

# 饱水冻结花岗岩动态力学性状的应变率效应\*

王建国<sup>1,2</sup>, 雷振<sup>3</sup>, 杨阳<sup>2,4</sup>, 李祥龙<sup>2</sup>, 郭延辉<sup>1</sup>

(1. 云南农业大学 建筑工程学院, 昆明 650201; 2. 昆明理工大学 国土资源与工程学院, 昆明 650093;  
3. 贵州理工学院 矿业工程学院, 贵阳 550025; 4. 云南农业大学 水利学院, 昆明 650201)

**摘要:**从某场地钻取典型花岗岩岩芯试样,借助75 mm直径SHPB装置和低温冻结设备,分别对-15℃和25℃饱水花岗岩试件施加应变率大小近乎相等的4种冲击荷载,以探究饱水冻结花岗岩动力学特性的应变率效应。试验结果表明:同等应变率冲击加载下,饱水冻结花岗岩的峰值强度更高,抗剪切强度增加,动态弹性模量变为近似直线型增长;相比25℃饱水花岗岩,-15℃饱水冻结花岗岩破坏需要更高的冲击应变率,破坏时的峰值应变减小。饱水冻结花岗岩内部复合结构裂纹的形成与耗散能紧密相关,耗散能越大,裂纹越多,用耗散能表征的损伤变量值可以判断岩石的破碎程度,-15℃冻结饱水花岗岩破坏时的损伤变量值为0.22。研究方法为确定高寒地区冻结岩体的动力学参数提供依据。

**关键词:**冻结花岗岩;应变率效应;SHPB;动力响应;能量耗散;损伤

中图分类号:TU45

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2018)05-1292-06

## Strain Rate Effect of Dynamic Mechanical Characteristics of Saturated Freezing Granite

Wang Jianguo<sup>1,2</sup>, Lei Zhen<sup>3</sup>, Yang Yang<sup>2,4</sup>, Li Xianglong<sup>2</sup>, Guo Yanhui<sup>1</sup>

(1. College of Civil and Architectural Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, P.R. China;  
2. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, P.R. China;  
3. Institute of Mining Engineering Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550025, P.R. China;  
4. College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, P.R. China)

**Abstract:** In order to study the dynamic characteristics of granite under complex environment, a typical granite core sample was drilled from a site. The dynamic mechanical tests were conducted under different strain rates on fully saturated granite under the temperature of -15℃ and 25℃ with a Φ75mm SHPB device and cryogenic equipment. Then the strain rate effect on the dynamic characteristics of the frozen granite were analyzed. The test results show as follows: (1) Under the load of equal strain rate, the peak strength of the frozen granite was higher, the shear strength increased, and the growth patterns of dynamic elastic modulus changed to approximate linear. (2) To compare with 25℃ saturated granite, the destruction of -15℃ saturated frozen granite requires a higher impact strain rate but low peak strain. (3) Impact incident energy is mainly used for breaking the original structure and freezing effect of frozen granite to form internal cracks. The formation of the crack is closely related to the dissipation energy. The larger the dissipation energy, the more the cracks, the value of the damage variable represented by the dissipation energy can

\* 收稿日期:2018-04-17(修改稿)

作者简介:王建国(1987-),男,河南信阳人,博士后,讲师,主要从事爆破技术和冲击动力学方面的研究。

E-mail:wangjg0831@163.com

通讯作者:杨阳(1988-),男,河南信阳人,博士后,讲师,主要从事爆破数值计算与动力学研究。

E-mail:519485237@qq.com

基金项目:国家自然科学基金(51664007, 51564027);云南省科技厅基础研究青年项目(2016FD029);云南省教育厅科学研究基金(2016ZZX108)

determine the fracture degree of the rock. The damage variable value is 0.22 of saturated frozen granite under  $-15^{\circ}\text{C}$  temperature state. The research method provides the basis for determining the dynamic parameters of frozen rock mass in high cold region.

**Keywords:** frozen granite; strain rate effect; Split Hopkinson Pressure Bar; dynamic response; energy dissipation; damage

## 0 引言

我国疆域辽阔,一些高海拔地区气候严寒、冰冻时间较长,如云南的普朗铜矿,因矿区海拔 4 000 m 以上,初期井筒建设中遇到较厚的冰冻花岗岩地层,给爆破开挖和支护工作带来诸多困难。因此,掌握低温冻结岩体的动力学特性对寒区的工程建设与施工具有指导意义。文献[1-4]对低温干燥和饱和冻结花岗岩开展单轴、三轴压缩试验,探究其抗压强度、抗剪强度随低温、围压的变化关系。文献[5]通过测试低温环境下干燥及饱和岩样的应变特征,给出了严格的岩石冻胀变形规律;文献[6]对液氮冻结前、后不同含水状态的大理岩、砂岩和花岗岩试样进行抗拉及抗压强度测试,研究液氮压裂时低温对岩石力学性能的影响。以上对低温状态下岩石的力学特性研究多以静载研究为主,而掌握岩石在低温冻结状态下的动力学特性对高寒地区爆破开挖技术优化意义重大。

笔者前期已在文献[7, 8]中对高应变率下饱水花岗岩的温度效应进行了讨论,但不同的施工、开挖方式会导致岩体<sup>[9]</sup>呈现不同的应变率效应。本文以人工形成的 $-15^{\circ}\text{C}$ 饱水花岗岩为研究对象,通过 SHPB 动态冲击试验,分析不同应变率加载下冻结花岗岩的力学特性变化规律,并与常温试件的应变率效应对比,分析冻结条件下岩石动力学特性的应变率效应。研究低温冻结花岗岩在动荷载作用下的力学性能对高寒地区类似工程岩体的开挖设计、施工具有重要的参考价值。

## 1 低温试件制备与试验方案

### 1.1 试件的制备

(1) 国际岩石力学学会 (ISRM) 建议力学试验岩石试件的尺寸不宜小于 50 mm, 结合以往学者的研究成果<sup>[10-13]</sup>, 确定本文 SHPB 冲击试验的圆柱形花岗岩试件长径比为 0.5, 加工尺寸为  $\Phi 75 \times 38$  mm;

(2) 为研究冻结条件下花岗岩的动力学特性, 应对常温花岗岩试件做如下处理: 将试件端面切割、打磨平整并进行干燥和饱水处理, 然后涂上凡士林并用保鲜膜包裹后, 放入高低温试验箱

(SUYING TEST) 进行冻结处理, 达到设定低温后再稳定 24 h 以上。

### 1.2 试验方案

试件的动态冲击实验在  $\phi 75$  mm SHPB 试验装置<sup>[14]</sup>上完成。为完成本次冻结冲击试验, 在 SHPB 装置放置试件处加装能控温的压力室<sup>[15]</sup>, 预先降至 $-15^{\circ}\text{C}$ 低温并稳定 2 h 后, 放入制备好的饱水冻结花岗岩试件, 随即进行冲击力学性能测试, 试验中分别施加 0.45 MPa、0.50 MPa、0.60 MPa、0.65 MPa 的冲击荷载, 每组不少于 3 个试件。然后, 与相似应变率 ( $\dot{\varepsilon}$ ) 下常温 ( $25^{\circ}\text{C}$ ) 试件的动态力学特性比较, 分析低温冻结花岗岩的应力 ( $\sigma$ )-应变 ( $\varepsilon$ ) 曲线变化规律和动力学响应性状。

## 2 动态力学特性分析

### 2.1 $\sigma$ - $\varepsilon$ 曲线特征及破坏形态分析

图 1、图 2 分别为  $25^{\circ}\text{C}$  和  $-15^{\circ}\text{C}$  饱水花岗岩在不同  $\dot{\varepsilon}$  下的  $\sigma$ - $\varepsilon$  曲线。

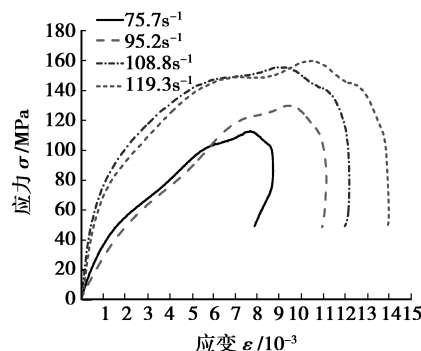


图 1 不同  $\dot{\varepsilon}$  下  $25^{\circ}\text{C}$  饱水花岗岩  $\sigma$ - $\varepsilon$  曲线

Fig. 1 Stress-strain curves under different strain rate for  $25^{\circ}\text{C}$  granite

可以看出,随着  $\dot{\varepsilon}$  的增大, $25^{\circ}\text{C}$  饱水花岗岩试样的动态弹性模量和峰值应力增大,峰值前  $\sigma$ - $\varepsilon$  曲线加长,说明岩石弹性变形增强; $-15^{\circ}\text{C}$  饱水冻结花岗岩线弹性变形阶段应变长度随  $\dot{\varepsilon}$  的增大而增加,与  $25^{\circ}\text{C}$  下动态弹性模量及峰值应力的变化趋势相同;相同  $\dot{\varepsilon}$  条件下, $-15^{\circ}\text{C}$  冻结花岗岩试件的峰值强度大于  $25^{\circ}\text{C}$  的值。下面结合图 3 不同温度和  $\dot{\varepsilon}$  条件下饱水花岗岩试件的冲击破坏形态进

行分析。从图3断裂破坏形态可以看出:

(1) 25℃条件下,  $\dot{\varepsilon}$  为  $95.2\text{s}^{-1}$  时即劈裂为2块,  $108.8\text{s}^{-1}$  时破裂为3块并伴有小体积碎块,  $119.3\text{s}^{-1}$  时破裂为5小块, 同时伴有极少量的锥形体结构。说明该范围冲击压缩荷载作用下常温花岗岩试件以张拉破坏为主, 具有较强的抗剪切能力, 随着  $\dot{\varepsilon}$  的提高, 由张拉破坏向剪切破坏过渡。

(2) -15℃条件下, 冻结花岗岩在  $\dot{\varepsilon}$  为  $109.1\text{s}^{-1}$  时才出现部分贯通裂纹,  $118.8\text{s}^{-1}$  时边缘劈裂出一小块; 同等  $\dot{\varepsilon}$  冲击加载下, 冻结花岗岩的破碎块度更大, 碎块数量相对较少, 碎块形态只有柱状劈裂结构, 说明低温冻结花岗岩的抗剪切能力增强。

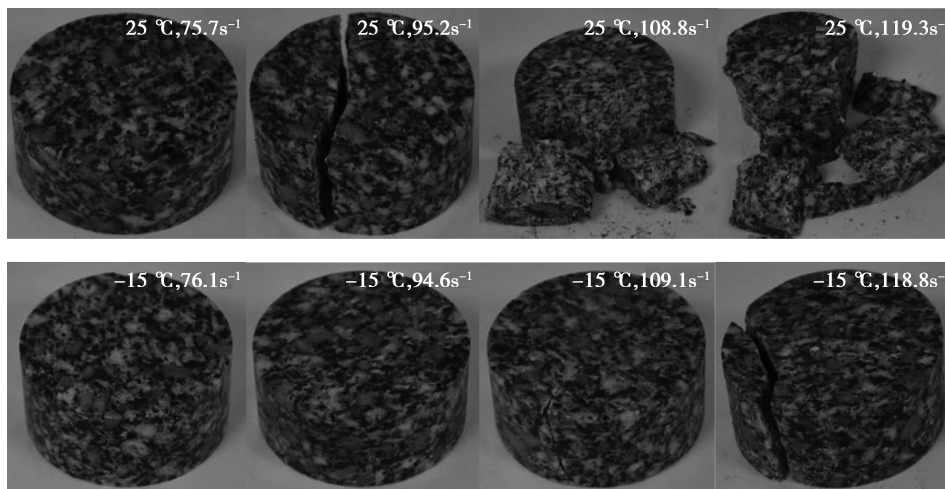


图3 不同条件下饱水花岗岩的破坏形态

Fig. 3 Failure pattern under different conditions for saturated granite

## 2.2 峰值应力随应变率变化规律

25℃和-15℃低温条件下饱水花岗岩的峰值强度随  $\dot{\varepsilon}$  的变化关系如图4。可以看出, 随着  $\dot{\varepsilon}$  的提高, 25℃和-15℃低温条件下饱水花岗岩的极限承载能力均逐渐增大, 但冻结花岗岩的峰值应力提升幅度大于25℃试件; 相同  $\dot{\varepsilon}$  条件下, 饱水冻结花岗岩的峰值强度大于25℃试件。

## 2.3 动态弹性模量随应变率变化规律

饱水花岗岩在25℃和-15℃条件下动态弹性模量随  $\dot{\varepsilon}$  的变化关系如图5, 可以看出, 同等  $\dot{\varepsilon}$  下, 花岗岩-15℃时的动态弹性模量始终略小于25℃的值。25℃和-15℃条件下花岗岩的动态弹性模量均随  $\dot{\varepsilon}$  的提高而增大, 但花岗岩经过-15℃饱水冻结后, 其动态弹性模量由原来的指数增长转为近似直线增长。

## 2.4 峰值应变随应变率变化规律

图6为25℃和-15℃低温状态下饱水花岗岩峰值应变随  $\dot{\varepsilon}$  的变化曲线, 从图中可以看出, 峰值

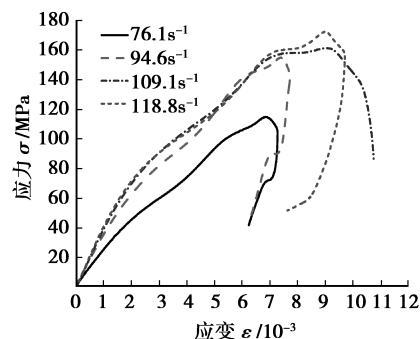


图2 不同  $\dot{\varepsilon}$  下-15℃饱水花岗岩  $\sigma$ - $\varepsilon$  曲线

Fig. 2 Stress-strain curves under different strain rate for -15℃ granite

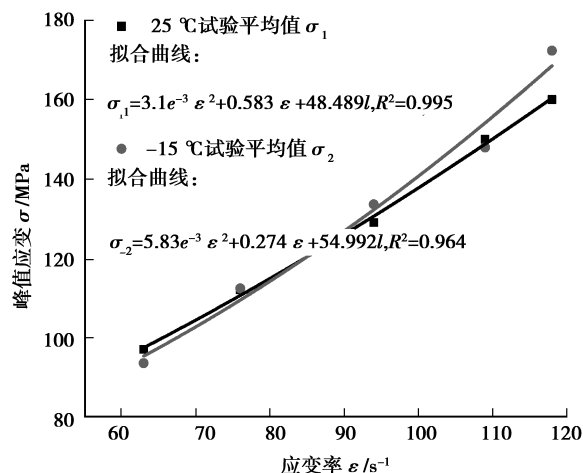


图4 25℃和-15℃饱水花岗岩峰值应力随  $\dot{\varepsilon}$  变化

Fig. 4 Peak stress vs. strain rate for 25℃ and -15℃ saturated granite

应变均随  $\dot{\varepsilon}$  的提高而增大。当  $\dot{\varepsilon}$  从  $75.7\text{s}^{-1}$  提高到  $119.3\text{s}^{-1}$ , 25℃饱水花岗岩峰值应变由  $6.84\text{e}^{-3}$  均匀增大到  $9.03\text{e}^{-3}$ , 提高了0.32倍; 而-15℃饱水

冻结花岗岩的峰值应变则经历了增长较慢的低  $\dot{\varepsilon}$  阶段和增加较快的高  $\dot{\varepsilon}$  阶段,由  $6.25 \times 10^{-3}$  增大到  $8.19 \times 10^{-3}$ ,提高了 0.31 倍。对照图 3 可以发现,25 °C 和 -15 °C 状态下饱水花岗岩破坏时的峰值应变分别为  $7.4 \times 10^{-3}$  和  $6.8 \times 10^{-3}$ ,说明饱水冻结后,花岗岩破坏需要更高的冲击  $\dot{\varepsilon}$ ,但破坏峰值应变有所减小。

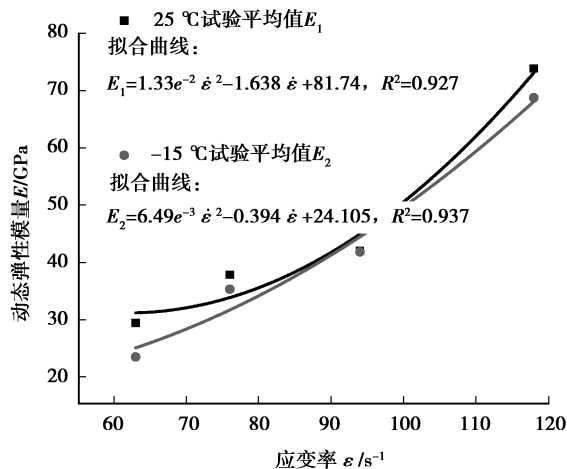


图 5 25 °C 和 -15 °C 饱水花岗岩动态弹性模量随  $\dot{\varepsilon}$  的变化

Fig. 5 Dynamic elastic modulus vs. strain rate for 25 °C and -15 °C saturated granite

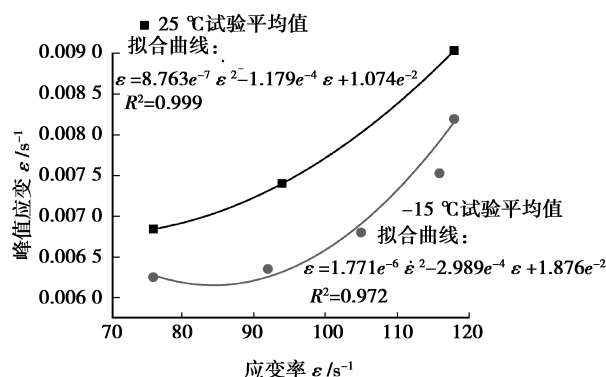


图 6 25 °C 和 -15 °C 饱水花岗岩峰值应变随  $\dot{\varepsilon}$  变化关系

Fig. 6 Peak strain vs. strain rate for 25 °C and -15 °C saturated granite

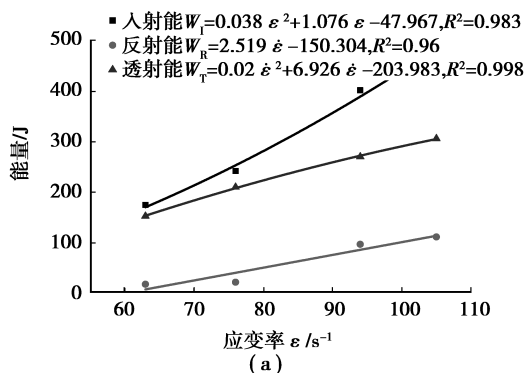


图 7 入射能、反射能、透射能和耗散能随应变率变化曲线

Fig. 7 Incidence, reflection, transmission and dissipation energy vs. strain rate for granite

### 3 能量传递特征与损伤变化

#### 3.1 能量传递规律与耗散特性

文献[16],入射波、反射波和透射波的能量计算方程如下:

$$W_I = A_0 \rho_0 C_0 \int_0^t \varepsilon_I^2(t_1) dt_1 \quad (1)$$

$$W_R = A_0 \rho_0 C_0 \int_0^t \varepsilon_R^2(t_1) dt_1 \quad (2)$$

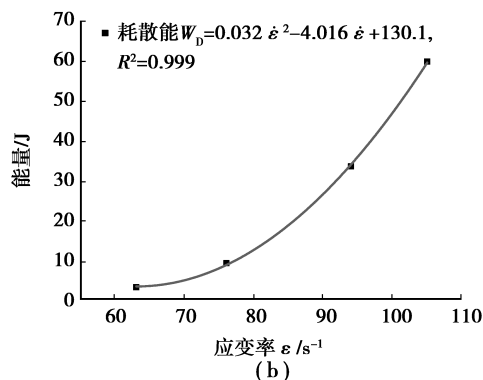
$$W_T = A_0 \rho_0 C_0 \int_0^t \varepsilon_T^2(t_1) dt_1 \quad (3)$$

$$W_D = W_I - W_R - W_T \quad (4)$$

式中:  $W_I$ 、 $W_R$ 、 $W_T$ 、 $W_D$  分别为入射能量、反射能量、透射能量和耗散能量;  $A_0$ 、 $\rho_0$ 、 $C_0$  分别为入射杆的透射杆的横截面积、材料密度和弹性纵波波速;  $\varepsilon_I(t_1)$ 、 $\varepsilon_R(t_1)$ 、 $\varepsilon_T(t_1)$  为入射、反射和透射波的应变时程曲线。由式(1)~(4)对 -15 °C 饱水冻结花岗岩的 SHPB 冲击试验数据进行处理,多组数据取平均获得各能量值随  $\dot{\varepsilon}$  的变化关系曲线和数据拟合方程如图 7 所示,可以看出:①随  $W_I$ 、 $W_T$ 、 $\dot{\varepsilon}$  呈弱幂函数关系(关系式见图 7(a)),  $\dot{\varepsilon}$  由  $63.5 \text{ s}^{-1}$  增大到  $105.2 \text{ s}^{-1}$ ,  $W_I$ 、 $W_T$  分别提高 1.75 倍、1 倍;②  $W_R$  随  $\dot{\varepsilon}$  线性增加,  $\dot{\varepsilon} = 105.2 \text{ s}^{-1}$  时的值是  $W_R$   $\dot{\varepsilon} = 63.5 \text{ s}^{-1}$  时的 5 倍;③  $W_D$  随  $\dot{\varepsilon}$  呈幂函数增加关系,  $\dot{\varepsilon} = 76.3 \text{ s}^{-1}$ 、 $\dot{\varepsilon} = 94.4 \text{ s}^{-1}$ 、 $\dot{\varepsilon} = 105.2 \text{ s}^{-1}$  时的  $W_D$  值分别是  $\dot{\varepsilon} = 63.5 \text{ s}^{-1}$  时的 1.7 倍、8.91 倍、16.65 倍。可见随着  $\dot{\varepsilon}$  的增加,冻结花岗岩的  $W_D$  大幅度提高但数值并不大,  $W_I$  主要转化为  $W_R$  和  $W_T$ ,用于破坏试件的能量较小,冲击后的试件较为完整,如图 3。

#### 3.2 损伤变量随应变率的变化

在 SHPB 装置上完成动态冲击加载后,文献[17-18]中的计算式(5)~(7),计算各试件的总吸收





能密度  $u$ 、总耗散能密度  $e_D$  和损伤变量  $d$  得到损伤变量  $d$  随  $\dot{\varepsilon}$  的变化关系曲线和数据拟合方程,如图8所示。花岗岩  $d$  值随  $\dot{\varepsilon}$  呈弱幂函数增加关系, $\dot{\varepsilon}$  越大, $d$  值越高。参照图3,岩石类材料的宏观破碎主要由裂纹引起,低  $\dot{\varepsilon}$  下单个裂纹最先扩展,对岩石的破坏起主导作用,而高  $\dot{\varepsilon}$  下多条裂纹交叉贯穿共同作用。

$$u = \int \sigma d\varepsilon \quad (5)$$

$$e_D = \frac{W_D}{V} \quad (6)$$

$$d = \frac{e_D}{u} \quad (7)$$

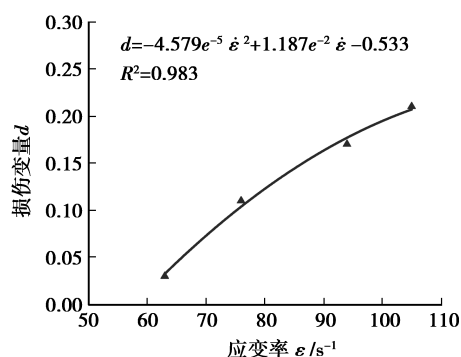


图8 -15 °C 花岗岩损伤值  $d$  随  $\dot{\varepsilon}$  变化关系

Fig. 8 Damage variable value vs. strain rate for -15 °C frozen granite

$W_D$  的大小与裂纹数量密切相关, $W_D$  越大说明试件内部形成的裂纹越多,因此,由  $W_D$  的大小可以推断岩石的破碎程度。学者们多以损伤变量  $d$  值表征岩石破碎程度<sup>[18]</sup>,本次试验-15 °C 冻结花岗岩试件破坏时的损伤变量值约 0.22。

## 4 结论

借助 75 mm 大直径 SHPB 装置和低温冻结设备,对比分析-15 °C 和 25 °C 饱水花岗岩的动态力学响应性状,得到如下结论:

(1)同等  $\dot{\varepsilon}$  冲击加载下,冻结花岗岩的峰值强度更高,抗剪切强度有所增加,动态弹性模量由 25 °C 时的指数增长转为近似直线增长。

(2)25 °C 时饱水花岗岩破坏的  $\dot{\varepsilon}$  约  $95.2\text{s}^{-1}$ ,峰值应变约  $7.4\text{e}^{-3}$ ,而 -15 °C 时破坏的  $\dot{\varepsilon}$  约  $109.1\text{s}^{-1}$ ,峰值应变约  $6.8\text{e}^{-3}$ ,说明饱水冻结花岗岩

破坏需要更高的冲击  $\dot{\varepsilon}$  但峰值应变减小。

(3)-15 °C 饱水冻结花岗岩损伤变量与  $\dot{\varepsilon}$  呈  $d = -4.579\text{e}^{-5} \dot{\varepsilon}^2 + 1.187\text{e}^{-2} \dot{\varepsilon} - 0.533$  弱幂函数增加关系,破坏时的损伤变量值为 0.22。

## 参考文献 (References)

- [1] 李云鹏,王芝银. 花岗岩低温热力效应参数及强度规律研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 321-326. (Li Yunpeng, Wang Zhiyin. Study of parameters and strength of thermal effects for granite under low temperature[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 321-326. (in Chinese))
- [2] 李云鹏,王芝银. 岩石低温单轴压缩力学特性[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(6): 671-675. (Li Yunpeng, Wang Zhiyin. Uniaxial compressive mechanical properties of rock at low temperature[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(6): 671-675. (in Chinese))
- [3] 李云鹏,王芝银. 花岗岩低温强度参数与冰胀力的关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增2): 4113-4118. (Li Yunpeng, Wang Zhiyin. Study of relationship between strength parameters and ice expansion force of granite under low temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Supp.2): 4113-4118. (in Chinese))
- [4] 唐明明,王芝银,孙毅力,等. 低温条件下花岗岩力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(4): 787-794. (Tang Mingming, Wang Zhiyin, Sun Yili, et al. Experimental study of mechanical properties of granite under low temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(4): 787-794. (in Chinese))
- [5] 康永水,刘泉声,赵军,等. 岩石冻胀变形特征及寒区隧道冻胀变形模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(12): 2518-2526. (Kang Yongshui, Liu Quansheng, Zhao Jun, et al. Research on frost deformation characteristics of rock and simulation of tunnel frost deformation in cold region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(12): 2518-2526. (in Chinese))
- [6] 黄中伟,位江巍,李根生,等. 液氮冻结对岩石抗拉及抗压强度影响试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(3): 694-700, 834. (Huang Zhongwei, Wei Jiangwei,

- Li Gensheng, et al. An experimental study of tensile and compressive strength of rocks under cryogenic nitrogen freezing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(3): 694-700, 834.(in Chinese))
- [7] 王建国, 杨阳, 郭延辉, 等. 高应变率下饱水花岗岩动力学特性的低温效应[J]. 岩土力学, 2017, 38 (Supp.2): 163-169. (Wang Jianguo, Yang Yang, Guo Yanhui, et al. Low temperature effect of saturated granite on dynamic characteristics under high strain rates [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38 (Supp.2): 163-169.(in Chinese))
- [8] 杨阳. 低温作用下岩石动态力学性能试验研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2016. (Yang Yang . Experimental study on dynamic mechanical properties of rock under low temperature [D]. Beijing: China University of Mining & Technology(Beijing), 2016.(in Chinese))
- [9] 王云飞, 郑晓娟, 褚怀保, 等. 花岗岩高应力状态脆延破坏细观力学强度特性[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(5): 1180-1185. (Wang Yunfei, Zheng Xiaojuan, Chu Huaibao, et al. Brittle and ductile failure meso-mechanics strength properties of granite under high stress state[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13 ( 5 ): 1180-1185. ( in Chinese))
- [10] 吕晓聪, 许金余, 张龙, 等. 大直径 SHPB 系统角闪岩的冲击动力试验[J]. 兵工学报, 2010, 31(Supp.1): 362-368. (Lü Xiaocong, Xu Jinyu, Zhang Long, et al. Impact experiments for amphibolite using large-diameter SHPB [J]. Acta Armamentarii, 2010, 31 (Supp.1): 362-368.(in Chinese))
- [11] 李胜林, 刘殿书, 李祥龙, 等.  $\phi 75$  mm 分离式霍普金森压杆试件长度效应的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(1): 93-97. (Li Shenglin, Liu Dianshu, Li Xianglong, et al. The Effect of specimen length in  $\phi 75$  mm split Hopkinson pressure bar experiment[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2010, 39(1): 93-97.(in Chinese))
- [12] 洪亮, 李夕兵, 马春德, 等. 岩石动态强度及其应变率灵敏性的尺寸效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 526-533. (Hong Liang, Li Xibing, Ma Chunde, et al. Study on size effect of rock dynamic strength and strain rate sensitivity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3): 526-533.(in Chinese))
- [13] 王建国, 高全臣, 陆华, 等. 分层介质冲击响应的 SHPB 实验研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(19): 192-197, 212. (Wang Jianguo, Gao Quanchen, Lu Hua, et al. Impact response tests of layered medium with SHPB[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(19): 192-197, 212.(in Chinese))
- [14] 黄理兴. 岩石动力学研究成就与趋势[J]. 岩土力学, 2011, 32 ( 10 ): 2889-2900. (Huang Lixing. Development and new achievements of rock dynamics in China[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(10): 2889-2900.(in Chinese))
- [15] 单仁亮, 杨昊, 张晋勋, 等. 梅林庙矿负温饱水红砂岩加卸载力学特性研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(5): 924-931. (Shan Renliang, Yang Hao, Zhang Jinxun, et al. Mechanical properties of saturated red sandstone of Meilinmiao mine under loading and unloading at negative temperatures [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2016, 33(5): 924-931.(in Chinese))
- [16] 王建国, 郭延辉, 张小华, 等. 冲击荷载下节理数对类岩石动力学特性的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(Supp.2): 559-564.(Wang Jianguo, Guo Yanhui, Zhang Xiaohua, et al. Mechanics properties of simulated rock affected by layer joints under impact loading[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13 ( Supp. 2 ): 559-564. ( in Chinese))
- [17] 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. (Li Liyun, Xu Zhiqiang, Xie Heping, et al. Failure experimental study on energy laws of rock under differential dynamic impact velocities[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(12): 2007-2011.(in Chinese))
- [18] 李祥龙, 王建国, 张智宇, 等. 应变率及节理倾角对岩石模拟材料动力特性的影响[J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(4): 483-490. (Li Xianglong, Wang Jianguo, Zhang Zhiyu, et al. Experimental study for effects of strain rates and joint angles on dynamic responses of simulated rock materials [J]. Explosion and Shock Waves, 2016, 36(4): 483-490.(in Chinese))