

冲击动载下低温冻胀岩石能量耗散与破坏形态研究

Study on Energy Dissipation and Damage Morphology of Cryogenically Frozen and Expanded Rocks under Impact Dynamic Loading

陈才贤¹, 王松¹, 邹圣贤²

(1. 西藏巨龙铜业有限公司, 西藏 拉萨 850200; 2. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083)

摘要:为研究低温冻胀条件下不同埋深花岗岩在冲击动载作用下能量耗散规律与破坏形态特征,本文采用 SHPB 试验系统对冻胀温度为 0、-10、-20 °C 不同埋深花岗岩进行冲击动载试验,分析了温度和埋深对岩石能量耗散与破坏形态的影响。结果表明:随着温度的降低,花岗岩试件的耗散能和单位体积吸收能呈现出现增加后减低的趋势,耗散能和单位体积吸收能随着埋深的增加逐渐增加;岩石的破碎程度随着温度的降低呈现出先减小后增大的趋势。

关键词:霍普金森压杆; 低温冻胀; 埋深; 能量耗散; 破坏形态

中图分类号: TD315

文献标志码: A

文章编号: 1672-609X(2025)02-0048-06

Abstract: In order to research the energy dissipation law and damage morphology characteristics of granite with different burial depths under low-temperature freezing and expansion conditions under impact dynamic loading. SHPB test system was used to carry out impact dynamic load test on granite with different burial depths at 0, -10 and -20 °C, and the effects of temperature and burial depth on energy dissipation and damage morphology of rock were analyzed. The results show that: with the decrease of temperature, the dissipated energy and absorbed energy per unit volume of granite specimens show a tendency of increasing and then decreasing, and the dissipated energy and absorbed energy per unit volume of granite show a tendency of decreasing and then increasing with the increase of burying depth; and the crushing degree of rock shows a tendency of decreasing and then increasing with the decrease of temperature.

Key words: Split Hopkinson Pressure Bar; low-temperature freezing and expansion; burial depth; energy dissipation; damage pattern

1 前言

在采矿工程领域,矿岩的稳定是保证矿岩安全高效开采的核心问题,随着开采工程的进行,矿岩处于越来越复杂的力学环境,如高地应力、爆破扰动等^[1-3]。因此,研究动载作用下矿岩的强度特性、破坏模式和能量特性具有重要意义^[4-5]。

在冲击动载下岩石能量耗散方面,学者们开展了大量的研究工作。刘洋等^[6]以 SHPB 试验能量理论为基础,深入探究了峰后破裂砂岩在动态破坏过程中的能量耗散特征,并将其与完整砂岩的相应特征展开对比分析;刘逸飞等^[7]研究了不同高径比花岗岩能量耗散规律,分析了冲击速度和长径比对花岗岩试件的破碎能耗和破坏形态的影响;刘石等^[8]

从岩石微观结构和能量角度出发,分析了岩石动态破坏中能量吸收能力差异造成岩样破坏形态不同的问题;黎立云等^[9]分析了砂岩试件在动态和静态加载破坏过程中总耗散能的不同特点;赵光明等^[10]采用 ANSYS/LS DYNA 数值模拟软件模拟冲击过程,并分析了岩石在破坏过程中的能量特性;李杨等^[11]将三种不同岩石进行组合,对复合岩石材料的动态断裂模式、波阻抗效应以及能量耗散规律展开分析,并探究不同复合岩石试件动能与断裂能之间的关系。刘照明^[12]通过对不同埋深花岗岩进行 SHPB 冲击试验,结果表明,岩样的入射能、透射能、耗散能、吸收能均随应变率和围压的升高而增加,而岩样的反射能呈现出随应变率的增大而增大,随围压的增大而减小的趋势。

在高原寒区,低温冻胀与冲击动载并存的情况极为常见,如寒区隧道掘进、矿山开采等工程活动中,岩石不仅长期处于低温环境,遭受冻胀作用,还会因爆破等作业承受冲击动载。本文深入研究冲击

[作者简介] 陈才贤(1989—),男,工程师,主要从事金属矿开采技术与管理等方面工作。

[基金项目] 国家自然科学基金(51804017)

[引用格式] 陈才贤,王松,邹圣贤. 冲击动载下低温冻胀岩石能量耗散与破坏形态研究[J]. 中国矿山工程,2025,54(2):48-53.

动载下低温冻胀岩石的能量耗散与破坏形态,对保障工程安全、优化施工工艺具有不可忽视的意义。

2 SHPB 动态冲击实验

2.1 试样制备与试验方案

选取现场不同埋深(-86 m、-125 m、-150 m)的花岗岩使用切割机将其加工成 $\phi 50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 的试样,切出完整的界面形状,并打磨控制表面的平整度和粗糙度,具体如图 1 所示。为还原岩芯在现场真实冻胀情况,将取样加工后的岩芯经保湿处理后存放于温度分别为 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ 的冷冻仓中,统一存放 1 d 后开始试验。试验方案见表 1。



图 1 花岗岩试样

2.2 试验设备与冲击试验

动态冲击压缩试验采用华北理工大学实验室的 50 mm 直径的 SHPB 装置,该试验装置包括冲击弹头、冲击杆、超动态应变仪、示波器及数据采集系统,气炮能量来源于高压氨气瓶,冲击弹头的速度可通过调节氨气气压和弹头位置进行控制,加载装置如图 2 所示。

SHPB 试验装置中的压力棒直径为 50 mm,材料为 40 Cr 合金钢,密度为 $7\,800 \text{ kg/m}^3$,波速为 $5\,200 \text{ m/s}$ 。在本研究中,设置冲击幅值为 130 mV 。超动态应变仪的灵敏度大于 $0.2 \text{ V}/100 \mu\epsilon$,应变系

表 1 低温冻胀试验方案

试件编号	埋深/m	温度/ $^\circ\text{C}$
G86-0	-86	0
G86-10	-86	-10
G86-20	-86	-20
G125-0	-125	0
G125-10	-125	-10
G125-20	-125	-20
G150-0	-150	0
G150-10	-150	-10
G150-20	-150	-20

数为 2.0。在 SHPB 开始之前,试验前,用游标卡尺将入射杆、透射杆和吸收杆保持在同一水平位置。将岩样横截面用凡士林与入射杆横截面黏结,凡士林可以起到减少试验摩擦对结果的影响。由于岩样与压力杆波阻抗不同,在调整位置并设置冲击压力后,入射杆被气体枪释放的压力影响,产生作用于岩样上的一维应力波。采集后的数据将被导入到试验数据处理平台中,完成后续处理。

3 SHPB 能量耗散计算原理

岩石破坏的过程本质上是能量演化的过程,因



图 2 SHPB 冲击加载装置

此,通过对入射能、反射能、透射能和耗散能变化规律的分析,可掌握动态加载过程中岩石内部损伤变化情况^[13]。根据一维应力波理论,对于试样而言,其开始加载到卸载过程中入射能 E_i 、反射能 E_r 、和透射能 E_t 可通过以下公式计算^[14]:

$$E_i = \frac{A}{\rho C} \int_0^t \sigma_i^2(t) dt \quad (1)$$

$$E_r = \frac{A}{\rho C} \int_0^t \sigma_r^2(t) dt \quad (2)$$

$$E_t = \frac{A}{\rho C} \int_0^t \sigma_t^2(t) dt \quad (3)$$

式中, E_i 、 E_r 、 E_t 分别为入射能量、反射能量和透射能量; A 为压杆的横截面积; C 为压杆的波阻抗。

根据能量守恒定律, SHPB 冲击试验 E_s 中耗散的总能量可表示为

$$E_s = E_i - E_r - E_t \quad (4)$$

除此之外,引入单位体积能量耗散来衡量能量对试件破坏做功能力。

$$E_v = \frac{E_s}{V} \quad (5)$$

式中, V 为试件的体积。

4 试验结果分析

4.1 动态冲击下岩石能量耗散

由于篇幅有限,选取埋深 -86 m, 冻胀温度 0 °C 下入射能、反射能、透射能和耗散能随时间变化曲线进行分析,变化曲线如图 3 所示。从图中可以看出,对花岗岩进行 SHPB 试验时,随着时间的推移,在加载初期,入射能、反射能、透射能和耗散能均呈上升趋势,后期到达某一值后能量趋于稳定,且入射能大部分转化为了耗散能,即岩石吸收的能量。此外,透射波的能量高于反射波的能量,这意味着有部分能量穿过试件并传递至输出杆。在入射能一定的情况下,耗散能与反射能和透射能二者能量之和有关系,二者能量之和越小,岩石耗散能越大。

低温冻胀下不同埋深和冻胀温度花岗岩入射能、射能、透射能、耗散能和单位体积吸收能试验结果见表 2。分析表 2 可知,随着温度的降低,花岗岩试件的耗散能和单位体积吸收能呈现出现增加后减低的趋势。主要原因可能是但当温度为 -20 °C 和 -10 °C 时,岩石孔隙中的水会结冰,岩石处于冻胀状态,低温冻胀产生的膨胀压力会使岩石中原有的裂隙、孔隙等缺陷进一步扩展和连通,应力波在孔隙处发生反射和散射,增加能量的耗散,同时随着温度

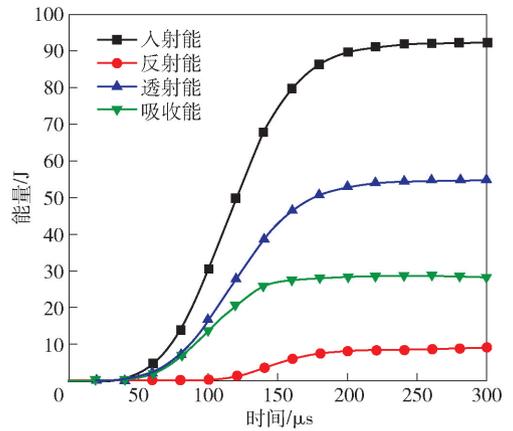


图 3 埋深 -86 m, 冻胀温度 0 °C 下入射能、反射能、透射能和耗散能随时间变化曲线

的持续下降,岩石可能会变得更加脆性,能量吸收能力下降。

表 2 低温冻胀花岗岩能量试验结果

试件编号	入射能/J	反射能/J	透射能/J	耗散能/J	单位体积吸收能/ J·cm ⁻³
G86-0	92.36	9.16	54.81	28.39	0.58
G86-10	87.97	16.88	24.30	46.79	0.95
G86-20	89.25	4.99	57.77	26.49	0.54
G125-0	86.93	5.57	45.13	36.24	0.74
G125-10	92.29	9.46	33.36	49.47	1.01
G125-20	89.94	5.68	41.42	42.84	0.87
G150-0	93.00	6.83	35.37	50.80	1.04
G150-10	97.03	19.01	21.79	56.23	1.15
G150-20	82.37	5.88	30.63	45.87	0.93

当温度保持不变的情况下,耗散能和单位体积吸收能随着埋深的增加逐渐增加,表明花岗岩岩石在埋深更大时破坏需要更多的能量。可能的原因是由于地压的作用,岩石内部的结构更加致密,能够承受更大的变形,吸能能力增加。

4.2 应力-应变曲线分析

应力-应变曲线可以直观地展示出材料在动态荷载作用下的动态力学性能。岩石应力、应变与应变率可以采用二波法、三波法计算,二波法计算公式如下^[15]:

$$\sigma_s = \frac{EA_0}{A_s \times \varepsilon_t} \quad (6)$$

$$\varepsilon_s = \frac{2C_0}{L_s \times \int_0^t (\varepsilon_i - \varepsilon_t) dt} \quad (7)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{2C_0}{L_s \times (\varepsilon_i - \varepsilon_t)} \quad (8)$$

式中, A_0 和 A_s 分别代表杆件和岩石的横截面积; A 、 E 和 C_0 代表杆件的截面积、弹性模量和弹性波波速; ε_i 和 ε_t 分别代表入射波和透射波的应变信号。

图4至图6所示为不同埋深花岗岩在 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 下的二波法、三波法应力与应变的关系。从图中可以看出, 由于冲击荷载作用在试件上的时间极短, 岩石试样内部孔隙、微裂隙闭合时间以及岩石压密阶段极短, 在图中不表现出来, 直接进入弹性变形阶段。从图中可以看出, 冻胀岩石在冲击荷载作用下的应力应变曲线经历三个阶段。①弹性阶段: 应力应变曲线近似为直线, 此时仪器冲击荷载不足以使冻胀岩石裂隙进一步扩展, 岩石表现为弹性变形; ②裂纹演化阶段: 随着应变的逐渐增大,

应力缓慢上升, 斜率越来越小, 说明冻胀岩石内部裂纹在外力的作用下不断演化及扩展, 并产生一些新的裂隙, 当应力达到峰值以后, 冻胀岩石内部裂隙大量扩展, 新裂隙不断产生, 内部出现破碎面, 宏观上能观察到裂隙的扩展与演化; ③卸载阶段: 应变持续增加, 应力不断减小, 试样发生宏观性破坏, 分裂成多个碎块。

根据图4~图6各图中动态峰值应力可以发现, 当温度由 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 下降到 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 随着埋深的增加, 花岗岩的动态峰值应力呈现出先减小后增加的趋势, 当埋深为 -86 m 和 -150 m 时, 温度为 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 时峰值应力达到最低; 埋深为 -125 m 时, 温度为 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 峰值应力持平。这表明不同埋深岩石在不同冻胀温度下动态力学性能不同。

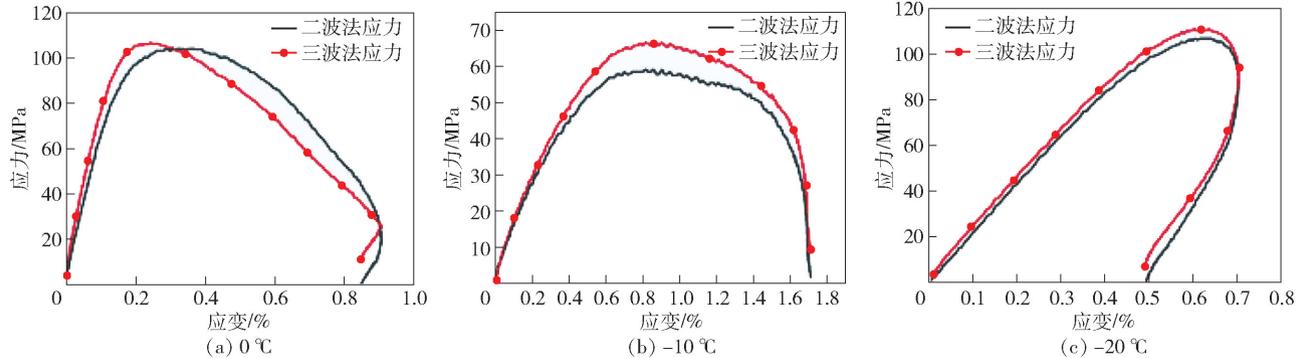


图4 埋深 -86 m 岩石不同温度下应力应变曲线图

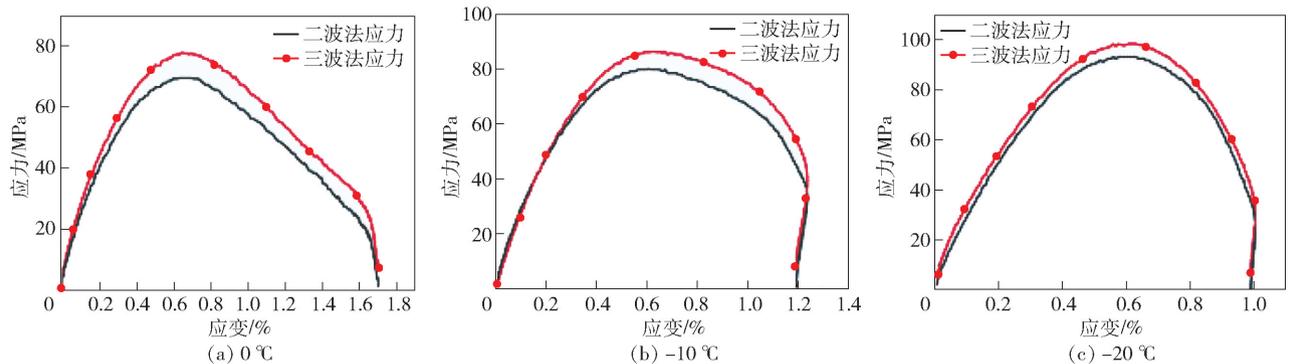


图5 埋深 -125 m 岩石不同温度下应力应变曲线图

4.3 矿岩破坏形态分析

图7至图9所示为花岗岩在埋深 -86 m 、 -125 m 、 -150 m 不同冻胀温度下的破坏变形特征。分析图6可知, 花岗岩在埋深为 -86 m , 温度为 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 试件产生裂纹, 岩石发生破坏温度为 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 岩石未出现裂纹, 岩石的破裂程度随

着温度的减低而减小。分析图7可知, 埋深为 -125 m 时, 岩石的破碎程度随着温度的降低呈现出先减小后增大的趋势, 温度为 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 时未发现明显裂纹, 且温度为 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 小块率明显增加。分析图8可知, 埋深为 -150 m 时, 不同温度下岩石均产生了不同程度的裂纹, 与埋深 -125 m 岩石相同,

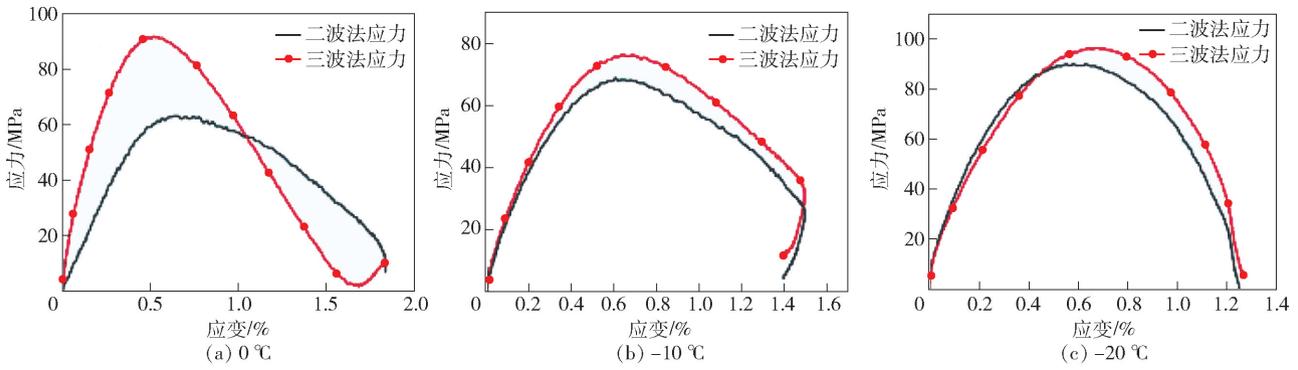


图6 埋深 -150 m 岩石不同温度下应力应变曲线图

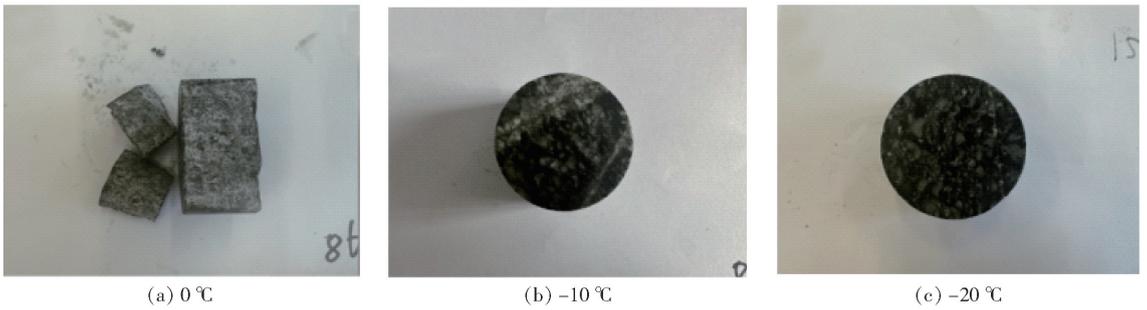


图7 埋深 -86 m 岩石不同温度下破坏形态

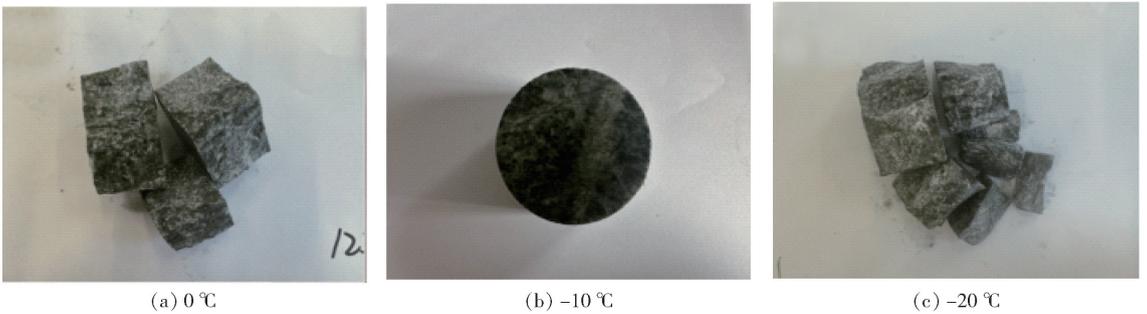


图8 埋深 -125 m 岩石不同温度下破坏形态

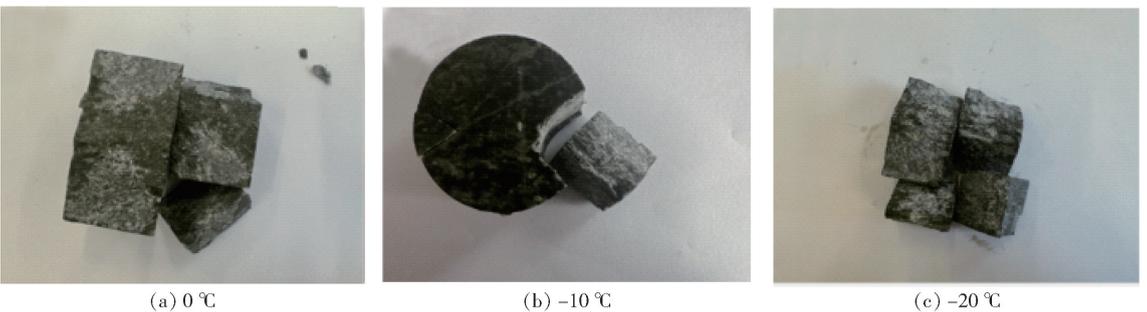


图9 埋深 -150 m 岩石不同温度下破坏形态

岩石的破碎程度随着温度的降低呈现出先减小后增大的趋势,温度为 -20 °C 时,岩石最破碎。

与此同时,根据图 7 ~ 图 9 纵向对比相同温度下不同埋深岩石破坏变形特征,当冻胀温度为 0 °C

时,可以发现,岩石破裂形态与埋深有相关性。当冻胀温度与保持一致时,随着埋深的增加,破碎程度从大到小排序整体表现为: -150 m、-125 m、-86 m。同时,岩石变形破裂也与冻胀温度相关,当温度从

-10℃降低至-20℃时,此时岩石发生冻胀,岩石脆性增加,破裂程度增加。

从能量的角度对岩石的破坏特征进行分析,花岗岩试样发生变形破坏是由裂纹的产生、扩展以及贯通所引发的,而裂纹在其产生和扩展过程中必然会消耗能量。对于那些需要更多能量才能起裂和扩展的微裂纹而言,在其吸收的能量尚未达到足以使其起裂、扩展的程度时,试样就已因能量消耗较小的微裂纹的扩展和贯通而损坏。由于能量消耗较小的微裂纹在数量上较少,所以花岗岩试样破碎后的块度会相对偏大。

同时,随着冻胀温度的减低,岩石孔隙中的水分会结冰,冰的体积膨胀会对孔隙壁施加压力,进而改变孔隙的大小、形状以及连通性等。使得岩石内部产生裂隙以及结构变得疏松,当受到外部压力作用时,裂隙处容易形成应力集中,岩石更容易沿着这些薄弱部位发生破坏,导致其抗压强度下降。

5 结论

对 SHPB 冲击动载下不同埋深冻胀岩石的能量耗散和破坏特征开展研究,主要得到了以下结论:

(1)对花岗岩进行 SHPB 试验时,随着时间的推移,在加载初期,入射能、反射能、透射能和耗散能均呈上升趋势,后期到达某一值后能量趋于稳定,且入射能大部分转化为了耗散能,即岩石吸收的能量。

(2)随着温度的降低,花岗岩试件的耗散能和单位体积吸收能呈现出现增加后减低的趋势。主要原因可能是但当温度为-20℃和-10℃时,岩石孔隙中的水会结冰,岩石处于冻胀状态。当温度保持不变的情况下,耗散能单位体积吸收能随着埋深的增加逐渐增加,表明花岗岩岩石在埋深更大时破坏需要更多的能量。

(3)由于冲击荷载作用在试件上的时间极短,岩石试样内部孔隙、微裂隙闭合时间以及岩石压密阶段极短,直接表现为弹性变形阶段;冻胀岩石在冲击荷载作用下的应力应变曲线经历三个阶段:弹性阶段、裂纹演化阶段和卸载阶段。

(4)岩石破裂形态与埋深、冻胀温度有关。岩石的破碎程度随着温度的降低呈现出先减小后增大的趋势。当冻胀温度与保持一致时,随着埋深的增加,破碎程度之间增大。

[参考文献]

- [1] Xue G, Yilmaz E, Wang Y. Progress and prospects of mining with backfill in metal mines in China [J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2023, 30(8): 1455 - 1473.
- [2] 马斌文,谢和平,张修峰,等. 动载扰动下巷道围岩冲击破坏与能量释放规律研究[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2024, 6(4): 5 - 22.
- [3] 陈元勇,徐松,徐长节,等. 冲击荷载下水泥节理红砂岩动态力学性能与能量演化规律研究[J/OL]. *有色金属科学与工程*, 1 - 14 [2025 - 01 - 14].
- [4] 温森,吴斐,李胜,等. 冲击荷载下强度比对类复合岩样能量耗散影响的研究[J]. *振动与冲击*, 2023, 42(13): 111 - 118.
- [5] 王雪松. 冲击荷载作用下岩石材料能量耗散及破碎机理研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2024.
- [6] 刘洋,何健,张志雄. 动荷载下峰后破裂砂岩能量耗散特征研究[J]. *有色金属工程*, 2019, 9(5): 81 - 86.
- [7] 刘逸飞,王道明,罗伟,等. 冲击荷载下不同长径比岩石能量耗散研究[J]. *四川水利*, 2024, 45(3): 15 - 19.
- [8] 刘石,许金余,刘军忠,等. 绢云母石英片岩和砂岩动态破坏过程的能量分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2011, 7(6): 1181 - 1185.
- [9] 黎立云,徐志强,谢和平,等. 不同冲击速度下岩石破坏能量规律的实验研究[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(12): 2007 - 2011.
- [10] 赵光明,马文伟,孟祥瑞. 动载作用下岩石类材料破坏模式及能量特性[J]. *岩土力学*, 2015, 36(12): 3598 - 3605 + 3624.
- [11] 李杨,王雁冰,付代睿,等. 动载下层状复合岩石能量耗散及断裂特征研究[J]. *工程科学学报*, 2023, 45(11): 1833 - 1846.
- [12] 刘照朋. 不同埋深条件下花岗岩动静力学特性与能量释放规律研究[D]. 重庆:重庆大学, 2019.
- [13] 金丹丹,鲁先东,王炳辉,等. 冲击荷载下含夹层饱和砂土孔压变化规律分析[J]. *岩土力学*, 2024, 45(4): 1081 - 1091 + 1120.
- [14] Zhang Z X, Kou S Q, Jiang L G, et al. Effects of loading rate on rock fracture: fracture characteristics and energy partitioning [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, 37(5): 745 - 762.
- [15] 陈见行,曾班全,张俊文. 冲击荷载下加卸载效应对冲击性岩石力学特性的影响[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(5): 2283 - 2297.