rB} = 0.801$), 发生灾变不会改变矿岩破碎(吸收)的能量, 但机构释放能量 \hat{E}_{mR} (灾变: 0.142; 非灾变: 0.028) 和总变形 \hat{u}_t (灾变: 4.491; 非灾变: 3.373) 在灾变情况下显著增大。

在能量和变形转化过程中, 两种破碎模式的主要

区别在于: 灾变破碎外力施载做功至灾变点 (\hat{u}_c) 失载, 而后矿岩靠机构的位能释出快速变形至破裂点 (\hat{u}_b) 完成破碎; 非灾变破碎外力施载直至破裂点, 不靠机构的位能释出完成破碎。

2.2 能量传递效率和破岩时效

2.2.1 能量传递效率

破碎系统能量转化中, 矿岩破碎能量 (\hat{E}_{rB}) 为有用能量, 机构释放能量 (\hat{E}_{mR}) 为无用能量, 其能量传递效率为矿岩破碎能量与破碎系统施加能量之比:

$$\eta_t = \frac{\hat{E}_{rB}}{\hat{E}_t} = \frac{\hat{E}_{rB}}{\hat{E}_{rB} + \hat{E}_{mR}} \quad (20)$$

2.2.2 破岩时效

破岩时效是完成矿岩破碎施载时间利用率的测度。在恒定的加载速率 (\hat{u} 为常数) 下, 破碎时间取决于 (正比) 于机构完成破碎施载所需之总变形, 其中, 矿岩破裂点变形 (\hat{u}_b) 为有效变形 (对应于有效破碎时间), 机构残余变形 (\hat{u}_{mR}) 为无效变形 (对应于无效破碎时间), 则破岩时效为矿岩有效变形与总变形之比:

$$\hat{R}_b = \frac{\hat{u}_b}{\hat{u}_t} = \frac{\hat{u}_b}{\hat{u}_b + \hat{u}_{mR}} \quad (21)$$

传递效率和破岩时效随机构在矿岩破碎时释放能量和残余变形的增大而降低, 这是由于破碎时 (无论灾变或非灾变情况) 机构的释放能量和残余变形会形成无用功和无效破碎时间。

图4给出了破岩动力系统能量 (\hat{E}_t)、传递效率 (η_t)、总变形 (\hat{u}_t) 以及破岩时效 (\hat{R}_b) 随系统机构刚度在区间 ($0 \leq \hat{K}_m \leq 0.4$) 的变化。

以机构刚度 $\hat{K}_m = 0.135$ 为界分为左右两个区间。 $0 \leq \hat{K}_m \leq 0.135$ 为动力系统灾变破碎区间, 在灾变点 ($\hat{K}_m = -\hat{K}_r$) 处失载构成灾变破碎, 矿岩灾变变形能量 \hat{E}_{rc} (0.264~0.594) 和变形 \hat{u}_c (1.0~2.0) 随机构刚度 \hat{K}_m 增大而增大。矿岩破碎能量 $\hat{E}_{rB} = 0.801$; 破裂点变形 $\hat{u}_b = 3, \hat{K}_m \rightarrow 0$, 机构释放能量、施加能量; 机构残余变形 \hat{u}_{mR} 、总变形 \hat{u}_t 均趋于 ∞ ; 能量传递效率 η_t 和破岩时效 \hat{R}_b 均趋于 0。随着机构刚度增大, \hat{E}_{mR} 、 \hat{E}_t 、 \hat{u}_{mR} 、 \hat{u}_t 急速降低, η_t 和 \hat{R}_b 迅速增大, 直至 $\hat{K}_m = 0.135$ 。机构刚度进一步增大, 进入 $\hat{K}_m > 0.135$ 非灾变破碎区间, 构成非灾变破碎, 矿岩破碎能量 \hat{E}_{rB} 和破裂点变形 \hat{u}_b 不变, \hat{E}_{mR} 、 \hat{E}_t 、 \hat{u}_{mR} 、 \hat{u}_t 随机构刚度增大进一步降低, η_t 和 \hat{R}_b 相应增大。 $\hat{K}_m \rightarrow \infty$ 时, \hat{E}_{mR} 、 $\hat{u}_{mR} \rightarrow 0$, η_t 、 $\hat{R}_b \rightarrow 1$ 。

灾变和非灾变破碎区间能量传递效率和破岩时效的变化值域及其区间平均变化率 $\bar{\tau} (\Delta\eta_t / \Delta\hat{K}_m, \Delta\hat{R}_b / \Delta\hat{K}_m)$ 存在显著差异, 详见表1。

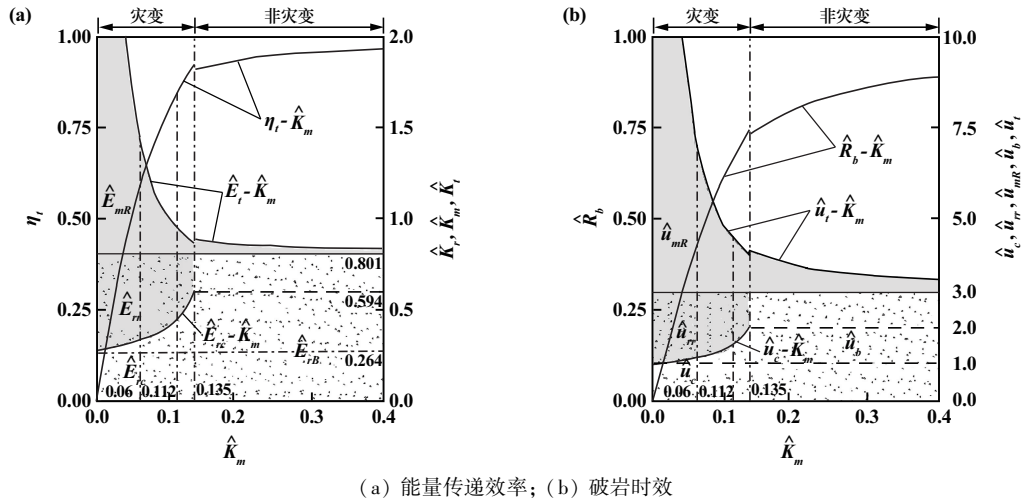


图 4 能量传递效率及破岩时效随机构刚度的变化

表 1 能量传递效率及破岩时效值域和区间平均变化率的比较

参数名称	类别	灾变区间 ($0 \leq \hat{K}_m \leq 0.135$)	非灾变区间 ($0.135 < \hat{K}_m \leq 0.400$)
能量传递效率 η_i	值域	0~0.927	0.907~0.966
	平均变化率 $\bar{\eta}(\eta_i)$	$\frac{0.927-0}{0.135-0} = 6.867$	$\frac{0.966-0.907}{0.400-0.135} = 0.223$
破岩时效 \hat{R}_b	值域	0~0.75	0.731~0.889
	平均变化率 $\bar{R}(\hat{R}_b)$	$\frac{0.75-0}{0.135-0} = 5.556$	$\frac{0.889-0.731}{0.400-0.135} = 0.596$

非灾变区间的能量传递效率和破岩时效处于高值区,远高于灾变区间的能量传递效率和破岩时效,且其区间平均变化率较小,即在非灾变区间破碎系统具有高值且稳定的能量传递效率和破岩时效,机构刚度的变化对其影响不大。

能量和变形随机构刚度的变化具有很好的一致性,变化规律基本相同,能量参量与其所对应的变形参量之间显现相应的准线性关系。这是由于破碎载荷在灾变区间变化不大 ($\hat{P} = 0.368 \sim 0.271$); 在非灾变区间为一恒定值 ($\hat{P} = \hat{P}_b = 0.149$); 而在恒力作用下,能量(外力做功)和变形之间存在线性(正比)关系 ($E = Pu$)。事实上,在矿岩破碎中,破碎能量和变形为相对应的两个映像,前者反映了能量的转化关系,后者反映了变形转化关系。能量传递效率给出了破碎岩石能量在施加能量中占有的比率,破岩时效给出了破岩时间在施载时间中占有的比率,两者从破碎能量和时间转化两个侧面给出了破碎功效测度。

3 计算实例

某矿岩单轴抗压强度 σ_b 为 2.8 MPa,弹性模量 E 为 5.4 GPa,初始刚度 λ 为 6.8×10^7 N/m(截割破碎方式),机构刚度 K_m 为 1.5×10^7 N/m(液压加载方式),

非灾变破碎时矿岩破碎变形 $\hat{u}_r = \hat{u}_b = 3$ 。计算结果如表 2 所示。

表 2 计算结果

类别	参数名称	计算式	计算结果	备注
机构特性	无量纲刚度 \hat{K}_m	式(6)	0.221	>0.135, 处于非灾变区间
	破碎载荷 \hat{P}	式(6)	0.149	非灾变破碎
传递效率	矿岩破碎能量 \hat{E}_{rB}	式(14)	0.801	非灾变破碎
	机构释放能量 \hat{E}_{mR}	式(15)~(16)	0.050	
	施加能量 \hat{E}_i	式(12)	0.851	
破岩时效	能量传递效率 η_i	式(19)	0.941	非灾变破碎
	机构残余变形 \hat{u}_{mR}	式(18)	0.674	
	总变形 \hat{u}_i	式(17)	3.674	
	破岩时效 \hat{R}_b	式(20)	0.818	

计算结果表明, $\hat{K}_m = K_m / \lambda = 0.221 > 0.135$, 处于非灾变破碎区间,能量传递效率 $\eta_i = \hat{E}_{rB} / \hat{E}_i = 0.941$,破岩时效 $\hat{R}_b = 0.818$,可较好地实现矿岩破碎。

4 结 语

1) 根据弱化性质矿岩的非线性本构特性,其破碎动力系统有灾变和非灾变两种破碎力学模式。前者发生于机构低刚度 ($0 < \hat{K}_m \leq 0.135$) 的灾变失稳区间,在

灾变点($\dot{K}_m + \dot{K}_r = 0$)矿岩变形速率突然增大,伴随着机构能量的大量释放;后者发生于机构高刚度($\dot{K}_m > 0.135$)非灾变区间,没有机构能量的大量释放。

2) 低机构刚度灾变破碎模式和高机构刚度非灾变破碎模式能量传递效率和破岩时效存在很大差异,前者显著低于后者。从能量利用和破岩功效角度考虑,破碎动力系统不宜采用低机构刚度。

3) 在高机构刚度非灾变破碎区间,能量传递效率和破岩时效随机构刚度变化率很小,即对刚度变化的敏感度不高,故从简化结构、降低制造成本角度,不必追求过高的机构刚度,一般控制 $\dot{K}_m > 0.2$ 即可满足要求。

4) 对矿岩初始刚度较大的情况,应采用较大的机构刚度,以降低系统能量释放、提高破碎功效。

5) 从破碎能量和时效的角度分析了弱化矿岩破碎系统的动力特性,研究结果可为弱化矿岩破碎动力系统的参数选择和设计提供参考。

参考文献:

- [1] Cook N G W. The failure of rock[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1965,2(4):389-403.
- [2] 朱芝若. 刚性试验机[M]. 北京:煤炭工业出版社,1985.
- [3] 周思孟. 刚性试验机及其在岩石力学中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,1987,6(2):125-138.

(上接第24页)

参考文献:

- [1] 唐礼忠,高龙华,王春,等. 动力扰动下含软弱夹层巷道围岩稳定性数值分析[J]. 采矿与安全工程学报,2016,33(1):63-69.
- [2] 张家明. 含软弱夹层岩质边坡稳定性研究现状及发展趋势[J]. 工程地质学报,2020,28(3):626-638.
- [3] 李楠,汪班桥,门玉明,等. 地震作用下锚固滑坡动力响应研究[J]. 防灾减灾工程学报,2017,37(6):878-885.
- [4] 杜晓丽,宋宏伟,魏京胜. 地震对软弱夹层边坡稳定性影响数值模拟研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2010,32(1):39-42.
- [5] 吴晔,许紫刚,杜修力. 软弱夹层对地下结构地震响应的影响分析[J]. 郑州大学学报(工学版),2021,42(4):91-97.
- [6] 言志信,张森,张学东,等. 顺层岩质边坡地震动力响应及地震动参数影响研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(S2):3522-3528.
- [7] 方庆红,胡斌,盛建龙,等. 含软弱夹层露天矿高边坡台阶宽度及台阶面角协同优化研究[J]. 矿冶工程,2021,41(5):5-9.
- [8] 李军伟,胡弘毅,梅松华,等. 花江北大江大桥六枝岸高陡边坡稳

- [4] Hustrulid W A, Fairhurst C. A theoretical and experimental study of the percussive drilling of rock, part II-force-penetration and specific energy determination[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1971,8(4):335-356.
- [5] 徐小荷. 岩石破碎学[M]. 北京:煤炭工业出版社,1984.
- [6] 赵统武. 冲击钻进动力学[M]. 北京:冶金工业出版社,1996.
- [7] 邹久群,张金松,庞建勇. 基于离散元法的镶齿冲击与切削破岩效果数值分析研究[J]. 振动与冲击,2022,41(22):173-183.
- [8] 刘春生,王庆华,李德根. 镐型截齿截割阻力谱的分形特征与比能耗模型[J]. 煤炭学报,2015,40(11):2623-2628.
- [9] 高锋,甘德清,甘泽,等. 基于分形理论的磁铁矿石多级破碎演化特征[J]. 矿业研究与开发,2021,41(11):149-154.
- [10] 汪学清,赵统武. 冲击机具凿入过程的能量传递[J]. 振动与冲击,2018,37(9):202-207.
- [11] 吴鸿遥,程育仁. 损伤力学的基本内容与进展[J]. 力学与实践,1985,7(1):2-9.
- [12] Krajcinovic D, Silva M A G. Statistical aspects of continuous damage theory[J]. International Journal of Solids Structures, 1982,18(7):551-562.
- [13] 段雄. 岩石截割破碎载荷谱的混沌识别与模拟[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1994.
- [14] 谷口修. 振动工程大全[M]. 北京:机械工业出版社,1983.
- [15] Salami M D G. Stability, instability and design of pillar workings[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1970,7(6):613-631.

引用本文:汪学清,唐红平,王建华,等. 弱化矿岩破碎动力系统的能量转化和时效特性[J]. 矿冶工程,2024,44(1):25-30.

- 定性评价[J]. 矿冶工程,2022,42(3):23-28.
- [9] 韩伟歌,崔振东,涂新斌,等. 不同层理面角度在层状岩体隧道围岩变形中的响应特征研究[J]. 工程地质学报,2021,29(5):1267-1275.
- [10] 徐文刚,余旭荣,年廷凯,等. 基于FLAC^{3D}的三维边坡稳定性强度折减法计算效率改进算法及其应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2021,51(5):1347-1355.
- [11] 朱帅帅,唐海,万文,等. 爆破荷载下露天矿高边坡振动速度阈值的确定及控制[J]. 矿业工程研究,2020,35(4):1674-5876.
- [12] 陈占军,朱传云,周小恒. 爆破荷载作用下岩石边坡动态响应的FLAC^{3D}模拟研究[J]. 爆破,2005(4):8-13.
- [13] 刘长续. 基于FLAC^{3D}的堆积型边坡加速度放大效应研究[D]. 保定:河北大学,2021.

引用本文:李屹,夏祥生,徐继业,等. 爆破振动作用下含断层边坡动力响应分析[J]. 矿冶工程,2024,44(1):21-24.