



冻融循环下砂岩动力特性及其破坏规律

杨念哥¹, 周科平¹, 雷 涛^{1,2}, 李杰林¹, 宾 峰¹

(1. 中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083;

2. 武汉理工大学 资源与环境工程学院, 武汉 430070)

摘 要: 冻融作用下岩石的动态力学特性研究对揭示岩石冻融损伤机理及寒区岩体工程冻融灾害防控具有很重要的意义, 通过选取 5 组砂岩试样, 按照 -30~20 °C 的温度范围开展 0、20、40、60 和 80 次的冻融循环, 并利用霍普金森压杆装置对冻融循环后的试样开展冲击气压为 0.45 MPa 的动态力学试验, 从动态应力-应变曲线、动态强度、峰值应变和破坏形式等方面对冻融循环下砂岩的动力学特性和破坏规律进行研究。结果表明: 砂岩的动力学性能随冻融次数的增加而降低, 其主要的力学指标如动态弹性模量、动态强度及峰值应变均有所劣化; 砂岩内部损伤随冻融次数的增加而累积, 但累积速度不均匀, 当冻融次数为 40 时, 速度变缓, 这一现象在砂岩饱水质量、孔隙度、强度和峰值应变曲线上都有体现; 砂岩的破坏程度随冻融循环次数的增加而增加, 当循环次数为 0~40 时, 其破坏形式与未冻融时类似, 以轴向的拉伸破坏为主; 当循环次数为 60 和 80 时, 试样碎块呈均匀细小化分布。

关键词: 冻融循环; 砂岩; 岩石力学特性; 冲击试验; 动力破坏

中图分类号: TU45

文献标志码: A

季节和昼夜交替会产生周期性温度变化, 对寒区岩体工程而言, 这种温度变化产生的岩石冻融力学效应不能忽略^[1]。冻融条件下, 岩体力学性能劣化是一个非常复杂的过程, 除了与岩体自身的材料特性相关以外, 也与冻融温度、冻融周期、冻融次数、以及理化环境等密不可分^[2]。以 0 °C 等温线为界, 我国约有 2×10^6 km² 的寒区, 主要分布在我国东北、西北及西南的高海拔地区^[3]。我国寒区的区域性气候具有昼夜温差大和冬夏温差大两大特点。这些区域的浅层岩体存在强烈的周期性自然冻融作用。因此, 开展冻融作用下岩石动态力学特性与破坏规律研究对揭示岩石的冻融损伤机理及防治我国寒区岩体工程的冻融灾害具有很重要的意义。

目前, 国内外很多学者在岩石冻融损伤领域开展了研究, 取得了很多有价值的成果。MATSUOKA^[4-5]的研究指出温度、水分和岩石性质是影响岩石冻胀碎裂的主要因素, 而岩石的抗拉强度、比表面积、孔隙率对岩石的冻胀劣化程度影响最大。NICHOLSON 等^[6]通过裂隙岩石的冻融循环试验, 研究原生裂隙对

岩石冻融损伤劣化程度的影响。JAVIER 等^[7]研究了冻融作用下岩石典型物理力学性质的渐进劣化过程。VLAHOU 等^[8]则在建立水分迁移模型的基础上, 分析了岩石裂隙中冻胀力的产生和发展过程。AMITRANO 等^[9]通过声发射试验测试了热循环和冻融循环作用下岩石的破坏特征, 指出细观破裂事件随着岩石受热变化和冻融循环的过程而大量发生。国内, 周科平等^[10]和许玉娟等^[11]通过核磁共振测试研究了冻融作用下花岗岩的微观结构变化特征和损伤机制。ZHOU 等^[12]利用核磁共振测试研究了冻融作用下岩石的微观损伤特性。ZHANG 等^[13]运用应变等价原理, 结合冻融试验, 研究冻融受荷岩石的损伤模型。杨更社等^[14]利用不同围压和温度下煤岩和砂岩的单轴、三轴压缩试验, 研究冻结条件下岩石的强度特性。刘泉声等^[15-16]则着重研究了裂隙岩体在冻胀作用下的损伤特征。宾峰^[17]和 ZHOU 等^[12]通过核磁共振测试主要研究了冻融作用下均质岩石的微观损伤特征。但是, 在冻融岩石的动力学特性方面, 目前国内外的研究相对较少, 本试验研究工作对揭示冻融岩石的动力特性以及动力破坏

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51474252); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20130162120012); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2015IVA028)

收稿日期: 2015-10-23; **修订日期:** 2016-04-22

通信作者: 周科平, 教授, 博士; 电话: 13973173563; E-mail: kpzhou@vip.163.com

损伤规律具有先导意义。

基于我国寒区的气候特征以及试验设备条件,本文作者通过以砂岩的 $-30\sim-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻融循环试验为基础,利用霍普金森压杆对不同循环次数的试样进行冲击试验,对冻融循环下岩石的动力性能变化规律开展了研究,并探讨其动力破坏形式。

1 试验设计

1.1 试样制备

试样所用材料为颗粒均匀性与结构完整性较好的砂岩,并将岩石加工为高径比约为1:1的标准圆柱砂岩试样见图1,高约50 mm,直径约50 mm。对所有试样两端进行打磨,表面平整度误差控制在0.02 mm以内,上下两端面平行度误差控制在0.05 mm以内,端面垂直于试样轴线,最大偏差不大于 0.25° 。



图1 部分砂岩试样照片

Fig.1 Photo of part sandstone sample

1.2 试验设备

冻融试验采用苏州市东华试验仪器有限公司生产的TDS-300型冻融循环试验机。该冻融试验机内径尺寸为 $1175\text{ mm}\times 520\text{ mm}\times 500\text{ mm}$,冻结温度可控范围为 $-15\sim-40\text{ }^{\circ}\text{C}$,融解温度的可控范围 $15\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$,采用空气中冷冻、水中解融的方案满足岩石等材料的冻融过程。

岩石的冲击试验所采用中南大学资源与安全工程学院的霍普金森压杆测试装置(SHPB),可对岩石、混凝土等材料的冲击动力学响应特性进行测试。该装置的主要组成部分包括发射腔、冲头、入射杆、透射杆、能量吸收部件、加载围压部件、加载轴压部件和数据采集处理系统等(见图2)。该试验装置杆件采用铬合金钢,其密度为 7.810 kg/cm^3 ,泊松比为0.3,弹性波速为 5410 m/s ,入射杆和透射杆的直径为50 mm,两者的长度分别为2.0 m和1.5 m。



图2 霍普金森压杆

Fig.2 Split Hopkinson pressure bar

1.3 试验方案

根据相关规范^[18]及试验条件,单次岩石冻融循环周期为8 h,即岩样在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下干式冻结4 h,在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 水中融解4 h。

根据冻融循环次数将试验分为5组,5组冻融次数分别为0、20、40、60和80次,每组试样数量均为5个。冻融循环结束后,用霍普金森压杆测试装置以0.45 MPa的恒定冲击气压对每组试样开展冲击试验,测试岩石试样的动力特性。

在冲击试验的同时,另取5个试样进行水饱和和质量 and 孔隙度测试,分别记为试样F1~F5和A1~A5,每个试样均参与所有的冻融循环。

2 冻融循环下砂岩动力特性

2.1 动态应力-应变曲线变化规律

不同冻融循环次数下砂岩典型的动态应力-应变曲线如图3所示,由图3可知:

1) 与静态加载相比,动态压缩应力-应变曲线基本不存在压密阶段,一般分为弹性、屈服、破坏3个阶段。图3中5条曲线总体形态相似,也可用这3个阶段加以描述,可见这一特点与岩石是否发生冻融没有关系;

2) 随着冻融循环次数的增加,岩石的应力-应变曲线总体有向X轴收缩的趋势。由图3可知,在冲击气压一定的条件下,岩石的峰值应力随冻融循环次数的增加而减小,峰值应变和总体应变均随冻融循环次数的增加而增加。这一规律表明,冻融作用会使岩体内部产生损伤,且随着冻融次数的增加,岩石中的损伤也会不断累积,从而导致其力学性能下降;

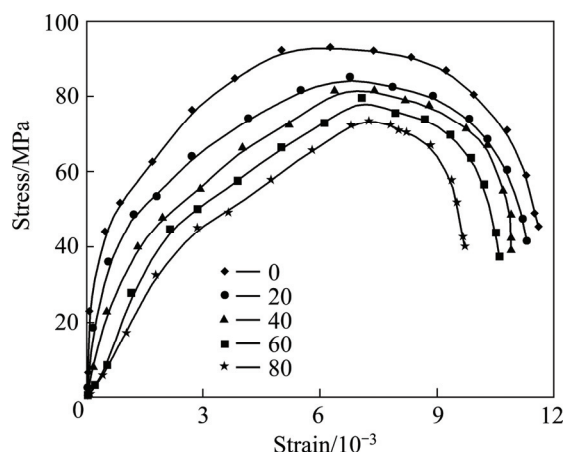


图 3 不同冻融循环次数下砂岩的动态应力-应变曲线

Fig. 3 Typical dynamic compression stress-strain curves of sandstones at different freeze-thaw cycles

3) 随着冻融循环次数的增加, 岩石动态弹性模量逐渐减小, 应力-应变曲线中的弹性阶段斜率与冻融循环次数呈负相关。0、20、40、60、80 次冻融循环其对应的弹性阶段应变分别为 3×10^{-4} 、 1.2×10^{-4} 、 1.3×10^{-4} 、 2.2×10^{-4} 、 2.8×10^{-4} , 即曲线的弹性应变越大, 同时, 其对应的应力值大体呈增加的趋势, 可见冻融循环次数越多, 弹性阶段越长, 这也是岩石损伤随冻融循环次数增加而不断累积的一个直观证据;

4) 随着冻融循环次数的增加, 岩石的脆性有减小趋势, 动态应力-应变曲线屈服阶段应力增加值减小, 岩石的脆性降低, 且达到破坏时的应变也增加, 这与冻融作用下砂岩的静态力学性质类似^[19]。

2.2 动态峰值强度变化规律

不同冻融循环次数下砂岩动态强度如图 4 所示。图 4 中每组 5 个黑色的散点代表了特定冻融循环次数下 5 个试样在相同冲击气压下的峰值强度, 蓝色点代表每组峰值强度的平均值, 蓝色曲线为不同循环次数下峰值强度的平均值曲线。

由图 4 可知:

1) 随着冻融循环次数的增加, 岩石的动态峰值强度减小。虽然不同试样的峰值强度有一定的离散, 但除个别特殊点以外, 这种趋势仍非常显著, 这说明冻融循环确实会导致岩石损伤的累积, 从而使得砂岩力学性能下降;

2) 砂岩动态峰值强度的下降与冻融循环次数的增加并非完全的线性关系。由平均值曲线可知, 当冻融循环次数为 40 次时, 砂岩的峰值动态强度偏离了曲

线的整体趋势, 出现了明显的上凸特征。出现这种情况的可能原因是当冻融循环次数不足时, 岩石裂隙中水的冻胀力尚不能完全克服砂岩试样之间的粘聚力, 从而使得裂隙进一步扩展或裂隙间贯通速度下降。

进一步考察同时进行的冻融循环下砂岩静态力学试验, 如图 5 所示。由图 5 可知, 砂岩静态峰值强度的冻融循环曲线也存在相同的现象, 这说明这一拐点存在的

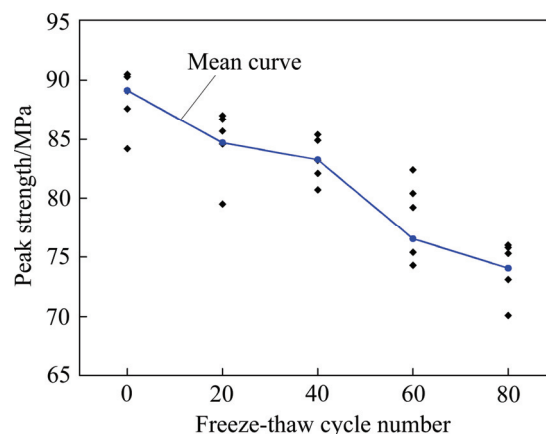


图 4 不同冻融循环次数下砂岩的动态强度

Fig. 4 Dynamic strengths of sandstones under different freeze-thaw cycles

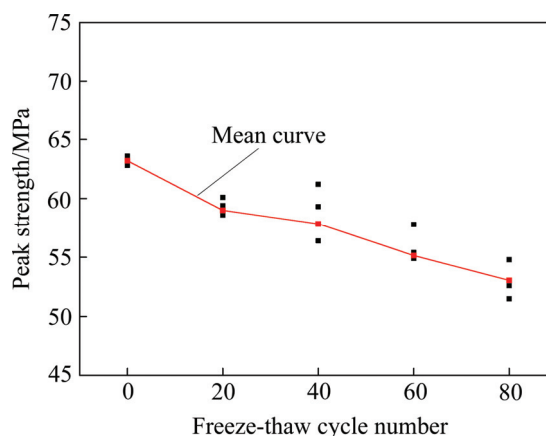


图 5 不同冻融循环次数下砂岩的静态强度

Fig. 5 Static strengths of sandstones under different freeze-thaw cycles

2.3 动态峰值应变变化规律

不同冻融循环次数下砂岩动态峰值应变如图 6 所示, 与图 4 类似, 黑色散点代表砂岩峰值应变, 蓝色点代表平均值, 蓝色曲线为不同循环次数下峰值应变的平均值曲线。

由图 6 可知:

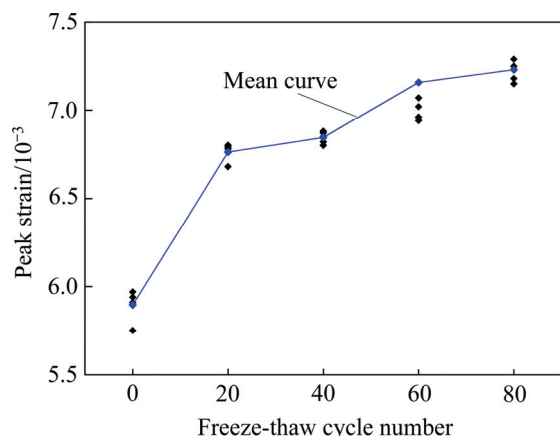


图6 不同冻融循环次数下砂岩的动态峰值应变

Fig. 6 Dynamic peak strains of sandstones under different freeze-thaw cycles

1) 随着冻融循环次数的增加,砂岩的动态峰值应变增加。这一特征直观地解释了图3中砂岩的应力-应变曲线的顶点随冻融次数增加右移的趋势。同时,这也说明了在冻融作用下,岩石内部会产生损伤,且损伤随冻融循环次数的增加而增加,表现在宏观力学上就是砂岩在破坏前可以忍受更大的应变;

2) 与动态强度的表现类似,砂岩动态峰值应变的增加与冻融循环次数的增加并非完全的线性关系。由平均值曲线可知,在0~20次冻融时,砂岩的峰值动态应变增量最大;在20~40次冻融时,砂岩的峰值动态应变增量最小;在40~80次冻融时,砂岩的峰值动态应变增量位于前二者之间。

上述的特征说明在初始冻融作用下,水的冻胀力使初始联结力较小的岩石颗粒间形成新的微裂隙并使原有较弱裂隙迅速扩展,导致岩石中初始损伤较快;动态峰值应变曲线在40次冻融时出现的拐点与此时期图4中的拐点是相关的;在40~80次冻融时应变增量较20~40次加速的原因则是随着冻融作用的不断累积,使得在原先不能被冻胀力扩张的裂隙被进一步扩展或贯通。

3 冻融循环下砂岩的破坏规律

不同冻融循环次数下砂岩典型动态破坏形式如图7所示。图7(a)、(b)、(c)、(d)、(e)分别代表冻融次数为0、20、40、60、80时对应的砂岩在恒定冲击气压下的破坏形式。

由图7可知,在一定的冻融循环次数范围内,冻

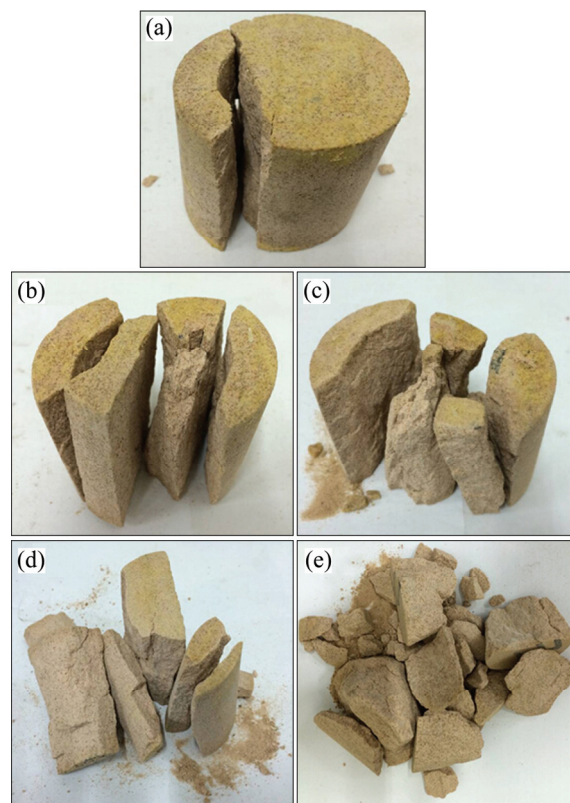


图7 不同冻融循环次数下砂岩典型动态破坏形式

Fig. 7 Dynamic failure characteristics of sandstones under different freeze-thaw cycles: (a) 0; (b) 20; (c) 40; (d) 60; (e) 80

融作用下砂岩的动态破坏主要以轴向的拉伸破坏为主。这与冻融循环砂岩的静态破坏形式一般呈“X”型贯穿剪切面^[19]不同,动态破坏明显呈试样轴向破坏形式,如在图7(a)的试样中有一个几乎完全平行于轴向的贯通破坏面,而在图7(b)和(c)都可明显看到多条相互平行的沿轴向贯通破坏面。

对均匀岩石试样而言,在一定的应变率下,由于作用在岩石轴向方向上的应力较大,因泊松效应的影响导致岩石试样径向变形比轴向变形显著得多,因此,一般表现为以轴向破坏面为特点的拉伸破坏特征。而在冻融过程中,在一定的冻融循环次数下,岩石内部因冻融导致的损伤累积得不够多,不足以主导裂隙的扩展,此时岩石虽然出现岩石力学性能下降的现象,但其破坏形式仍符合上述岩石冲击动态破坏规律。

同时还可以知道,随着冻融循环次数的增加,岩石破坏剧烈程度越大,也破坏地越均匀。

由图7可知,冻融循环次数越多,试样破坏后的碎块体积变小、数量增多、块度越均匀。在冻融循环次数为0、20和40时,岩石轴向贯穿的破坏面非常清晰;在冻融循环次数为60时,岩石试样的贯穿面尚可

看出, 但破坏面形状已不太规整, 且已有较小的岩块和岩屑出现; 当冻融循环次数达到 80 次时, 岩石试样碎块呈现均匀细小化分布, 同时伴随大量粉末状碎屑产生。

分析其原因, 可知随着冻融循环次数的增加, 岩石内部的孔隙数量和大小均不断累积增加, 且大量裂隙相互之间相连接通, 相似尺寸的孔隙呈现集中化分布, 导致碎块均匀细小化现象的发生。这一点可以在图 8 中得到一定程度的验证。

图 8 所示为不同冻融循环次数下砂岩饱水质量变化曲线和砂岩孔隙度变化曲线。由图 8 可知, 随着冻融循环次数的增加, 砂岩饱水质量和孔隙度均随之增加, 这是岩石试样内部损伤累积增加的直接证据。

值得注意的是, 岩石饱水质量和空隙度的变化曲线与其动态强度和峰值应变均值变化曲线有相似的特征, 即在冻融次数在 40 次时出现了拐点, 此时两者增加的速度较曲线整体较缓, 这在试样 F1、F3 和 F5 的

曲线上都表现得较为显著。

4 结论

1) 砂岩的动力学性能随冻融循环次数的增加而降低。在 $-30\sim-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冻融循环下, 冻融循环次数越多, 砂岩的动态应力-应变曲线有向应变轴(X轴)收缩的趋势, 其动态弹性模量、动态强度均降低, 峰值应变增加。

2) 砂岩内部累积损伤并非随冻融次数的增加而均匀增加, 在冻融次数为 40 次左右时增速较缓。不同冻融循环次数下砂岩的饱水质量、孔隙度、静态强度、动态强度和峰值应变变化曲线均显示, 在冻融次数为 40 左右时对应的值出现明显偏移整体曲线趋势的特点, 其可能的原因是当冻融循环次数不足时, 冻胀力尚不能完全克服砂岩试样之间的粘聚力, 从而使得裂隙进一步扩展或裂隙间贯通速度下降。

3) 冻融循环次数越多, 在恒定冲击气压下, 砂岩破坏的剧烈度和均匀度都增加, 但在一定的冻融循环次数下, 其破坏形式与未冻融时类似。试验结果显示, 当循环次数在 0~40 次时, 砂岩试样以轴向的拉伸破坏为主, 但破坏面的数量随冻融循环次数的增加而增加, 且在冻融次数为 60 次和 80 次时, 岩石试样碎块呈现均匀细小化分布, 同时伴随大量粉末状碎屑产生。

REFERENCES

- [1] 徐光苗, 刘泉声. 岩石冻融破坏机理分析及冻融力学试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3076-3082.
XU Guang-miao, LIU Quan-sheng. Analysis of mechanism of rock failure due to freeze-thaw cycling and mechanical testing study on frozen-thawed rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3076-3082.
- [2] 张继周, 缪林昌, 杨振峰. 冻融条件下岩石损伤劣化机制和力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1688-1694.
ZHANG Ji-zhou, MIAO Lin-chang, YANG Zhen-feng. Research on rock degradation and deterioration mechanisms and mechanical characteristics under cyclic freezing-thawing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1688-1694.
- [3] 黄小铭. 我国寒区道路工程中冻土问题研究的回顾[J]. 冰川冻土, 1988, 10(3): 344-351.
HUANG Xiao-ming. Review about the research on permafrost problems of road engineering in cold region, in China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1988, 10(3): 344-351.

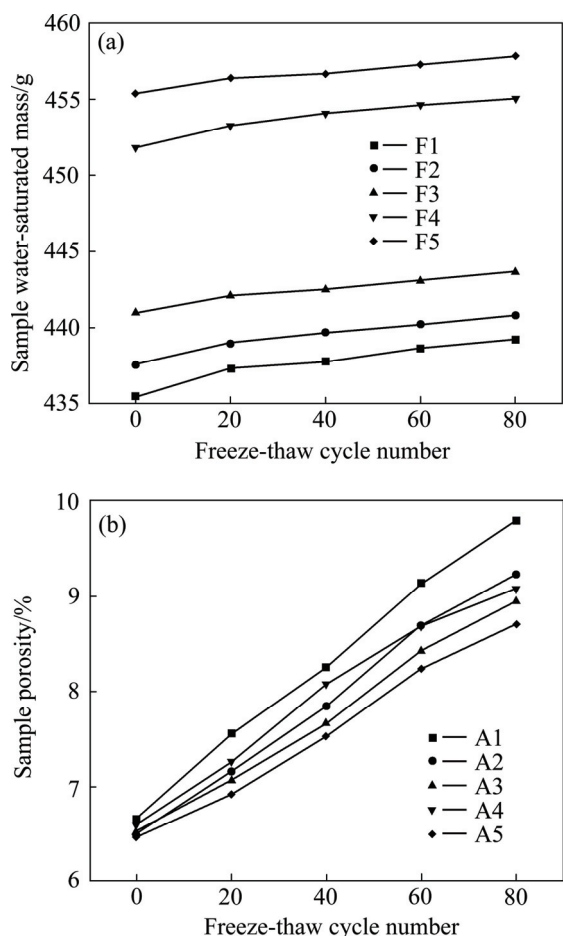


图 8 不同冻融循环次数下砂岩饱水质量变化和孔隙度变化曲线

Fig. 8 Variation curves of sandstones saturated(a) and sandstones porosity(b) under different freeze-thaw cycles

- [4] MATSUOKA N. The rate of bedrock weathering by frost action: field measurements and a predictive model[J]. *Earth Surface Processes and Land forms*, 1990, 15(1): 73–90.
- [5] MATSUOKA N. Mechanisms of rock breakdown by frost action: an experimental approach[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1990, 17(3): 253–270.
- [6] NICHOLSON D T, NICHOLSON F H. Physical deterioration of sedimentary rocks subjected to experimental freeze-thaw weathering[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2000, 25(12): 1295–1307.
- [7] JAVIER M M, DAVID B, MIGUEL G H, LUZ M C, MANGELES G C. Non-linear decay of building stones during freeze-thaw weathering processes[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 38: 443–454.
- [8] VLAHOI I, WORSTER M G. Ice growth in a spherical cavity of a porous medium[J]. *Journal of Glaciology*, 2010, 56(196): 271–277.
- [9] AMITRANO D, GRUBER S, GIRARD L. Evidence of frost-cracking inferred from acoustic emissions in a high-alpine rock-wall[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, 341: 86–93.
- [10] 周科平, 李杰林, 许玉娟, 张亚民, 杨培强, 陈路平. 冻融循环条件下岩石核磁共振特性的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(4): 731–737.
ZHOU Ke-ping, LI Jie-lin, XU Yu-juan, ZHANG Ya-min, YANG Pei-qiang, CHEN Lu-ping. Experimental study of NMR characteristics in rock under freezing and thawing cycles[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 2012, 31(4): 731–737.
- [11] 许玉娟, 周科平, 李杰林, 张亚民. 冻融岩石核磁共振检测及冻融损伤机制分析[J]. *岩土力学*, 2012, 33(10): 3001–3006.
XU Yu-juan, ZHOU Ke-ping, LI Jie-lin, ZHANG Ya-min. Study of rock NMR experiment and damage mechanism analysis under freeze-thaw condition[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(10): 3001–3006.
- [12] ZHOU Ke-ping, LI Bin, LI Jie-lin, DENG Hong-wei, BIN Feng. Microscopic damage and dynamic mechanical properties of rock under freeze-thaw environment[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015, 25(4): 1254–1261.
- [13] ZHANG Hui-mei, YANG Geng-she. Research on damage model of rock under coupling action of freeze-thaw and load[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(3): 471–476.
- [14] 杨更社, 奚家米, 邵学敏, 李慧军, 程磊. 冻结条件下岩石强度特性的实验[J]. *西安科技大学学报*, 2010, 30(1): 14–18.
YANG Geng-she, XI Jia-mi, SHAO Xue-min, LI Hui-jun, CHENG Lei. Experimental study on rock strength properties under freezing conditions[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2010, 30(1): 14–18.
- [15] 刘泉声, 康永水, 刘小燕. 冻结岩体单裂隙应力场分析及热-力耦合模拟[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(2): 217–225.
LIU Quan-sheng, KANG Yong-shui, LIU Xiao-yan. Analysis of stress field and coupled thermo-mechanical simulation of single-fracture freezed rock masses[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(2): 217–225.
- [16] 刘泉声, 黄诗冰, 康永水, 崔先泽. 裂隙岩体冻融损伤研究进展与思考[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(3): 452–471.
LIU Quan-sheng, HUANG Shi-bing, KANG Yong-shui, CUI Xian-ze. Advance and review on freezing-thawing damage of fractured rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(3): 452–471.
- [17] 宾峰. 冻融循环作用下岩石动态力学特性及微观机理研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
BIN Feng. Study on dynamic mechanical properties and micro-structure mechanism of rock under freeze-thaw cycles[D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [18] 中华人民共和国国家发展与改革委员会. DL/T5368—2007 水电水利工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
People's Republic of China National Development and Reform Commission. DL/T5368 — 2007 Code for rock tests of hydroelectric and water conservancy engineering[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2007.
- [19] 张慧梅, 杨更社. 冻融岩石损伤劣化及力学特性试验研究[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(10): 1756–1762.
ZHANG Hui-mei, YANG Geng-she. Experimental study of damage deterioration and mechanical properties for freezing-thawing rock[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(10): 1756–1762.

Sandstones dynamic mechanical properties and failure characteristics under freeze-thaw cycles

YANG Nian-ge¹, ZHOU Ke-ping¹, LEI Tao^{1,2}, LI Jie-lin¹, BIN Feng¹

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. School of Resources and Environment Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Dynamic properties study on rock under freeze-thaw cycles is meaningful for revealing the rock damage mechanism under freeze-thaw and preventing the freezing-thawing disaster of geotechnical engineering in cold regions. The freeze-thaw cycles experiments of 0, 20, 40, 60 and 80 times during $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ by five groups sandstone samples were made, and then, the SPHB was used to test the dynamic mechanical properties of sandstone samples under the constant impact load which is 0.45 MPa, the sandstones dynamic mechanical properties and failure characteristics were studied from the dynamic stress strain curves, dynamic strength, peak strain and failure modes. The results show that, as the freeze-thaw cycle increasing, the sandstones dynamic mechanical property decreases, the main mechanical indices, such as dynamic elasticity modulus, dynamic strength and peak strain, are degradation. The inner damage grows with the increasing of the freeze-thaw cycles times, but the growth rate is uneven, the growth rate slow down at 40 times freeze-thaw cycles and this phenomenon also reflects in indices, such as saturated mass, porosity, strength and peak strain. The damage degree of sandstone samples also increases with the increase of the freeze-thaw cycles times, and which is similar to none freeze-thaw, the dynamic damage mode is main tensile fracture by axial direction at 0–40 times cycles, and the fragments of samples are even and tiny at 60 and 80 times cycles.

Key words: freeze-thaw cycle; sandstone; rock mechanical property; impact mechanical experiment; dynamic damage

Foundation item: Project(51474252) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (20130162120012) supported by the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China; Project(2015IVA028) supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China

Received date: 2015-10-23; **Accepted date:** 2016-04-22

Corresponding author: ZHOU Ke-ping; Tel: +86-13973173563; E-mail: kpzhou@vip.163.com

(编辑 李艳红)