

DOI: 10.11883/bzycj-2024-0207

# 不同状态下冰冲击的力学特性\*

解北京, 陈铭进, 陈思羽, 刘志遥

(中国矿业大学(北京)应急管理与安全工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 为探究非纯净冰和非完整冰在冲击载荷下的动态力学特性, 基于改进后的分离式霍普金森压杆实验系统, 采用快速加载、杆端降温和波形整形技术, 对冻结温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的完整冰(纯水, 含 2.5%、3.5%、4.5% 盐分, 含 2.0%、4.5%、8.5% 椰丝)和拼接冰(拼接界面倾角 $30^{\circ}$ 、 $60^{\circ}$ )进行冲击力学特性研究; 利用高速摄像技术记录破坏过程, 并结合 Mohr-Coulomb 强度准则分析拼接冰的破坏模式。结果表明: 纯水冰具有最高的抗压强度, 添加椰丝的冰样次之, 且二者表现出相似的正应变率效应, 添加盐分的冰的抗压强度最低, 应变率效应也不明显。添加椰丝的冰样的动态抗压强度随椰丝含量的增加先增大后减小; 由于椰丝对小粒径碎冰的联结作用, 高椰丝含量的冰样的应力-应变曲线易出现“双峰”现象。拼接平面对裂纹扩展和破坏模式均有影响, 拼接冰的抗压强度低于完整冰。界面倾角较小时, 拼接冰破坏以界面滑移为主; 倾角大时, 拼接冰以整体破坏为主, 与完整冰类似。

**关键词:** 冰; 冲击破坏; 分离式霍普金森压杆; 动态力学特性; 高速摄像

中图分类号: O383 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

## Experimental study on mechanical properties of ice shock under different states

XIE Beijing, CHEN Mingjin, CHEN Siyu, LIU Zhiyao

(School of Emergency Management and Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** To investigate the dynamic mechanical characterization of non-pure and non-intact ice materials under impact loads, a modified split Hopkinson pressure bar (SHPB) was used. Rapid loading, rod end cooling and waveform shaping techniques were used to ensure the stability of the ice material and achieve dynamic stress balance during loading. The impact mechanical properties of complete ice (pure water, containing 2.5%, 3.5%, 4.5% salt, containing 2.0%, 4.5%, 8.5% coconut) and spliced ice (splicing interface inclination  $30^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$ ) at freezing temperature of  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  were studied. The strain rate ranges from  $150\sim 250\text{ s}^{-1}$ . The failure process was recorded by using the high-speed camera triggered simultaneously with the pressure rod. The correlation between the stress and strain of the sample, along with the failure process, was determined by analyzing the time history curve of sample. The failure mode of the spliced ice sample was analyzed by combining the Mohr-Coulomb strength criterion. The results show that the pure water ice exhibits the highest compressive strength, followed by the ice with coconut shreds, and both of them show a positive strain rate effect. However, the compressive strength of the ice with salt addition decreases significantly due to its loose structure and the strain rate effect is not obvious. The dynamic compressive strength of ice samples added with coconut fiber increases firstly and then decreases with the increase of coconut fiber content. Ice samples with high coconut fiber content are prone to "double peak" phenomenon due to the binding effect of coconut fiber

\* 收稿日期: 2024-06-27; 修回日期: 2024-09-18

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC2904100); 中央高校基本科研业务费专项资金(2023ZKPYAQ04); 中国矿业大学(北京)大学生创新训练项目(202312031)

第一作者: 解北京(1984—), 男, 博士, 副教授, [bjxie1984@163.com](mailto:bjxie1984@163.com)

通信作者: 陈铭进(1999—), 男, 硕士研究生, [CMJ1357550362@163.com](mailto:CMJ1357550362@163.com)

on broken ice with small particle size. The splicing plane affects the crack growth, resulting in lower compressive strength than the intact ice sample, and affects the failure mode as well. The ice with small interface inclination is mainly damaged by interface slip, while the ice with large interface inclination is mainly damaged by whole ice, which is similar to the intact ice. The research results provide theoretical basis and method reference for the dynamic mechanical properties of non-pure and non-intact ice materials under impact loads.

**Keywords:** ice; impact damage; split Hopkinson pressure bar; dynamic mechanical characterization; high-speed camera

冰在自然界中十分常见,它与众多的人类活动有紧密联系,例如:冰雹对房屋<sup>[1]</sup>、汽车<sup>[2]</sup>、飞行器<sup>[3]</sup>等造成的损伤,南北极等寒冷地区中应用的破冰<sup>[4]</sup>技术等。冰的冲击断裂已经成为航空、航海安全领域的重要课题。

冲击作用下冰的抗压强度的影响因素众多,如冻结温度、应变率等。对于冻结温度:Wu等<sup>[5]</sup>将冰的测试温度从 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降到 $-125\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,发现峰值抗压强度持续增大,随着测试温度进一步降到 $-173\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,峰值强度保持恒定;Kermani等<sup>[6]</sup>对大气冰进行了抗压强度测试,发现随着实验温度的降低,抗压强度增加,且抗压强度对温度的依赖性在应变率为 $3\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ 时最强。对于应变率:Kim等<sup>[7]</sup>发现中高应变率 $400\sim 2600\text{ s}^{-1}$ 下冰的动态压缩强度保持恒定,平均动态压缩强度为 $19.7\text{ MPa}$ ;Shazly等<sup>[8]</sup>的研究表明,冰在应变率为 $90\sim 1400\text{ s}^{-1}$ 范围内表现出应变率敏感性。部分学者对冰的劈裂拉伸特性进行了研究:Zhang等<sup>[9]</sup>采用巴西圆盘法对蒸馏水冰和河水冰进行了动态拉伸研究,发现蒸馏水冰的间接拉伸强度比河水冰高;Song等<sup>[10]</sup>发现冰在动态剪切下的力学特性对剪切应变率敏感;单仁亮等<sup>[11]</sup>对冰进行三轴压缩强度试验,获得了围压对冰强度的影响规律。

目前的研究主要关注外因对冰强度的影响,人工制冰时多使用完整纯水冰进行实验。然而,在实际情况中,冰不仅受到自然界中各种杂质的影响,还可能处于冻融过程中的不完整状态,对于非纯净冰和非完整状态下的冰的研究还少见报道。本文中,基于改进后的分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)实验系统,采用快速加载、杆端降温和波形整形技术,对冻结温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的完整冰和拼接冰进行冲击力学特性研究,利用高速摄像技术记录破坏过程,并结合Mohr-Coulomb强度准则分析拼接冰的破坏模式,以期为非纯净冰和非完整冰在冲击载荷下的动态力学特性提供理论依据。

## 1 SHPB 实验设计

### 1.1 实验装置

实验装置采取分离式霍普金森压杆<sup>[12]</sup>,如图1所示。为适配具有较小的波阻抗的冰,主体杆采用密度为 $2.81\text{ g/mm}^3$ 、弹性波速为 $5164\text{ m/s}$ 、泊松比为 $0.33$ 、直径为 $50\text{ mm}$ 的圆柱形铝杆。撞击杆长 $40\text{ cm}$ ,入射杆长 $300\text{ cm}$ ,透射杆长 $250\text{ cm}$ ,吸能杆长 $100\text{ cm}$ 。

数据采集时,采用SB3.8-120-P-2型半导体应变片,电阻值为 $(120\pm 9.6)\text{ }\Omega$ ,灵敏度系数为 $110\pm 5.5$ ;采用LK2017型超动态应变仪测量应变,其包含4个通道,可同时采集入射杆和透射杆上4组应变片的电信号,采样频率为 $10^7\text{ s}^{-1}$ ;采用KIRANA-5M型超高速摄像机拍摄样品,其拍摄帧率最高可达 $5\times 10^5\text{ s}^{-1}$ ,配套使用FH-500型多通道闪光灯,每通道的强闪光持续 $2\text{ ms}$ ,以满足试样破坏过程中所需抓取的时长。

### 1.2 冰样制备与防融措施

采用普通纯净水制备 $50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 的圆柱形冰样,冻结温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,实验冻结冷源采用高精度低温恒温试验箱,控温精度为 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。冰样分为完整冰和拼接冰,二者皆采用定制硅胶模具冻结。对于完整冰,采用一体模具冻结 $24\text{ h}$ ,表面辅以平整的亚克力板,硅胶和亚克力板的导热系数较低,能降低冰块的结晶速度,使水中的溶解氧排出至冰块外部,并在冷冻的过程中使完整冰充分并均匀地制冷,保证完整冰直径的均匀性以及端面平行度<sup>[13-15]</sup>。对于拼接冰,采用分体模具冻结 $12\text{ h}$ 后,将端面置于导热性能好的平整铁板上,待端面微融,将两端面自然贴合并放入一体模具中再次冻结 $12\text{ h}$ ,以模拟自然界中微

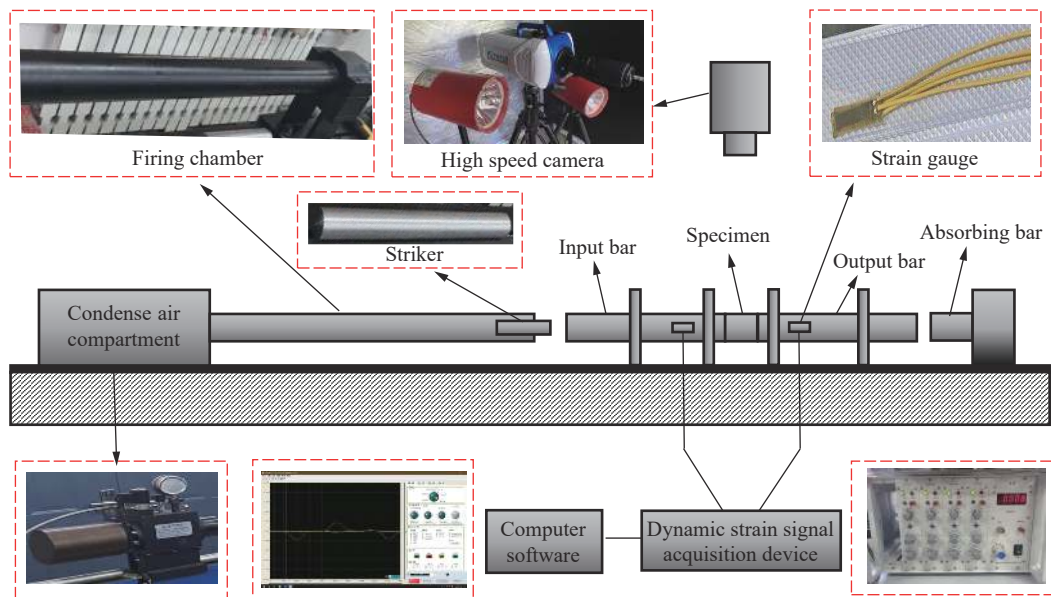


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental apparatus

融冰结合并再次受冷形成的拼接冰状态。拼接冰的试样如图 2 所示。本实验选择相对较高的温度和较长的冷冻时间, 以便在冷冻过程中任何截留的空气逸出<sup>[16]</sup>。

研究表明,  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  的冰样在室温环境下升高  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  需要  $120\text{ s}$ <sup>[17]</sup>, 而在一般情况下, 冰样升温约  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[18]</sup> 不会改变冰样的本质。因此, 实验采用 2 种冰样防融措施: (1) 实验前, 用绑带将自身温度为  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右且仍能保持流体状态的超低温软体冰袋环绕置于杆端, 以此降低杆端温度, 减少冰样的热量传递; (2) 尽可能缩短冰样暴露在室温中的时间, 调整实验准备步骤, 将气仓充气系统、超动态应变仪采集系统、高速摄像记录系统等提前开启, 冰样从恒温箱中取出置于杆端中间后立即冲击<sup>[19]</sup>, 经测试, 冰样在室温环境中经历的时间不超过  $20\text{ s}$ 。

1.3 实验工况与应力平衡

### 1.3 实验工况与应力平衡

以现实为基础进行实验设计, 盐的质量分数(含盐量)大于  $2.5\%$  的为咸水湖, 海水的平均含盐量约为  $3.5\%$ , 因此, 设计质量分数为  $2.5\%$ 、 $3.5\%$  以及  $4.5\%$  的含盐工况进行研究。自然情况下, 水中掺杂物以掉落的水边植物为主。椰丝较为坚韧, 在实验冻结过程中易于操作, 能够在冰中较均匀地分布, 并且体积小, 能够分辨其在冰样中的分布情况。考虑可操作性和经济性, 选择椰丝作为实验掺杂物, 代表水中小体积的丝状杂质, 椰丝的质量分数设为  $2.0\%$ 、 $4.5\%$  以及  $8.5\%$ 。拼接冰中, 拼接平面与轴向杆件冲击方向所夹的角度, 即拼接角度( $\alpha$ )取  $30^{\circ}$ 、 $60^{\circ}$ , 与完整冰样进行对比研究。

实验中, 通过调节撞击杆在发射膛中的位置以及冲击气压控制输入杆件系统内的能量大小(撞击杆速度)。根据空杆测试方法, 将撞击杆速度控制在  $8$ 、 $10$ 、 $12$ 、 $14\text{ m/s}$ , 对应的冰样的应变率在  $150\sim 250\text{ s}^{-1}$  之间。实验共计  $36$  个工况, 如表 1 所示。

研究<sup>[20]</sup>显示, 动态平衡后, 通常使用“二波法”(入射波  $\varepsilon_i(t)$  和透射波  $\varepsilon_t(t)$ ) 进行计算。这是因为相较于入射波和透射波, 反射波  $\varepsilon_r(t)$  易受干扰因素影响, 进而影响试样的应力-应变关系的确定。因此, 保证试样受力的动态平衡至关重要<sup>[21]</sup>, 即  $\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) = \varepsilon_t(t)$ 。试样在其内部的应力脉冲近似  $\pi$  次反射后达

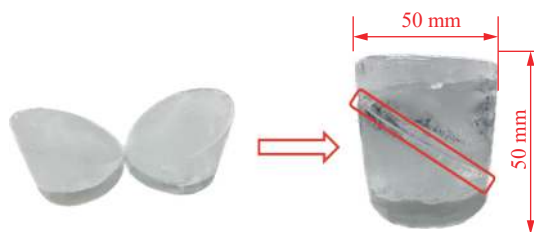


图 2 拼接冰试样

Fig. 2 A sample of spliced ice

到平衡状态<sup>[22]</sup>:

$$t_0 = \frac{\pi L_0}{C_0} \quad (1)$$

式中:  $t_0$  为到达平衡状态需要的时间,  $L_0$  和  $C_0$  分别为试样长度和纵波波速。

实验用冰样的长度为 50 mm, 经非金属超声检测仪测得的冰样平均波速为 3 220 m/s, 计算可得到达平衡状态的平均时间为 48.8  $\mu$ s。冰样的弹性波速越小, 到达平衡状态所需时间越长。根据文献 [17-18], 冰样的弹性波速为 3 162 和 3 338 m/s, 考虑到冰样波速的误差, 对波速取系数 0.9~1.1, 即波速在 2 898~3 542 m/s 范围内, 到达平衡状态至少需要 44.3~54.2  $\mu$ s。本实验采用波形整形技术, 在入射杆端中心处放置橡胶整形器, 延缓入射波达到峰值的时间, 使应力波在冰样内充分反射直至冰样破坏, 即冰样在破坏前达到动态平衡状态。

图 3 对比了高(H)/低(L)速冲击下应变片测得的电压( $U$ )-采样时间( $t$ )曲线, 图 4 为整形后试样的动态平衡结果。由图 3 可知, 入射波经整形后, 达峰时间明显延长, 由 50  $\mu$ s 延长至 227  $\mu$ s, 且波形振荡明显减弱。整形后试样符合动态应力平衡要求(图 4)。

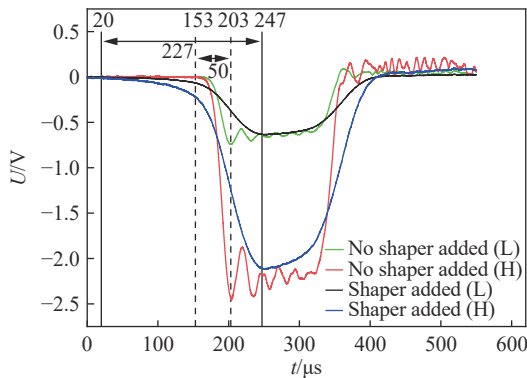


图 3 高/低速冲击下应变片测得的电压曲线对比

Fig. 3 Comparison of voltage curves obtained by strain gauge under high/low speed impact

试样编号	材质	拼接角度/(°)	撞击杆速度/(m·s <sup>-1</sup> )
1~4	纯水	完整	
5~8	水+2.5%盐	完整	
9~12	水+3.5%盐	完整	
13~16	水+4.5%盐	完整	
17~20	水+2.0%椰丝	完整	8、10、12、14
21~24	水+4.5%椰丝	完整	
25~28	水+8.5%椰丝	完整	
29~32	纯水	30	
33~36	纯水	60	

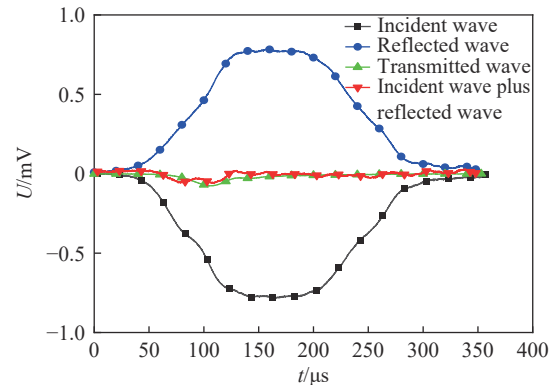


图 4 整形后试样的动态平衡结果

Fig. 4 The result of dynamic balance of the sample after shaping

## 2 动态力学特性分析

### 2.1 完整冰样

实验通过控制撞击杆加载速度, 来保证试样处于同一应变率水平。在相近应变率(200 s<sup>-1</sup>)下, 完整冰样的典型应力( $\sigma$ )-应变( $\epsilon$ )曲线如图 5 所示。由图 5 可知, 高应变率工况下, 纯水冰的抗压强度高于含盐和椰丝的冰, 其中含盐冰的抗压强度最低。对应力-应变曲线中的线性上升段作切线, 斜率代表该冰样的弹性模量, 可以看出, 含盐和椰丝的冰的弹性模量明显减小, 抗压强度下降。

选取应变率为 200 s<sup>-1</sup> 时的纯水冰作为典型工况, 采用高速摄像捕捉其冲击破坏过程, 如图 6 所示, 其应力-时间曲线如图 7 所示。高速摄像与应变片同时触发, 计算出应力波从应变片传播至试样端所需的时间即可推算出高速摄像每张图片对应于试样应力-时间曲线上的点, 图 6(a)~(h) 分别对应图 7 中点 A~H。由图 6~7 可知: 在应力上升阶段, 冰样在杆端处出现了裂纹; 在应力峰值附近, 与杆接触的两端处裂纹产生较多, 且裂纹即将贯通; 图 6(d) 中两端裂纹已经相互贯通, 冰样应力下降, 相较于应力上升阶



段, 应力下降阶段(图 7 中点 D~H)的速度较慢, 对应的破坏过程(图 6(d)~(h))也较为接近, 总体上表现为轴向裂纹数量多且相互贯通。

全部完整冰样在不同应变率( $\dot{\epsilon}$ )下的抗压强度( $\sigma_{bc}$ )如图 8 所示。由图 8 可知: 在实验应变率范围内, 纯水冰和含椰丝冰的动态抗压强度随应变率的上升而增加; 而含盐冰无明显的应变率效应, 在应变率约为  $180 \text{ s}^{-1}$  时达到抗压强度峰值。相较于纯水冰, 含盐冰在  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ 、24 h 的冻结条件下, 抗压强度峰值下降, 约为纯水冰的 20%。随着含盐量的上升, 含盐冰的抗压强度进一步下降。盐水在冻结过程中会伴随盐析出现象<sup>[23]</sup>, 3.5% 和 4.5% 的含盐量超过了冻结过程中的饱和含盐量, 导致抗压强度结果相近, 总体上表现为 3 种含盐量工况下的动态抗压强度变化较小。产生这种现象的原因与含盐冰的结构有关, 图 9 为纯水冰和含盐冰破坏时的高速摄像图片。

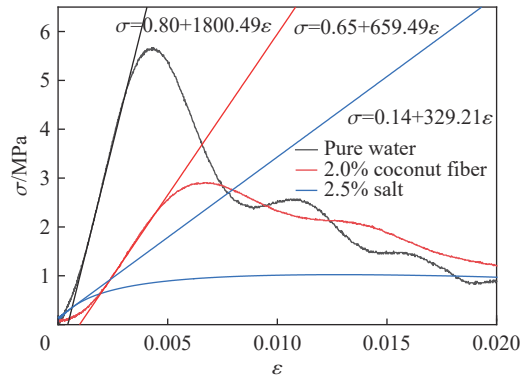


图 5 应变率为  $200 \text{ s}^{-1}$  时完整冰样的应力-应变曲线  
Fig. 5 Stress-strain curves of intact ice samples at strain rate of  $200 \text{ s}^{-1}$

产生这种现象的原因与含盐冰的结构有关, 图 9 为纯水冰和含盐冰破坏时的高速摄像图片。

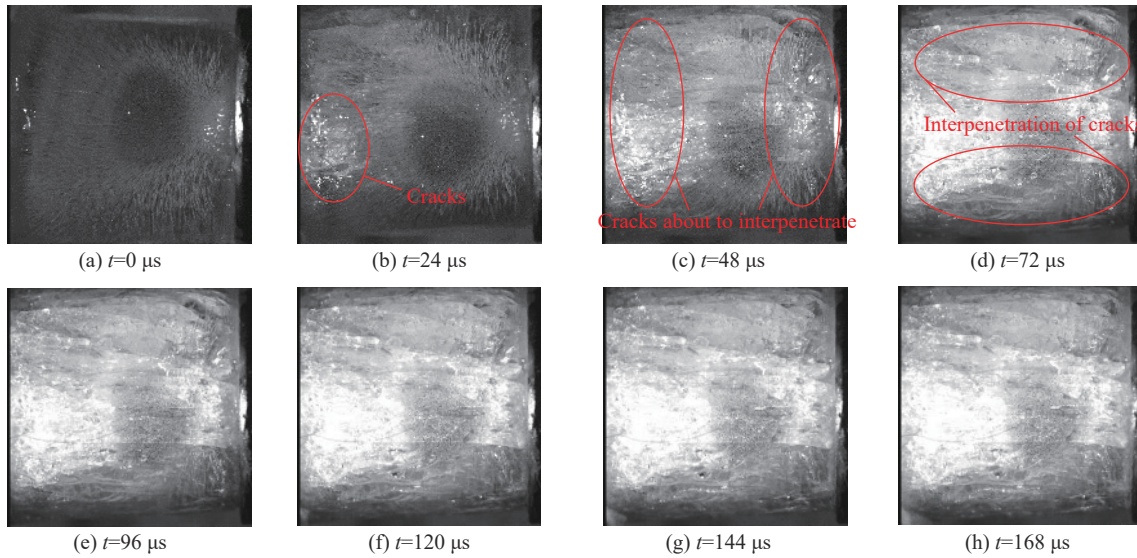


图 6 应变率为  $200 \text{ s}^{-1}$  时纯水冰的冲击破坏过程  
Fig. 6 Impact failure process of pure water ice at strain rate of  $200 \text{ s}^{-1}$

图 9(a)~(b) 中, 纯水冰在不同应变率下破坏时表现出不同的裂纹分布规律: 低应变率时, 裂纹较少, 破坏碎片粒径大; 高应变率时, 轴向裂纹明显增多, 试样破碎较完全, 表现为更大的抗压强度。添加盐分后, 冰的破坏状态与纯水冰明显不同; 随着应变率和含盐量的提高, 冰样的破坏形态变化不大, 破碎时裂纹较密集, 说明含盐冰在实验应变率下已达抗压强度峰值。含盐冰抗压强度下降的原因可能是, 含盐冰冻结时盐分无法冻结且析出时间较慢, 部分盐分与水形成水合物, 导致含盐冰内部无法形成类似纯水冰的致密结构, 较低的应变率也会使较松散的结构出现

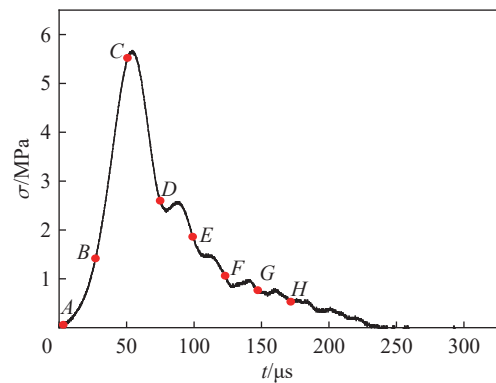


图 7 应变率为  $200 \text{ s}^{-1}$  时纯水冰的应力-时间曲线  
Fig. 7 Stress-time curve of pure water ice at strain rate of  $200 \text{ s}^{-1}$

大量细密裂纹并导致破坏<sup>[24]</sup>。

由图 8 还可见, 整体上, 含椰丝冰的抗压强度低于纯水冰, 但高于含盐冰, 且抗压强度随椰丝质量分数(含椰丝量)的增加呈现先增大后减小的变化趋势。这是由于椰丝含量低时, 椰丝对冰样内部结构的破坏作用远大于其对冲击过程的强化作用; 椰丝含量适中时, 椰丝在冰样破碎过程中能够与大粒径碎冰形成一定的联结强化作用; 椰丝含量偏高时, 联结的碎冰更多, 但冰样内部被大量椰丝分隔, 导致破碎粒径减小, 联结的碎冰的抗压强度不足。

椰丝含量的增加会使冰样产生明显的“双峰”现象(图 10)。随着椰丝含量的增加, 冰样的应力峰值出现明显的滞后, 8.5% 含椰丝冰的应力峰值低于 4.5% 含椰丝冰, 但在 8.5% 含椰丝冰达到峰值应力时的应变水平下(图 10 中的  $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$ 、 $\epsilon_3$ ), 椰丝含量高的冰样的抗压强度更大, 4.5% 含椰丝冰在此应变水平下的抗压强度已经下降了 30% 左右。这是由于椰丝含量不同时, 冲击破坏过程中椰丝对碎片的联结作用不同, 如图 11 所示。

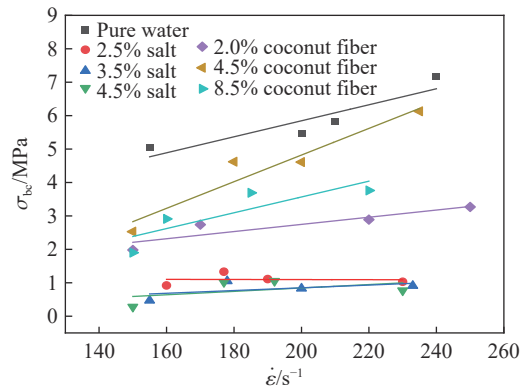


图 8 不同应变率下完整冰样的抗压强度

Fig. 8 Compressive strength of intact ice samples at different strain rates

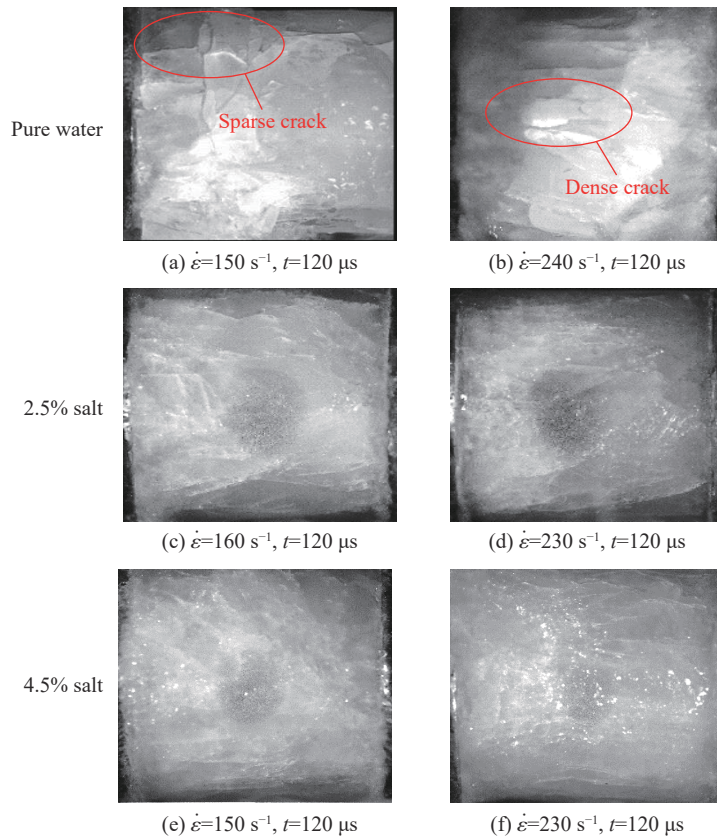


图 9 纯水冰和含盐冰破坏时的高速摄像图像

Fig. 9 High-speed camera images of the destruction of pure ice and salt added ice

由图 11(a)~(b) 可知, 4.5% 含椰丝冰在冲击过程中小粒径的碎块掉落, 椰丝主要对大粒径的破碎冰块起联结作用, 使冰样的抗压强度增加; 由图 11(c)~(d) 可知, 含椰丝量为 8.5% 时, 冰样内部孔隙增多,

破碎粒径减小, 此时椰丝对小粒径碎冰的联结作用较强, 因此, 在破坏过程中, 应力上升达到首个峰值、冰样初步破碎后, 不断挤压联结的碎冰, 碎冰到达密实阶段并出现第 2 次应力峰值, 产生“双峰”现象。从破坏后的冰样可以发现, 椰丝含量高的冰样在较大应变时仍保持一定的抗压强度。

### 2.2 拼接冰样

采用纯水制作了 2 种拼接角度的冰样, 即  $\alpha=30^\circ$  以及  $\alpha=60^\circ$ 。图 12 为不同拼接角度下冰样的抗压强度。可以看出, 相较于完整冰, 拼接冰的抗压强度降低 50% 以上, 并且拼接角度对抗压强度有影响,  $\alpha=60^\circ$  时, 拼接冰的抗压强度强于  $\alpha=30^\circ$  时。拼接角度也会影响冰样的应变率效应:  $\alpha=60^\circ$  时, 随着应变率的上升, 冰样的抗压强度增强, 与完整冰基本一致;  $\alpha=30^\circ$  时, 随着应变率的上升, 冰样的抗压强度变化不大。

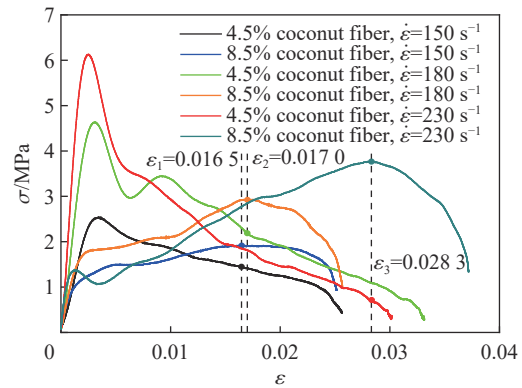


图 10 含椰丝冰的应力-应变曲线  
Fig. 10 Stress-strain curve of ice containing shredded coconut

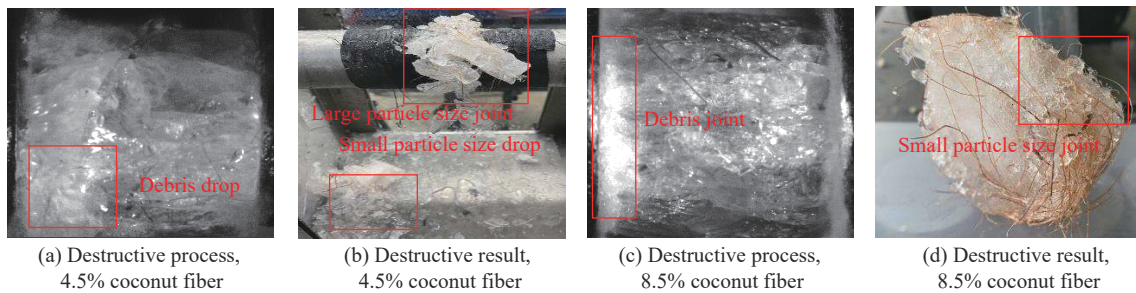


图 11 含椰丝冰的破坏过程与破坏结果  
Fig. 11 Destruction process and result of ice containing shredded coconut

图 13 为 2 种拼接角度的冰样在不同应变率下的应力-应变曲线。可见, 随着应变率的上升,  $\alpha=60^\circ$  与  $\alpha=30^\circ$  冰样的应力峰值差值逐渐增大, 并且  $\alpha=30^\circ$  时, 冰样应力达到峰值后的失效速度更快。从高、低 2 种应变率下冰样的破坏过程分析造成两者差别的原因。图 14 为应变率为 150 和 250  $s^{-1}$  时拼接冰的破坏过程, 其中虚线为裂纹。

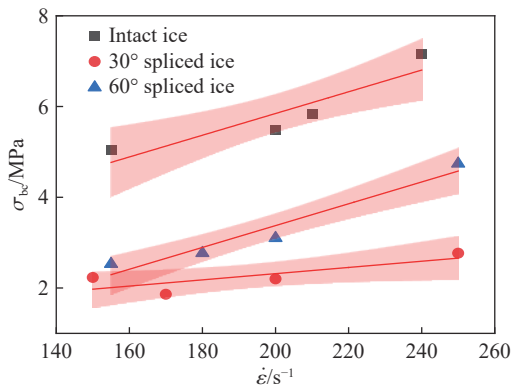


图 12 不同拼接角度下冰样的抗压强度  
Fig. 12 Compressive strength of ice samples at different splicing angles

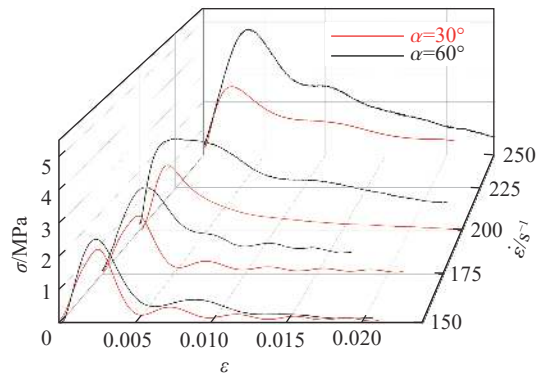


图 13 不同应变率下拼接冰的应力-应变曲线  
Fig. 13 Stress-strain curves of spliced ice at different strain rates



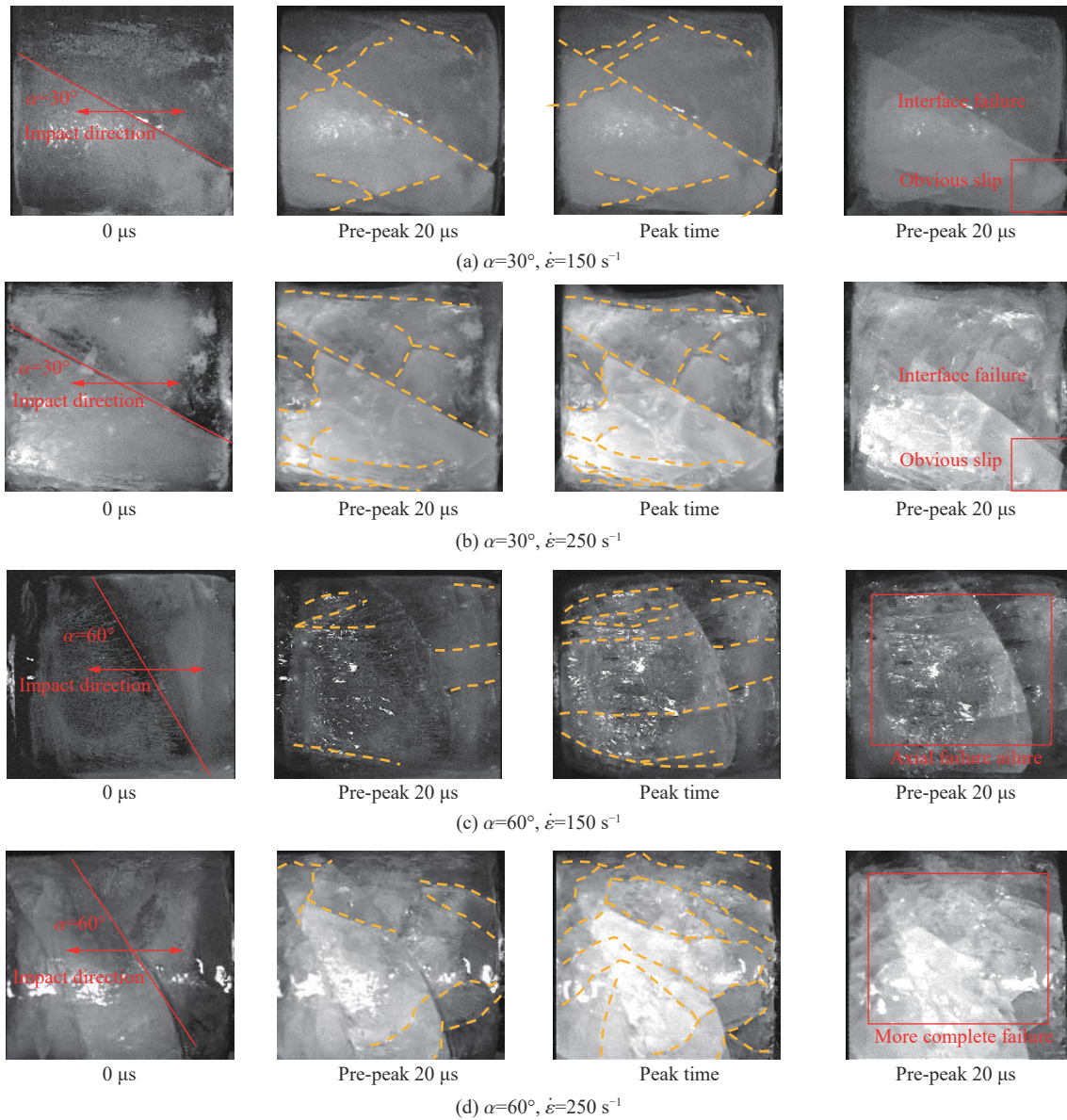


图 14 不同应变率下拼接冰的破坏过程

Fig. 14 Failure process of spliced ice at different strain rates

由图 14 可知, 拼接平面的存在明显影响了裂纹的扩展与贯通, 这是拼接冰的整体抗压强度降低的主要原因。此外, 对比图 14(a) 和 (b) 可知,  $\alpha=30^\circ$  时, 随着应变率的上升, 冰样的破坏过程变化不大, 都以拼接界面的滑移为主, 裂纹较少且较疏, 整体裂纹未发育完全时, 拼接界面就发生了滑移, 滑移导致冰样结构迅速崩溃, 因此, 抗压强度上升不显著且失效速度快; 对比图 14(c) 和 (d) 可知,  $\alpha=60^\circ$  时, 随着应变率的上升, 冰样的破坏裂纹更加密集, 破坏模式由轴向劈裂破坏转为整体压碎破坏, 因此, 抗压强度上升且具有明显的应变率效应。这也解释了  $\alpha=30^\circ$  与  $\alpha=60^\circ$  冰样在抗压强度和应变率效应上的差异。

拼接角度会影响拼接冰的破坏模式, 特别是在低应变率(图 14(a)、(c))下。姚韦靖等<sup>[25]</sup>的研究表明, 单轴压缩下不同界面倾角的岩石-混凝土组合体试件表现出不同的破坏模式(图 15):  $\alpha=30^\circ$  时, 试样的破坏模式为界面破坏, 拼接界面出现了明显滑移;  $\alpha=60^\circ$  时, 试样的破坏模式为整体的轴向破坏。

为进一步解释冰样拼接角度与破坏模式之间的关系, 结合 Mohr-Coulomb 理论研究冰样的破坏机制。Mohr-Coulomb 理论被广泛应用于岩土工程中, 在动态抗压强度方面有一定适用性<sup>[26]</sup>。该理论认为, 材料的破坏是由剪切力引起的, 在任意平面上, 当剪应力等于材料的抗剪强度时, 该点就发生破坏。冰



样的加载情况如图 16(a) 所示, 其中:  $\sigma_n$  为剪切界面上的法向应力,  $\sigma_1$  为最大主应力,  $\sigma_3$  为最小主应力,  $\tau$  为剪切界面的切应力,  $\beta$  为剪切界面与最小主应力的夹角(与  $\alpha$  互余)。实验为单轴压缩, 所以  $\sigma_3=0$ 。由力平衡原理可知, 冰样发生剪切破坏时, 剪切界面上的法向应力和剪应力可表示为:

$$\sigma_n = \frac{\sigma_1}{2} + \frac{\sigma_1}{2} \cos 2\beta \quad (2)$$

$$\tau = \frac{\sigma_1}{2} \sin 2\beta \quad (3)$$

整理式 (2)~(3) 可得极限莫尔应力圆方程:

$$\left(\sigma_n - \frac{\sigma_1}{2}\right)^2 + \tau^2 = \left(\frac{\sigma_1}{2}\right)^2 \quad (4)$$

Mohr-Coulomb 理论认为, 对于完整冰, 其沿某一界面发生剪切破坏时, 剪切强度可表示为:

$$\tau_i = c_i + \sigma_n \tan \varphi_i \quad (5)$$

对于拼接冰, 其沿较弱的拼接界面发生剪切破坏时, 剪切强度可表示为:

$$\tau_j = c_j + \sigma_n \tan \varphi_j \quad (6)$$

式中:  $\tau_i$  为完整冰的剪切破坏强度,  $\tau_j$  为拼接界面的剪切破坏强度,  $c_i$  和  $c_j$  分别为完整冰和拼接界面的黏聚力,  $\varphi_i$  和  $\varphi_j$  分别为完整冰和拼接界面的内摩擦角。拼接界面较弱, 导致  $\tau_j < \tau_i$ , 由式 (2)~(6) 可得极限莫尔应力圆以及莫尔强度曲线<sup>[27]</sup>, 如图 16(b)~(c) 所示, 其中:  $\beta_1$  和  $\beta_2$  为发生界面破坏和整体破坏的临界角。

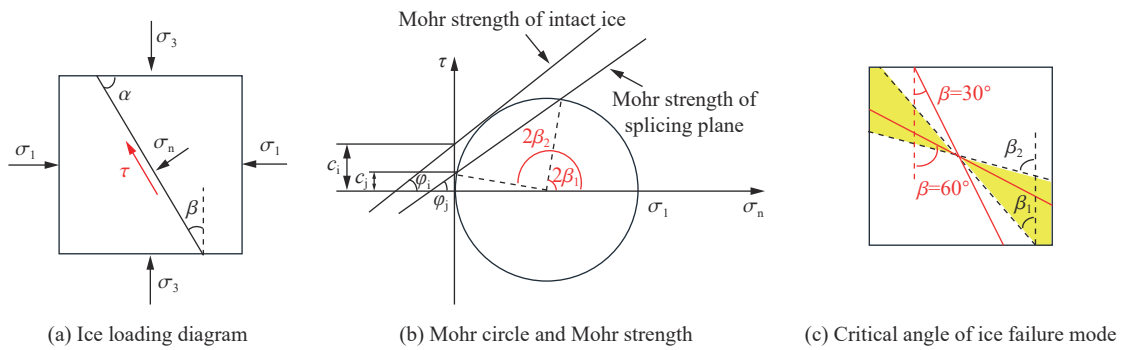


图 16 冰样加载情况与 Mohr-Coulomb 强度准则  
Fig. 16 Ice loading and Mohr-Coulomb strength criterion

根据 Mohr-Coulomb 理论, 当摩尔圆位于拼接界面的包络线上方 ( $2\beta_1 < 2\beta < 2\beta_2$ ) 时, 冰样会沿拼接界面发生破坏; 而当莫尔圆位于拼接界面的破坏包络线下方 ( $2\beta < 2\beta_1$  或  $2\beta > 2\beta_2$ ) 时, 冰样不沿拼接界面发生破坏, 而是发生整体破坏<sup>[28]</sup>。结合图 16 可知:  $\alpha=30^\circ$  ( $\beta=60^\circ$ ) 时,  $\beta$  位于临界角  $\beta_1$  和  $\beta_2$  之间(图 16(c) 中的黄色范围), 冰样主要沿拼接界面发生破坏; 而  $\alpha=60^\circ$  ( $\beta=30^\circ$ ) 时,  $\beta$  小于临界角  $\beta_1$ , 冰样在拼接界面基本不发生破坏, 其破坏模式主要表现为低应变率下的轴向破坏与高应变率下的整体压碎破坏。因此,  $\alpha=30^\circ$  拼接冰的抗压强度主要是由拼接界面的剪切强度决定,  $\alpha=60^\circ$  拼接冰的抗压强度主要是由拼接界面以外的冰的剪切强度决定, 两者的破坏模式不同。

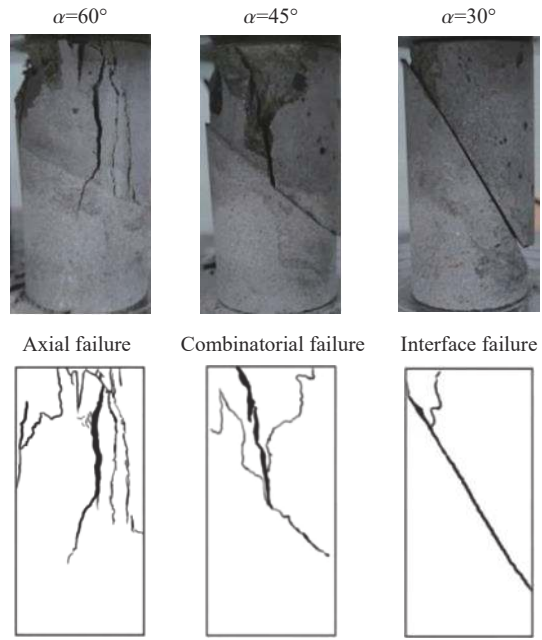


图 15 单轴压缩下岩石-混凝土组合体试件的破坏模式<sup>[25]</sup>  
Fig. 15 Failure mode of rock-concrete composite specimens under uniaxial compression<sup>[25]</sup>

### 3 结 论

基于 SHPB 动载实验平台, 结合超高速摄像技术, 在试样稳定、应力平衡等实验条件下, 对纯水冰、非纯净冰和非完整冰进行了高速动载下的力学特性测试, 在  $150\sim 250\text{ s}^{-1}$  的应变率范围内, 得出以下主要结论。

(1) 纯水冰的动态抗压强度最高, 其次是含椰丝冰, 二者都存在应变率增强效应; 而含盐冰的内部结构松散, 抗压强度最低, 不到纯水冰抗压强度的 20%, 并且应变率效应不明显。

(2) 含椰丝冰的抗压强度随着椰丝含量的增加呈现先增大后减小的趋势, 并且椰丝含量高的冰样容易出现“双峰”现象, 整体的应力峰值明显滞后, 在较大应变时仍保持一定抗压强度。

(3) 拼接界面会影响裂纹扩展, 拼接冰的抗压强度整体低于完整冰。 $\alpha=30^\circ$  拼接冰在高、低应变率下都会沿拼接面滑移, 裂纹扩展不完全, 故失效速度快, 抗压强度较低, 且应变率效应不明显;  $\alpha=60^\circ$  拼接冰在高、低应变率下沿拼接面滑移不明显, 随着应变率的上升, 裂纹扩展, 破坏模式由轴向劈裂破坏转变为整体压碎破坏。 $\alpha=60^\circ$  拼接冰的抗压强度高于  $\alpha=30^\circ$  拼接冰, 并具有与完整冰相近的应变率效应。

(4) 拼接角度会影响拼接冰的破坏模式,  $\alpha=30^\circ$  和  $\alpha=60^\circ$  拼接冰的抗压强度分别由拼接界面的剪切强度和拼接界面以外的冰的剪切强度决定。

### 参考文献:

- [1] HOHL R, SCHIESSER H H, ALLER D. Hailfall: the relationship between radar-derived hail kinetic energy and hail damage to buildings [J]. *Atmospheric Research*, 2002, 63(3/4): 177–207. DOI: 10.1016/S0169-8095(02)00059-5.
- [2] HOHL R, SCHIESSER H H, KNEPPER I. The use of weather radars to estimate hail damage to automobiles: an exploratory study in Switzerland [J]. *Atmospheric Research*, 2002, 61(3): 215–238. DOI: 10.1016/S0169-8095(01)00134-X.
- [3] FERRO C G, CELLINI A, MAGGIORE P. Structural damage assessment of an airfoil anti-icing system under hailstorm conditions [J]. *Aerospace*, 2024, 11(7): 520. DOI: 10.3390/aerospace11070520.
- [4] 刘俊杰, 刘昆, 从曙光, 等. 方槽型纵骨船舶抗冰结构冰撞动响应实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(6): 065101. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0168.  
LIU J J, LIU K, CONG S G, et al. Experimental study on dynamic response of an anti-ice hull structure with square groove longitudinals under ice impact [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(6): 065101. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0168.
- [5] WU X Q, PRAKASH V. Dynamic compressive behavior of ice at cryogenic temperatures [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2015, 118: 1–13. DOI: 10.1016/j.coldregions.2015.06.004.
- [6] KERMANI M, FARZANEH M, GAGNON R. Compressive strength of atmospheric ice [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2007, 49(3): 195–205. DOI: 10.1016/j.coldregions.2007.05.003.
- [7] KIM H, KEUNE J N. Compressive strength of ice at impact strain rates [J]. *Journal of Materials Science*, 2007, 42(8): 2802–2806. DOI: 10.1007/s10853-006-1376-x.
- [8] SHAZLY M, PRAKASH V, LERCH B A. High strain-rate behavior of ice under uniaxial compression [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2009, 46(6): 1499–1515. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2008.11.020.
- [9] ZHANG Y H, WANG Q, HAN D F, et al. Dynamic splitting tensile behaviours of distilled-water and river-water ice using a modified SHPB setup [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 145: 103686. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103686.
- [10] SONG Z H, CHEN R, GUO D L, et al. Experimental investigation of dynamic shear mechanical properties and failure criterion of ice at high strain rates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, 166: 104254. DOI: 10.1016/J.IJIMPENG.2022.104254.
- [11] 单仁亮, 白瑶, 黄鹏程, 等. 三向受力条件下淡水冰破坏准则研究 [J]. *力学学报*, 2017, 49(2): 467–477. DOI: 10.6052/0459-1879-16-364.  
SHAN R L, BAI Y, HUANG P C, et al. Experimental research on failure criteria of freshwater ice under triaxial compressive stress [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2017, 49(2): 467–477. DOI: 10.6052/0459-1879-16-364.

- [12] 解北京, 栾铮, 刘天乐, 等. 静水压下原生组合煤岩动力学破坏特征 [J]. *煤炭学报*, 2023, 48(5): 2153–2167. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0193.  
XIE B J, LUAN Z, LIU T L, et al. Dynamic failure characteristics of primary coal-rock combination under hydrostatic pressure [J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(5): 2153–2167. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0193.
- [13] 聂飞晴. 棉纤维增强冰复合材料的冲击动力学特性研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2023: 15–16. DOI: 10.27352/d.cnki.gylgu.2023.000574.  
NIE F Q. Study on impact dynamics of cotton fiber reinforced ice composite [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2023: 15–16. DOI: 10.27352/d.cnki.gylgu.2023.000574.
- [14] 赵恺旭. 纤维增强冰基复合材料抗冲击性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023: 12–13. DOI: 10.27060/d.cnki.ghbcu.2023.001199.  
ZHAO K X. Study on impact resistance of fiber reinforced ice matrix composites [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2023: 12–13. DOI: 10.27060/d.cnki.ghbcu.2023.001199.
- [15] 梁志强. 冰的制备及力学特性研究 [D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2020: 22–23. DOI: 10.27323/d.cnki.gsgyc.2020.000096.  
LIANG Z Q. Study on preparation and mechanical properties of ice [D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2020: 22–23. DOI: 10.27323/d.cnki.gsgyc.2020.000096.
- [16] ISAKOV M, LANGE J, KILCHERT S, et al. In-situ damage evaluation of pure ice under high rate compressive loading [J]. *Materials*, 2019, 12(8): 1236. DOI: 10.3390/ma12081236.
- [17] 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): 093103. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0270.  
LI S K, FENG X W, XIE R Z, et al. Dynamic compression property of distill-water ice and impurity-water ice at high strain rates [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(9): 093103. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0270.
- [18] 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. DOI: 10.11883/1001-1455(2011)02-0215-05.  
WANG Y, LI Y L, LIU C X. Dynamic mechanical behaviors of ice at high strain rates [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2011, 31(2): 215–219. DOI: 10.11883/1001-1455(2011)02-0215-05.
- [19] 解北京, 陈铭进, 陈思羽, 等. 冰试样动态冲击破坏力学特性实验研究 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2023, 43(6): 1284–1290. DOI: 10.13409/j.cnki.jdpme.20230207003.  
XIE B J, CHEN M J, CHEN S Y, et al. Experimental study on dynamic impact failure mechanical properties of ice samples [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2023, 43(6): 1284–1290. DOI: 10.13409/j.cnki.jdpme.20230207003.
- [20] NAKAO Y, YAMADA H, OGASAWARA N, et al. Impact compression test of ice by combining SHPB method and high-speed camera observation [J]. *Experimental Mechanics*, 2022, 62(7): 1227–1240. DOI: 10.1007/s11340-022-00874-2.
- [21] 解北京, 栾铮, 李晓旭, 等. 三维动静加载下煤的本构模型及卸荷破坏特征 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2024, 56(4): 61–72. DOI: 10.11918/202301054.  
XIE B J, LUAN Z, LI X X, et al. Constitutive model and unloading failure characteristics of coal under 3D coupled static and dynamic loads [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2024, 56(4): 61–72. DOI: 10.11918/202301054.
- [22] DAVIES E D H, HUNTER S C. The dynamic compression testing of solids by the method of the split Hopkinson pressure bar [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1963, 11(3): 155–179. DOI: 10.1016/0022-5096(63)90050-4.
- [23] 陈晓东. 海冰与海水间热力作用过程及海冰单轴压缩强度特性的试验研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2019: 76–79. DOI: 10.26991/d.cnki.gdllu.2019.004313.  
CHEN X D. Experimental study on sea ice - water thermodynamic process and characteristics of sea ice uniaxial compressive strength [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019: 76–79. DOI: 10.26991/d.cnki.gdllu.2019.004313.
- [24] COLE D M. The microstructure of ice and its influence on mechanical properties [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2001, 68(17/18): 1797–1822. DOI: 10.1016/S0013-7944(01)00031-5.
- [25] 姚韦靖, 刘宇, 庞建勇, 等. 不同界面倾角岩石-混凝土组合体蠕变特性研究 [J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2024, 6(4): 141–153. DOI: 10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.20240715.001.



- YAO W J, LIU Y, PANG J Y, et al. Creep behavior of combined rock-concrete specimens with different interface inclination angles [J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2024, 6(4): 141–153. DOI: 10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.20240715.001.
- [26] 赵坚, 李海波. 莫尔-库仑和霍克-布朗强度准则用于评估脆性岩石动态强度的适用性 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(2): 171–176. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2003.02.001.
- ZHAO J, LI H B. Estimating the dynamic strength of rock using Mohr-Coulomb and Hoek-Brown criteria [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(2): 171–176. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2003.02.001.
- [27] WU F, LIU Y, GAO R B, et al. Study on the influence mechanism of interfacial inclination angle on the mechanical behavior of coal and concrete specimens [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 443: 137787. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2024.137787.
- [28] 薛珂, 王江涛, 张毓颖, 等. 三轴加载条件下层理煤体的力学特性和破坏机制研究 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2023, 19(12): 71–78. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2023.12.009.
- XUE K, WANG J T, ZHANG Y Y, et al. Study on mechanical properties and failure mechanism of layered coal under triaxial loading conditions [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2023, 19(12): 71–78. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2023.12.009.

(责任编辑 王晓双)