文章编号：1007−7294(2026)09−1495−12

基于 SHPB 的−20 ℃ 纯水冰高应变率单轴压缩试验研究

姬贺港[1], 张　健[1], 刘俊杰[2], 夏劲松[2], 康俊杰[1]
(1. 江苏科技大学, 江苏 镇江 212000; 2. 中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082)

摘要: 冰在高应变率下的动态力学行为对极地工程安全和冰−结构相互作用研究具有重要意义。本文基于改进的制样工艺和分离式霍普金森压杆(SHPB)系统, 对−20 ℃ 下纯水冰在 1054~1972 s^{-1} 区间开展了高应变率单轴压缩试验。结果表明, 纯水冰在该区间内表现出典型的应变率敏感性: 峰值应力随应变率由 13.2 MPa 增至 25.1 MPa, 增幅约 90%; 峰值应变则未呈单调变化趋势, 分布较为分散。应力−应变曲线整体呈尖峰形态, 在峰值后迅速衰减, 并在应变约 0.05~0.06 时形成 1~7 MPa 的残余承载平台, 高应变率下表现出“延迟失稳”特征。高速摄像结果揭示了破坏的阶段性过程, 包括裂纹萌生、宏观裂解与颗粒化粉碎, 与峰后残余承载平台相呼应。在近似应变率条件下, 峰值应力仍存在约 15%~20% 的离散度, 提示未来本构模型需引入微观结构或统计性参量以提高预测能力。跨文献对比显示, 本研究结果整体落入已有响应区间, 但在制样、控温与加载控制方面具备更高一致性与可靠性。本文补充了−20 ℃ 下纯水冰的高应变率数据库, 揭示了其应变率敏感性、残余承载机理及破坏阶段性特征, 为寒区工程动力响应分析和本构模型构建提供了试验依据。

关键词: 高应变率; 纯水冰; 分离式霍普金森压杆; 动态压缩; 残余承载平台; 本构模型
中图分类号: O383　　**文献标识码:** A　　**doi:** 10.3969/j.issn.1007−7294.2026.09.009

Experimental study on the high strain rate uniaxial compression of pure water ice at −20 ℃ using SHPB

JI He−gang[1], *ZHANG Jian*[1], *LIU Jun−jie*[2], *XIA Jin−song*[2], *KANG Jun−jie*[1]
(1. Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212000, China; 2. China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China)

Abstract: The dynamic mechanical behavior of ice at high strain rates is crucial for polar engineering safety and ice–structure interaction studies. Based on an improved specimen preparation method and a Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) system, this study conducted high strain rate uniaxial compression tests on pure water ice at −20 ℃ in the range of 1054−1972 s^{-1}. The results show that pure water ice exhibits clear strain rate sensitivity: peak stress increases from 13.2 MPa to 25.1 MPa (≈ 90% increase), while peak strain shows no monotonic trend but remains scattered. Stress-strain curves generally display a sharp-peak profile, followed by rapid decay and the formation of a residual load-bearing platform of 1−7 MPa at strains around 0.05−0.06, with higher strain rates showing a "delayed instability" characterized by slower post-peak decay and higher residual strength. High-speed imaging further reveals a staged failure process of crack initiation, macro-cracking, and granular fragmentation, corresponding to the residual platform. Even under strict

收稿日期：2026−04−26
基金项目：科技部外专局资助项目(T230515007)
作者简介：姬贺港(1997–), 男, 博士研究生; 张　健(1977–), 男, 博士, 教授, 通讯作者, E-mail: justzj@just.edu.cn。

specimen screening and temperature control, peak stress still exhibits scatter of about 15%−20% at similar strain rates, suggesting that strain rate alone is insufficient to explain the mechanical response and that future constitutive models should introduce microstructural or statistical parameters. Cross-comparison with existing literature indicates that the present results fall within the established response range but demonstrate higher consistency and reliability due to stricter control of specimen thickness, temperature uniformity, and loading conditions. Overall, this study supplements the high strain rate database of pure water ice at −20 ℃, clarifies its strain rate sensitivity, residual load-bearing mechanism, and staged failure characteristics, and provides experimental evidence for dynamic response analysis and constitutive model development in cold-region engineering.

Key words: high strain rate; pure water ice; Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB); dynamic compression; residual load-bearing platform; constitutive model

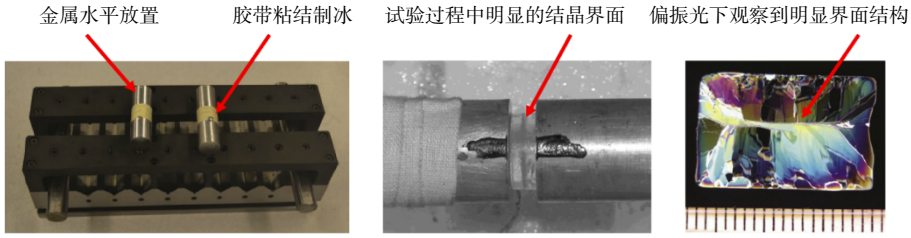
0 引　言

冰广泛分布于极地与高纬度海域,其力学特性直接关系到多类工程安全问题,如破冰作业中的爆炸与冲击载荷、冰–结构相互作用中的高速飞行体冲击或碎冰冲击,以及冰雹撞击等极端工况。在快速加载或局部冲击作用下,冰体极易发生断裂与破碎。准确表征其在高应变率条件下的动态响应,不仅是理解低温环境下冰体失稳机理的关键,也是完善极端环境本构模型、提升极地及寒区工程抗冲击设计水平的重要基础。

近年来,关于冰在高应变率下动态力学行为的研究逐渐增多。Shazly 等[1−2] 在−10 ℃ 与−30 ℃ 条件下,对单晶和多晶纯水冰在应变率为 60~1400 s^{-1} 的条件下开展了动态压缩试验,结果表明冰的强度随应变率升高而增加,且在达到峰值应力后仍保留一定的残余承载能力。Wu 与 Prakash[3−4] 对比研究了蒸馏水冰与含杂质的湖水冰在−15 ℃ 条件下的动态响应,发现后者具有更高的强度。在−15~−173 ℃ 的温度范围内,冰的峰值强度随温度降低而提高,同时应变率敏感性随之减弱。李尚昆[5] 等在−18 ℃ 条件下,对纯水冰及掺杂膨润土的冰样在应变率为 700~2700 s^{-1} 的条件下开展了动态压缩试验,发现冰在此应变率范围内表现出显著的动态强化效应,且适度掺杂可进一步提升其强度与刚度。汪洋等[6] 则在−25 ℃ 与−10 ℃ 下开展了 500~2000 s^{-1} 范围内的纯水冰动态压缩试验,结果表明峰值强度与破坏应变均随应变率提高而增长,而温度升高则显著削弱冰的压缩强度。

尽管上述研究取得了重要进展,但在更高应变率(>1000 s^{-1})区间内仍缺乏系统的试验数据与理论分析。一方面,既往工作多集中于较低应变率,难以支撑对高区间响应规律的归纳;另一方面,部分研究受限于低温控温精度与加载过程的摩擦热/应力波致温升,可能引起材料性质变化,从而影响结果的准确性与可重复性。此外,常见的水平放置金属模具制样因导热率高,冰晶易沿模具内壁成核并向中心对生,形成与压缩方向垂直的结晶界面;该界面虽对峰值强度影响有限,但可能诱发界面裂纹提前萌生,进而干扰破坏模式与残余强度的评估(见图 1)。

为弥补现有研究在高应变率区间、制冰、温控等一致性方面的不足,本文以纯水冰为研究对象,在−20 ℃ 温度及应变率为 1054~1972 s^{-1} 条件下开展动态单轴压缩试验。试验基于经波形整形与闭环温控改造的分离式霍普金森压杆(SHPB)装置,在液氮低温腔体中实现稳定温场加载。试样通过垂直定向冻结与排气策略提升结构一致性,降低晶界取向与气泡夹杂对结果的干扰。测试过程中同步记录应力波并采用三波法求解应力−应变响应,同时结合高速成像追踪破坏过程。试验获得了纯水冰在高应变率下的动态力学行为,揭示了峰值强度的应变率依赖规律、残余承载平台的形成机制及破坏阶段性特征,补充了现有数据库的高应变率空白,为理解低温冰体的失稳行为与构建合理的本构模型提供了试验依据。



（a）水平放置的金属模具制冰装置　（b）试样在SHPB装置中夹持状态　（c）偏振光观察下的冰样内部结构

图 1 传统金属模具水平冷冻过程中纯水冰样的制备过程与结构特征

Fig.1 Preparation process and structural characteristics of pure water ice specimens during horizontal freezing in a traditional metal mold

1 试验方法

1.1 冰试样制备

本研究采用直径 49 mm、厚度 10 mm 的圆盘形纯水冰试样(径厚比 0.2)开展动态压缩试验。几何尺寸的选取综合考虑端面摩擦与惯性误差的影响。尽管在高速加载条件下薄型试样可能受到端面摩擦引起的径向约束,已有研究表明在较高滑移速度下,冰体与试验杆(通常为铝合金)之间的摩擦或粘附效应可忽略不计[7−9]。

除摩擦效应外,分离式霍普金森压杆(SHPB)试验中的应力波加载还可能引入惯性效应,进而影响样品的特性测量,特别是在高应变速率下[10]。对于直径为 d、初始长径比为l_0/d_0的样品,输出杆测得的应力可按式(1)简化估算为

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma_y}=\frac{\rho d^2\dot{\varepsilon}^2}{\sigma_y}\left[\frac{1}{64}+\frac{1}{6}\left(\frac{l_0}{d_0}\right)^2\right] \tag{1}$$

其中,ρ为材料密度,$\dot{\varepsilon}$为应变率,σ_y为屈服强度。以本研究的纯水冰试样为例,$\rho\approx910\ \mathrm{kg/m^3}$,$d=49\ \mathrm{mm}$,$\dot{\varepsilon}_{\mathrm{avarage}}=1500\ \mathrm{s^{-1}}$,$\sigma_y\approx25\ \mathrm{MPa}$。根据上述公式计算的惯性误差约为 0.004%,可在本工作中忽略。

本研究所用纯水冰试样采用人工冻结法制备。水样经中国气象局认证机构检测,主要离子组成见表 1。为确保试验一致性与可重复性,所有试样均通过标准化工艺制备。制样采用内径 49 ± 0.2 mm、高度 80 mm 的亚克力圆柱模具,模具底部贴附孔径为 0.3~0.5 mm 的微孔胶带,以引导冻结过程中气泡的释放。冷冻时将模具垂直放置于冰格上方,气泡沿微孔通道逸出,并最终聚集到冰格区域,从而显著减少中心残余气泡、提升内部结构均匀性,如图 2 所示。整个冷冻过程在 CK-BRCDW-31D 型步入式超低温试验箱中完成,设定温度为−20 ℃,冷冻持续时间为 48 h。模具外置于聚氨酯保温箱中,以抑制环境波动对结晶过程的影响。试验箱内部温度波动控制在±0.3 ℃ 以内,保证样品在相对均匀温场下逐层凝固,有效避免局部热梯度诱发的异常取向。冻结结束后在−20 ℃ 环境中脱模,并使用低温锯骨机完成初步切割。每块冰坯加工成 6 个几何尺寸一致的标准圆盘试样,目标厚度 10 ± 0.2 mm,最终尺寸由游标卡尺复核确认。制备流程如图 3 所示。

为进一步确保几何一致性与结构完整性,试验前对全部样品实施质量筛选:(1)外观筛查:在漫射光下剔除存在明显裂纹、夹杂或中心气泡的样本;(2)尺寸公差:厚度控制在 10 ± 0.2 mm;(3)密度抽检:对部分样本称重后以评估密度均匀性。经筛选共获得 97 个满足要求的标准化试样;全部样品在−20± 0.5 ℃ 条件下储存 48~72 h,以确保测试前达到热平衡。

表 1 纯净水化学成分

Tab.1 Chemical composition of pure water

分析物名称	分析方法	标准 /（$mg·L^{-1}$）	检测结果 /（$mg·L^{-1}$）	结论
总大肠杆菌数	GB/T 5750.12-2023 5.2	N/A	未检出	符合
氟化物	GB/T 5750.5-2023 6.2	0.01	0.15	符合
硝酸盐（以N计）	GB/T 5750.5-2023 6.2	0.01	1.35	符合
氯化物	GB/T 5750.5-2023 6.2	0.01	27.7	符合
硫酸盐	GB/T 5750.5-2023 6.2	0.01	48.4	符合
总硬度（以$CaCO_3$计）	GB/T 5750.4-2023 10.1	1.0	129	符合
钠	GB/T 5750.6-2023 4.4	0.005	18.2	符合
亚硝酸盐（以N计）	GB/T 5750.5-2023 12.1	0.001	<0.001	符合

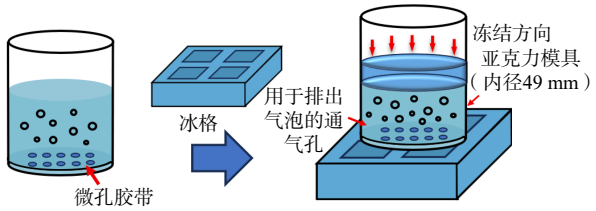


图 2 用于试样制备的垂直定向冻结过程示意图

Fig.2 Schematic diagram of the vertical directional freezing process for specimen preparation

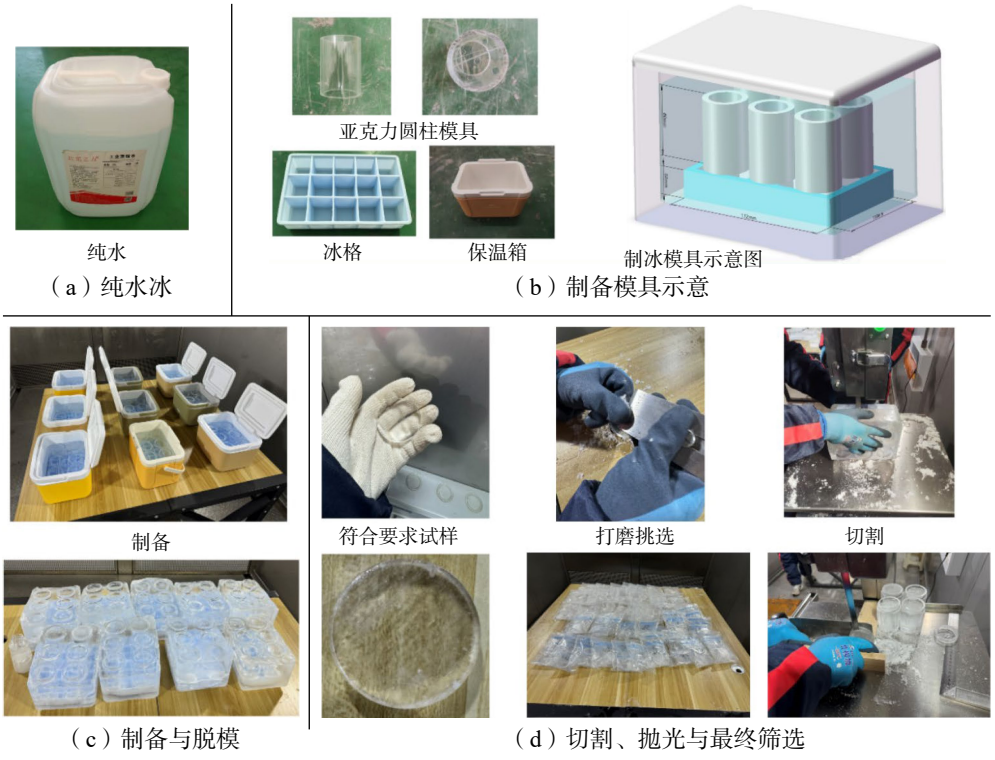
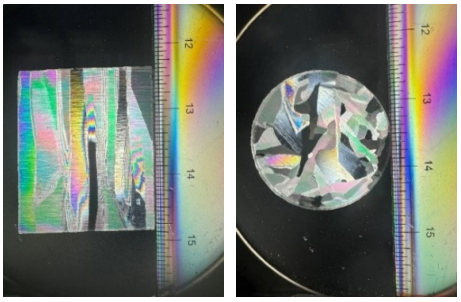


图 3 用于动态压缩试验的纯水冰试样制备流程

Fig.3 Preparation process of pure water ice specimens for dynamic compression tests



（a）　　（b）

图 4 在−20 ℃ 下以偏振光观察的纯水冰试样典型微观特征

Fig.4 Typical microstructural characteristics of pure water ice specimens observed under polarized light at −20 ℃

图 4 展示了典型纯水冰试样的微观结构特征。整体观察表明，样品呈典型多晶形貌，晶粒之间干涉色彩强烈反差，晶界轮廓清楚，表明晶体在空间中存在明显取向差异。未发现夹杂或析出物，反映出制样过程中温场控制稳定、凝固均匀、纯度较高。纵向切片图 4(a) 显示晶粒沿冻结方向呈柱状分布，干涉条带沿主热流方向连续排列、颜色渐变清晰，反映出在稳定温度梯度下的择优生长；横向晶粒宽度主要为 2~3 mm，纵向延展长度可达 6~8 mm。横向切片图 4(b) 中晶粒多为不规则多边形，整体近等轴，尺寸主要分布于 2~5 mm，少量小晶粒约 1~2 mm。从尺度对比看，试样厚度约 10 mm、最大晶粒长度 6~8 mm，厚度与晶粒尺寸比约 1.25~1.67。尽管该比例可能影响局部应力传递路径的连续性，但相关研究表明[2]，在此尺度范围内晶粒尺寸对高应变率压缩响应的影响有限，误差处于可接受范围。纵剖面中柱状晶取向大体平行于加载轴，而横剖面晶粒取向分散、界面富集显著。未观察到由模壁向内延伸的条带状织构，说明垂直定向冻结与微孔导气工艺有效抑制了面内取向偏置，提升了样品结构均匀性，并降低了界面裂纹早期萌生的风险。

为降低制样过程中的不确定性，本研究对模具结构和冻结路径进行了优化，并引入微孔导气措施，以避免传统冻结条件下易出现的晶粒定向生长、气泡滞留以及界面裂纹初始萌生等缺陷。所有试样在测试前均经过外观、尺寸和密度的严格筛选，并在各工况下实施多件重复试验，以减小制备过程带来的随机误差。需要指出的是，在未进行结构优化的常规冻结条件下，试验室制备的纯水冰往往在底部聚集明显气泡和初生裂纹。直接使用此类未经筛选的样品会在高应变率试验中产生较大的离散性，要通过统计方法获得稳定规律，则必须依赖大量重复试验，而高应变率试验的条件和成本均难以支持如此规模的样本量。尽管严格筛选在减少气泡与初生裂纹的同时，也会降低杂质含量并使晶粒取向分布更加集中，从而可能使测得的强度高于天然海冰的平均水平，但此方法提高了样品结构的一致性和实验数据的可重复性。本研究所得结果更接近于冰体力学性能的上限，可作为分析海冰在极端加载条件下典型响应规律的重要参考。

1.2 分离式霍普金森压杆

本研究采用改进的分离式霍普金森压杆（Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB）装置开展纯水冰高应变率单轴压缩试验，研究在−20 ℃、1054~1972 s^{-1} 条件下的动态力学响应。试验装置如图 5 所示，由冲击杆、入射杆和透射杆组成，所有杆件均采用直径为 50 mm 的 7075-T6 高强度铝合金材料制造，材料屈服强度约为 500 MPa。冲击杆长度 0.3 m，入射杆和透射杆均为 2.0 m。冲击由压缩空气驱动，撞击速度范围为 12~23 m/s。应变信号由 KFGS-5-120-C1-11 L1M2R 型电阻应变片采集，并经 LK2109 A 超动态应变仪放大记录。为同步观察破坏过程，系统集成 FASTCAM SA-Z 高速摄像机（最大帧率 224 000 fps），捕捉不同温度下试样的损伤演化。

为保证加载全过程中热稳定，SHPB 集成液氮低温控温系统，由 YDZ-100 液氮罐、中央温控箱与金属冷却舱组成，连续控温范围−180~−20 ℃。冷却舱外壳为金属，内衬 50 mm 丙烯酸隔热层以降低热交换并提升温度场均匀性；液氮经顶部喷口进入舱体，在风扇驱动下形成环绕试样的闭合循环气流，实现快速且均匀降温。中央控温箱实时监测舱体温度并闭环调节液氮流量以维持设定温度。考虑高速成像需求，冷却舱一侧设置双层观察窗并内嵌防霜加热丝，在不显著扰动温场的前提下实现全程可视化。

在 SHPB 试验过程中，试样置于入射杆与透射杆之间。冲击杆在设定速度下撞击入射杆产生轴向传播的应力波。入射波$\varepsilon_I(t)$传至试样接触界面后，因波阻抗差而分裂为反射波$\varepsilon_R(t)$与透射波$\varepsilon_T(t)$，分别

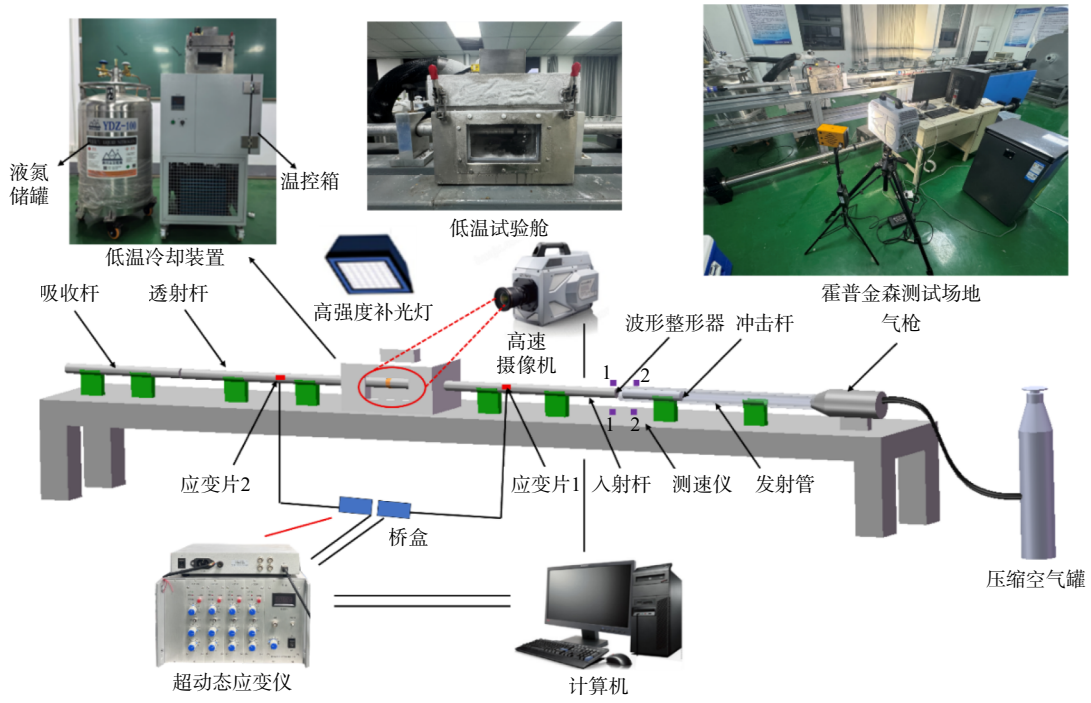


图 5 用于纯水冰动态压缩试验的改进型分离式霍普金森试验装置

Fig.5 Improved split Hopkinson pressure bar (SHPB) apparatus for dynamic compression tests of pure water ice

沿入射杆与透射杆传播。在一维应力波传播假设与试样内应力近似均匀的条件下，采用三波法求解试样的动态响应，获得工程应力$\sigma(t)$、工程应变率$\dot{\varepsilon}(t)$和工程应变$\varepsilon(t)$为

$$\sigma(t)=\frac{EA_0}{A_s}\varepsilon_{\mathrm{T}}(t) \tag{2}$$

$$\varepsilon(t)=-\frac{2C_0}{L_s}\int_0^t\varepsilon_{\mathrm{R}}\mathrm{d}t \tag{3}$$

$$\dot{\varepsilon}=\frac{2C_0}{L_0}\varepsilon_{\mathrm{R}} \tag{4}$$

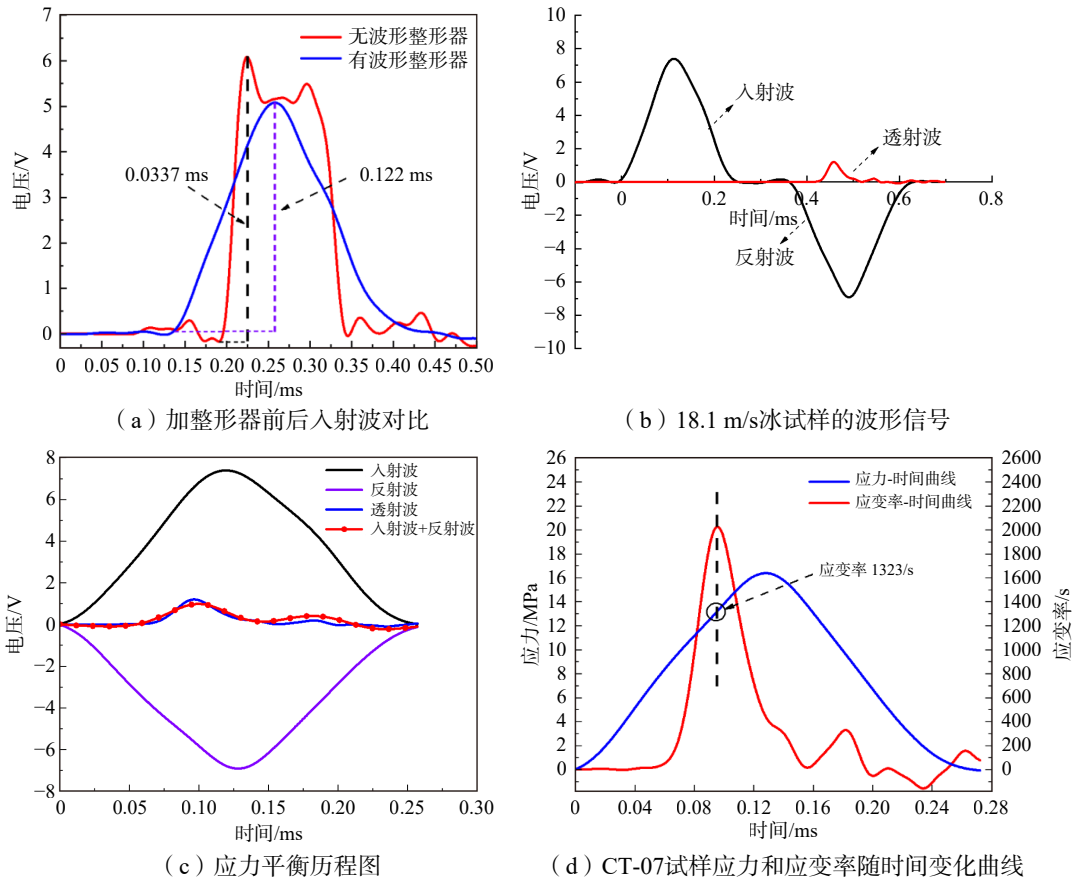
式中：E、A_0和C_0分别是入射和透射杆的弹性模量、横截面积和纵波波速；A_s和L_s分别是试样的横截面积和长度。真实的应力−应变关系通过假定在变形过程中试样内存在均匀和等容的变形条件，由工程应力−应变关系确定。

在 SHPB 试验中，试样内部的应力均衡是获得可靠力学参数的前提。Davies 和 Hunter[11] 指出，在典型的分离式霍普金森压杆（SHPB）试验中，试件内部的应力脉冲需经历约π次反射后才能达到初步平衡，其所需时间可表示为

$$t_{\mathrm{e}}=\frac{\pi L_0}{C_{\mathrm{ice}}} \tag{5}$$

式中：t_{e}为试件达到应力平衡所需要的时间，L_0为试样长度，C_{ice}为冰中纵向波速。冰的平均杨氏模量为 10 GPa，其密度约为 910 kg/m^3。基于这些值，冰中的纵向波速可近似为 3315 m/s。使用等式(5)，对于 10 mm 厚的冰样其平衡时间可估算为 9.48 μs。然而，已有研究表明，为获得较好的应力均匀状态，应力波在试样内部至少传播 3~5 个来回[12]。因此，冰样达到理想应力均衡状态的持续加载时间应不低于 50 μs。为延长有效应力平衡时间，本研究在入射杆前端粘贴直径 12 mm、厚度 1 mm 的退火铜垫片作为波形整形器。图 6(a)对比了波形整形器使用前后的入射波，波形整形器有效延缓了波前上升速度，使入射波上升时间由原始的 0.0337 ms 延长至 0.122 ms。图 6(b)给出了冲击速度 18.1 m/s 下获得的典型波形信号，图 6(c)基于该波形对应力均衡性进行验证，红色曲线为入射波与反射波的叠加，蓝色曲线

为透射波信号。两者在加载过程中的相位与幅值演化高度一致，验证了试样在加载过程中已基本实现应力均匀分布，满足动态力学参数求解的基本前提。



（a）加整形器前后入射波对比　　（b）18.1 m/s冰试样的波形信号

（c）应力平衡历程图　　（d）CT-07试样应力和应变率随时间变化曲线

图 6　SHPB 条件下纯水冰的波形分析

Fig.6　Waveform analysis of pure water ice under SHPB conditions

在低温−高应变率条件下，冰作为典型脆性材料常在尚未完全建立稳态应变率场前即发生失稳破坏，导致主要变形过程在极短时间内完成，峰前难以获得长时间的应变率稳定区。这一现象在既有文献中广泛存在，并增加了数据的物理解释难度。目前针对脆性材料的动态应变率，文献中常见三种处理思路：(1)全过程平均法，适用于稳态响应但易掩盖峰值邻域的局部特征；(2)初始线性段平均法，侧重起始加载阶段，但受上升沿与信噪比影响较大；(3)峰值区间平均法，聚焦临界失稳窗口，物理意义更贴合脆性破坏。本文采用第三种方法，图 6(d)给出了试样编号为 CT-07 的应力−应变率−时间响应曲线。在波形整形器的作用下，应变率曲线在峰值应力附近出现了相对平稳的平台区，可将该区间的平均应变率作为试样在最大承载状态的典型动态响应。然而，即便经过整形优化，瞬态应变率波动仍不可忽视。尽管在加载波形与样品一致性方面已采取控制措施，动态试验仍不可避免存在不确定性，体现在应变率波动、载荷轻微非对称及内部微观扰动等。鉴于本文关注的是极端条件下的宏观力学响应，上述不确定性对峰值应力等指标的影响有限，数据总体具有良好代表性与工程可用性。

2　试验结果及讨论

试验在−20 ℃ 的条件下进行。具体参数和关键结果整理在表 2，包括试验编号、冲击速度、平均应变率，以及峰值应力及其对应的应变。为确保试验数据的可重复性与统计可靠性，每个冲击速度条件下均进行了 2 次独立重复试验，并利用高速摄像机全程记录加载过程。

表 2 −20 ℃ 条件下试验的试验结果

Tab.2 Experimental results for tests conducted at −20 ℃

试验编号	冲击速度 /（$m\cdot s^{-1}$）	应变率 /s^{-1}	峰值应变 /（$\times10^{-3}$）	峰值应力 /MPa
CT-20-001	14.1	1054	5.4	13.3
CT-20-002	15.1	1199	8.8	15.9
CT-20-003	15.1	1120	6.5	13.2
CT-20-004	15.3	1155	11.1	16.7
CT-20-005	16.1	1247	9.2	16.9
CT-20-006	16.2	1269	6.2	14.6
CT-20-007	18.1	1323	6.8	20.3
CT-20-008	18.2	1355	10.5	17.7
CT-20-009	19.3	1653	11.3	19.0
CT-20-010	19.6	1513	7.8	20.0
CT-20-011	19.9	1755	9.5	18.6
CT-20-012	20.0	1736	8.1	20.1
CT-20-013	21.2	1903	20.5	18.4
CT-20-014	21.2	1911	11.2	21.1
CT-20-015	22.8	1972	16.6	25.1
CT-20-016	22.8	1941	15.7	21.8

在分离式霍普金森压杆试验中，冰样−压杆界面的低摩擦特性易引发加载初期的接触失稳，即“掉落”现象，导致应力波畸变并降低力学参数提取的可靠性。常规金属试样可通过环氧粘结实现稳固耦合，但该方法在低温下对冰样无效。已有研究尝试采用喷水冻结或在试样底部设置柔性支撑（如橡胶垫、泡沫片）以降低掉落风险：前者虽具可操作性，但易形成界面与温场不均，本研究的验证亦难以获得稳定效果；后者有助于初始定位，但在破坏过程中易引入反弹与附加反射波，干扰应力波传播，降低数据稳定性与可重复性。基于上述考量，本文不采用附加粘结或支撑措施，而以高速摄像实时监测加载过程，并结合图像识别剔除发生掉落的试验，仅对未发生掉落的有效试验进行处理与展示，掉落试验不纳入统计，亦不再追加重复。

在有效试验数据中，冲击杆的速度范围为 14.1~22.8 m/s，对应的应变率范围为 1054~1972 s^{-1}。峰值应力随应变率升高呈增大趋势，由 13.2 MPa 增至 25.1 MPa，增幅达 90%。相比之下，峰值应变的范围为 5.4×10^{-3}~20.5×10^{-3}，整体分布较为分散，未呈现出随应变率升高的单调变化趋势。

图 7 所示应力−应变曲线进一步揭示了其力学响应特征。在单轴压缩下，冰样发生脆性破坏，曲线整体呈现典型的尖峰形态：峰值应力达到最大值后迅速下降，并在应变约 0.05~0.06 附近趋于平稳，残余应力维持在 1~7 MPa，形成明显的承载平台。这一阶段的承载主要来源于碎裂冰块之间的摩擦滑移、颗粒嵌合以及局部冷粘结作用，说明即便在整体失稳后，冰体仍具一定的残余承载能力。值得注意的是，在高应变率工况（$\dot{\varepsilon}>1900\ s^{-1}$）下，曲线不仅峰值应力更高，且峰后应力的衰减速率明显减缓，残余强度普遍高于其他应变率。该现象提示在更高加载速率下，破裂过程更趋均匀，裂纹呈多分支扩展模式，从而抑制单一主裂纹的瞬时贯通；同时，碎块之间的摩擦与嵌合作用延缓了承载力衰减，提升了体系的整体稳定性与能量耗散能力。该现象与低温脆性材料（如冷冻岩石、脆性聚合物）在高应变率下表现出的“延迟失稳”规律一致。需说明的是，上述机理解释基于曲线形态与一般认识的合理推断，尚待结合高速成像与定量指标进一步验证。

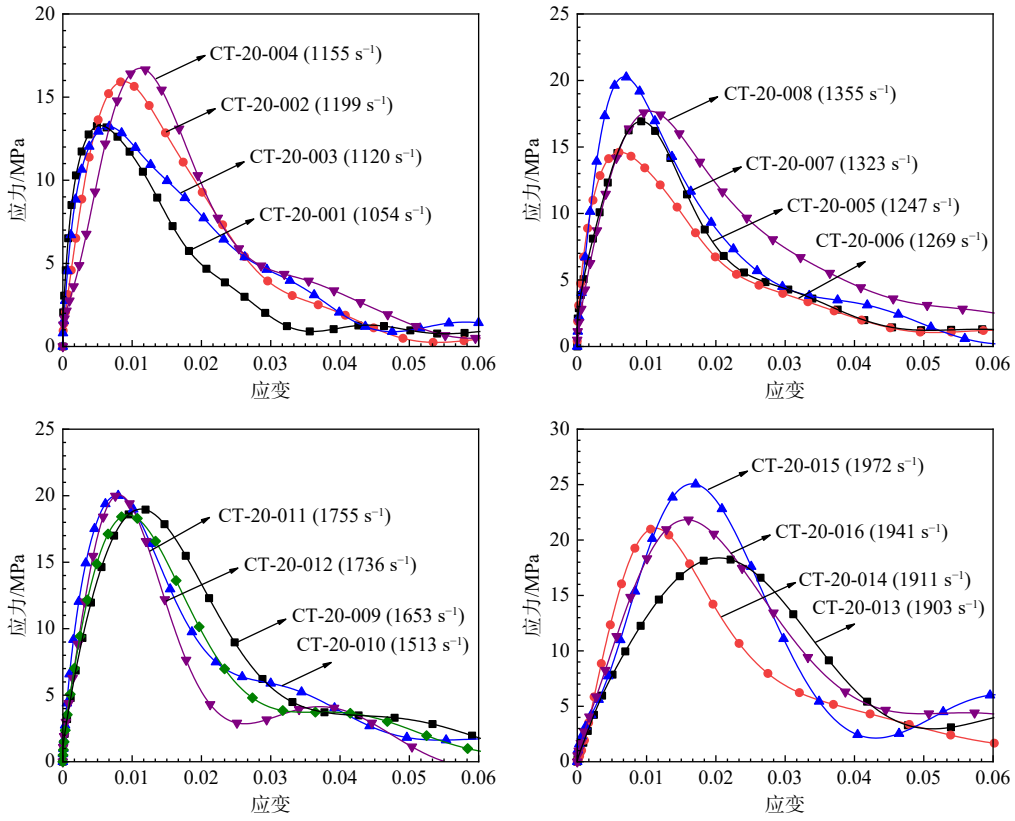


图 7　−20 ℃ 纯水冰应力−应变曲线

Fig.7　Stress-strain curves of pure water ice at −20 ℃

图 8 展示了−20 ℃ 条件下纯水冰峰值应力分别随应变率与冲击速度的变化关系。线性拟合结果为$\sigma = 0.08\dot{\varepsilon} + 0.2027 (R^2 = 0.68)$与$\sigma = 0.996\ V - 0.1371 (R^2 = 0.80)$。拟合结果表明，两种形式均呈现出随加载速率升高而增加的趋势，体现出典型的应变率敏感性。线性拟合的目的在于揭示峰值应力随加载速率变化的总体规律，而非追求较高的拟合优度。拟合直线的斜率表征了峰值应力对应变率变化的敏感程度，可视为速率硬化特征的定量反映，其数值越大，说明材料在高应变率加载下的强度提升越显著。本研究的数据范围为−20 ℃、1054~1972 s^{-1}，在更高应变率或更低温条件下，该线性关系可能不再适用。尽管应变率是表征材料速率效应的基本物理量，但在实际工程中，冲击速度往往更易测量和控制。因此，速度−峰值应力关系的呈现有助于试验数据向工程应用转化。无论采用应变率还是速度作

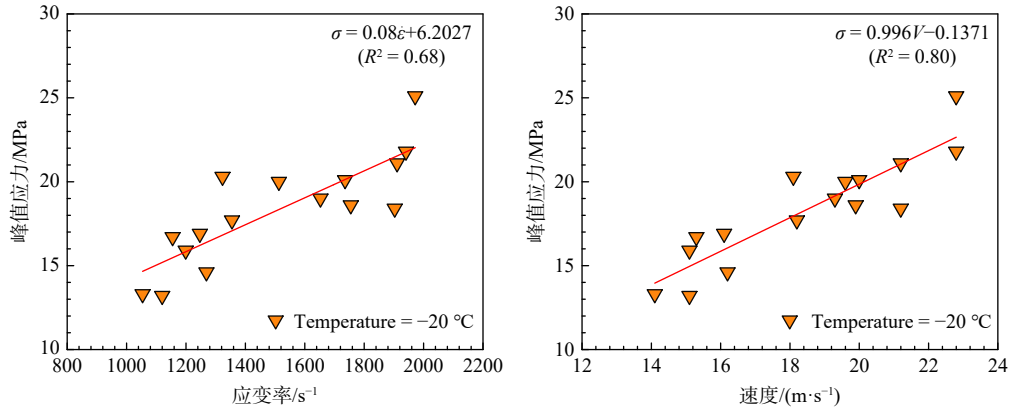


图 8　−20 ℃ 条件下纯水冰峰值应力随应变率、速度变化关系

Fig.8　Relationship between peak stress, strain rate, and impact velocity of pure water ice at −20 ℃

为变量,数据在相近条件下均表现出一定离散性:在 19~20 m/s 区间,峰值应力差异可达 3~5 MPa,约占均值的 15%~20%。需要指出的是,本研究的冰样已在制备与筛选阶段剔除了含明显缺陷的个体,表明即便在人工优化条件下,微观结构差异(如晶粒取向、裂纹分布和边界接触状态等)亦可能对结果产生重要影响。因此,在建立动态本构模型时,单纯的速率效应项可能不足以解释观测到的力学响应波动。引入能够表征微观结构差异或统计分布特征的参量,可能是提高模型精度与适用性的必要方向。

图 9 展示了−20 ℃、冲击速度 18.1 m/s 下(对应工况 CT-20-007),纯水冰在动态压缩作用下的高速摄像序列(帧间间隔 1/100 800 s,末帧除外)。结果表明,破坏过程具有阶段性特征,可分为裂纹快速萌生、宏观裂解和颗粒化粉碎三个阶段。初始阶段试样保持完整,随后在底部边缘出现局部白化点,可视为裂纹萌生的表征;随加载持续,白化区逐渐扩展并贯通至外形轮廓,表现为宏观裂解;在最终阶段,试样整体失稳并转化为碎片化状态,外缘逐步模糊,呈现出典型的颗粒化粉碎特征。结合应力−应变曲线的峰后延迟衰减,可以推测在高应变率条件下,裂纹扩展更可能呈多分支化发展,抑制单一主裂纹的瞬时贯通失效,从而在碎裂过程中形成相对均匀的颗粒体系。这一机制有助于解释残余承载平台的存在及其随应变率升高而稳定性增强。需要指出的是,由于摄像机沿试样厚度方向布置,所获影像主要反映外形变化、裂纹出现时间及宏观破裂形态,无法捕捉三维裂纹网络与内部损伤演化。这一局限性提示,未来研究可结合 X 射线层析成像或透明冰样光学观测等技术,以进一步揭示冰体破坏的完整机制。

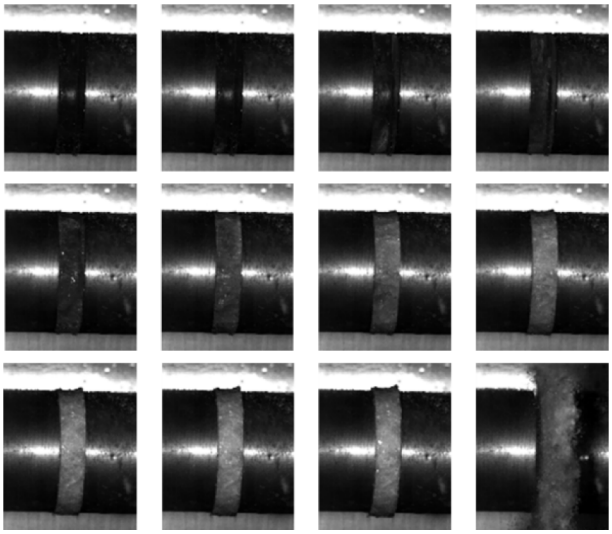


图 9 −20 ℃、18.1 m/s 动态压缩条件下纯水冰破坏过程的高速摄影图

Fig.9 High-speed photographic sequence of the failure process of pure water ice under dynamic compression at −20 ℃ and 18.1 m/s

图 10 对比了本研究在−20 ℃ 下纯水冰的峰值应力−应变率数据与已有文献结果。不同研究在制样方式、控温条件和加载装置等方面存在差异(见表 3),但整体趋势均表现出峰值应力随应变率升高而增强,表明该规律具有跨研究的一致性。在数值上,本研究结果更接近 Li 等(−18 ℃)的试验,而略低于 Wu 等(−15 ℃)的结果,这种差异可能与水源矿化物成分、样品纯净度及制冷方式有关。需要指出的是,部分文献采用厚度仅 3 mm 的冰样,此类极薄试样在制冰过程中与端面平整度方面难以保证一致性,往往导致强度值偏高且波动加剧。此外,部分研究缺乏低温环境设备,而依赖高速加载以维持温度,其结果虽可在趋势上反映速率效应,但在温度场均匀性和数据稳定性方面存在局限。相比之下,本研究在试样筛选、低温维持与加载控制上具备更严格的约束条件,能够最大程度降低环境与几何因素的干扰。尽管试验存在差异,各研究所得结果在整体规律与响应区间上保持一致,这种共性规律表

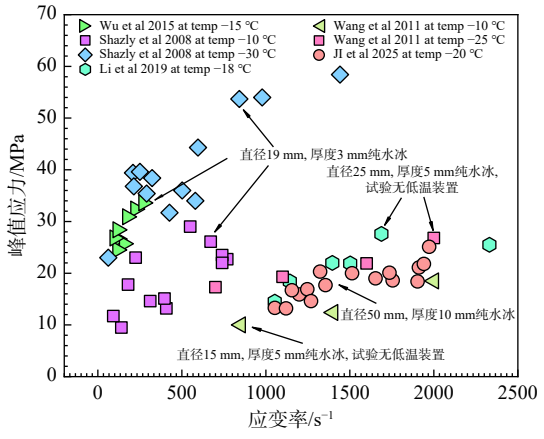


图 10 −20 ℃ 下纯水冰峰值应力−应变率数据与已有文献结果对比

Fig.10 Comparison between peak stress-strain rate data of pure water ice at −20 ℃ and existing literature results

明: 冰体的速率敏感性是稳定的宏观响应, 但其强度水平和离散幅度受到微观结构与界面条件的影响。本研究的试验方案与数据处理路径具有合理性和可比性, 可为冰高应变率本构建模和工程应用提供支撑。

表 3 本研究与已有文献中纯水冰高应变率试验条件及峰值应力对比

Tab.3 Comparison of high strain rate test conditions and peak stress of freshwater ice between this study and previous literature

温度 /℃	应变率 /S^{-1}	峰值应力 /MPa	试样尺寸 /mm	杆件尺寸	是否有低温装置	冰样类型	参考文献
−15	100~272	24.5~33.6		入射杆1.8 m	有	纯水冰	[3]
−10	92~770	9.5~26.1	直径19厚3	透射杆2.0 m	有	纯水冰	[2]
−30	62~1441	23~58.4		直径19.05 mm	有	纯水冰	[2]
−18	1053~2331	14.5~27.6	直径25厚5	入/透杆长1.5 m 直径25 mm	无	纯水冰	[5]
−10	850~2000	10~18.5	直径15厚5	入射杆1.7 m	无	纯水冰	[6]
−25	700~2000	17.3~26.8	直径15厚5	透射杆1.2 m 直径20 mm	无	纯水冰	[6]
−20	1054~1972	13.2~25.1	直径49厚10	入/透杆长2.0 m 直径50 mm	有	纯水冰	–

3 结　论

本研究基于改进的制样工艺与分离式霍普金森压杆(SHPB)装置, 对−20 ℃、1054~1972 s^{-1} 条件下的纯水冰开展了高应变率单轴压缩试验, 得到如下结论:

(1)在本研究的应变率范围内, 纯水冰表现出典型的应变率敏感性: 峰值应力随应变率升高明显增加, 而峰值应变无固定规律并呈离散分布。应力−应变曲线具有尖峰特征, 高应变率段的峰后软化减缓, 残余承载能力相对更高。

(2)高速摄像揭示了破坏过程经历裂纹萌生、宏观裂解和颗粒化粉碎。结合应力−应变曲线的峰后延迟衰减, 推测在高应变率下裂纹扩展更趋于分散, 可能抑制单一主裂纹的瞬时贯通, 从而与残余承载平台的存在相呼应。但受限于观测方向, 该推测仍需进一步验证。

(3)即便在严格筛选与低温控制条件下, 峰值应力在相近应变率下仍存在明显离散性, 表明单独依赖应变率难以解释强度差异。未来的动态本构模型需考虑晶粒取向、裂纹分布及界面状态等反映微观结构差异的参数, 以提高对冰体动力学行为的表征能力。

(4)本研究数据整体落在既有文献的响应区间内, 趋势一致, 验证了试验方案的可靠性。相比部分研究, 本研究在试样厚度、低温维持和加载控制方面更为规范, 减少了几何与温度场不均匀导致的强度偏高和波动放大。所得结果丰富了−20 ℃ 纯水冰的高应变率力学数据库, 可为寒区工程动力分析及相关本构模型构建提供试验依据。

参　考　文　献:

[1] Shazly M, Prakash V, Lerch B A. High-strain-rate compression testing of ice[R]. NASA, Glenn Research Center, 2006.

[2] 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.

[3] Wu X, Prakash V. Dynamic compressive behavior of ice at cryogenic temperatures[J]. Cold Regions Science and Technology, 2015, 118: 1–13.

[4] Wu X, Prakash V. Dynamic strength of distill water and lake water ice at high strain rates[J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 76: 155–165.

[5] 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 compression property of distill-water ice and impurity-water ice at high strain rates[J]. Explosion and Shock Wave, 2019, 39(9): 76–83. (in Chinese)

[6] 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. Dynamic mechanical behaviors of ice at high strain rates[J]. Explosion and Shock Wave, 2011, 31(2): 215–219. (in Chinese)

[7] Okada M, Liou N S, Prakash V, et al. Tribology of high-speed metal-on-metal sliding at near-melt and fully-melt interfacial temperatures[J]. Wear, 2001, 249(8): 672–686.

[8] Ullah H, Irfan M A, Prakash V. State and rate dependent friction laws for modeling high-speed frictional slip at metal-on-metal interfaces[J]. Joural of Tribology, 2007, 129(1): 17–22.

[9] Prakash V. Time-resolved friction with applications to high-speed machining: Experimental observations[J]. Tribology Transactions, 1998, 41(2): 189–198.

[10] Gorham D. Specimen inertia in high strain-rate compression[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1989, 22(12): 1888.

[11] 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.

[12] 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(1): 17–25.
Wang L L, Wang Y G. The important role of stress waves in the study on dynamic constitutive behavior of materials by SHPB[J]. Explosion and Shock Wave, 2005(1): 17–25. (in Chinese)