



冻融循环后红砂岩静动态劈裂拉伸性能对比分析

张阳阳 黄伟

引用本文:

张阳阳, 黄伟. 冻融循环后红砂岩静动态劈裂拉伸性能对比分析[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(3): 94–99.

ZHANG Yangyang, HUANG Wei. Comparative analysis of static and dynamic split tensile properties of red sandstone after freeze–thaw cycles[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(3): 94–99.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0443>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

冻融循环条件下砂岩动态拉伸力学特性试验研究

Experimental study on dynamic tensile mechanical properties of sandstone under freeze–thaw cycles

煤炭科学技术. 2022, 50(8): 60–67 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/9304f9a3-b438-4e4b-92f9-1512a5ed9301>

液氮冻结和冻融循环作用下煤样力学特性试验研究

Study on evolution law of mechanical properties of coal samples subjected to freezing and freeze–thaw cycles of liquid nitrogen

煤炭科学技术. 2023, 51(5): 82–92 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-1451>

液氮冻融循环作用下饱水煤样力学特性试验研究

Experimental study on mechanical properties of saturated coal samples subjected to freezing–thawing cycles of liquid nitrogen

煤炭科学技术. 2020, 48(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/fade14c1-af3e-41be-952a-41f8f05ab60e>

冻融受荷砂岩力学性能劣化与统计损伤模型研究

Study on deterioration of mechanical properties and statistical damage model of freeze–thaw loaded sandstone

煤炭科学技术. 2024, 52(5): 84–91 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0693>

冻融循环下排土场软岩边坡抗剪特性及时效性研究

Research on shear characteristics and timeliness of soft rock slope of dump under freezing–thawing cycle

煤炭科学技术. 2021, 49(10): 50–57 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/6e6237f2-3dd0-4665-942a-842c02d25f28>

冻融循环下页岩孔裂隙和渗透率演化特征研究

Research on evolution characteristics of shale pore–fracture and permeability under freeze–thaw cycles

煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 18–26 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.QNTK21-1135>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

张阳阳, 黄 伟. 冻融循环后红砂岩静态劈裂拉伸性能对比分析[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(3): 94–99.

ZHANG Yangyang, HUANG Wei. Comparative analysis of static and dynamic split tensile properties of red sandstone after freeze-thaw cycles[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(3): 94–99.

冻融循环后红砂岩静态劈裂拉伸性能对比分析

张阳阳, 黄 伟

(淮南联合大学 建筑与艺术学院, 安徽 淮南 232038)

摘 要: 研究冻融循环作用后岩石的劈裂拉伸性能对分析寒区岩体稳定性具有重要的参考价值, 以寒区典型的红砂岩为研究对象, 对红砂岩开展了 0、5、10、15、20 次冻融循环试验, 研究了冻融循环次数对红砂岩纵波波速、干密度和孔隙率的影响规律, 采用岩石试验机和 $\phi 50$ mm 分离式 Hopkinson 压杆实验系统, 进行了不同冻融循环次数后红砂岩试样的静、动态力学性能试验, 分析了冻融循环次数对红砂岩静、动态强度、变形和破坏形态的影响, 基于纵波波速的变化定义了红砂岩的冻融损伤度。研究表明: 随着循环次数的增加, 红砂岩内部裂隙不断扩展, 矿物颗粒之间黏结力逐渐减弱, 试件的纵波波速和干密度逐渐减小, 而孔隙率和损伤度逐渐增大; 红砂岩的静、动态劈裂拉伸强度随冻融次数的增加逐渐下降, 而达到峰值应力所需的时间逐渐增加, 20 次冻融循环后, 红砂岩试件的静、动态劈裂强度分别降低了 41.88% 和 21.93%。相同冻融循环次数条件下, 红砂岩试件的动态劈裂强度比静态劈裂强度提高了 2.0~3.5 倍。静态劈裂条件下, 红砂岩试件呈中心劈裂破坏模式, 与静态相比, 试件的动态破碎形态在加载两端出现明显的压碎区域, 且区域面积随循环次数的增加不断增大, 破碎区的碎块尺寸逐渐减小。红砂岩内部的损伤度随循环次数的增加呈对数增大。

关键词: 岩石力学; 冻融循环; 静态力学; 动态力学; 分离式 Hopkinson 压杆; 劈裂; 破碎形态

中图分类号: TU45

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)03-0094-06

Comparative analysis of static and dynamic split tensile properties of red sandstone after freeze-thaw cycles

ZHANG Yangyang, HUANG Wei

(School of Architecture and Art, Huainan Union University, Huainan 232038, China)

Abstract: It's of great value to study on splitting tensile properties of rock after freeze-thaw cycles of rock mass in cold regions. The typical red sandstone in cold region was selected for testing, the freeze-thaw (F-T) cycle experiments with different numbers (0, 5, 10, 15, and 20 times) were performed on red sandstone specimens, and the effects of F-T cycle number on the P-wave velocity, dry density, and porosity of red sandstone were studied in detail. In addition, both the static and dynamic mechanical properties of red sandstone specimens after different F-T cycles were tested by using rock testing machine and $\phi 50$ mm split Hopkinson bar system, and the influence of F-T cycle number on the static and dynamic strength, deformation, and failure mode of red sandstone was systematically analyzed. F-T damage degree of red sandstone was defined based on the variation in P-wave velocity. Results show that with the increase of F-T number, the internal cracks of red sandstone continuously expand, bonding between mineral particles gradually decreases. Both the P-wave velocity and dry density of specimens gradually decrease, while the porosity and damage degree gradually increase. The static and dynamic splitting tensile strengths of red sandstone specimens gradually decrease with the increase of F-T number, while the time needed to reach the peak stress gradually increases. After 20 F-T cycles, the static and dynamic splitting strengths of red sandstone specimens decreased by 41.88% and 21.93%, respectively. Under the same F-T cycle number, the dynamic splitting strength of red sandstone specimens is increased by 2 ~ 3.5

收稿日期: 2021-06-03

责任编辑: 朱恩光

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2021-0443

基金项目: 安徽省教育厅科学研究重点资助项目(2022AH052930, KJ2020A0899)

作者简介: 张阳阳(1990—), 男, 安徽宿州人, 讲师, 硕士。E-mail: zhangyiyah@163.com

通讯作者: 黄 伟(1980—), 男, 安徽青阳人, 教授, 博士。E-mail: hwaust@163.com

times compared to the specimen under static loading. Under the static splitting condition, the red sandstone specimen exhibits the central splitting failure mode. However, an obvious crushed region at both ends of specimens was observed under dynamic loading. Additionally, with the increase of F-T number, the crushed area increases gradually, while the size of fragments gradually decreases. The damage degree of red sandstone increases logarithmically with the increase of F-T number.

Key words: rock mechanics; freeze-thaw cycle; static mechanical; dynamic mechanical; split Hopkinson pressure bar; splitting; failure mode

0 引 言

岩石是一种非均质多相复合结构材料,内部存在大量随机分布的天然节理,物理力学性质极为复杂^[1]。岩石的劈裂拉伸强度是岩体力学和工程设计中的重要参数,其值远小于抗压强度,导致工程岩体中常出现劈裂破坏的模式,因此,岩石的劈裂拉伸性能逐渐成为研究的热点^[2]。

国内外学者针对岩石的劈裂性能开展了大量的研究,并取得了丰硕的成果。宫凤强等^[3]研究了巴西圆盘劈裂试验中拉伸模量的解析算法,推导出岩石拉伸模量和总位移之间的关系;钟帅等^[4]发现灰岩受力变形过程经历了压密、弹性和破坏 3 个阶段,并采用 Weibull 分布及 Lemaitre 应变等效原理,计算得出岩石的损伤劣化程度。考虑到岩石在工程中会经受爆破、冲击等动荷载的作用,平琦等^[5-6]采用分离式 Hopkinson 压杆装置 (Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB)。对岩石的动态劈裂拉伸性能进行了研究,得出冲击荷载作用下煤矿砂岩试件的拉伸应力表现出明显的应变率效应;许金余等^[7]对 3 种不同的岩石进行动态巴西劈裂试验,发现岩石的拉伸敏感系数随应变率的增加而增加,径向峰值应变与应变率成正比,岩石动态劈裂拉伸的最终破坏模式受冲击速度影响较大。

在寒区,环境温度在水的冰点上下浮动,反复的冻融循环导致岩石内部损伤逐渐积累,导致岩石物理力学性能的弱化^[8-10]。刘慧等^[11]对冻融循环后的砂岩进行了声发射试验,发现冻融作用可引起砂岩抗拉强度降低,随着冻融次数的增加,声发射持续时间缩短,岩样呈现由脆性破坏向延性破坏转变的趋势。此外宋彦琦^[12]、单仁亮^[13]、张慧梅^[14]、WANG 等^[15]也对冻融循环后岩石的物理力学特性进行研究。MA 等^[16]对冻融循环后岩石的动态单轴抗压强度和能量分布参数进行研究,试验结果表明,随着冻融循环次数的增加,动态单轴抗压强度呈对数下降趋势。相同冻融循环下,泥岩的动态冻融损伤系数大于砂质泥岩。近年来国内外学者对冻融循环后的岩石进行了静态和动态的单轴压缩试验,但对于冻融循环

后岩石静态和动态劈裂抗拉性能的对比分析相对较少。

以红砂岩为研究对象,利用 RMT-150B 岩石试验机和 SHPB 试验装置对冻融循环后红砂岩的静态和动态力学特性和破坏形态进行了系统地研究,后期为寒区岩体工程稳定性分析提供一定的试验依据。

1 红砂岩试样的制备与试验设计

1.1 红砂岩试样的制备

试验选用的红砂岩试样取自于安徽省淮南市某项目,红砂岩平均干密度 2.471 g/cm^3 ,平均孔隙率 2.486%,平均纵波波速 $2\,048.06 \text{ m/s}$,静态单轴抗压强度为 25.94 MPa,图 1 为利用扫描电子显微镜得到的常温下红砂岩的微观图片。劈裂试验采用 $\phi 50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 的红砂岩圆柱试样,将两端打磨平整,使其符合岩石动力学试验标准^[17]。

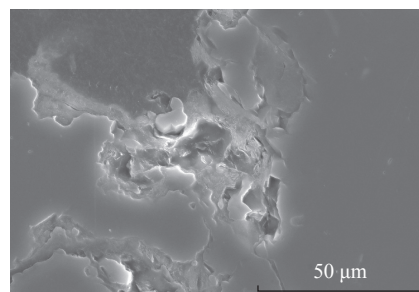


图 1 常温下红砂岩微观特性

Fig.1 Microscopic characteristics of red sandstone at room temperature

1.2 试验设计

首先将红砂岩放置在真空饱水机中浸泡 48 h,使试块完全饱和。其次将试块取出,采用保鲜膜密封后放入高低温循环试验箱中。冻结循环温度设置为 $-20 \sim 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (12 h 冻结, 12 h 融化),一次循环时间为 24 h,如图 2 所示。循环次数为 0、5、10、15、20 次,每组 3 个平行试件。静态试验采用 RMT-150B 岩石试验机,动态试验采用 50 mm 的 SHPB 装置,压杆材料为密度 7.8 g/cm^3 、弹性模量 210 GPa 的合金钢,纵波波速为 $5\,190 \text{ m/s}$,如图 3 所示,试验冲击气压为 0.4 MPa。

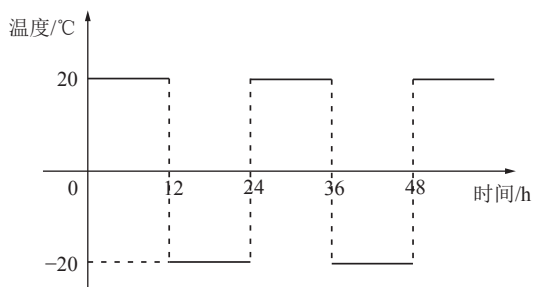


图2 冻融循环温度变化曲线

Fig.2 Temperature curve of freeze-thaw cycle

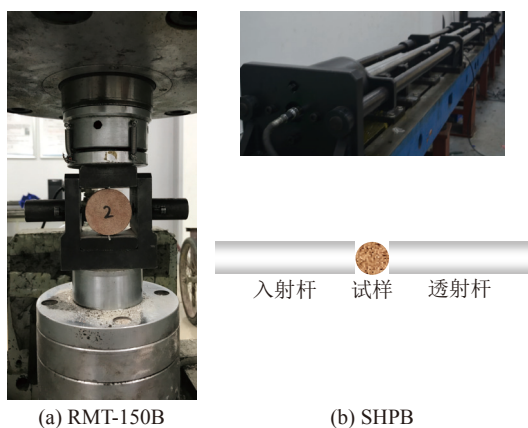


图3 静态和动态试验装置

Fig.3 Device for static and dynamic test

2 试验结果分析

2.1 数据处理方法

利用 RMT-150B 岩石试验机进行静态劈裂拉伸试验,通过式(1)计算出红砂岩静态劈裂拉伸强度^[18-19]。

$$\sigma_t(t) = \frac{2P}{\pi DH} \quad (1)$$

式中: σ_t 为岩石的劈裂拉伸强度; P 为破坏时的极限荷载; H 为圆柱体试样的高度; D 为圆柱体试样的直径。

通过黏贴在入射杆和透射杆上的应变片采集入射、反射和透射脉冲信号,由 SHPB 试验中的 2 个基本假定,将采集到的有效原始波形利用简化的三波法进行数据处理^[20],得到试件的径向荷载 $P(t)$,试件的应变 $\varepsilon(t)$ 和平均应变率 $\dot{\varepsilon}(t)$,如式(2)—式(4)所示:

$$P(t) = E_0 A_0 \varepsilon_T(t) \quad (2)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{2C_0}{D} \int_0^t \varepsilon_R(t) dt \quad (3)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = -\frac{2C_0}{D} \varepsilon_R(t) \quad (4)$$

式中: E_0 , A_0 , C_0 分别为压杆的弹性模量、横截面面积

和纵波波速的横截面面积; D 为试件直径; τ 为应力波持续时间; ε_T 和 ε_R 分别为测得的透射应变和反射应变。

2.2 冻融循环后红砂岩的物理特征

经过冻融循环前后红砂岩的纵波波速、干密度和孔隙率随循环次数的变化规律如图 4 所示。

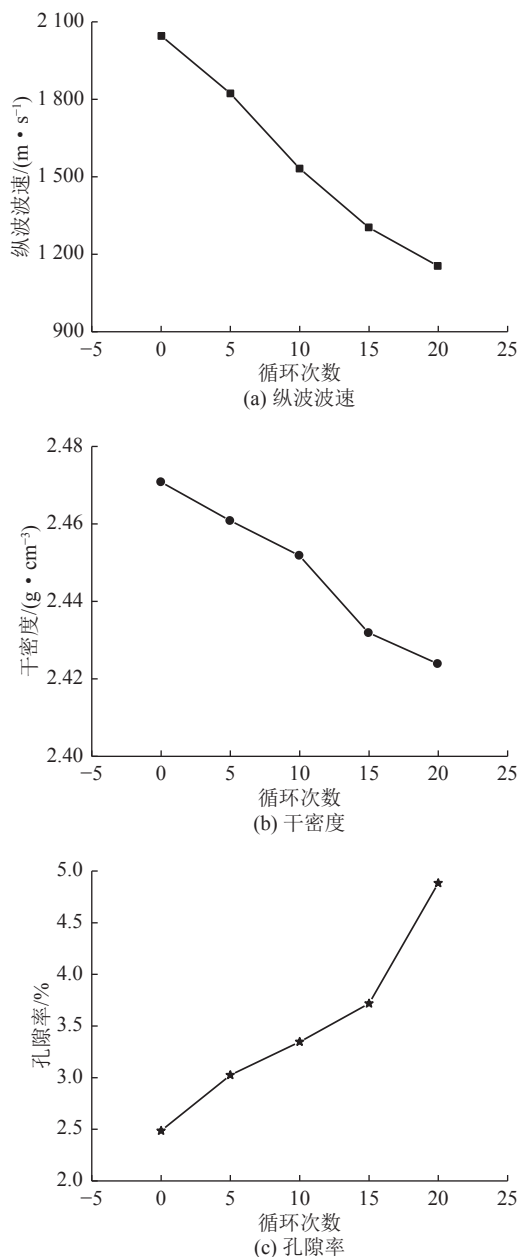


图4 冻融循环后红砂岩的物理特征

Fig.4 Physical characteristics of red sandstone after freeze-thaw cycles

从图 4 中可以看出,冻融循环后红砂岩的纵波波速和干密度随着循环次数的不断增加而逐渐减小,而孔隙率则随着循环次数的增加而逐渐增大。在 0 次循环时,红砂岩的纵波波速和干密度分别为 2 048.06 m/s 和 2.471 g/cm³;在 20 次循环时,红砂岩

的纵波波速和干密度分别为 1 155.01 m/s 和 2.424 g/cm³,下降了 43.6% 和 1.90%。在 0 和 20 次循环时,红砂岩的孔隙率分别为 2.486% 和 4.884%,上升了 96.46%。研究表明冻融循环后红砂岩内部裂隙不断扩展,孔洞尺寸增大,数量增多,矿物颗粒之间相互分离,其黏结力逐渐减弱,导致红砂岩脆性下降,塑性增大,更容易在试验中破裂,强度也会随之下降^[13]。

2.3 冻融循环对红砂岩动、静态劈裂强度的影响

将静态和动态的劈裂拉伸强度进行比较,如图 5 所示。

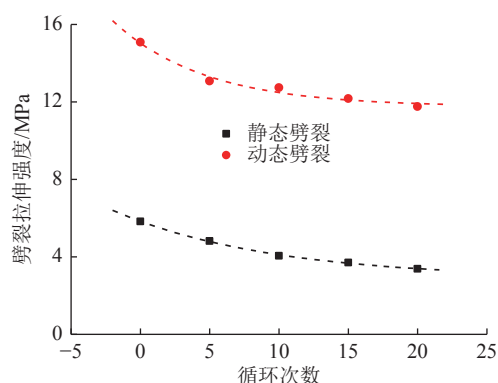


图 5 红砂岩劈裂拉伸应力—循环次数曲线

Fig.5 Splitting tensile stress-cycle number curve of red sandstone

可以看出,随着冻融循环次数的不断增加,动态、静态劈裂拉伸强度都在不断的减小,且静态劈裂强度小于动态劈裂强度,下降趋势符合式(5):

$$\sigma = A + B \exp(-n/C) \quad (5)$$

式中: σ 为劈裂强度; A, B, C 为常数,取值见表 1; n 为循环次数。

表 1 拟合常数数据
Table 1 Fitting constant data

试验状态	常数		
	A	B	C
静态劈裂试验	2.895	2.963	11.369
动态劈裂试验	11.795	3.295	6.640

未进行冻融循环时,红砂岩试件的动态和静态劈裂拉伸强度分别为 15.14 MPa 和 5.85 MPa,经过 5、10、15、20 次冻融循环以后,动态劈裂强度为 13.12、12.78、12.22、11.82 MPa,静态劈裂强度为 4.84、4.07、3.72、3.40 MPa。20 次冻融循环后,试件的静态、动态劈裂强度分别降低了 41.88% 和 21.93%。相同冻融循环次数下,红砂岩试件的动态劈裂强度比静态劈裂强度提高了 2.0~3.5 倍。

图 6 给出了红砂岩经过冻融循环后进行动、静态试验,在达到劈裂强度值时所用的时间,可以看出随着循环次数的增加,动态和静态荷载下试件达到劈裂强度峰值所需的时间就越长,这是由于冻融导致红砂岩的塑性增强,脆性减弱。

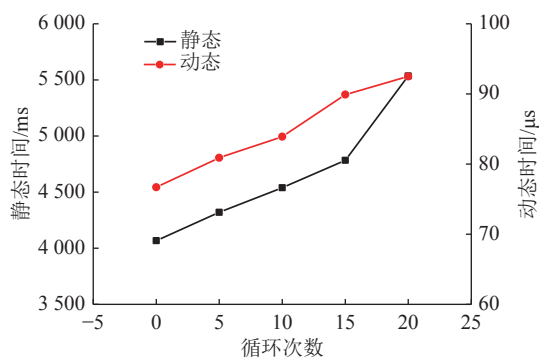


图 6 红砂岩时间-循环次数曲线

Fig.6 Time-cycle number curve of red sandstone

3 破坏形态及损伤特性

3.1 冻融循环后红砂岩破坏形态

图 7a 为冻融循环后红砂岩的静态破碎形态,不同循环次数后红砂岩的静态破坏形态基本相同,岩石破碎成 2 块,从中轴线垂直破坏,形成几乎相同的 2 个部分,一般无多余碎片产生。

图 7b—图 7f 为冻融循环后红砂岩的动态破碎形态,随着循环温度的下降,岩石破碎逐渐增大,不再形成如同静态破碎形态相似的两半,出现不均匀的破碎形态。经过动态劈裂拉伸试验后,红砂岩试件的破碎形态与静态相比有以下不同之处:①动态破碎形态加载两端出现明显的压碎区域,而静态破碎形态不明显。②红砂岩试件随着循环次数的不断增加破碎程度也在不断增大,碎块不断增多,尺寸不断减小,而静态破碎几乎相同。③红砂岩试件在入射杆接触面处的破碎面积比透射杆接触处的破碎面积略大,而静态破碎形态较均匀。

3.2 冻融循环后红砂岩的损伤特性

研究表明^[21],纵波波速能够评价试件的损伤程度,通过测量红砂岩试件在冻融循环前后的纵波波速,能够计算得出红砂岩试件的损伤程度:

$$D = 1 - \left(\frac{V_p}{V_0} \right)^2 \quad (6)$$

式中: D 为损伤度; V_p 和 V_0 分别为 n 次循环和 0 次循环时红砂岩试件的纵波波速。

图 8 为冻融循环后红砂岩的循环次数与损伤程度的关系曲线。从图 8 可以看出,随着循环次数的

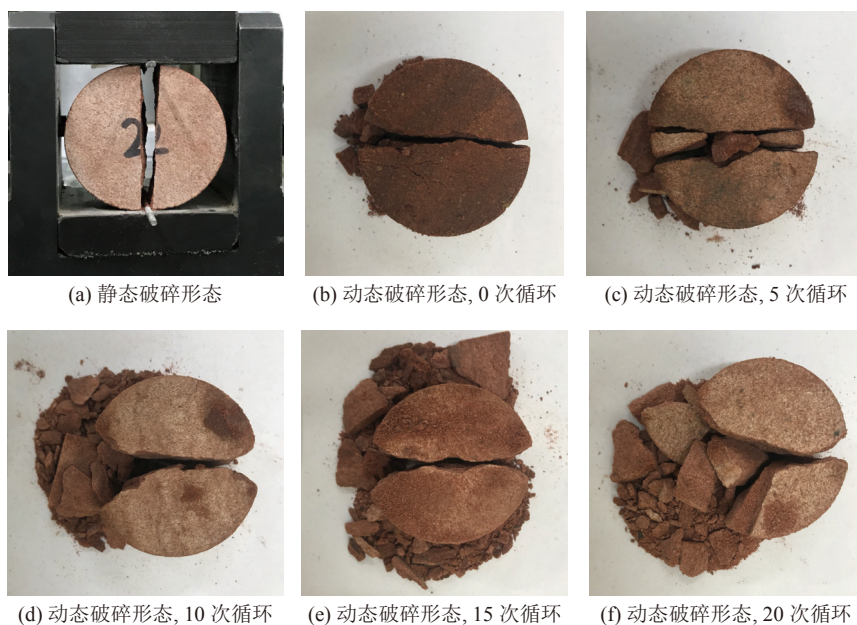


图7 冻融循环后红砂岩的破碎形态

Fig.7 Fracture morphology of red sandstone after freeze-thaw cycles

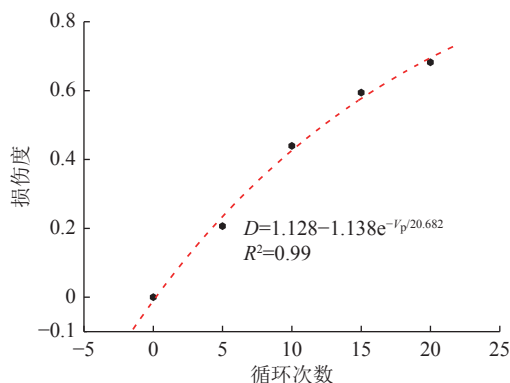


图8 循环次数与损伤度曲线

Fig.8 Curve of cycle number and damage

不断增加,红砂岩内部的损伤也在不断增大,二者呈对数关系。

4 结 论

1)红砂岩试件经过冻融循环后,纵波波速和干密度随着循环次数的不断增加而逐渐减小,而孔隙率和损伤度则逐渐增大。

2)随着冻融次数的不断增加,动态和静态劈裂拉伸强度都在不断下降,而达到峰值所需的时间逐渐增加。相同循环次数时,静态劈裂强度远小于动态劈裂强度。

3)与静态破碎形态相比,红砂岩试件的动态破碎形态在加载两端出现明显的压碎区域,且区域面积随循环次数的增加不断增大,破碎区的碎块尺寸逐渐减小。

参考文献(References):

- [1] HAO Y, HAO H, ZHANG X H. Numerical analysis of concrete material properties at high strain rate under direct tension[J]. International Journal of Impact Engineering, 2012, 39(2): 51-62.
- [2] 蔡美峰. 岩石力学与工程第2版[M]. 北京: 科学出版社, 2019. CAI Meifeng. Rock mechanics and engineering [M]. Beijing: Science Press, 2019.
- [3] 宫凤强, 李夕兵. 巴西圆盘劈裂试验中拉伸模量的解析算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 881-891. GONG Fengqiang, LI Xibing. Analytical algorithm to estimate tensile modulus in Brazilian disk splitting tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 881-891.
- [4] 钟 帅, 左双英, 罗 沙, 等. 含层理灰岩的巴西劈裂强度及拉裂损伤各向异性[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(16): 6578-6584. ZHONG Shuai, ZUO Zhuangying, LUO Sha, et al. Brazilian tensile strength and tensile damage anisotropy of laminated limestone[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(16): 6578-6584.
- [5] 平 琦, 马芹永, 张经双, 等. 高应变率下砂岩动态拉伸性能 SHPB试验与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(S1): 3363-3369. PING Qi, MA Qinyong, ZHANG Jingshuang, et al. SHPB tests and analysis of dynamic tensile performance of sandstone under high strain rate [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S1): 3363-3369.
- [6] 平 琦, 马芹永, 袁 璞, 等. 岩石试件 SHPB劈裂拉伸试验中能量耗散分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(3): 401-407. PING Qi, MA Qinyong, YUAN Pu, et al. Energy dissipation analysis of stone specimens in SHPB tensile test [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2013, 30(3): 401-407.
- [7] 许金余, 刘 石, 孙蕙香. 3种岩石的平台巴西圆盘动态劈裂拉伸

- 试验分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S1): 2814–2819.
- XU Jinyu, LIU Shi, SUN Huixiang. Analysis of dynamic split tensile tests of flattened Brazilian disc of three rocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S1): 2814–2819.
- [8] XU X T, WANG Y B, YIN Z H, *et al.* Effect of temperature and strain rate on mechanical characteristics and constitutive of frozen Helin loss[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2017, 136: 44–51.
- [9] 刘德俊, 浦海, 沙子恒, 等. 冻融循环条件下砂岩动态拉伸力学特性试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(8): 60–67.
- LIU Dejun, PU Hai, SHA Ziheng, *et al.* Experimental study on dynamic tensile mechanical properties of sandstone under freeze-thaw cycles[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(8): 60–67.
- [10] 陈招军, 王乐华, 王思敏, 等. 冻融循环条件下岩石加卸荷力学特性研究[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(1): 98–103.
- CHEN Zhaojun, WANG Lehua, WANG Simin, *et al.* Loading and unloading mechanical characteristics of rock under freezing-thawing cycles[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2017, 34(1): 98–103.
- [11] 刘慧, 蔺江昊, 杨更社, 等. 冻融循环作用下砂岩受拉损伤特性的声发射试验[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(4): 830–839.
- LIU Hui, LIN Jianghao, YANG Gengshe, *et al.* Acoustic emission test on tensile damage characteristics of sandstone under freeze-thaw cycle[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2021, 38(4): 830–839.
- [12] 宋彦琦, 刘济琛, 邵志鑫, 等. 冻融循环条件下灰岩物理力学性能试验[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(2): 741–746.
- SONG Yanqi, LIU Jichen, SHAO Zhixin, *et al.* Experimental study on physical and mechanical properties of limestone under freeze-thaw cycles[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(2): 741–746.
- [13] 单仁亮, 张蕾, 杨昊, 等. 饱水红砂岩冻融特性试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(5): 923–929.
- SHAN Renliang, ZHANG Lei, YANG Hao, *et al.* Experimental study of freeze-thaw properties of saturated red stone[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2016, 45(5): 923–929.
- [14] 张慧梅, 夏浩峻, 杨更社, 等. 冻融循环和围压对岩石物理力学性质影响的试验研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(2): 441–448.
- ZHANG Huimei, XIA Haojun, YANG Gengshe, *et al.* Experimental research of influences of freeze-thaw cycles and confining pressure on physical-mechanical characteristics of rocks [J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(2): 441–448.
- [15] WANG P, XU H Y. A prediction model for the dynamic mechanical degradation of sedimentary rock after long-term freeze-thaw weathering: considering the strain-rate effect[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2016, 131: 16–23.
- [16] MA Qinyong, MA Dongdong, YAO Zhaoming. Influence of freeze-thaw cycles on dynamic compressive strength and energy distribution of soft rock specimen[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2018, 153: 10–17.
- [17] ULUSAY J Hudson. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring [J]. *International Society for Rock Mechanics*, 2007: 1974–2006.
- [18] 闻名, 陈震, 许金余, 等. 不同含水率红砂岩静动态劈裂试验及微观分析[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(1): 86–92.
- WEN Ming, CHEN Zhen, XU Jinyu, *et al.* Static-dynamic split tensile tests and micro analysis on red-sandstone with different moisture contents[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2017, 13(1): 86–92.
- [19] 杨仁树, 李炜煜, 李永亮, 等. 3种岩石动态拉伸力学性能试验与对比分析[J]. 煤炭学报, 2020, 45(9): 3107–3118.
- YANG Renshu, LI Weiyu, LI Yongliang, *et al.* Comparative analysis tensile mechanical properties of three kinds of rocks[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(9): 3107–3118.
- [20] 平琦. 砂岩动静态拉伸力学性能试验与对比分析[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(2): 246–290.
- PIN Qi. Comparative analyses on dynamic and tensile performances of sandstone[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2013, 9(2): 246–290.
- [21] 李家欣, 袁维, 王伟, 等. 冻融循环条件下白云岩物理力学特性[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(2): 755–762.
- LI Jiaxin, YUAN Wei, WANG Wei, *et al.* Physical and Mechanical properties of Dolomite with freeze-thaw cycles[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(2): 755–762.