

DOI: 10.11883/bzycj-2018-0270

高应变率下纯水冰和杂质冰的动态力学行为*

李尚昆^{1,2}, 冯晓伟¹, 谢若泽^{1,2}, 张方举^{1,2}, 胡文军^{1,2}, 徐伟芳^{1,2}, 黄西成^{1,2}

(1. 中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621999;

2. 工程材料与结构冲击振动四川省重点实验室, 四川 绵阳 621999)

摘要: 通过采用大热惯性试件快速加载技术和波形整形技术, 对 3 种冰材料在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的动态压缩性能进行测试, 实验中试件达到了应力均衡和近似恒应变率加载等条件。通过实验波形对比分析, 解释了反射波和透射波中的“双峰现象”。在 $700\sim 2\,700\text{ s}^{-1}$ 的应变率范围内, 纯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。含有杂质的冰试件总体峰值应力相比于纯水冰试件有较大提升, 而峰值应力对应的平均应变在减小, 这表明添加了杂质的冰试件动态模量增大, 冰材料变得更硬, 其抵抗变形的能力更强。b 型试件所表现出的强度 ($41.3\sim 51.6\text{ MPa}$) 较 a、c 型试件均有提高并且分散性较小, 说明该试件中杂质与冰晶体之间的结合力较强, 抑制了微裂纹的萌生、扩展、成核等过程。

关键词: SHPB; 冰试件; 动态压缩性能; 波形整形技术

中图分类号: O383

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

随着人类活动范围向天空、极地等区域扩展, 冰对人类活动的影响越来越大。冰雹的撞击可使飞行器机体复合材料发生损伤, 最终可能引起结构破坏, 对飞行器的危害较大^[1]。为了正确评估飞行器结构在冰雹撞击条件下的可靠性和安全性, 需要对冰材料在冲击载荷下的力学行为进行研究。

冰的力学行为十分复杂, 其可以看成是一类材料组成的复合体^[2]。现在对于冰材料的研究主要集中在准静态的拉压性能和破坏模式上^[3,4,5], 而对于冰材料在动态加载条件下的力学性能研究较少, 特别是对于地球上广泛存在的含有杂质的冰的动态力学性能的数据十分缺乏。Shazly 等^[6]研究了应变率 ($60\sim 1\,400\text{ s}^{-1}$) 和温度 ($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$) 对单晶冰和多晶冰的压缩强度的影响, 发现冰的压缩强度随着应变率的升高、温度的降低而升高。汪洋等^[1]研究了应变率 ($400\sim 2\,000\text{ s}^{-1}$)、温度 ($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$) 对冰试件压缩强度的影响, 得到的结论与 Sharly 的^[6]相近。Wu 等^[2]通过改进的 SHPB (split Hopkinson pressure bar) 装置研究了在 $60\sim 800\text{ s}^{-1}$ 应变率范围内 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 湖冰 (含可溶杂质) 试件和纯冰试件的单轴压缩强度和压剪强度特性。结果发现, 两种冰试件在该应变率区间均呈现较明显的应变率效应, 且可溶杂质的存在能够提高冰的单轴压缩强度; 此外, 冰试件的压剪强度低于其单轴压缩强度。然而, 目前关于不可溶杂质对冰材料动态力学性能的影响特性研究尚不充分。本文中利用 SHPB 实验装置对纯水冰和两种含有杂质的冰 (不可溶杂质) 的动态力学性能进行测试, 分析应变率、杂质含量等因素对冰材料力学性能的影响。

1 冰材料的 SHPB 实验方法

1.1 试件状态

冰试件为 $\varnothing 25\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 的圆柱形。根据添加水成分的不同可将试件分为 3 类: (1) 纯水试件 (a 型); (2) 含杂质质量分数为 2.5% 的试件 (b 型); (3) 含杂质质量分数为 5.0% 的试件 (c 型)。其中杂质为

* 收稿日期: 2018-07-24; 修回日期: 2018-12-04

基金项目: 国家自然科学基金 (11502258, 11472257, 11572299); 中物院创新基金 (2017cxj07)

第一作者: 李尚昆 (1992—), 男, 硕士, 研究实习员, lishangkun192@163.com;

通信作者: 谢若泽 (1970—), 男, 硕士, 研究员, xierz@caep.cn。

钠基膨润土,其颗粒尺寸小于 45 μm 。

冰试件的制作方法:将 2 个尺寸为 $\varnothing 25 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 、材料与波导杆一致的铝短杆间隔 5 mm 放置在 V 型槽中,并通过一段胶带连接起来,其中可以形成一个 $\varnothing 25 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的圆柱形密闭空间,如图 1 所示;然后在胶带上打 2 个小孔,一个小孔加水,同时另一个小孔排出空气;将模具放入 $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ 的低温箱中冷冻,冻结过程中因冰体积膨胀而多余的水可以从小孔排出,从而保持试样的形状、尺寸不变。

为了测量冰试件的升降温过程,将热电偶冻结在试件内部,得到了试件在放入和拿出低温箱时温度随时间变化的曲线,如图 2 所示。冷冻 35 min,试件的温度达到了预设温度 $-18 \text{ }^\circ\text{C}$,并保持平稳,说明此时冰试件内部已经趋于稳定。实验中通过 2 h 的冷冻,可以保证试件被冻结,温度满足实验要求。红色曲线是将冷冻 2 h 后的冰试件置于室温环境下试件温度随时间变化的曲线,从图中可以看出 120 s 内试件温度升高到 $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ 有 $3 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温升,而一般认为 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 以内的温差不会引起冰材料本质的变化^[1]。所以可以认为若实验在 120 s 内完成,试件的温升不会对实验的结果产生较大影响。

1.2 实验装置

由于冰材料的波阻抗较低,实验中采用 2 个直径为 25 mm、长度为 1 500 mm 的铝杆作为 SHPB 系统装置的波导杆,如图 3 所示。动态应变测量系统由 DC-96A 型动态应变仪和 NI 公司的 PXI-1042Q 型数据采集系统组成,测试时采样频率为 2 MHz。

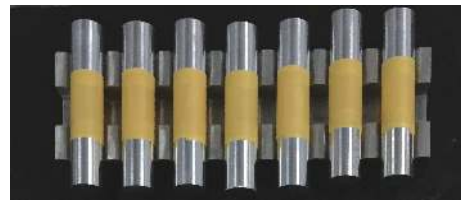


图 1 冰试件的形貌

Fig. 1 The shape of ice specimens

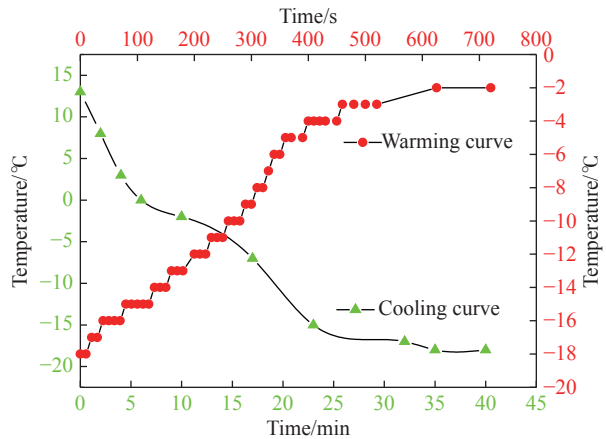


图 2 冰试件的升降温曲线

Fig. 2 The warming and cooling curves of ice specimens

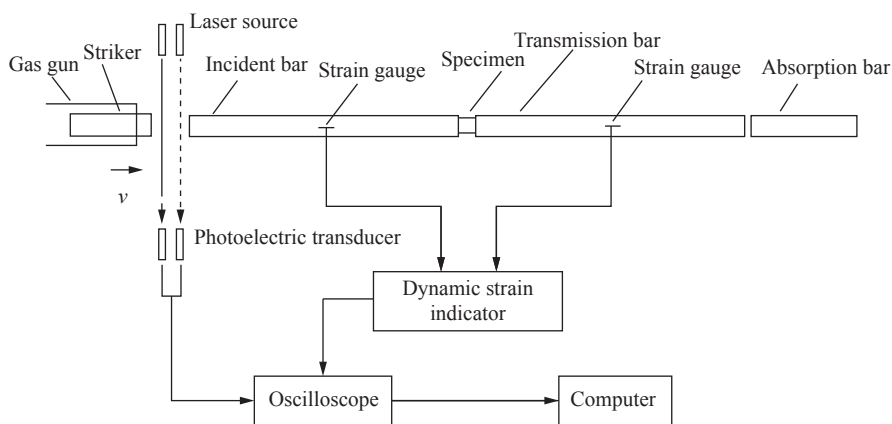


图 3 SHPB 系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of SHPB apparatus

实验时将 2 根短杆和冰试件作为一个整体一起置于波导杆中间,实验前冰试件的现场安装状态如图 4 所示。为了方便试件与波导杆紧密结合,在试件下部设有支撑装置,并在支撑装置的表面铺上了隔热垫层。由于冰试件与外部空气接触的面积较小,且试件整体的热惯性较大,通过采用先充气再安装试

件快速击发的方式, 可以认为冰试件在从低温箱拿出到应力波传播到试件上完成加载的时间 (约 100 s) 内的温升不大。

1.3 实验技术

1.3.1 扁平试样的尺寸问题和端部摩擦问题

由于实验采用的是较薄的圆盘形试件 (长径比 1 : 5), 试件端部的运动有可能被摩擦力所约束。Shazly 等^[6]的研究显示这种作用的影响是可以忽略的, 因为冰和铝之间的摩擦是很小的, 并且在破坏前冰试样沿径向的位移也是很小的。

除了摩擦效应, 应力波的二维效应也会对实验测量的结果产生影响。根据试样尺寸的不同, 测得的应力与真实应力之间的关系可以由下式^[2]来简化表示:

$$\frac{\sigma_{\text{measured}} - \sigma_{\text{b}}}{\sigma_{\text{b}}} = \frac{\rho d^2 \dot{\varepsilon}^2}{\sigma_{\text{b}}} \left[\frac{1}{64} + \frac{1}{6} \left(\frac{l_0}{d_0} \right)^2 \right] \quad (1)$$

式中: σ_{measured} 为测得的材料屈服应力; σ_{b} 为材料的真实屈服应力; ρ 为材料的密度; l_0 、 d_0 分别为试件初始的长度和直径; $\dot{\varepsilon}$ 为材料变形的应变率; 对于冰材料来说, $\rho=897 \text{ kg/m}^3$, $\dot{\varepsilon}=1\ 000 \text{ s}^{-1}$, $\sigma_{\text{b}}=30 \text{ MPa}$ 。经计算可得上式=0.001 6%, 意味着由于波的二维效应而引起的误差很小。

1.3.2 脆性材料的应力平衡问题

实验过程中, 试件内应力要保持平衡是 SHPB 实验理论的基本条件之一。而对于冰这样的脆性材料来说, 虽然其波速较高但是破坏应变很小, 往往试件中的应力还未达到均匀就已经发生局部破坏了。一般认为如果应力波在试件内传播超过两到三个来回^[7], 就可以认为试件处于应力均匀状态:

$$t_{\text{e}} = \frac{4l_0}{c_{\text{i}}} \quad (2)$$

式中: t_{e} 为试件达到应力平衡所需要的时间, l_0 为试件厚度, c_{i} 为试件材料中的应力波速度。

根据文献 [8] 可知冰的弹性模量约为 10 GPa, 密度为 897 kg/m^3 , 所以可以得到冰材料的波速约为 $3\ 338 \text{ m/s}$ 。那么一个 5 mm 厚的冰试件达到应力平衡所需要的时间约为 $6 \mu\text{s}$ 。对于冰这种脆性材料来说, 其破坏应变较小, 为了使试件在载荷较小的情况下尽可能达到应力平衡状态, 现在大多数采用入射波整形技术来解决这个问题。

在入射杆的撞击端粘贴一个小直径的波形整形器。整形器通常由较软的材料制成。撞击杆在加载过程中先撞击整形器, 整形器的塑性变形使传入到入射杆中的加载波形发生变化, 在延缓上升沿的同时还可以滤去高频振荡。本文中采用的滤波整形器为真空封泥^[9]制成的直径约为 3 mm、质量约为 0.3 g 的小球。图 5 为加整形器前后的波形对比, 由图 5 可知在加了整形器后, 入射波的上升沿由 $15.7 \mu\text{s}$ 增长至 $37.4 \mu\text{s}$, 并且原来的入射波的高频振荡也得到了较好的消除。整形滤波后整个波形呈现出一个上升沿较宽、最大幅值较平稳的梯形状态, 有利于尽快实现试件内部应力平衡和恒应变率加载。

按照试件前后应力平衡的原则, 透射波减去反射波应该等于入射波。由于冰试件在压缩波的作用下前期发生了碎裂, 因此透射波的波长比入射波和反射波的波长要短。图 6 为加整形器后冰试件在 11.8 m/s 冲击下的应力平衡历程图, 由图 6 可知在试件碎裂以前试件内部的应力基本达到了平衡状态。

1.3.3 冰试件恒定应变率加载

由于冰试件的破坏应变较小, 其在破坏前没有足够的时间来达到恒定应变率, 通过采用入射波整形技术可以在试件达到应力峰值附近的时刻近似达到恒定应变率。图 7(a)、(b) 分别是在 20.2 m/s 和

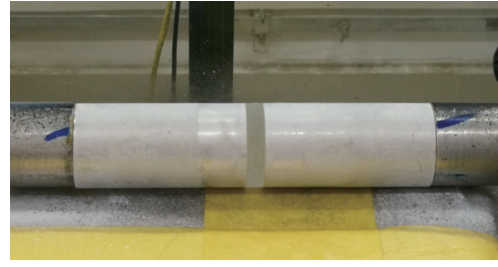


图 4 实验前冰试件的状态

Fig. 4 State of an ice specimen before experiment

8.9 m/s 的冲击速度下,试件的应力、应变率相对于应变的曲线,从图中可以看出在较低加载速度下可在应力峰值时刻达到恒定应变率,而在加载速度较高时应变率的平台时刻略滞后于应力峰值时刻。

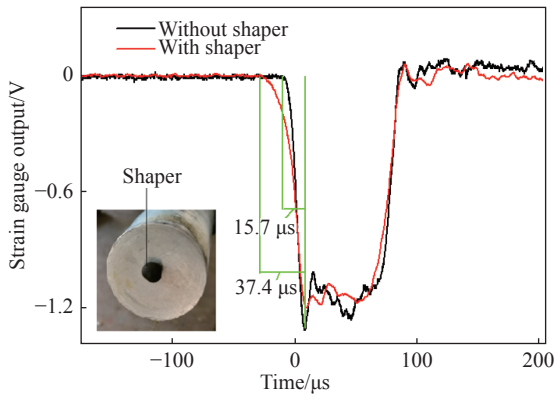


图 5 加整形器前后入射波的对比

Fig. 5 Incident waves without and with shaping

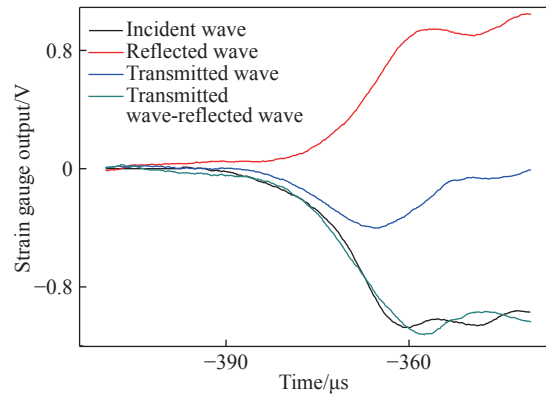


图 6 加整形器后试件两端应力平衡历程图

Fig. 6 The stress balance process of the specimen with shaping

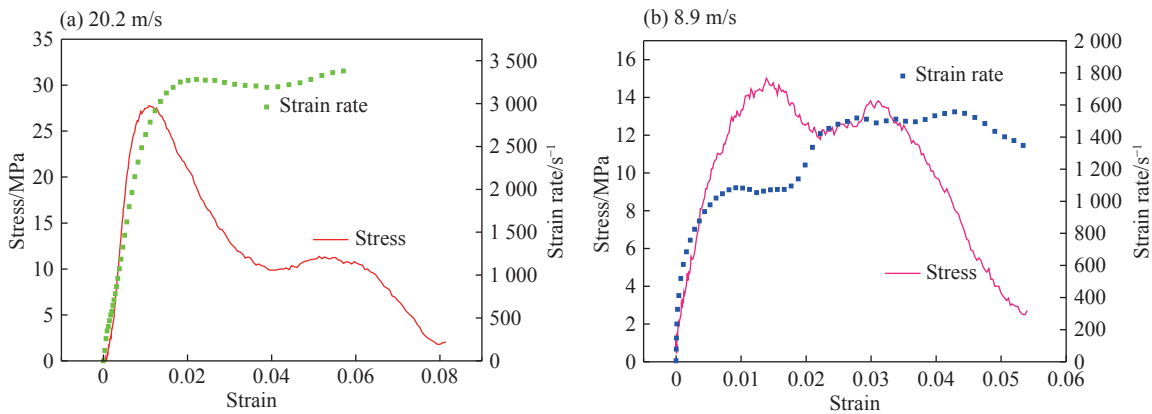


图 7 两种冲击速度下试件应力、应变率相对应应变的曲线

Fig. 7 Stress and strain rate of the specimens varying with strain at two impact velocities

2 冰材料的 SHPB 实验波形分析

由于铝的导热率较高,因此水在与铝短杆接触的表面冻结成冰,然后冰晶体层层生长,最后在试样中间形成一个明显的界面。虽然界面是垂直于试样的加载方向,理论上其对冰的压缩强度的影响可以忽略,但是在冰试件中产生的微裂纹和晶体的大小、分布都会对试件的抗冲击性能产生影响,在波形曲线上也会有体现。图 8 为 2 种不同应变率条件下典型的波形曲线,从图中可以看出对于不同的加载速度,反射波均表现出“双峰”的现象,对于这种现象一般认为是由于脆性材料发生损伤破裂产生的^[10]。

在高动态加载条件下,试件内部损伤快速开始

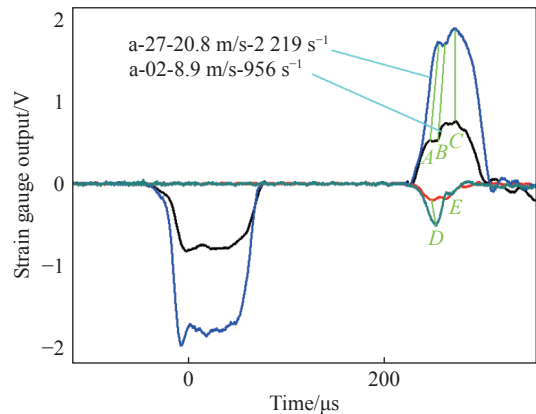


图 8 两种不同应变率下典型的波形曲线

Fig. 8 The representative waveform curves at two strain rates

萌生 (A 点)。继续加载后裂纹开始产生 (B 点), 整个试件的承载能力下降。 C 点时试件产生严重损伤, 开始发生粉碎性破坏, 应力卸载。此时试件的承载面积在急剧减小, 应力波无法穿过试件传入透射杆, 所以此时的反射波幅值快速增大, 直到与入射波幅值相等。

对于透射波来说也有类似的“双峰”现象, 在动态加载下试件应力水平快速升高至最大应力点 (D 点), 同时损伤也在试件内部萌生。由于裂纹产生、扩展所需的能量是一定的, 加载速率越高, 产生裂纹所需的应力值越大, 所以在高的加载速率条件下 D 点会升高、推后出现。在 D 点后试件出现裂纹, 此时应力卸载。由于试件没有完全碎裂, 其剩余部分还有一定的承载能力, 继续加载后还会产生一个小的波峰, 对应图中 E 点。最后试件发生整体破坏, 透射波幅值基本降为零。对于应变率较高的情况, 由于其入射波的能量较大, 试样的损伤、破裂较严重, 所以试件的剩余强度较小, 其第 2 个波峰较小, 表现为类似“单峰”形式的波形。由于冰试件的非均匀性, 同种加载速度下试件的响应模式不是固定的, 只是在速度较低的情况下波形较多出现类似 a-02 试件一样的“双峰”现象, 随着加载速度的增高, 波形较多出现类似 a-27 的“单峰”形式。

3 冰材料的动态力学行为

图 9 分别是 a 型、c 型试件在不同应变率条件下的应力应变曲线图。从图 9 可以看出, 同种冰试件在不同加载速度条件下其峰值应力具有明显的应变率增强效应, 其应力应变曲线随着应变率的增高也倾向于由“双峰”向“单峰”转变。在同等加载速度下含杂质的冰试件的强度要普遍高于不含杂质的冰试件, 且波形更倾向于表现出“单峰”的特性, 这说明杂质的加入增强了试件的强度和韧性, 降低了试件内部提前出现裂纹导致的试件局部破坏的机率。

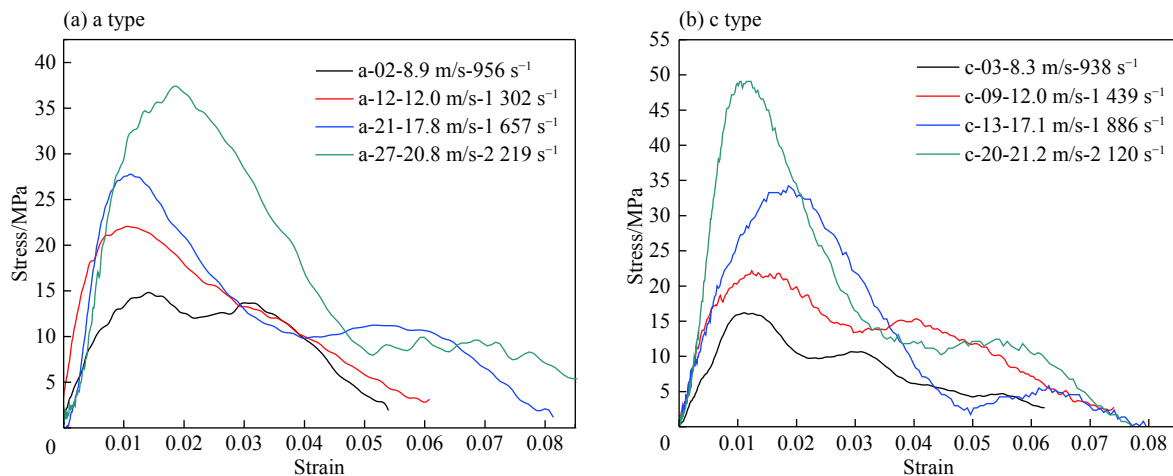


图 9 不同应变率下试件的应力应变曲线

Fig. 9 Stress-strain curves of the specimens at different strain rates

图 10 为通过实验和文献得到的不同冰试件的峰值应力随应变率变化的关系图。在动态加载过程中由于作用时间很短, 需要更高的应力来提供裂纹成核扩展所需的能量。从对冰材料力学性能的研究成果^[2-3,5-6,11-12]可以看出, 在 $10^{-4} \sim 10^3 s^{-1}$ 的应变率范围内, 冰材料的峰值应力随着应变率的增高表现出明显的动态增强效应, 如图 10 所示。在双对数坐标系中冰材料的峰值应力与应变率存在近似线性关系, 且本次实验得到的数据与前人得到的结果有较一致的变化趋势。

图 11 为实验得到的 3 种冰试件在双对数坐标系中的峰值应力随应变率变化的关系图, 表 1 为冰试件在不同撞击速度下试件的应变率、峰值应力、峰值应力对应的应变等参数的列表。实验中冰试件的撞击速度范围为 $8 \sim 23 m/s$, 应变率范围为 $700 \sim 2700 s^{-1}$, 相应的峰值应力范围为 $14.5 \sim 55.4 MPa$ 。由于试件在冻结时会不可避免地产生微缺陷, 这些微缺陷的多少、形貌、空间分布等都难以进行准确表征, 而

这些因素都会对材料性能有影响,因此冰材料的峰值应力数据具有一定分散性。通过统计学方法可得到 3 种冰试件峰值应力的平均值和标准差等数据,如表 2 所示。对于含有杂质的冰试件来说,其总体的峰值应力相比于不含杂质的冰试件有较大提升(平均峰值应力由 26.8 MPa 上升到 46.8 MPa 和 39.5 MPa),而峰值应力对应的平均应变(a 型 1.45%, b 型 1.25%, c 型 1.07%)在减小,这就表示添加了杂质后的冰试件的动态模量增大,冰材料变得更硬,其抵抗变形的能力更强。b 型试件的峰值应力较 a 型试件高并且分散性小,说明 b 型试件中杂质与冰晶体之间的结合力较强,抑制了微裂纹的萌生、扩展等过程。c 型试件所含的杂质浓度最高,但其峰值应力较 b 型偏低且分散性最大,通过分析认为这可能是由于高浓度溶液在试件冻制的时间内较易发生团聚和沉降造成的。团聚和沉降会造成试件内部不均匀,引起试件的力学性能产生较大差异。

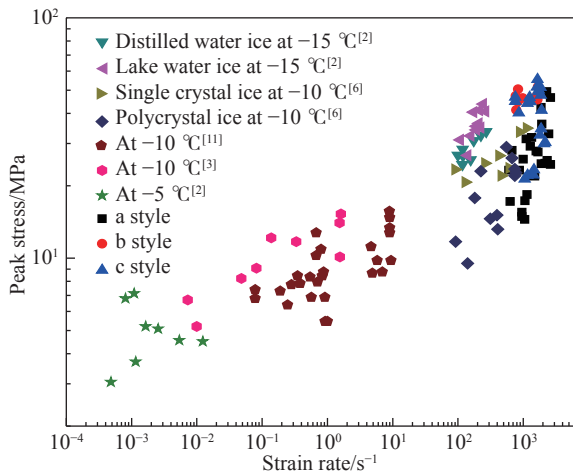


图 10 宽应变率下冰材料的峰值应力

Fig. 10 Peak stresses of ice specimens in a wide strain rate range

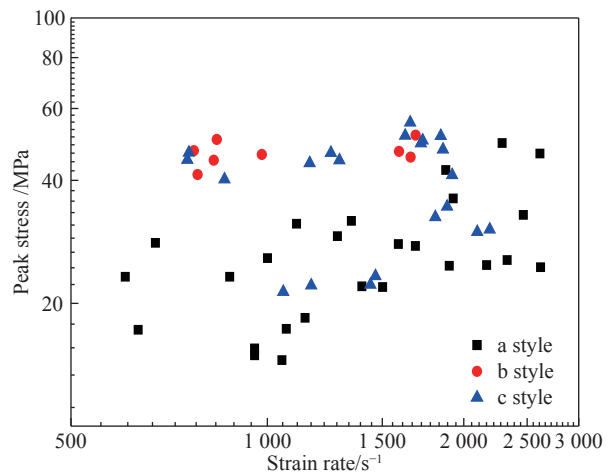


图 11 3 种冰试件峰值应力随应变率的变化

Fig. 11 Peak stresses for three styles of ice specimens at different strain rates

表 1 部分冰试件的实验结果
Table 1 Part of experimental results

试件编号	加载速度/(m·s ⁻¹)	峰值应力/MPa	峰值应力处应变/%	应变率/s ⁻¹
a-03	8.8	14.5	1.27	1 053
a-06	8.8	18.4	1.58	1 143
a-11	12.0	22.0	1.55	1 396
a-12	12.0	21.9	1.09	1 502
a-21	17.9	27.6	1.14	1 687
a-22	18.4	25.5	1.47	2 331
b-02	12.5	50.4	0.88	837
b-05	12.1	47.3	1.18	772
b-06	21.6	51.6	1.18	1 688
b-08	21.6	47.1	1.13	1 592
c-05	9.3	21.3	1.06	1 058
c-12	12.0	46.7	1.08	1 251
c-15	17.4	55.4	1.15	1 655
c-17	17.1	51.5	1.34	1 627
c-18	21.2	51.4	1.25	1 845

表 2 冰试件峰值应力的统计结果

Table 2 The statistic results of peak stress for ice specimens

试件类型	峰值应力平均值/MPa	标准差/MPa	最小值/MPa	最大值/MPa
a	26.8	9.1	14.5	49.3
b	46.8	3.2	41.3	51.6
c	39.5	11.1	21.3	55.4

4 结 论

通过采用大热惯性试件快速加载技术和波形整形技术,对 3 种冰材料在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的动态压缩性能进行了测试,试件达到了应力平衡和近似恒应变率加载等条件。通过分析实验结果得到以下结论:

(1) 在应变率 $700\sim 2\,700\text{ s}^{-1}$ 的范围内,纯净冰试件的压缩强度为 $14.5\sim 49.3\text{ MPa}$,相比于准静态情况表现出明显的动态增强效应;随着应变率的升高,3 种冰试件都有应变率强化效应;在相同的应变率条件下,b 型试件的平均强度最高,c 型试件的平均强度次之,a 型试件的平均强度最低。

(2) 对于含有杂质的冰试件来说,其总体的峰值应力相比于纯冰试件有较大提升,而峰值应力对应的平均应变在减小,这就表示添加杂质后冰试件的动态模量增大,冰材料变得更硬,其抵抗变形的能力更强;b 型试件所表现出的强度 ($41.3\sim 51.6\text{ MPa}$) 较 a、c 型试件均较高并且分散性较小,说明 b 型试件中的杂质与冰晶体之间的结合力较强,抑制了微裂纹的萌生、扩展、成核等过程。

参考文献:

- [1] 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 Yang, LI Yulong, LIU Chuanxiong. 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.
- [2] WU X, VIKAS P. Dynamic strength of distill water and lake water ice high strain rate [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 76: 155–165. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2014.09.013.
- [3] SCHULSON E M. The structure and mechanical behavior of ice [J]. *Journal of the Minerals Metals and Materials Society*, 1999, 51(2): 21–27. DOI: 10.1007/s11837-999-0206-4.
- [4] MAJID K, MASOUD F. Compressive strength of atmospheric ice [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2007, 49: 195–205. DOI: 10.1016/j.coldregions.2007.05.003.
- [5] SCHULSON E M. Brittle failure of ice [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2001, 68(18): 39–87. DOI: 10.1016/S0013-7944(01)00037-6.
- [6] 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.
- [7] 王礼立, 王永刚. 应力波在用 SHPB 研究材料动态本构特性中的重要作用 [J]. *爆炸与冲击*, 2005, 25(1): 17–25. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)01-0017-09.
WANG Lili, WANG Yonggang. The important role of stress waves in the study on dynamic constitutive behavior of materials by SHPB [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(1): 17–25. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)01-0017-09.
- [8] PETROVIC J J. Mechanical properties of ice and snow [J]. *Materials Science*, 2003, 38(1): 1–6. DOI: 10.1023/A:1021134128038.
- [9] 陈刚, 张青平, 黄西成. 基于软材料的 SHPB 波形整形技术 [J]. *中国科学: 技术科学*, 2016, 46: 393–399. DOI: 1360/N092015-00368.
CHEN Gang, ZHANG Qingping, HUANG Xicheng. Pulse shaping with soft material for SHPB [J]. *Scientia Sinica: Technological*, 2016, 46: 393–399. DOI: 1360/N092015-00368.
- [10] LV T H, CHEN X W, CHEN G. Analysis on the wave form features of the split Hopkinson pressure bar tests of plain concrete

- specimen [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 103: 107–123. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.01.004.
- [11] JONES S. High strain-rate compression test on ice [J]. *Journal of Physical Chemistry: B*, 1997, 101(6): 99–101.
- [12] 冯晓伟, 冯高鹏, 方辉. 不同应变率下冰破坏特性的试验研究 [J]. *应用力学学报*, 2016, 33(2): 223–229. DOI: 10.11776/cjam.33.02.B035.
- FENG Xiaowei, FENG Gaopeng, FANG Hui. Experimental investigation on compressive failure behavior of fresh-water ice at different compressive rates [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2016, 33(2): 223–229. DOI: 10.11776/cjam.33.02.B035.

Dynamic compression property of distill-water ice and impurity-water ice at high strain rates

LI Shangkun^{1,2}, FENG Xiaowei¹, XIE Ruoze^{1,2}, ZHANG Fangju^{1,2},
HU Wenjun^{1,2}, XU Weifang^{1,2}, HUANG Xicheng^{1,2}

(1. *Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China*;
2. *Shock and Vibration of Engineering Materials and Structures Key Laboratory of Sichuan Province, Mianyang 621999, Sichuan, China*)

Abstract: The dynamic strength of three kinds of ice specimens at $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ were tested by the split Hopkinson pressure bar (SHPB) method. The pulse-shaping technology was used to achieve constant strain rate loading and stress equalization. The double-peak phenomena of reflection wave and transmission wave were explained by comparing with stress waveforms. The compression stress of distill-water ice in the strain rate range from 700 to 2 700 s^{-1} is 14.5–49.3 MPa, and it is much higher than the static data. Generally, the dynamic compression stress of the impurity-water ice is higher than that of the distill-water ice, this indicate that the ice specimens become harder after adding impurities, and the capability to resist deformation is enhanced. Compared with a-type and c-type specimens, the crack stress of b-type specimens becomes higher and its dispersiveness is lower. This indicates that the adhesive forces between impurities and ice crystals become stronger, and the expending and nucleate process of cracks is restrained.

Keywords: SHPB; ice specimen; dynamic compression property; pulse-shaping technology

(责任编辑 张凌云)