

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2018.0010

ZHANG Huan, PING Qi, WU Mingjing. Experimental study on dynamic compressive mechanical properties of sandstone with low temperature and natural water content[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(1): 79-85. [张欢, 平琦, 吴明静. 低温含水砂岩动态压缩力学性能试验研究[J]. 冰川冻土, 2018, 40(1): 79-85.]

低温含水砂岩动态压缩力学性能试验研究

张欢¹, 平琦^{1,2}, 吴明静¹

(1. 安徽理工大学 矿山下工程教育部工程研究中心, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽理工大学 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室, 安徽 淮南 232001)

摘要: 为研究砂岩动态压缩力学性能, 采用 SHPB 装置对低温含水砂岩试样进行 6 种不同加载速率的冲击压缩试验。结果表明: $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时砂岩动态抗压强度和弹性模量明显大于 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 动态抗压强度与应变率均呈幂乘关系增长; 动态弹性模量与应变率呈正相关性, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时均呈多项式关系; 动态应力-应变曲线分为 4 个阶段, 应变软化阶段的应变范围随应变率的增加而增大; 砂岩试样破坏模式随着应变率的增加, 由块状劈裂结构、片状层裂结构的拉伸破坏, 转变为锥形体结构的剪切破坏, 最终呈现颗粒状粉碎破坏。

关键词: 岩石动力学; 低温; SHPB; 动态强度; 应变率效应

中图分类号: TU45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2018)01-0079-07

0 引言

我国有相当大一部分的国土为季节性冻土, 因此我国在冻土力学的研究方面有深厚的积累^[1-2], 而有关冻岩的研究则不多, 冻岩一般是指温度低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且含有冰的岩体。工程岩体大多处于含水状态, 低温下孔隙水凝结产生的冻胀力是造成岩石破坏的内在动力。随着西部大开发国家基础设施建设的需要, 许多大型寒区岩体工程, 如青藏铁路工程、南水北调工程、石油管线建设和西部众多深长隧道工程等, 都为我们研究低温含水岩石问题提供了良好的契机^[3-7]。

Inada 等^[8]通过单轴压缩和拉伸试验, 分别研究了 $-160\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的花岗岩和安山岩在干燥和饱和状态下的抗压与抗拉强度。Yamabe 等^[9]选取日本 Sirahama 砂岩, 分别进行了不同温度 ($+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$) 下单轴压缩试验及 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下不同围压 (0 MPa, 1 MPa, 3 MPa) 三轴压缩试验。徐光苗等^[10]对 $-20\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的江西红

砂岩和湖北页岩, 进行干燥与饱和状态下的岩石单轴压缩试验与三轴压缩试验。谭贤君等^[11]建立了低温岩体温度场和渗流场耦合的数学模型; 并将建立的耦合控制方程应用于 Smith 等的数学模型, 有限元模拟结果一致, 从而验证了该模型的可靠性; 最后对青海拉脊山隧道进行了模拟研究。杨阳^[12]研究了不同几何形状撞击杆对入射波形的影响, 研究了低温与动态冲击耦合作用下岩石的动态力学性能, 分析了低温岩石破碎块度的能量特性和分形。

袁璞等^[13]采用 SHPB 装置研究了干湿循环对砂岩动态力学性能的劣化效应。王斌等^[14]对自然风干和饱水状态下的砂岩进行了动态冲击压缩试验, 发现与静载试验结果不同, 饱水砂岩动态强度应考虑 Stefan 效应。李男等^[15]对干燥和饱水砂岩进行了剪切蠕变试验, 分析水对砂岩剪切蠕变特性的影响及其影响机制, 发现水能够增大砂岩的蠕变应变量和应变速率, 并降低蠕变破坏强度。

有关低温岩石和含水岩石的研究多以静态为主, 动态性能的研究较少, 而将低温与含水结合起

收稿日期: 2017-07-18; 修订日期: 2018-01-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51674008); 安徽省博士后基金资助项目 (2015B058); 安徽高校省级自然科学研究重点项目 (KJ2013A085) 资助

作者简介: 张欢 (1992-), 女, 湖北武汉人, 2015 年在湖北工程学院获学士学位, 现为安徽理工大学在读硕士研究生, 从事岩石动力学研究。E-mail: austzh@126.com

通信作者: 平琦, E-mail: qping@aust.edu.cn.

来研究的相对更少。本文以砂岩为研究对象,对 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温自然含水状态下的试样实施单轴冲击压缩试验,研究同一含水状态、不同温度、不同应变率加载下砂岩的动态压缩力学性能,这对解决西部实际工程问题有着重大意义。

1 砂岩试样的加工与制备

1.1 砂岩试样的加工

选取淮南矿业集团潘东煤矿完整性和均匀性较好的砂岩作为试验对象,经取芯、切割、打磨等多道工序以后,制成 $\phi 50\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ 的圆柱状试样。该砂岩为细砂岩,呈灰白色,主要矿物成分有石英、长石、白云母、方解石、粘土矿物等。按照《煤和岩石物理力学性质测定方法》(GB/T 23561.7 -

2009)^[16] 规范,要求长径比控制在 0.5 左右以减少试样的惯性效应和端面摩擦效应,试样两端面平行度 $\leq \pm 0.3\text{ mm}$,端面垂直试样轴线偏差 $\leq \pm 0.25^{\circ}$ 。

1.2 含水砂岩试样的制备

试样制作过程如图 1。试验前对试样进行筛选,先剔除视觉上差别较大的个别试样,再采用超声波测速仪测试各个试样的波速,筛选出波速相近的试样进行试验,以减少试样物理力学性质上的离散型。自然含水试样的制备,按照《煤和岩石物理力学性质测定方法》(GB/T 23561.5 - 2009)^[17] 规范要求,先将试样放在 $105 \sim 110\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘箱内烘 24 h 至恒重,后取出放在干燥器内冷却至室温;然后将试样放在下部储水的干燥器内存放 1 ~ 2 d,试样不与水接触。

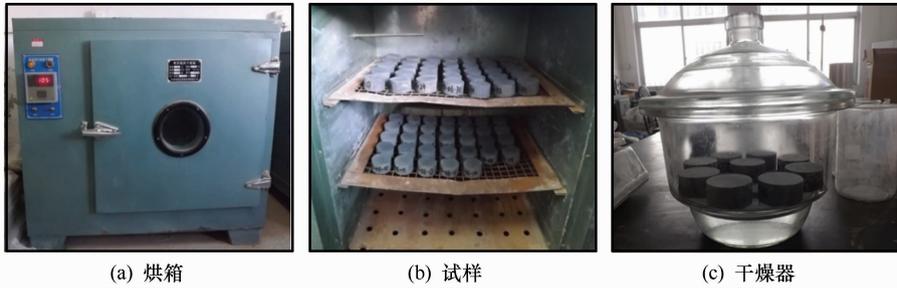


图 1 自然含水砂岩的制作过程

Fig. 1 Preparing process of sandstone specimens with natural water content

2 低温含水砂岩试样 SHPB 试验

2.1 试验准备

取上述自然含水砂岩试样,用密封袋或保鲜膜密封好,逐一编号,放在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温箱内冷藏 24 h。动态冲击试验开始半小时,将低温环境箱内温度降至 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$,当试样冻结时间满足规定的要求后,从低温箱中拿出试样立即放入低温环境箱内保温,以减少试样在运输过程中产生的温度误差。

低温环境箱由环境箱、液氮瓶、鼓风机、温度控制系统四部分组成。低温环境箱是通过鼓风机对液氮瓶中液氮的压缩,使之由液态变为气态,进入环境箱从而达到降温的目的。环境箱中埋设有温度传感器,温度控制系统能实时监控环境箱内温度,当达到设定温度时系统会立即停止降温。低温环境箱如图 2 所示。

2.2 试验过程

$\phi 50\text{ mm}$ 变截面 SHPB 试验装置中,撞击杆、入射杆、透射杆均采用同种材质的合金钢,其密度

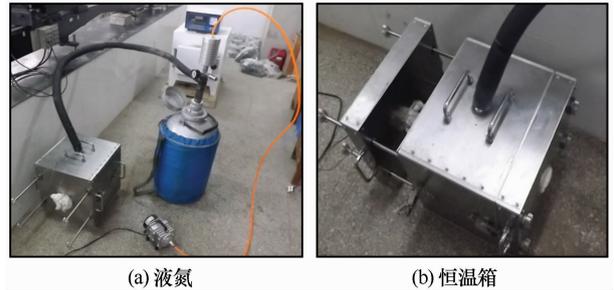


图 2 低温环境箱

Fig. 2 The low-temperature environmental box

为 $7.8\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,弹性模量为 210 GPa,纵波波速为 $5\ 190\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。撞击杆长 0.6 m,入射杆长 2.4 m 且为锥形过渡变截面,由 37 mm 增至 50 mm,透射杆长 1.2 m。选用 BX120-2AA 型电阻应变片采集信号,采用 KD6009 动态应变仪和 Tektronix MDO 3024 动态测试分析仪记录数据。运用一维应力波理论和应力均匀性假定^[18],可以计算出试件的动态力学参数,其计算公式分别为:

$$\sigma_s(t) = \frac{EA}{2A_s} (\varepsilon_l(t) + \varepsilon_R(t) + \varepsilon_T(t)) \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon}_s(t) = \frac{C_0}{l_s}(\varepsilon_I(t) - \varepsilon_R(t) - \varepsilon_T(t)) \quad (2)$$

$$\varepsilon_s(t) = \frac{C_0}{l_s} \int_0^t (\varepsilon_I(t) - \varepsilon_R(t) - \varepsilon_T(t)) dt \quad (3)$$

式中: E 为压杆的弹性模量(GPa); A 、 A_s 分别为压杆和试件的横截面积(m^2); C_0 为压杆的纵波波速($m \cdot s^{-1}$); l_s 为试件的长度(m); ε_I 、 ε_R 、 ε_T 分别为入射、反射和透射应变; σ_s 、 $\dot{\varepsilon}_s$ 、 ε_s 分别为试样的应力(MPa)、应变率(s^{-1})和应变。

试验按加载气压的不同分为 6 组: 0.3 MPa、0.4 MPa、0.5 MPa、0.6 MPa、0.7 MPa、0.8 MPa, 每组选取 3 个试样进行试验。

2.3 试验结果

SHPB 冲击压缩试验中, 岩石在不同温度和不同应变率加载条件下, 会表现出不同的动力学性能。本文对 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $-15\text{ }^\circ\text{C}$ 的低温含水砂岩进行了 6 种不同加载气压下的冲击压缩试验, 得到了一些有效数据, 如表 1 所示。

表 1 试验结果
Table 1 Experiment results

| 试验温度 / $^\circ\text{C}$ | 试样编号 | 含水率 /% | 冲击气压 /MPa | 冲击速度 /($m \cdot s^{-1}$) | 应变率 / s^{-1} | 抗压强度 /MPa | 弹性模量 /GPa |
|-------------------------|----------|--------|-----------|----------------------------|----------------|-----------|-----------|
| -10 | PD-01-19 | 0.15 | 0.3 | 4.5 | 96 | 152.18 | 14.70 |
| | PD-01-22 | 0.15 | 0.4 | 5.0 | 107 | 184.02 | 24.26 |
| | PD-01-25 | 0.16 | 0.5 | 6.1 | 115 | 213.04 | 34.58 |
| | PD-01-30 | 0.15 | 0.6 | 6.6 | 121 | 241.20 | 43.24 |
| | PD-01-32 | 0.13 | 0.7 | 7.0 | 134 | 256.39 | 35.26 |
| | PD-01-34 | 0.15 | 0.8 | 7.8 | 147 | 277.01 | 51.62 |
| -15 | PD-01-01 | 0.12 | 0.3 | 4.5 | 55 | 127.87 | 11.02 |
| | PD-01-04 | 0.09 | 0.4 | 5.1 | 67 | 151.78 | 15.09 |
| | PD-01-07 | 0.08 | 0.5 | 6.0 | 74 | 186.32 | 17.66 |
| | PD-01-12 | 0.12 | 0.6 | 6.6 | 90 | 205.13 | 27.70 |
| | PD-01-14 | 0.12 | 0.7 | 7.1 | 101 | 236.00 | 29.50 |
| | PD-01-18 | 0.10 | 0.8 | 7.8 | 113 | 257.90 | 51.92 |

2.3.1 砂岩试样动态抗压强度-应变率曲线分析

$-10\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-15\text{ }^\circ\text{C}$ 低温含水砂岩试样动态抗压强度与应变率的数据拟合曲线如图 3 所示。由图知, 随着应变率的增大, 砂岩试样的动态抗压强度相应增大且增幅基本相同; 动态抗压强度与应变率呈乘幂关系^[19-20], 其拟合关系如式(4):

$$\sigma \propto a\varepsilon^b \quad (4)$$

式中: σ 为试样动态抗压强度(MPa); $\dot{\varepsilon}$ 为应变率(s^{-1}); a 为动态抗压强度相关系数; b 取值在 $1/3$ 左右。

当温度降到冻结点以下时, 孔隙水发生相变, 体积膨胀产生冻胀力, 致使试样内部萌生新的裂隙并使原有裂隙进一步发展。而 $-15\text{ }^\circ\text{C}$ 时冻胀力较大且岩石基质的收缩速率较大, 导致岩石强度有所降低, 故同一加载速率下, $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 时的动态抗压强度大于 $-15\text{ }^\circ\text{C}$ 。

2.3.2 砂岩试样应力-应变曲线分析

$-10\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-15\text{ }^\circ\text{C}$ 低温含水砂岩试样在不同应变率下的应力-应变曲线如图 4、图 5 所示。由图可知, 随着应变率的增加动态抗压强度相应增大, 初始弹性模量增大。应力-应变曲线可分为 4 个阶段: I 压密阶段, 岩石内部的原有裂隙在冲击荷载作用下来不及闭合, 此阶段表现为应力增大明显而应变上升缓慢; II 线性变形阶段, 此阶段斜率为常数或接近常数, 应变随应力增大稳定增长, 不会产生残

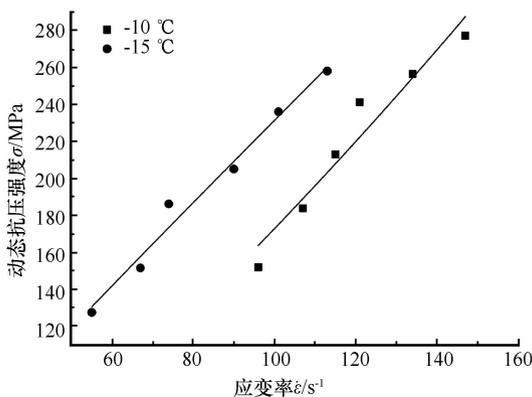


图 3 砂岩动态抗压强度与应变率关系

Fig. 3 Relations between dynamic compressive strength and strain rate of sandstone

余应变；Ⅲ塑性变形阶段，岩石内部微裂隙快速扩张，并形成贯穿主裂缝，此阶段表现为应力增长缓慢而应变迅速增大，曲线斜率减小直至为零，达到峰值应力；Ⅳ应变软化阶段，岩石出现大量宏观裂隙，此阶段曲线斜率为负，已贯穿的裂隙继续发展。应变软化阶段对应的应变长度随应变率的增大而增大，这是因为随应变率的增大，微裂隙和宏观破裂面增多，软化变形加重，极限应变增大。在 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的应力-应变曲线，塑性变形阶段出现了应力平台，即应力不变而应变持续增大。

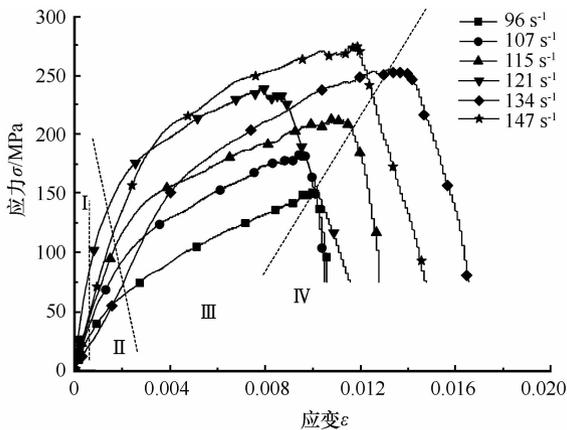


图4 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时砂岩试样动态应力-应变曲线
Fig. 4 Dynamic stress-strain curves of sandstone specimens under $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

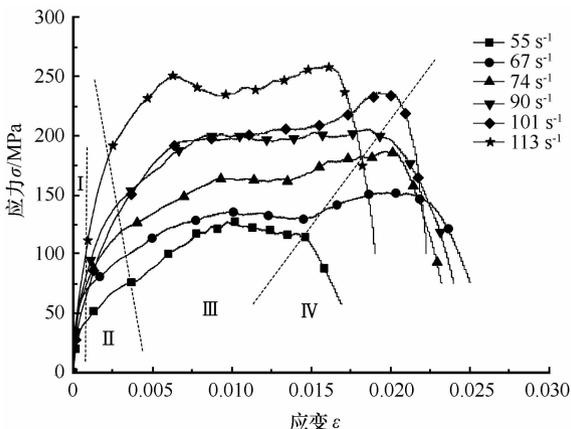


图5 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时砂岩试样动态应力-应变曲线
Fig. 5 Dynamic stress-strain curves of sandstone specimens under $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$

2.3.3 砂岩试件动态弹性模量-应变率曲线分析

弹性模量是衡量岩石刚度特征的重要参数，可以用来表征岩石抵抗变形的能力。 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温含水砂岩试件动态弹性模量与应变率的拟合曲线如图6所示。由图6可知，随着应变率的增大，砂岩试样的动态弹性模量也相应增大，二者呈多项式关系，其拟合关系如式(5)：

$$E = a\varepsilon^2 + b\varepsilon + c \quad (5)$$

式中： E 为动态弹性模量(GPa)。其余参数见表2。

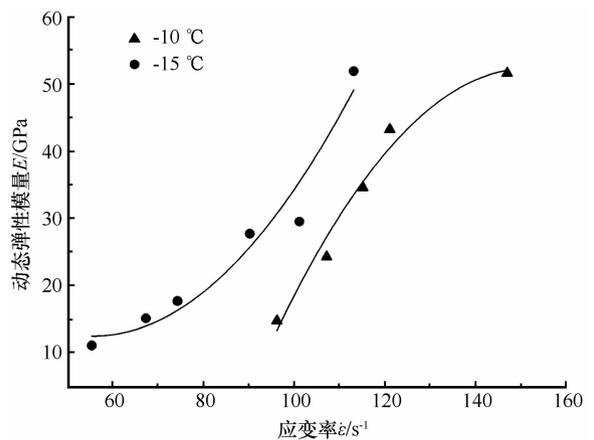


图6 砂岩动态弹性模量与应变率关系
Fig. 6 Relations between dynamic modulus of elasticity and strain rate of sandstone

表2 砂岩试样参数

| Table 2 Parameters of the sandstone specimens | | | | |
|---|-------|-------|---------|--------|
| 温度 | a | b | c | R^2 |
| $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ | -0.01 | 3.83 | -237.83 | 0.9558 |
| $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ | 0.01 | -1.22 | 46.18 | 0.9205 |

在 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下，当应变率小于 74 s^{-1} 时，曲线较为平缓，动态弹性模量增长较小；当应变率大于 74 s^{-1} 时，曲线较为陡峭，动态弹性模量增长较大。在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下则相反，动态弹性模量初始增长较大，而后增长缓慢，具体表现为：当应变率小于 121 s^{-1} 时，曲线较为陡峭，动态弹性模量增长较大；当应变率大于 121 s^{-1} 时，曲线较为平缓，动态弹性模量增长较小。同一加载速率下， $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的动态弹性模量大于 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的动态弹性模量，这是由于在较低温度下岩石内部的矿物颗粒收缩速率有较大差异，岩石内部产生损伤，强度劣化，表现为动态弹性模量的降低。

2.3.4 砂岩试样的破坏

岩石变形破坏过程是能量的复杂转化过程，在岩石应力达到峰值强度前不断吸收外界的能量，而峰值后的破坏则是能量不断释放的过程^[21-23]。低温含水砂岩试样在不同应变率下的典型破坏形态如图7、图8所示。

从图7、图8可以看出，随应变率的增大碎块尺寸明显减少而碎块数量增加，具有较强的应变率效应。在低应变率下，试样破坏程度较低，破坏后的试样呈块状劈裂结构和片状层裂结构，属于拉伸

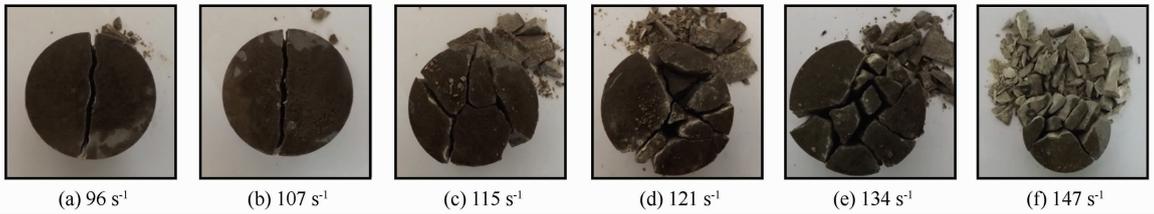


图7 -10 °C时砂岩试样典型破坏形态

Fig. 7 Typical failure modes of the sandstone specimens under -10 °C

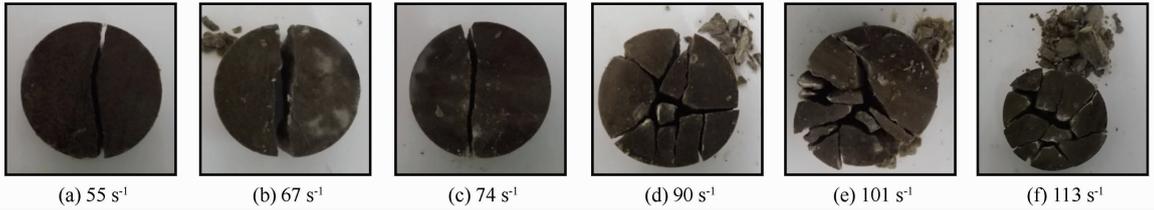


图8 -15 °C时砂岩试样典型破坏形态

Fig. 8 Typical failure modes of the sandstone specimens under -15 °C

破坏模式; 在高应变率下, 试样破坏程度较高, 碎块呈柱状劈裂结构和锥形体结构, 拉伸破坏模式伴随剪切破坏模式。随着应变率的增大, 锥形体结构的增多, 拉伸破坏会逐渐过渡为剪切破坏, 随着应变率的进一步增大, 则为颗粒状粉碎破坏模式。

3 结论

本文分别对 -10 °C 和 -15 °C 的低温环境下含水砂岩试样实施冲击压缩试验, 研究了同一含水状态、不同温度、不同应变率加载下砂岩的动态压缩力学性能, 结论如下:

(1) 砂岩动态抗压强度与应变率呈乘幂关系增长。-15 °C 时冻胀力较大且岩石基质的收缩速率较大, 导致岩石强度有所降低, 故 -10 °C 时的动态抗压强度大于 -15 °C。

(2) 动态应力-应变曲线分为压密、线性变形、塑性变形、应变软化等 4 个阶段。随应变率的增加, 微裂隙和宏观破裂面增多, 软化变形加重, 应变软化阶段的应变范围增大。-15 °C 时的应力-应变曲线, 在塑性变形阶段, 出现了应力平台。

(3) 砂岩试样动态弹性模量与应变率呈正相关性, -10 °C 和 -15 °C 时均呈多项式关系。-15 °C 下, 当应变率小于 74 s^{-1} 时动态弹性模量增幅较小, 大于 74 s^{-1} 时增幅较大; -10 °C 下则相反, 动态弹性模量初始增长较大, 而后增长趋于平缓。同一加载速率下, -10 °C 时的动态弹性模量大于 -15 °C 时, 这是由于在较低温度下岩石内部的矿物颗粒收缩速率有很大差异, 岩石内部产生损伤,

强度劣化, 从而动态弹性模量降低。

(4) 砂岩试样破坏模式随着应变率的增加, 由块状劈裂结构、片状层裂结构的拉伸破坏, 转变为锥形体结构的剪切破坏, 最终呈现颗粒状粉碎破坏。

参考文献 (References):

- [1] Xu Xuezu, Wang Jiacheng, Zhang Lixin. Permafrost physics [M]. Beijing: Science Press, 2001. [徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.]
- [2] Zhou Youwu, Guo Dongxin, Qiu Guoqing, et al. Frozen soil in China[M]. Beijing: Science Press, 2000. [周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000.]
- [3] Yang Jianping, Yang Suiqiao, Li Man, et al. Vulnerability of frozen ground to climate change in China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(6): 1436-1445. [杨建平, 杨岁桥, 李曼, 等. 中国冻土对气候变化的脆弱性[J]. 冰川冻土, 2013, 35(6): 1436-1445.]
- [4] Wang Chenghai, Jin Shuanglong, Shi Hongxia. Area change of the frozen ground in China in the next 50 years[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(1): 1-8. [王澄海, 靳双龙, 施红霞. 未来 50 a 中国地区冻土面积分布变化[J]. 冰川冻土, 2014, 36(1): 1-8.]
- [5] Liu Minghao, Sun Zhizhong, Niu Fujun, et al. Variation characteristics of the permafrost along the Qinghai-Tibet railway under the background of climate change[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(5): 1122-1130. [刘明浩, 孙志忠, 牛富俊, 等. 气候变化背景下青藏铁路沿线多年冻土变化特征研究[J]. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1122-1130.]
- [6] Wu Libo, Qi Wei, Niu Fujun, et al. A review of studies on roadbed frozen damage and countermeasures in seasonal frozen ground regions in China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(5): 1283-1293. [武立波, 祁伟, 牛富俊, 等. 我国季节性冻土区公路路基冻害及其防治研究进展[J]. 冰川冻土, 2015, 37(5): 1283-1293.]
- [7] Li Dongwei, Zhou Yan, Jin Pengwei, et al. Monitoring and

- studying the freezing temperature field in deep fractured rock mass with high confined water[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(1): 140–144. [李栋伟, 周艳, 靳鹏伟, 等. 深部高承压水地层裂隙岩体冻结温度场实测研究[J]. *冰川冻土*, 2016, 38(1): 140–144.]
- [8] Inada Y, Yokota K. Some studies of low temperature rock strength[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1984, 21(3): 145–153.
- [9] Yamabe T, Neaupane K M. Determination of some thermo-mechanical properties of Sirahama sandstone under subzero temperature condition[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2001, 38(7): 1029–1034.
- [10] Xu Guangmiao, Liu Quansheng, Peng Wanwei, et al. Experimental study on basic mechanical behaviors of rocks under low temperatures[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(12): 2502–2508. [徐光苗, 刘泉声, 彭万巍, 等. 低温作用下岩石基本力学性质试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(12): 2502–2508.]
- [11] Tan Xianjun, Chen Weizhong, Jia Shanpo, et al. A coupled hydro-thermal model for low temperature rock including phase change[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(7): 1455–1461. [谭贤君, 陈卫忠, 贾善坡, 等. 含相变低温岩体水热耦合模型研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(7): 1455–1461.]
- [12] Yang Yang. Experimental study on dynamic mechanical properties of rock under low temperature[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2016. [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, 2016.]
- [13] Yuan Pu, Ma Qinyong. Split Hopkinson pressure bar tests on sandstone in coalmine under cyclic wetting and drying[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(9): 2557–2562. [袁璞, 马芹永. 干湿循环条件下煤矿砂岩分离式霍普金森压杆试验研究[J]. *岩土力学*, 2013, 34(9): 2557–2562.]
- [14] Wang Bin, Li Xibing, Yin Tubing, et al. Split Hopkinson pressure bar experiments on dynamic strength of water-saturated sandstone[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(5): 1003–1009. [王斌, 李夕兵, 尹土兵, 等. 饱水砂岩动态强度的 SHPB 试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(5): 1003–1009.]
- [15] Li Nan, Xu Hui, Hu Bin. Shear creep characteristics of sandstone under dry and saturated states[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(2): 124–128. [李男, 徐辉, 胡斌. 干燥与饱水状态下砂岩的剪切蠕变特性研究[J]. *岩土力学*, 2012, 33(2): 124–128.]
- [16] The National Standard Compilation Groups of People's Republic of China. Methods for determining the physical and mechanical properties of coal and rock; GB/T 23561.7–2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009. [中华人民共和国国家标准编写组. 煤与岩石物理力学性质测定方法: GB/T 23561.7–2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.]
- [17] The National Standard Compilation Groups of People's Republic of China. Methods for determining the physical and mechanical properties of coal and rock; GB/T 23561.5–2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009. [中华人民共和国国家标准编写组. 煤与岩石物理力学性质测定方法: GB/T 23561.5–2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.]
- [18] Ping Qi, Ma Qinyong, Yuan Pu. Sensitivity of time for stress equilibrium to wave impedance ratio with different rising times in SHPB tests[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(10): 2128–2134. [平琦, 马芹永, 袁璞. SHPB 试验中不同加载时应力平衡时间对波阻抗比的敏感性[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(10): 2128–2134.]
- [19] Li Xibing, Gu Desheng. Rock impact dynamics[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1994. [李夕兵, 古德生. 岩石冲击动力学[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1994.]
- [20] 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. [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.]
- [21] You Mingqing, Hua Anzeng. Fracture of rock specimen and decrement of bearing capacity in uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1998, 17(3): 292–296. [尤明庆, 华安增. 岩石试样单轴压缩的破坏形式与承载能力的降低[J]. *岩石力学与工程学报*, 1998, 17(3): 292–296.]
- [22] Ping Qi, Ma Qinyong, Yuan Pu. Energy dissipation analysis of stone specimens in SHPB tensile test[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2013, 30(3): 401–407. [平琦, 马芹永, 袁璞. 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.]
- [23] Lu Yani, Li Xiping, Wu Xinghong. Failure modes of fractured rock masses under freeze-thaw action and load[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(2): 351–357. [路亚妮, 李新平, 吴兴宏. 单轴压缩条件下裂隙岩样冻融损伤破坏模式分析[J]. *冰川冻土*, 2017, 39(2): 351–357.]

Experimental study on dynamic compressive mechanical properties of sandstone with low temperature and natural water content

ZHANG Huan¹, PING Qi^{1,2}, WU Mingjing¹

(1. Ministry of Education's Engineering Research Center of Mine Underground Projects, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China; 2. Key Laboratory Being Built by Anhui Province and Ministry of Education for Coal Mine Safety and Efficient Exploitation, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

Abstract: In order to study the dynamic mechanical properties of sandstone, impact compression tests were performed on low temperature and natural water content sandstone specimens under 6 kinds of loading rate by split Hopkinson pressure bar (SHPB) apparatus. The results show that the dynamic compressive strength and the elastic modulus of the sandstone at $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ is greater than that at $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, the dynamic compressive strength increases in a power function with the strain rate. The dynamic elastic modulus is positively related to the strain rate and in a polynomial function both at $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. The dynamic stress-strain curve is able to divide into 4 stages and the strain range in the strain softening stage increases with the increase of strain rate. Failure modes of sandstone specimens range from tensile failure modes in block splitting structure and lamellar spallation structure to shear failure modes in cone structure until to crushing failure modes in granular structure with the increase of strain rate.

Key words: rock dynamics; low temperature; SHPB; dynamic strength; strain rate effect

(本文编辑: 庞瑜)