

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230207003

冰试样动态冲击破坏力学特性实验研究*

解北京, 陈铭进, 陈思羽, 栾 铮, 李晓旭, 梁天宇

(中国矿业大学(北京),北京 100000)

摘要: 为了进一步探究冰材质动态冲击破坏力学特性,通过分离式Hopkinson压杆(SHPB)试验装置,采用快速加载、杆端降温与波形整形技术,保证冰材质的稳定性并实现了加载过程中的动态应力平衡,分析了应变率、温度、长径比、冻藏时间对冰力学特性与破坏模式的影响。结果表明:在 $100\text{ s}^{-1}\sim 500\text{ s}^{-1}$ 的应变率范围内,冰的动态单轴抗压强度与应变率呈现明显的正相关性;小长径比冰温度越低,抗压强度越大,且这种特性会受到应变率的影响;大长径比冰抗压强度随温度的下降而下降,这与体积大导致冰试样受冷不均,内部预应力增大有关;稳定无预应力冰,短冻藏时间会使其强度下降;温度、长径比对冰弹性模量影响明显,小长径比冰弹性模量随温度下降而增大,大长径比冰弹性模量随温度下降而减小;应变率是影响冰材质破坏模式的主要因素,随着应变率的上升,冰材质达到破坏时的轴向裂纹明显增加,形成的破碎产物尺寸明显变小。

关键词: 冰; SHPB; 动态抗压强度; 应变率; 破坏模式

中图分类号: O383 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)06-1284-07

Experimental Study on Dynamic Impact Failure Mechanical Properties of Ice Samples

XIE Beijing, CHEN Mingjin, CHEN Siyu, LUAN Zheng, LI Xiaoxu, LIANG Tianyu
(China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100000, China)

Abstract: In order to further explore the mechanical characteristics of the ice material under dynamic impact failure, the separation Hopkinson pressure bar (SHPB) test device was utilized to ensure the stability of the ice material and achieve dynamic stress balance during the loading process through rapid loading, bar end cooling and waveform shaping technology. The effects of strain rate, temperature, length-diameter ratio and frozen storage time on mechanical properties and failure modes of ice were investigated. The results show that the dynamic uniaxial compressive strength of ice is positively correlated with the strain rate in the range of $100\text{ s}^{-1}\sim 500\text{ s}^{-1}$. For ice with a small length-to-diameter ratio, lower temperatures result in greater compressive strength, a trend significantly influenced by the strain rate. Conversely, the compressive strength of ice with large length-diameter ratio diminishes as temperatures decrease, , attributable to the uneven cooling of large-volume ice samples and increased internal prestress. The strength of stable and unprestressed ice decreases with short freezing time. Both temperature and length-diameter ratio markedly affect the elastic modulus of ice. The elastic modulus of ice with small length-diameter ratio increases with decreasing temperature, while it de-

* 收稿日期:2023-02-07;修回日期:2023-03-22

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC2904100,2019YFC0810800)、国家自然科学基金青年基金项目(51404277)资助
作者简介:解北京(1984—),男,副教授,博士。主要从事矿井瓦斯灾害防治、煤岩动力灾害防治等方面的研究。

E-mail: bjxie1984@cumtb.edu.cn

creases for ice with a larger ratio under the same conditions. The strain rate is the main factor affecting the failure mode of the ice material. With the increase of the strain rate, axial cracks increase obviously when the ice material reaches failure, and the resulting fragments significantly reduce in size.

Keywords: ice; SHPB; dynamic compressive strength; strain rate; failure mode

0 引言

冰材质作为自然界常见的固体,对人类生产生活有着重要的影响。河流与湖泊结冰影响交通运输,破冰船进行撞击挤压破冰;飞机在起飞或降落阶段位于对流层,强对流运动可能引发的冰雹对飞机的高速冲击是较大的安全隐患^[1],为了提高破冰效率或是评估穿越冰雪层的飞机安全性,需要对冲击过程进行数值模拟研究,冰材质的动态力学性能规律与参数是研究的基础。目前对冰的研究主要集中在准静态拉压性能上,关于冰动态加载试验的研究较少。H.Kim等^[2]测量了 $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰在 $400\text{ s}^{-1}\sim 2\ 600\text{ s}^{-1}$ 应变率范围内的抗压强度,发现抗压强度几乎是均匀的,在 19.7 MPa 左右;李尚昆等^[3]在 $700\text{ s}^{-1}\sim 2\ 700\text{ s}^{-1}$ 的应变率范围内,测得 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰试件的压缩强度为 $14.5\sim 49.3\text{ MPa}$,相比于准静态结果表现出明显的动态增强效应;汪洋等^[4]在 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 对冰试样进行了应变率为 $500\text{ s}^{-1}\sim 2\ 000\text{ s}^{-1}$ 的动态压缩实验,发现在较高应变率范围内,冰的动态应力应变关系是与应变率相关的,峰值应力和破坏应变都随应变率的增大而增大。可见,由于冰的力学行为复杂,其动态力学特性的研究数据离散性较大,研究结果差异明显,因此有必要对影响冰动态力学特性的因素进行进一步研究。

1 冰材质 SHPB 试验设计

1.1 试样制备

试验制备的试样为圆柱形,直径 D 均为 50 mm ,长度 L 选择两种,分别是 25 mm 及 50 mm ,即制备 0.5 和 1 两种长径比的冰试样^[5]。试验用水为普通纯净水。考虑到金属模具热传导率大,易在冻结过程中因温度变化影响试样均质性,且金属模具刚度大、脱模不易,易致试样损坏。采取硅胶软材料模具,并在表面覆盖亚克力板,保证试样表面平整和完整性^[6]。

采用DWH-40高精度低温恒温试验箱进行试

样的冻藏,此试验箱可以实现室温至 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的恒温冻藏条件,控温精度可以达到 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。将试样模具放入恒温箱,在设定的温度条件下($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$)冻藏超过 24 h ,保证其结构稳定,典型冰试样尺寸如图1所示。



图1 冰试样

Fig.1 Ice sample piece

1.2 冰试样防融化措施

根据相关研究显示,冰的温度与环境温度之间存在小于 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温差时,冰的内部因为温度的相对稳定其性质也不会有变化,可忽略温差对冰试样的影响。因此需要防止冰试样在实验过程中因温差产生的融化现象^[7]。采取两个方面的技术措施:

(1)快速加载,即将从恒温箱中取出到杆件发射完毕的过程时间尽可能的缩短,实验将往气腔充气以及调整好数据采集系统状态提早完成,将从恒温箱取出试样放置在杆件预定位置的步骤作为发射前的最后一步,根据相关研究^[8]显示,要使试件的温升不对实验的结果产生较大影响,则实验需要在 120 s 内完成,合理设置实验步骤使试样在环境中暴露的时间不会超过 30 s ,保证试样稳定。

(2)降低直接接触试样的杆端温度,实验采取超低温软体冰袋,该种冰袋在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 仍处于软体状态,实验前使用绑带使其环绕杆端,迅速降低杆端温度。

1.3 实验装置

实验装置采取的是分离式Hopkinson压杆(SHPB)试验装置,由于冰的波阻抗较小,杆件采取的是直径为 50 mm 的铝杆^[9](密度 2.81 g/mm^3 ,弹性波速 $5\ 163.98\text{ m/s}$,泊松比 0.33)。具体试验装置如

图2所示。

1.4 应力平衡

由于冰是典型的脆性材料,特征是较小的破坏应变,要使冰试样在破坏前尽可能达到应力平衡状态。

根据相关研究,应力波在试样内传播两个来回的时间点就可以认为该试样达到了应力平衡,如式(1):

$$t_e = \frac{4l_0}{c_i} \quad (1)$$

式中, l_0 为试样厚度(m); c_i 为试样的轴向弹性波速(m/s)。

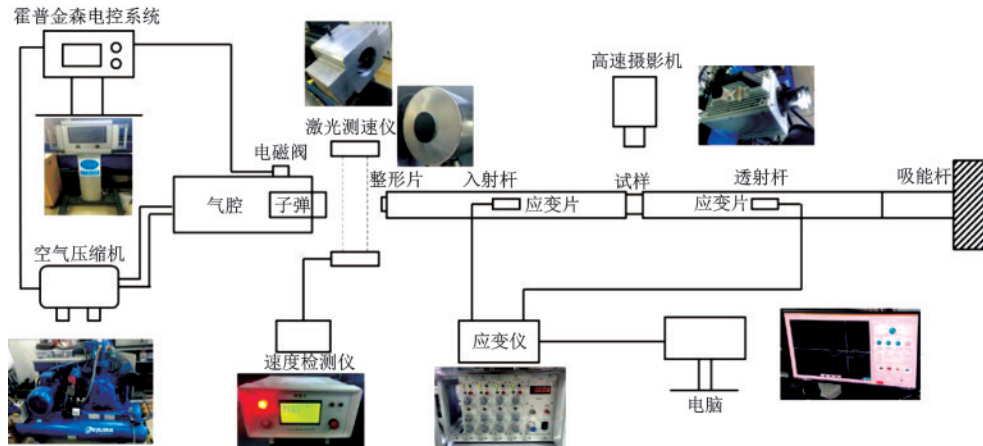


图2 SHPB试验装置
Fig.2 SHPB test facility

采用非金属超声检测仪测量冰试样的轴向弹性波速,经多次测量得到冰试样的平均弹性波速为3 888 m/s,计算得出厚度为25 mm的冰在25.72 μ s时内部应力达到平衡,而厚度为50 mm的冰为51.44 μ s。

利用入射波波形整形技术对入射波进行处理,在延缓其入射波上升达到峰值速度的同时,还能够对高频震荡信号进行滤波处理^[10]。实验采用的是小直径的橡胶薄片,经波形整形后的典型入射波如图3所示,可以看到入射波达到峰值所用时间为225 μ s,使试样在承受较低载荷的时候就能达到内部的应力平衡。

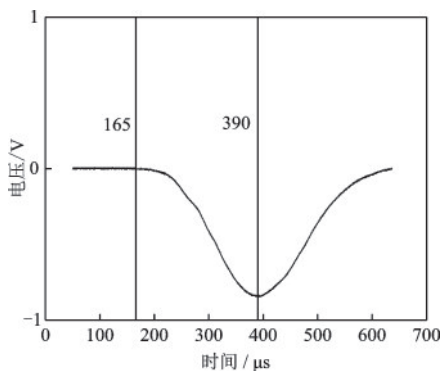


图3 整形后原始入射波波形

Fig.3 The shape of the original incident wave after shaping

根据试样前后应力平衡的原则,在所得波形中,透射波减去反射波应等于入射波^[11],对试验中试样的应力平衡过程进行检验,结果如图4所示,可见冰试样试验中的应力平衡结果较好。

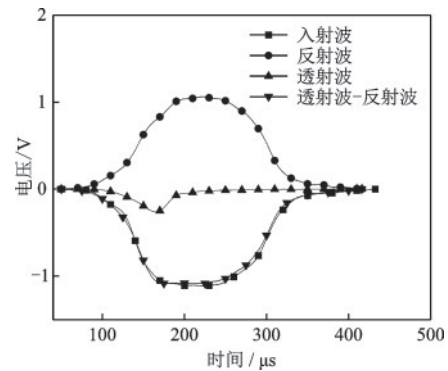


图4 试样应力平衡历程

Fig.4 Time history of sample stress equilibrium

2 冰材质动态力学特性分析

2.1 冰材质动态抗压强度

通过控制子弹位于气腔内深度以及气腔压力来改变子弹发射速度,实现不同的加载条件^[12]。

图5为4种温度下长径比0.5冰试样抗压应力

峰值与应变率关系图。由图5可见,冰的动态抗压强度随着应变率的增加而增大,呈现明显的正相关性,并且这种特性不受冻藏温度的影响;总体上冻藏温度更低的冰抗压强度更大,并且冻藏温度对冰抗压强度的影响与应变率大小有一定关系。由线性拟合的曲线可见,随着温度降低,曲线斜率逐渐增大,在低应变率(150 s^{-1})附近,高低冻藏温度之间冰的抗压强度相差约3 MPa,而在高应变率(400 s^{-1})附近,两者的抗压强度在 $-10\sim-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间达到了最大值约10 MPa。可见不同冻藏温度的冰的抗压强度都具有应变率强化效应,并且冰的冻藏温度越低,其应变率效应越强。

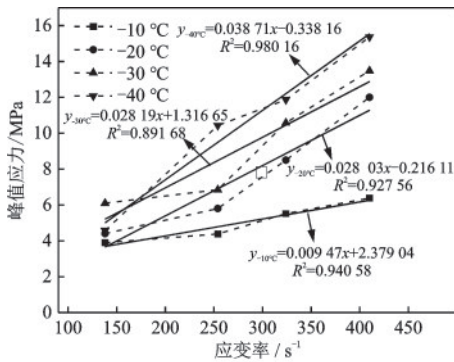


图5 不同冻藏温度冰试样峰值应力($L/D=0.5$)

Fig.5 Stress peaks of ice samples at different freezing temperatures($L/D=0.5$)

图6为4种温度下长径比1冰试样抗压应力峰值与应变率关系图。为对比两种长径比冰在不同温度下的抗压强度,利用图5、6中线性拟合曲线,将应变率解耦,选择同一应变率。为减少误差,选择实际实验覆盖的应变率 200 s^{-1} ,计算得出各自峰值应力,如图7所示。

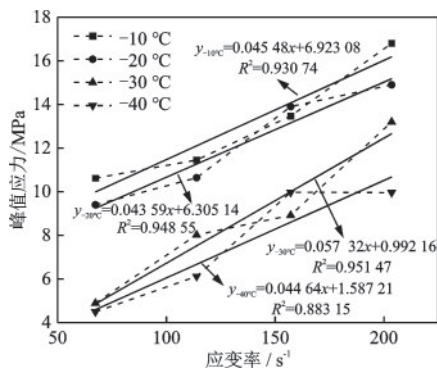


图6 不同冻藏温度冰试样峰值应力($L/D=1$)

Fig.6 Stress peaks of ice samples at different freezing temperatures($L/D=1$)

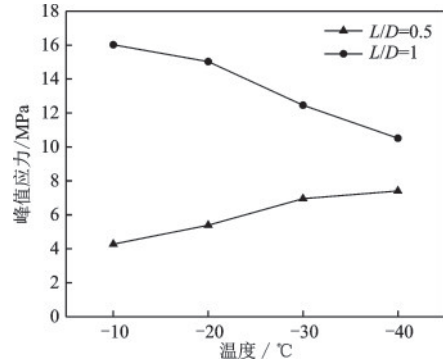


图7 200 s^{-1} 应变率下不同长径比冰试样峰值应力

Fig.7 Peak stress of ice samples with different length-diameter ratios at 200 s^{-1} strain rate

由图6可见,不同温度冰的抗压强度线性拟合曲线斜率相差不大,长径比为1的冰不同温度之间应变率效应的差别较小。值得一提的是,冰抗压强度随冻藏温度的降低而降低,与长径比为0.5的冰规律不符。从图7的对比可以明显看出,长径比为1的冰抗压强度在4种温度下都强于长径比为0.5的冰,但总体上抗压强度随温度降低有明显下降。

造成以上现象的可能原因:首先长径比为1的冰试样体积更大,动载作用下发生破坏前能够储存更多的弹性应变能,且这一作用较强,导致其整体抗压强度高于长径比为0.5的冰;其次由于长径比为1的冰试样体积大,在冻藏过程中内部不可避免地会出现受冷不均,从而在内部产生预应力,此种预应力效应可能减弱了不同温度下应变率对冰的强化效应,导致不同温度冰之间应变率效应的差别较小。同时冻藏温度越低,各部分受冻成冰的状态差距越大,内部产生的预应力越大,其在动载作用下,承受到较小的应变能,就会与内部的预应力共同作用使试样破坏,导致抗压强度的降低。

图8为冻藏时间分别为24 h和8 h的冰试样在相近应变率下的应力峰值图,冰试样选择长径比为0.5,冻藏温度选择 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,使冰受冷均匀,稳定冻结,消除预应力的影响。

冻藏8 h的试样虽然在外表面上与冻藏24 h的试样相似,其内部结构实际并未趋于稳定。由图8可见,峰值应力有明显的降低,可知稳定无预应力冰的动态单轴抗压强度受冻藏时间的影响较大,这与汪洋等^[13]的试验结果不一致,相关原因有待进一步的研究。

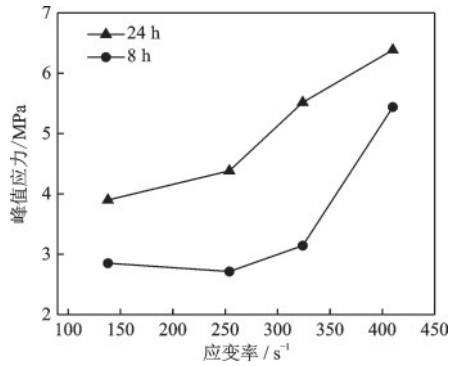


图8 -10 °C下不同冻藏时间冰试样峰值应力($L/D=0.5$)
Fig.8 Peak stress of ice samples at -10 °C for different frozen storage time ($L/D=0.5$)

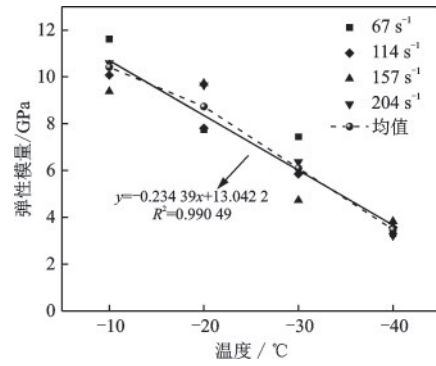


图10 不同冻藏温度下冰试样弹性模量($L/D=1$)
Fig.10 Elastic modulus of ice at different freezing temperatures ($L/D=1$)

2.2 冰材质弹性模量

弹性模量是冰材料力学性能的重要参数。目前对于纯水冰的弹性模量研究较少,以应力-应变曲线上破坏应力50%处所对应的割线模量作为冰的弹性模量^[14],研究不同冻藏温度下冰的弹性模量变化规律。图9、10分别为4种冻藏温度下 $L/D=0.5$ 以及 $L/D=1$ 的冰试样弹性模量离散值与均值图。

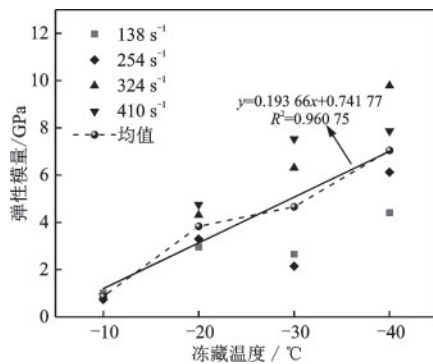


图9 不同冻藏温度下冰试样弹性模量($L/D=0.5$)
Fig.9 Elastic modulus of ice at different freezing temperatures ($L/D=0.5$)

由于冰试样由模具制作,在冻结过程中容易出现细小的缺陷,微缺陷的位置、大小、形状不同导致单个试样的精确性不易控制,相同温度下的试样弹性模量数据具有分散性,通过计算算术平均值可见,总体上长径比为0.5的冰的弹性模量随温度的降低而有明显的增大,可知冻结均匀的冰,冻结温度越低,其刚度越大。由图10可见,长径比为1的冰其弹性模量随温度的降低而降低,可知预应力效应会影响冰的刚度。

2.3 冰材质破坏模式

试验同时采用高速摄像机捕捉冰试样破坏演化过程,摄像机同一边设置两组恒定光源进行补光,拍摄速度选择100 000 Fps,应变信号的采样频率为10 MHz,因此拍摄所得每张照片的间隔为100组采样数据,选取一组典型数据进行分析。图11为-30 °C、 $L/D=1$ 、应变率为200 s⁻¹冰试样的系列高速摄像图,与其相对应的应力-时间曲线如图12所示。曲线上的4个编号对应的时间点与图11的4幅图相对应:在#1图像之前的图像皆无可见损伤,试样处于均匀变形阶段;#2图像可以看出在透射杆端的小损伤区域,标记了损伤的开始;#3图像中,来源于入射杆端与透射杆端的裂纹开始沿轴向传播;至#4图像,试样中的损伤几乎达到饱和状态^[15]。

通过对冰试样破坏过程的高速摄像影像对比分析,发现在相近应变率的条件下,温度、长径比对

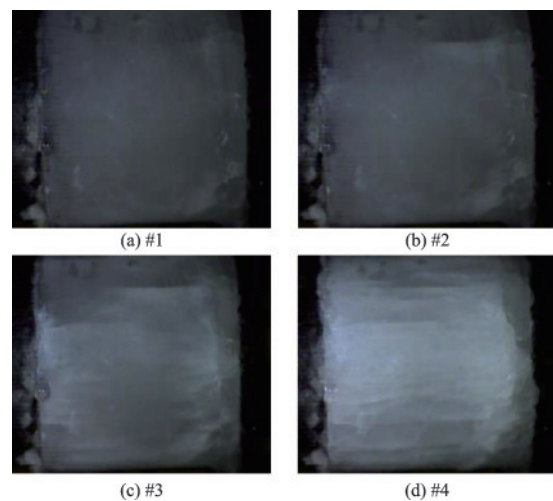


图11 典型冰试样的破坏过程
Fig.11 The destruction process of a typical ice sample

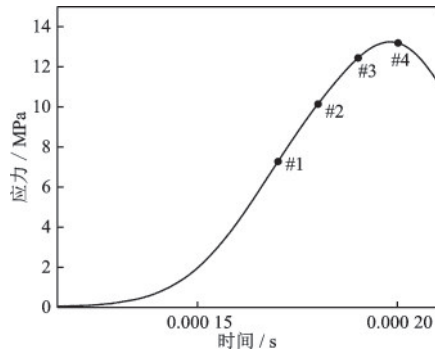


图 12 典型冰试样的应力-时间曲线

Fig.12 Stress-time curves of typical ice samples

冰材质破坏模式的影响较小。如图 13 所示,应变率相近(138 s^{-1}),破坏模式差异不大,在这一应变率下,冰试样都以较大碎块沿轴向破坏。

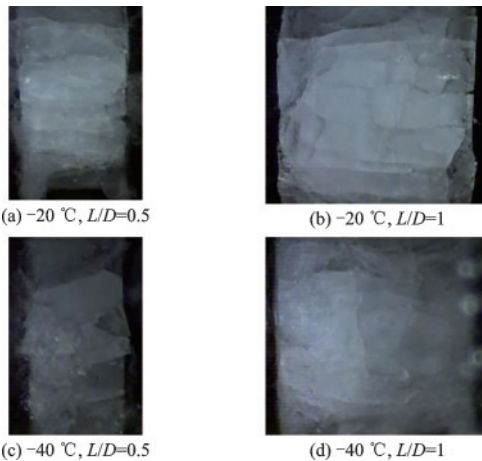


图 13 温度、长径比对冰破坏模式影响对比

Fig.13 Comparison of effects of temperature, length-diameter ratio on ice failure modes

长径比为 1 的试样破坏过程图像更为明显,为了便于对比,选择长径比为 1 的典型试样进行应变率因素影响分析,如图 14 所示。明显可见随着应变率的上升,冰试样达到破坏时的轴向裂纹明显增加,形成的破碎产物尺寸逐渐变小。

3 结论

通过 SHPB 动态加载与数据采集系统,研究了冰在 $100\text{ s}^{-1}\sim 500\text{ s}^{-1}$ 应变率范围内不同冻藏温度、长径比、冻藏时长下的力学特性与破坏模式,采用防融化措施保证了冰试样的稳定性,使用波形整形技术实现了冰试样加载过程中的应力平衡。分析试验结果可得出以下结论:

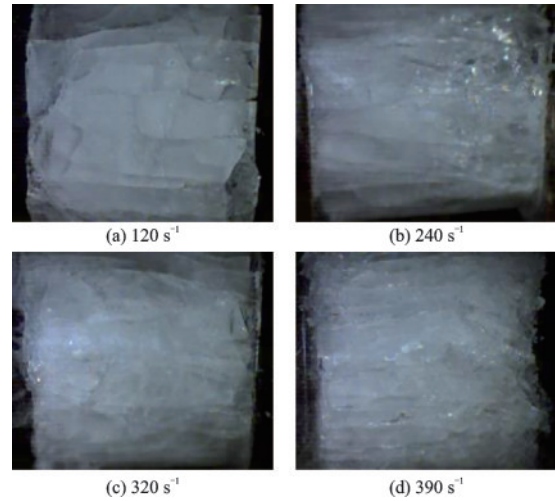


图 14 不同应变率下典型冰试样的破坏模式对比

Fig.14 Failure modes of typical ice samples under different strain rates

(1)冰动态单轴抗压强度与应变率呈现正相关性;长径比为 0.5 的冰抗压强度随冻藏温度的降低而增强,应变率效应也随之增强;长径比为 1 的冰总体抗压强度强于长径比为 0.5 的冰,但随冻藏温度降低有所下降,此种现象与冰体积大导致受冷不均,内部预应力增大有关;稳定无预应力冰冻藏时长缩短,强度会下降。

(2)冰的弹性模量与其长径比、冻藏温度有关。长径比决定冰冻过程的预应力,无预应力影响下,冻藏温度越低,冰弹性模量越大;有预应力影响下,冻藏温度越低,预应力越大,冰弹性模量越小。

(3)温度、长径比对冰材质破坏模式的影响较小,应变率是影响破坏模式的主要因素,随着应变率的上升,冰试样达到破坏时的轴向裂纹明显增加,形成的破碎产物尺寸明显变小。

参考文献:

- [1] 张永康,李玉龙,汤忠斌,等.冰在低温下的单轴压缩力学行为和破坏机制[J].固体力学学报,2018,39(5):530-538.
Zhang Y K, Li Y L, Tang Z B, et al. Mechanical behavior and failure mechanism of ice under uniaxial compression at low temperature[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2018, 39(5): 530-538. (in Chinese)
- [2] Kim H, Keune J N. Compressive strength of ice at impact strain rates[J]. Journal of Materials Science, 2007, 42(8):2802.
- [3] 李尚昆,冯晓伟,谢若泽,等.高应变率下纯水冰和杂

- 质冰的动态力学行为[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(9): 76-83.
- Li S K, Feng X W, Xie R Z, et al. Dynamic mechanical behavior of pure water ice and impurity ice at high strain rate[J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(9): 76-83. (in Chinese)
- [4] 汪洋, 李玉龙, 刘传雄. 利用 SHPB 测定高应变率下冰的动态力学行为[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(2): 215-219.
- Wang Y, Li Y L, Liu C X. Determination of dynamic mechanical behavior of ice under high strain rate by SHPB[J]. Explosion and Shock Waves, 2011, 31(2): 215-219. (in Chinese)
- [5] 王宝生. 原位高压冻结冰试样的制作工艺与单轴压缩力学特性[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- Wang B S. Fabrication technology and uniaxial compression mechanical properties of in-situ high pressure frozen ice samples[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021. (in Chinese)
- [6] 薛世超, 常孟周, 韩雅菲, 等. 冲击载荷下冰的动态压缩力学特性数值模拟[J]. 装备制造技术, 2021(3): 4-6.
- Xue S C, Chang M Z, Han Y F, et al. Numerical simulation of dynamic compressive mechanical properties of ice under impact load[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2021(3): 4-6. (in Chinese with English abstract)
- [7] 梁志强. 冰的制备及力学特性研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2020.
- Liang Z Q. Study on preparation and mechanical properties of ice[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [8] 李尚昆, 冯晓伟, 谢若泽, 等. 高应变率下纯水冰和杂质冰的动态力学行为[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(9): 76-83.
- Li S K, Feng X W, Xie R Z, et al. Dynamic mechanical behavior of pure water ice and impurity ice at high strain rate[J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(9): 76-83. (in Chinese)
- [9] 解北京, 于瑞星, 陈冬新, 等. 动载下石灰岩能耗指标影响因素研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(11): 62-70.
- Xie B J, Yu R X, Chen D X, et al. Study on Influencing factors of energy consumption index of limestone under dynamic load[J]. China Work Safety Science and Technology, 2022, 18(11): 62-70. (in Chinese)
- [10] 万林林, 邓泽辉, 邓朝晖, 等. 基于脆性材料的 SHPB 实验研究与展望[J]. 材料科学与工程学报, 2019, 37(2): 316-324.
- Wan L L, Deng Z H, Deng Z H, et al. Experimental research and prospect of SHPB based on brittle Materials[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2019, 37(2): 316-324. (in Chinese)
- [11] 解北京, 栾铮, 陈冬新, 等. 不同长径比煤样动力学特征及本构模型[J]. 矿业科学学报, 2023, 8(2): 190-201.
- Xie B J, Luan Z, Chen D X, et al. Dynamic characteristics and constitutive model of coal samples with different length-diameter ratios[J]. Journal of Mining Science, 2023, 8(2): 190-201. (in Chinese)
- [12] 肖俊孝, 庞宝君, 唐钧跃, 等. 月壤水冰模拟样本 SHPB 试验及反射波特性和分析[J]. 深空探测学报(中英文), 2022, 9(2): 150-156.
- Xiao J X, Pang B J, Tang J Y, et al. SHPB test and reflectivity analysis of lunar soil water ice simulated samples[J]. Journal of Deep Space Exploration (Chinese & English), 2022, 9(2): 150-156. (in Chinese)
- [13] 汪洋, 李玉龙, 刘传雄. 利用 SHPB 测定高应变率下冰的动态力学行为[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(2): 215-219.
- Wang Y, Li Y L, Liu C X. Determination of dynamic mechanical behavior of ice under high strain rate by SHPB[J]. Explosion and Shock Waves, 2011, 31(2): 215-219. (in Chinese)
- [14] 徐湘田, 白瑞强, 赖远明, 等. 含盐冻结粉质砂土力学性质的试验研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(4): 836-842.
- Xu X T, Bai R Q, Lai Y M, et al. Experimental study on mechanical properties of frozen silty sand containing salt[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(4): 836-842. (in Chinese)
- [15] 陈为农, 宋博. 分离式霍普金森(考尔斯基)杆: 设计、试验和应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2018: 68-69.
- Chen W N, Song B. Separated Hopkinson (Kolski) bar: design, test and application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2018: 68-69. (in Chinese)

(本文编辑: 赵霞)