

不同加载速率下冻融砂岩的动态劈裂特性

贾蓬, 毛松泽, 钱一锦, 卢佳亮
(东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110819)

摘要: 为研究加载速率和冻融循环对砂岩动态劈裂特性的影响,对冻融0,25,50,75,100次的砂岩进行了静态和不同加载速率的动态劈裂试验,分析了冻融砂岩的静动态抗拉强度及冲击荷载作用下耗散能变化规律. 研究表明:冻融砂岩的静动态抗拉强度、纵波波速、质量损失率均随冻融次数增加而劣化. 随冻融次数、加载速率增加,动强度增加因子(DIF)不断增大,且砂岩冻融损伤越大,DIF随加载速率增加越明显. 建立的基于冻融损伤和加载速率的动态抗拉强度预测模型可以很好地反映砂岩的强度变化. 砂岩的冻融损伤越大,动态抗拉强度随加载速率的变化速率越快;冲击荷载作用下的耗散能随冻融次数增加而减小,随加载速率增加而增大.

关键词: 冻融循环;加载速率;损伤;动态抗拉强度;能量耗散

中图分类号: TU 452 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)01-0111-09

Dynamic Splitting Characteristics of Freeze-Thawed Sandstone at Different Loading Rates

JIA Peng, MAO Song-ze, QIAN Yi-jin, LU Jia-liang

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: JIA Peng, E-mail: polarjia@163.com)

Abstract: In order to study the effects of loading rate and freeze-thaw cycles on the dynamic splitting characteristics of sandstone, static and dynamic splitting tests with different loading rates were conducted on sandstone subjected to 0, 25, 50, 75 and 100 freeze-thaw cycles, and the static and dynamic tensile strength of freeze-thaw sandstone, as well as the change law of dissipation energy under impact load were discussed. The results show that the static and dynamic tensile strength, the P-wave velocity and the mass loss rate of freeze-thaw sandstone deteriorate with an increase in the number of freeze-thaws cycles. The dynamic strength increase factor (DIF) increases with the increase of freeze-thaw cycles and loading rate, and a higher degree of the freeze-thawing damage in sandstone results in a more significant increase in DIF with loading rate. The dynamic tensile strength prediction model based on freeze-thaw damage and loading rate can reflect the strength change of sandstone effectively. The greater the freeze-thaw damage of sandstone, the faster the change of dynamic tensile strength with loading rate. The dissipation energy under impact load decreases with the increase of freeze-thaw cycles and increases with higher loading rate.

Key words: freeze-thaw cycle; loading rate; damage; dynamic tensile strength; energy dissipation

冻融循环是影响寒区岩石工程稳定的重要因素,经过冻融循环后的岩石孔隙率增大、矿物质流失,严重削弱了岩石的抗压、抗拉等力学性能. 在寒区矿产资源开采及工程建设中岩石往往还要承受不同加载速率的爆破、振动等动荷

载的影响^[1]. 此外,岩石是一种典型的脆性材料,其抗拉强度远小于抗压强度,破坏的主要原因是岩石内部拉应力超过了其抗拉强度,并且实际工程中通常将抗拉强度作为评价岩石工程稳定的重要参数^[2]. 因此,研究冻融循环和加载

收稿日期: 2022-08-31

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC2903903); 国家自然科学基金资助项目(52174071).

作者简介: 贾蓬(1973-),女,内蒙古呼和浩特人,东北大学教授,博士生导师.

速率对岩石动态抗拉性能的影响具有重要工程意义。

目前,在冻融岩石的劣化机制及静态力学研究方面学者们取得了丰富的成果. Hori 等^[3]认为孔隙水在冻结时体积膨胀约 9% 会对岩石产生冻胀力,融化时冻胀力消失,反复的冻胀力导致了岩石出现冻融损伤. 近年来,显微观测、核磁共振(NMR)、CT 扫描等技术的发展为探究岩石的冻融损伤提供了更多手段. 刘杰等^[4]通过 CT 扫描提出了砂岩的层进式损伤过程,并探讨了砂岩表层剥落后两阶段层进式冻融损伤过程. 冻融损伤的产生直接影响了岩石的力学性能, Feng 等^[5]得出单轴压缩条件下,随冻融循环次数的增加,黄砂岩的弹性模量、峰值强度减小,峰值应变增大;杨鸿锐等^[6]、刘慧等^[7]的研究表明冻融砂岩的静态抗拉强度与冻融次数成反比; Mutlutürk 等^[8]、Jamshidi 等^[9-10]建立了静态强度指数衰减模型,为进一步评价岩石在冻融环境下的强度退化提供了理论支撑.

考虑到许多寒区岩石工程往往是劈裂失效破坏且要受到动荷载影响^[11],因此学者们针对冻融岩石的动态抗拉力学性能开展了一定研究,孟凡东等^[12]研究发现随冻融次数增加,砂岩动态抗拉强度不断减小,巴西圆盘的破坏面弯曲度不断增大;闻名等^[13]分析了不同含水率及冻融环境下砂岩的动态抗拉强度,并根据动态抗拉强度定义了软化系数与抗冻系数;Liu 等^[14]对冻融花岗岩进行了动态劈裂试验,并建立指数衰减模型用来评估动态抗拉强度. 上述研究多是基于单一加载速率进行的,而加载速率或应变率是影响岩石动态力学性能的重要因素,在不同加载速率或应变率下岩石的强度及变形特征将发生显著变化^[15]. 然而,目前关于不同加载速率下冻融岩石的动态抗拉性能的研究还不多见.

鉴于此,本文对冻融 0, 25, 50, 75, 100 次的砂岩进行了静态巴西劈裂和不同加载速率的 SHPB 动态劈裂试验,研究和探讨了冻融循环次数对砂岩静动抗拉强度、动强度增加因子(DIF)的影响,通过纵波波速定义冻融损伤因子并结合加载速率建立了冻融砂岩的动态抗拉强度经验方程,最后分析了冻融次数和加载速率对砂岩动态劈裂过程中耗散能的影响,通过上述研究以为寒区岩石工程建设提供参考.

1 试验方法

1.1 试件制备及冻融循环测试

试验所用砂岩来自四川隆昌某矿区,试样均钻取自同一块新鲜岩石,干密度约为 2.37 g/cm^3 ,干燥纵波波速约为 2900 m/s . 按照 ISRM 试验标准^[16],静态、动态巴西劈裂试样的高径比均为 1:2,考虑到动态冲击试验中霍普金森杆直径为 100 mm ,因此动静试验的砂岩试件尺寸均为 $\phi 100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$. 为减少岩石非均质性带来的误差,试验前先测量试件的质量、体积、纵波波速等基础参数,选取基础参数近似的试件作为本次试验所用试件.

将强制饱和处理的试件编号后放入 HDD 全自动冻融试验机(图 1a)中进行冻融循环试验,共设置 25, 50, 75, 100 次 4 组冻融循环试验,每组分别准备 3 块平行试件. 冻融循环温度、时间按照《工程岩体试验方法标准》(GB/T50266—2013)进行选择,温度曲线如图 1b 所示.

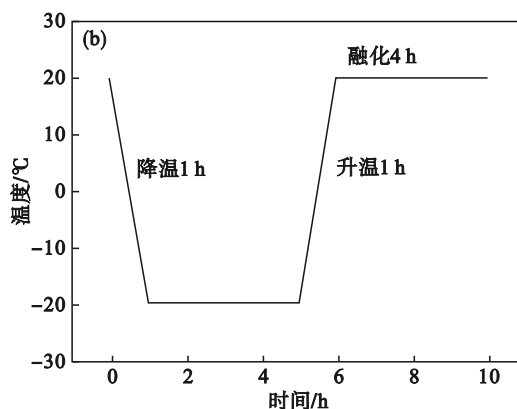


图 1 冻融循环测试

Fig. 1 Freeze-thaw cycle test

(a)—HDD 全自动冻融机; (b)—冻融循环温度曲线.

1.2 力学测试

1) 静态力学加载. 如图 2 所示,在岩石刚性试验机上进行静态劈裂力学试验,采用荷载控制的方式进行加载,加载速度为 1 MPa/s .

2) 动态力学加载. 使用 $\phi 100 \text{ mm}$ 的分离式

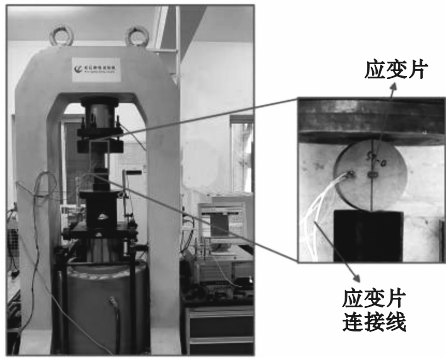


图2 静态力学加载装置

Fig. 2 Static mechanical loading device

霍普金森压杆(图3)对经历0, 25, 50, 75, 100次冻融循环的5组岩石分别进行4种冲击速度的动态劈裂试验(每组岩石平均冲击速度为4, 4.5, 5, 5.5 m/s). 为保证试验数据的准确性, 采用波形脉冲整形技术, 在入射杆的撞击面上粘贴直径35 mm、厚度2 mm的橡胶片. 图4为一试件撞击后的波形平衡图, 可以看到入射波+反射波与透射波重合较好, 可以认为试件在撞击时处于平衡状态, 然后利用图4及式(1)与式(2)^[12]计算得到该试件的动态拉伸应力时程曲线(图5).

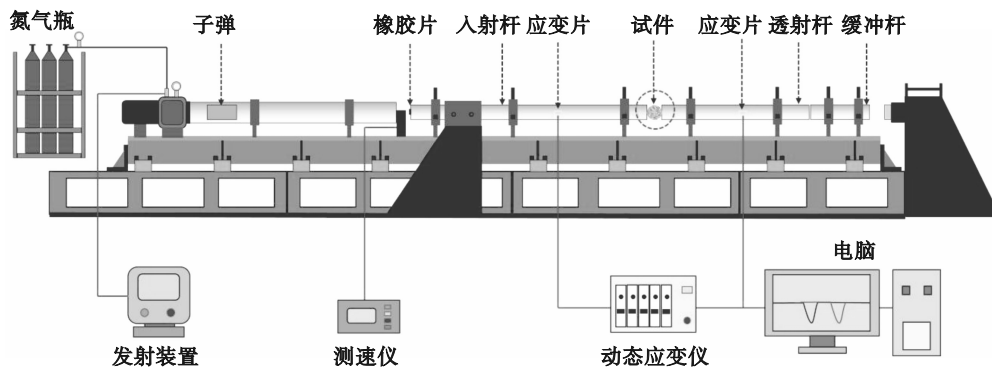


图3 SHPB加载装置

Fig. 3 SHPB loading device

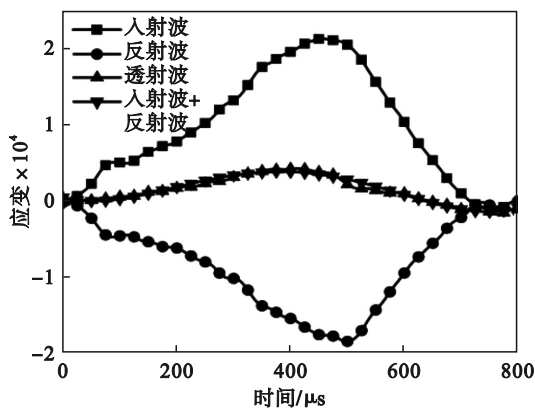


图4 波形平衡图

Fig. 4 Waveform balance diagram

$$\left. \begin{aligned} P_1(t) &= EA[\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t)], \\ P_2(t) &= EA\varepsilon_t(t), \\ P(t) &= \frac{1}{2}[P_1(t) + P_2(t)]; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\sigma_d^t = \frac{2P(t)}{\pi DL} \quad (2)$$

其中: $P_1(t)$, $P_2(t)$ 分别为试件两端的荷载; $P(t)$ 为试件两端荷载的平均值; E 为杆件的弹性模量 (206 GPa); A 为杆件的横截面积; $\varepsilon_i(t)$, $\varepsilon_r(t)$, $\varepsilon_t(t)$ 分别为入射波、反射波、透射波应变信号; σ_d^t 为试件的动态拉伸应力; D 为试件的直径 (100 mm);

L 为试件的厚度 (50 mm).

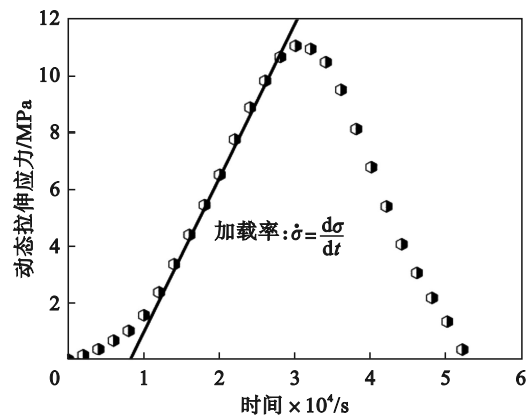


图5 加载速率计算原理

Fig. 5 Calculation principle of loading rate

如图5所示, 动态劈裂试验中岩石的加载速率 $\dot{\sigma}$ 可通过动态拉伸应力-时间曲线峰值前的直线段斜率来确定. 图6绘制了不同冻融次数砂岩的冲击速度与加载速率之间的关系, 每种冲击速度均对应着一个平均加载速率, 即4, 4.5, 5, 5.5 m/s 分别对应36.22, 43.08, 68.58, 113.8 GPa/s; 此外还可以看到, 冻融砂岩的加载速率均随着冲击速度增加而增加, 并且在相同的冲击速度下, 砂岩的冻融次数越多, 加载速率就越小.

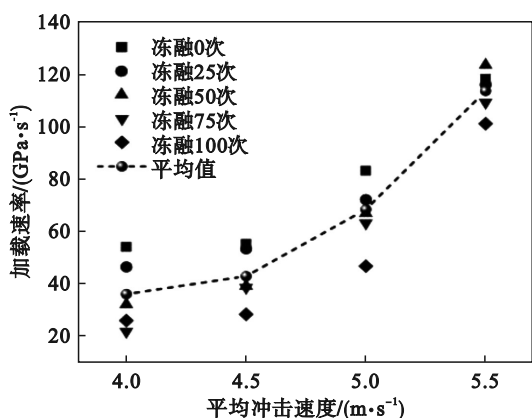


图6 冲击速度与加载速率的关系

Fig. 6 Relationship between impact velocity and loading rate

2 静态劈裂特性分析

图7a为不同冻融次数砂岩的荷载-位移曲线,可以看到冻融砂岩的变形过程均具有明显的阶段特征,加载初期曲线的斜率变化较小,随荷载及变形增加,曲线的变化逐渐呈线性增加趋势,直至达到峰值荷载时,曲线突然下降,试件劈裂为两个半圆(图7b).从图7b冻融砂岩的破坏模式可以看到,破坏后的砂岩试件主要表现为沿中心的一条主贯穿裂缝.

通过式(3)计算得到冻融砂岩破坏后的静态抗拉强度,如图7c所示.可以看到,冻融循环对于砂岩静态抗拉强度的劣化有显著影响,随冻融循环次数增加,冻融砂岩的静态抗拉强度逐渐减小,但减小幅度并不随冻融次数增加而均匀增加.随冻融循环次数增加,可将静态抗拉强度下降主要划分为两个阶段:第一阶段(0~50次),在冻融50次前,砂岩的静态抗拉强度降低幅度较小,下降了25.04%;第二阶段(50~100次),冻融50次后,砂岩的静态抗拉强度下降了52.04%,下降幅度更明显.质量损失率、纵波波速、含水率是描述砂岩冻融损伤的关键物理指标,故冻融砂岩抗拉强度的不均匀变化可通过冻融损伤特性来解释.如图8a所示,砂岩在冻融前50次,质量损失率的增加幅度为2.56%,冻融循环超过50次后,质量损失率增加了3.53%,增加幅度大于冻融前50次;如图8b所示,同样的冻融前50次纵波波速降低为11.13%,小于冻融后50次的12.89%;图8c中冻融前50次含水率的增加幅度0.75%,小于冻融后50次的0.90%.总的来说,质量损失率、纵波波速与抗拉强度均表现出一致的变化规律.

$$\sigma_s^i = \frac{2P_{\max}}{\pi DL} \quad (3)$$

其中: P_{\max} 为静态加载过程中的最大荷载; σ_s^i 为冻融砂岩的静态抗拉强度.

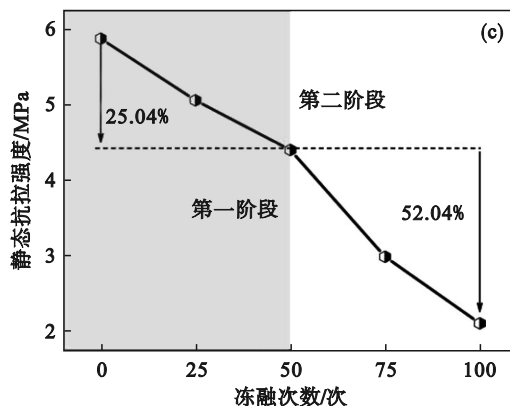
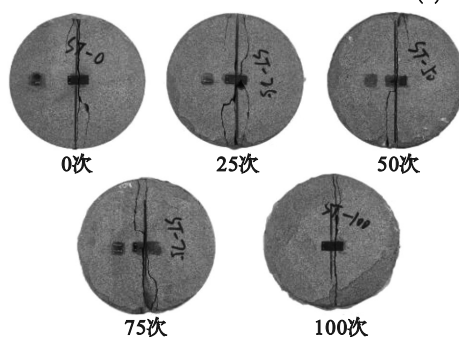
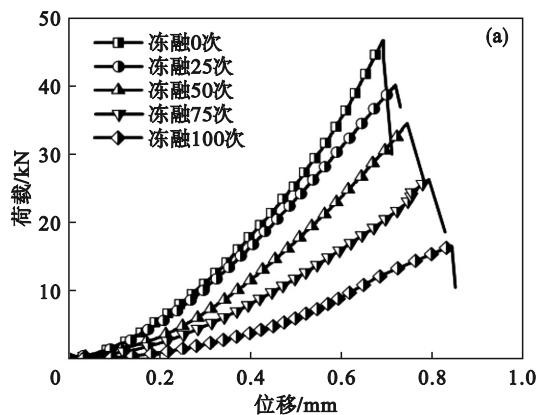


图7 静态条件下冻融砂岩的力学性能

Fig. 7 Mechanical properties of freeze-thaw sandstone under static conditions
(a)—位移-荷载曲线;(b)—破坏模式;(c)—抗拉强度.

3 动态劈裂特性分析

3.1 冻融砂岩的动态抗拉强度特性

如图9所示,通过式(1)、式(2)计算得到不同冻融次数及加载速率砂岩的动态拉伸应力-时间曲线.由图9可知,砂岩在动态劈裂拉伸试验过程中的拉应力-时间曲线受冻融次数 N 和加载速率 v 的影响显著.对于相同冲击速度的砂岩,冻融次数越少的试样,其拉应力时程曲线峰值应力

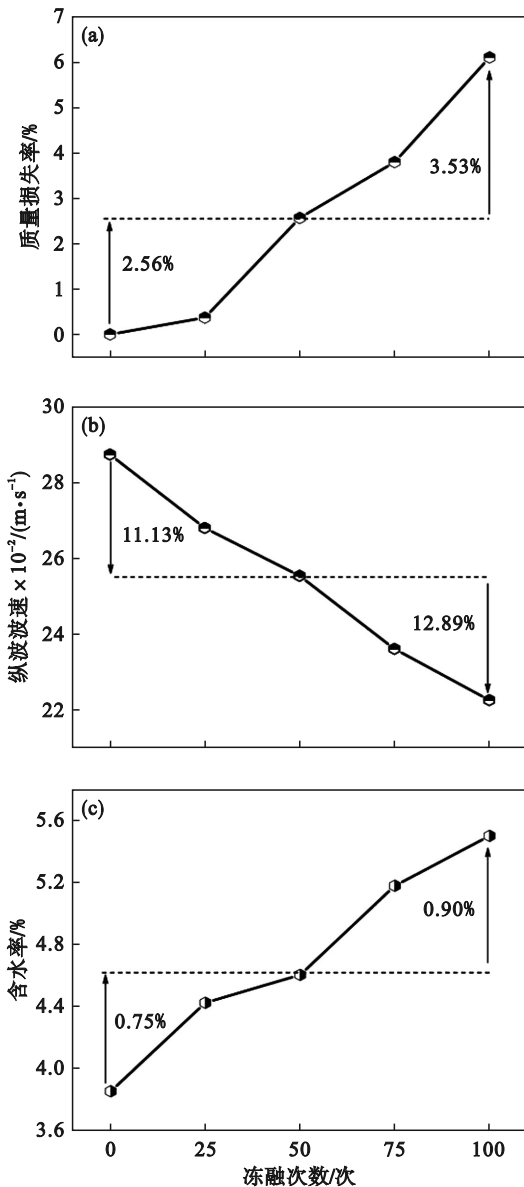


图 8 物理参数变化
Fig. 8 Physical parameters variation

(a) —质量损失率; (b) —纵波波速; (c) —含水率.

越大,峰值点前应力增长速度较快,峰值点后应力下降速度较快.

图 10 绘制了不同冻融次数下砂岩的动态抗拉强度,可以看到各加载速率下砂岩的动态抗拉

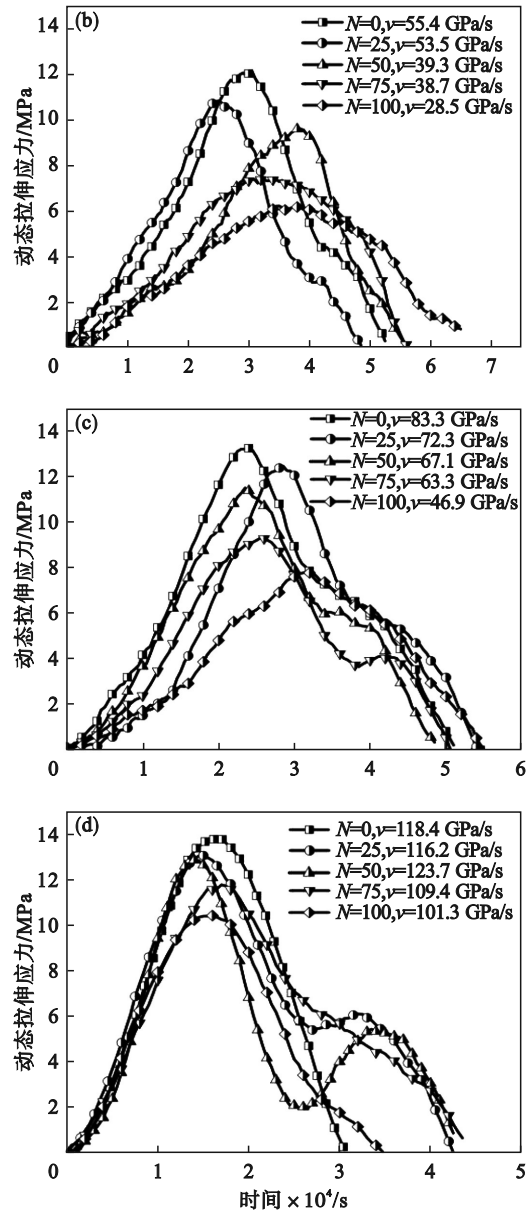
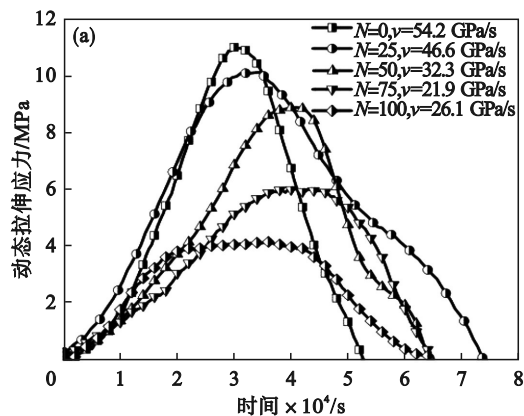


图 9 不同冲击速度下冻融砂岩的时间-应力曲线
Fig. 9 Time-stress curves of freeze-thaw sandstone at different impact velocities

(a) —平均冲击速度 4 m/s,平均加载速率 36.22 GPa/s;
(b) —平均冲击速度 4.5 m/s,平均加载速率 43.08 GPa/s;
(c) —平均冲击速度 5 m/s,平均加载速率 68.58 GPa/s;
(d) —平均冲击速度 5.5 m/s,平均加载速率 113.8 GPa/s.

强度均表现为下降趋势,但下降幅度不同. 在加载速率为 36.22, 43.08, 68.58, 113.8 GPa/s 时, 经历 100 次冻融循环后的砂岩动态抗拉强度分别降低了 61.49%, 50.74%, 41.13%, 24.35%, 这说明加载速率越大砂岩经历冻融循环后动态抗拉强度的降幅就越小, 加载速率对冻融砂岩的动态抗拉强度有一定的强化作用. 值得注意的是, 动态抗拉强度随冻融次数的变化规律与静态抗拉强度表现出相同的规律, 动态抗拉强度的下降也经历 2 个阶段: 缓慢下降段、急速下降段, 即前 50 次

冻融循环,砂岩的动态抗拉强度下降幅度较小,而后 50 次动态抗拉强度下降较大。

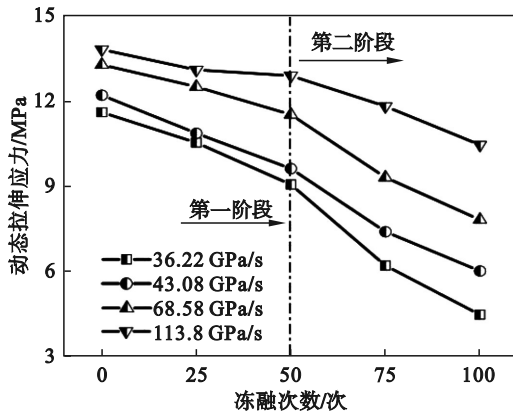


图 10 冻融次数与动态抗拉强度的关系

Fig. 10 Relationship between number of freeze-thaws and dynamic tensile strength

为描述冻融砂岩的冲击强化现象,定义动强度增加因子(DIF),如式(4)所示,它表示为动态抗拉强度与静态抗拉强度的比值.由图 11 可知,除加载速率 36.22 GPa/s 外,其余加载速率下,DIF 均随冻融循环次数增加而增加,这说明砂岩的冻融损伤越大、岩石越软弱,冲击强化现象就越明显.此外,加载速率对 DIF 也有一定影响,表现为加载速率越高,DIF 就越大,冲击强化越明显.

$$DIF = \frac{\sigma_d^t}{\sigma_s^t} \quad (4)$$

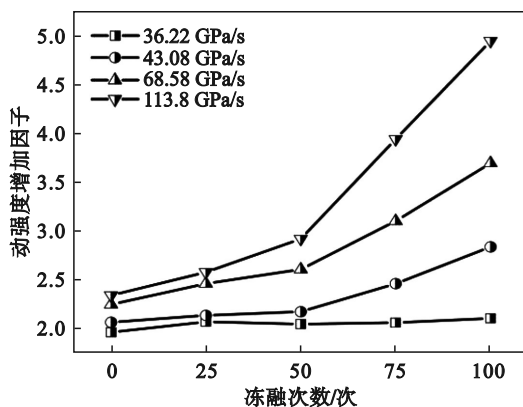


图 11 冻融次数与动强度增加因子的关系

Fig. 11 Relationship between number of freeze-thaws and dynamic strength increase factor

3.2 冻融砂岩的动态劈裂破坏模式

图 12 为不同冻融循环次数及冲击速度下砂岩的破坏模式.可以看到,砂岩的破坏与静态条件下的破坏模式相似,但动态荷载下砂岩的破坏更加剧烈,碎块明显增多,并且在相同冻融次数下随着冲击速度提高,砂岩的试样更加破碎;在相同冲击速度下,冻融循环次数对砂岩试样的动

态破坏模式影响不显著,并未出现文献[12]中得出冻融次数越多的砂岩破裂线越弯曲的现象,这可能是与不同砂岩内部结构特性不同有关.

3.3 基于冻融损伤和加载速率的强度模型

为分析加载速率、冻融损伤对砂岩动态抗拉强度的影响,通过纵波波速定义了砂岩的冻融损伤因子,如式(5)所示^[5].

$$D_n = 1 - \left(\frac{v_n}{v_0} \right)^2 \quad (5)$$

其中: D_n 为冻融损伤因子; v_0 为未冻融砂岩的纵波波速; v_n 为冻融 n 次后砂岩的纵波波速.

如图 13 所示,砂岩的冻融损伤因子随冻融循环次数增加而增加,这与砂岩的抗拉强度劣化相对应.

岩石或混凝土在高温热损伤、高加载速率下的强度可由式(6)进行预测^[17].因此本文借鉴式(6)并修正,得到式(7),式(7)的前一项可以反映冻融损伤的影响,后一项可以反映加载速率的影响.利用式(7),对不同加载速率及冻融损伤下的动态抗拉强度试验数据进行拟合,结果如表 1 和图 14 所示.由图 14 可知,冻融砂岩的动态抗拉强度均随加载速率的增加而增加,表现出明显的加载速率强化效应.此外,还注意到,冻融次数越多,砂岩的动态抗拉强度变化速率就越快,即冻融损伤大的砂岩对加载速率敏感性更大.

$$\sigma_d^t = (1 - D) \left[1 + \alpha \left(\frac{\dot{\sigma}_d}{\dot{\sigma}_s} \right)^\beta \right] \sigma_s^t \quad (6)$$

其中: σ_d^t 为高温后岩石的动态抗拉强度; σ_s^t 为常温岩石的静态抗拉强度; $\dot{\sigma}_d$ 为岩石的动态加载速率; $\dot{\sigma}_s$ 为岩石的静态加载速率; α, β 为参数.

$$\sigma_d^t(n) = (1 - D_n) \sigma_s^t(0) + \alpha \left(\frac{\dot{\sigma}_d}{\dot{\sigma}_s} \right)^\beta \sigma_s^t(0) \quad (7)$$

其中: $\sigma_d^t(n)$ 为冻融 n 次砂岩的动态抗拉强度; $\sigma_s^t(0)$ 为未冻融砂岩的静态抗拉强度; $\dot{\sigma}_d$ 为砂岩的动态加载速率; $\dot{\sigma}_s$ 为砂岩的静态加载速率(本试验为 1MPa/s); α, β 为拟合参数.

3.4 能量耗散规律分析

岩石动态劈裂破坏过程的耗散能量可以通过式(8)计算.

$$\left. \begin{aligned} W_i(t) &= EAC \int_0^t \varepsilon_i^2(\tau) d\tau, \\ W_r(t) &= EAC \int_0^t \varepsilon_r^2(\tau) d\tau, \\ W_t(t) &= EAC \int_0^t \varepsilon_t^2(\tau) d\tau, \\ W_s(t) &= W_i(t) - W_r(t) - W_t(t). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

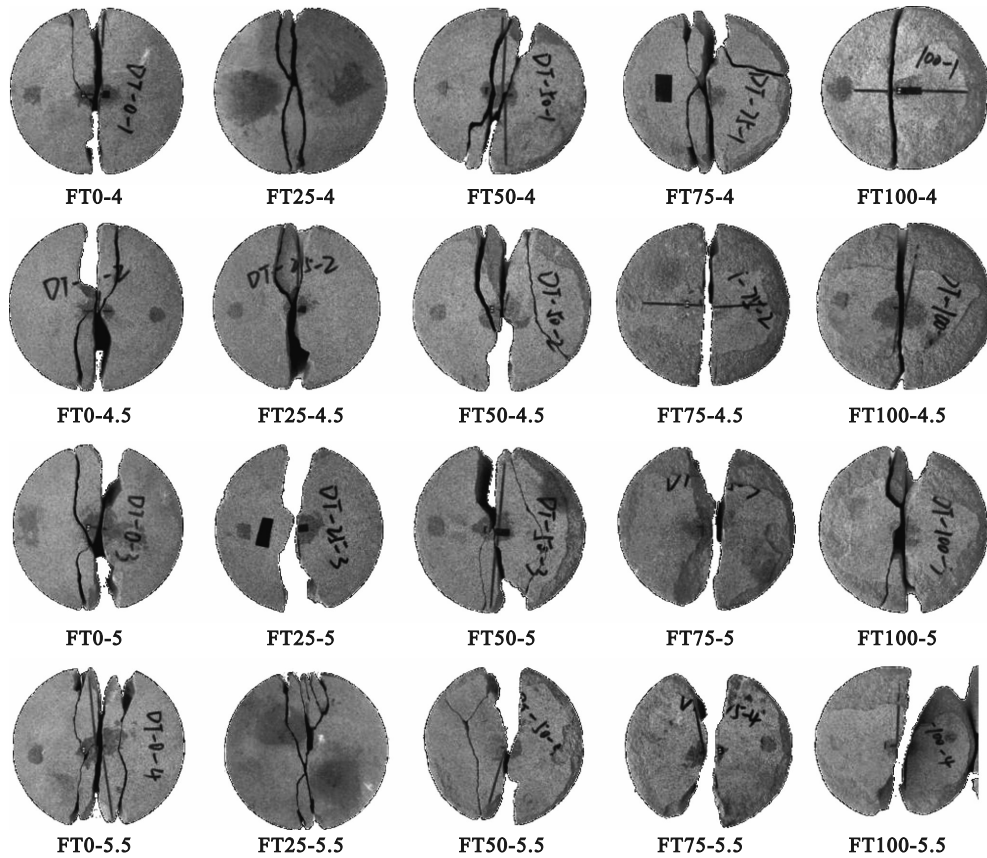


图 12 动态劈裂破坏模式

Fig. 12 Dynamic splitting damage model

注: FT*-#,其中“*”表示冻融次数;“#”表示冲击速度, m/s.

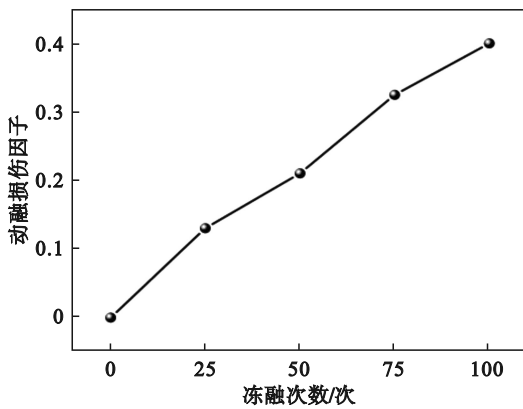


图 13 基于纵波波速的冻融损伤因子变化规律

Fig. 13 Freeze-thaw damage factor variation law based on P-wave velocity

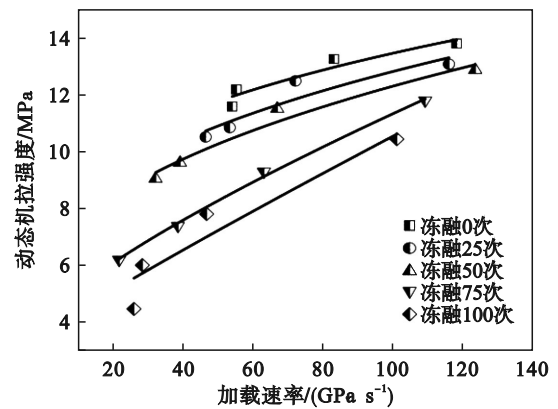


图 14 不同加载速率下冻融砂岩的动强抗拉强度

Fig. 14 Dynamic tensile strength of freeze-thaw sandstone at different loading rates

表 1 经验方程拟合参数

Table 1 Fitting parameters of empirical equation

冻融次数	冻融损伤因子	α	β	拟合度 R^2
0	0	0.019	0.37	0.91
25	0.13	0.011	0.41	0.89
50	0.21	0.007	0.45	0.95
75	0.33	1.64×10^{-4}	0.78	0.99
100	0.40	5.89×10^{-5}	0.86	0.92

其中: C 为杆件的纵波波速(5 122 m/s); $W_i(t)$, $W_r(t)$, $W_s(t)$ 分别为冻融砂岩的入射能、反射能、透射能、耗散能。

图 15 为冻融砂岩在冲击速度 5m/s 下的耗散能演化曲线, 可以看到, 冻融砂岩的耗散能随加载时间的增加而逐渐增大, 最终破坏时耗散能达到最大值。此外, 以冻融 100 次砂岩的耗散能演化曲线为例, 在冲击荷载作用下, 耗散能演化曲线主要经历 4 个阶段: I 阶段(压密阶段)、II 阶段

(弹性阶段)、III 阶段(屈服阶段)、IV 阶段(破坏阶段)。

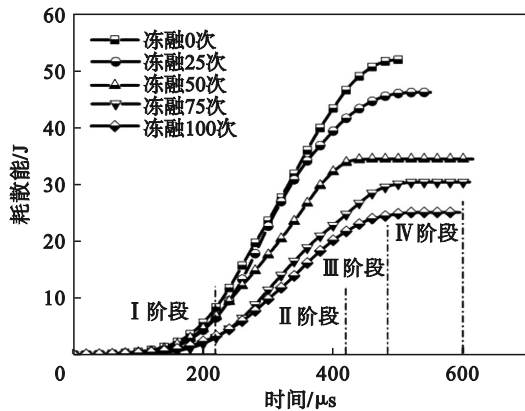


图 15 耗散能演化曲线

Fig. 15 Evolution curves of dissipated energy

冲击荷载作用下砂岩冻融次数与耗散能的关系见图 16,可以看出,各个平均加载速率下耗散能均随冻融次数增加而逐渐减小,100 次冻融后,4 种加载速率的耗散能分别降低了 63.2%, 53.5%, 51.7%, 46.3%。从冻融损伤角度分析可知,随着砂岩冻融次数增加,砂岩内部孔隙、空隙不断增大,组成砂岩的矿物颗粒之间的胶结能力减弱,矿物晶体之间的连接强度减弱,因此使得冻融次数多的砂岩在相同冲击速度下仅仅需要吸收少量的能量便可破碎。这与张站群等^[18]研究的灰岩化学腐蚀后的冲击耗散能随损伤增大而减小的主要原因相似。

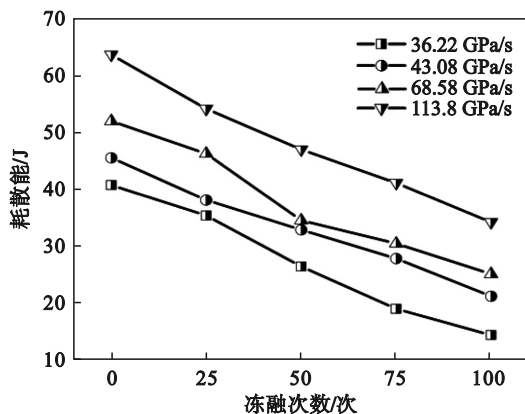


图 16 冻融次数与耗散能的关系

Fig. 16 Relationship between number of freeze-thaw and dissipated energy

图 17 为冻融砂岩加载速率与耗散能的关系。由图可知,随加载速率增加,冻融砂岩的耗散能逐渐增大,耗散能也表现出加载速率强化效应,二者大致呈线性关系。在冲击荷载作用下,岩石或混凝土材料的破碎程度随加载速率或冲击

速度的增加而增大,加载速率或冲击速度越大,破坏后产生的裂面就越多,耗散的能量就越多,因此冻融砂岩的耗散能表现出加载速率强化效应。

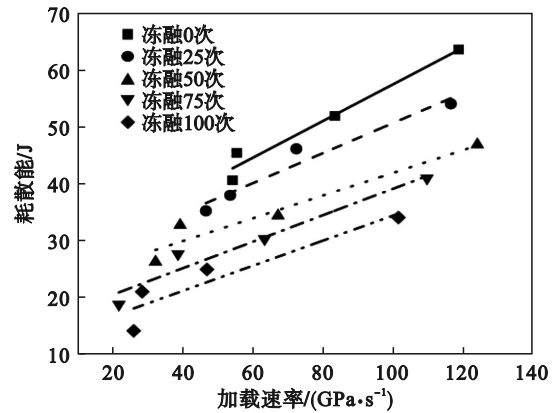


图 17 加载速率与耗散能的关系

Fig. 17 Relationship between loading rate and dissipated energy

4 结 论

1) 冻融砂岩的静动抗拉强度劣化规律与质量损失率、纵波波速、含水率密切相关。加载速率的增加对强度的降低有补偿作用。

2) 冻融砂岩的动态抗拉强度、动强度增加因子(DIF)均表现出明显的加载速率强化效应,且砂岩冻融损伤越大,加载速率强化效应越明显。

3) 本文所建立的基于冻融损伤和加载速率动态抗拉强度预测模型可以很好地反映砂岩的强度变化。

4) 冻融损伤会降低砂岩破坏时的冲击耗散能,100 次冻融后,随加载速率的增加,耗散能降低程度逐渐减小,表现出加载速率强化效应,二者近似呈线性关系。

参考文献:

- [1] Wang P, Xu J Y, Fang X Y, et al. Energy dissipation and damage evolution analyses for the dynamic compression failure process of red-sandstone after freeze-thaw cycles[J]. *Engineering Geology*, 2017, 221: 104-113.
- [2] 王成,王春,苏承东,等.不同加载速率对石灰岩巴西劈裂特性的影响[J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(5): 1036-1044.
(Wang Cheng, Wang Chun, Su Cheng-dong, et al. Effects of different loading rates on Brazilian tension characteristics of limestone [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2021, 38(5): 1036-1044.)
- [3] Hori M, Morihiro H. Micromechanical analysis on deterioration due to freezing and thawing in porous brittle materials[J]. *International Journal of Engineering Science*, 1998, 36(4): 511-522.
- [4] 刘杰,张瀚,王瑞红,等.冻融循环作用下砂岩层进式损伤

