基于 SHPB 试验的海冰动态力学性能研究

孟 强[1], 张久洋[2]

（1. 成远矿业开发股份有限公司, 辽宁 辽阳 111000;
2. 辽宁科技大学 矿业工程学院, 辽宁 鞍山 114051）

摘 要： 为研究海冰在高应变率下的动态力学特性，使用分离式霍普金斯压杆（split Hopkinson pressure bar，SHPB）装置，对 2 种海冰试件进行动态冲击试验，并采用三波法对试验数据进行处理，得到了海冰试件的应力-应变关系以及能量耗散规律，并对海冰破碎能耗特性进行总结。试验结果表明：在应变率为 53.2～229.6 s^{-1} 的区间内，海冰的动态抗压强度为 17.1～40.0 MPa，相同气压下，1.0 长径比海冰试件的应变率与峰值应力均小于 0.5 长径比的海冰试件；海冰试件受压应力作用，最终表现出塑性压剪破坏特征；应变率较小时，由于冰的黏性，海冰破坏后仍保持一个整体，随着应变率增大，试件断裂破碎为不同大小的碎块；2 种长径比试件应变率对海冰的动态破坏的能量吸收率 ω 均具有较大的影响，但能量吸收率 ω 与应变率的关系曲线表现出不同的趋势。

关键词： 海冰；SHPB；冲击荷载；应变率效应；能量耗散

中图分类号： TD853；P731.15 **文献标志码：** A **文章编号：** 1002-3682（2023）03-0277-11

doi: 10.12362/j.issn.1002-3682.20220730001

引用格式： 孟强, 张久洋, 2023. 基于 SHPB 试验的海冰动态力学性能研究[J]. 海岸工程, 42(3): 277-287.
MENG Q, ZHANG J Y, 2023. Research on dynamic mechanical properties of sea ice based on SHPB test[J]. Coastal Engineering, 42(3): 277-287.

随着“冰上丝绸之路”的发展，海运航道在我国与北美、西欧、东欧这几个经济中心的合作发挥着重要的作用，而海冰是影响航行安全的首要因素，因此研究海冰的动态力学性能具有重要的工程价值和应用前景。

冰的力学行为十分复杂，可以看成是一类材料组成的复合体（Mostafa et al，2008）。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（Jones et al，1983；于哲敏等，2017；隋俊鹏等，2021），而对于冰材料在能量消散上的研究较少，特别是海冰的动态力学性能数据和能量耗散规律的研究十分缺乏。汪洋等（2011）对冰的高应变率下的动态力学行为进行了初步研究，在−25～−10 ℃ 的温度区间内对冰样试件进行了应变率为 500～2 000 s^{-1} 的动态压缩试验，结果发现冰的动态应力应变之间的关系并非呈现线性相关，冰样试件的峰值应力与破坏应变的大小都与应变率有正相关性。Hyonny 等（2007）利用分离式霍普金斯压杆（split Hopkinson pressure bar，SHPB）装置，测得应变率在 400～2 600 s^{-1} 的冰的动态抗压强度，通过调整试件长度，发现的应变率是可重复和可控的，并显示出密切遵循试件长度的倒数关系；但在试验中应变率的不断升高后，试验结果有较大的离散性。Fasanella 等（2006）基于哥伦比亚号飞船的事故，为研究碎冰对船体的伤害建立了动态有限元模型，通过高速落锤装置研究了冰试样在高速冲击下的试验数据，试验表明对于 100 m/s 及以上的速度，冰在受撞击时破裂的表现更像流体。本文利用 SHPB 试验装置对 0.5 长径比和 1.0 长

收稿日期： 2022-07-30
资助项目： 2023 年辽宁省中央引导地方科技发展资金第一批计划（项目编号：2023JH6/100400022）
作者简介： 孟 强（1988—），男，工程师，主要从事港口航道与海岸工程方面研究.
E-mail: mengqianghfer@163.com

（李 燕 编辑）

径比的海冰的动态力学性能进行测试，并根据试验结果对应变率、长径比等因素分析对海冰材料力学性能特点和能量消耗耗散规律的影响。

1 人工海冰试件制备及方案设计

由于海冰特性受环境影响较大，为保证试验结果的稳定性，采用了人工冻结的方法制备海冰试件，进而模拟渤海海域的部分港口的海冰条件，在冲击试验设备的选择中，基于常用于中高应变率加载的分离式霍普金森试验装置完成冲击试验，并根据海冰的低强度、脆性特征设计了不同长径比的低气压加载方案。

1.1 试件制备

在试验之前，对冬季渤海海域的锦州、营口和葫芦岛等地的港口进行了实地考察，图 1 给出了其中营口港海域的海冰分布。在实际考察中发现，海冰易受气温等因素影响，现场取样进行加工无法保证数据精度，会大大增加数据的离散性。因此，海冰试件采用人工冻结的方法来进行制备，试件制备和试验在辽宁科技大学冲击动力学试验室完成。海冰试件要保证其表面光滑平整，同时考虑到水的热胀冷缩特性，在制备试件时选用硅胶材料的模具，并在上方保留小孔，在注水过程中将模具中空气排出，同时也可使试样在冻结膨胀过程中将多余的水排出。

试验前，收集营口港附近海域海水，将其放进模具中，并在−5 ℃ 的温度下冻结 5 h，保持试件外形平整，然后调整温度至−20 ℃，来保证人工冻结海冰的试验温度。由于水冻结成冰后体积会发生膨胀，因此为保证海冰试件的完整性和可行性，同时避免试件因应力集中而发生破坏，在冻结完成后，先将模具与试件整体短暂浸水，以释放试件中的预应力。在将试件取出后，去掉有缺陷的、外形不符合的试件。为保证试件的均一性，用打磨机将海冰试件两端进行打磨，保证平整。经测量，制备好的试件均为直径 50 mm 海冰圆柱体试件，高度分别为 25 mm 和 50 mm，海冰试件见图 2。

图 1 营口港海域海冰分布

Fig. 1 Distribution of sea ice in the area of Yingkou Port

(a) 0.5 长径比海冰试件 (b) 1.0 长径比海冰试件

图 2 制备好的海冰试件

Fig. 2 Sea ice specimens prepared

1.2 试验系统及原理

海冰的动态力学试验利用辽宁科技大学霍普金森试验装置完成，试验装置原理如图 3 所示。该试验装置的圆柱形冲头、入射杆、透射杆及缓冲杆均为 50 Cr 钢，其杨氏模量为 240 GPa，密度为 7 800 kg/m^3，杆中纵波波速为 5 580 m/s，波阻抗为 4.35×107 MPa/s。采用 LK2109A 型超动态应变仪和 LK2400 高速数据采集器获取海冰应变信号数据。试验使用 BC-202 型双路爆速仪对冲头测速，通

过控制高压气室压强来实现恒速冲击，通过调冲击气压值或者减小冲头入膛深度来改变冲头速度，以达到试验所需的撞击速度。

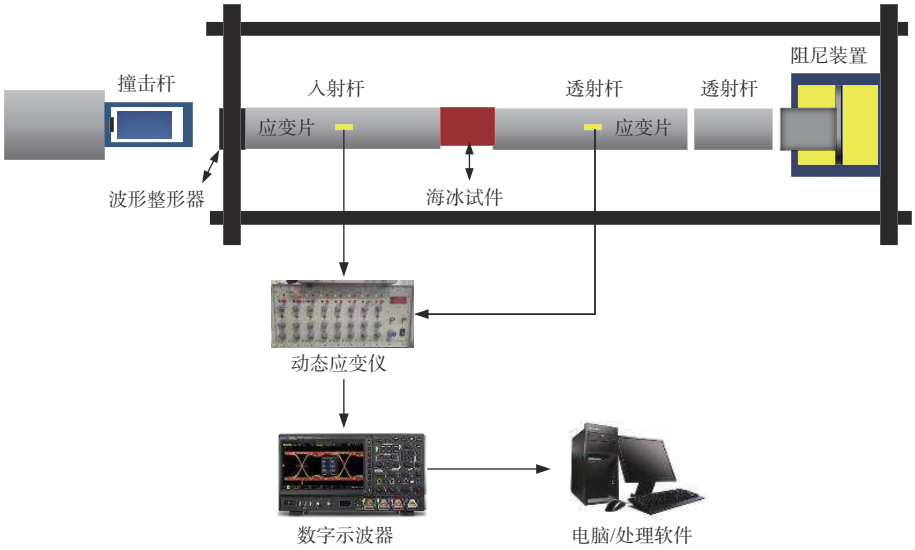


图 3　霍普金森试验装置原理

Fig. 3　Principle of the device of Hopkins pressure bar

试验完成后，选用三波法处理数据，这种方法可以有效获得较为真实的数据，减少人为误差[7]。三波法处理人工海冰试件的应力、应变和应变率的计算式为：

$$\begin{cases} \sigma_s = \dfrac{A_0 E_0}{2A_s}(\varepsilon_I + \varepsilon_R + \varepsilon_T) \\ \varepsilon_s = \dfrac{C_0}{l_s}\displaystyle\int_0^t (\varepsilon_I - \varepsilon_R - \varepsilon_T)\,\mathrm{d}t \\ \dot{\varepsilon}_s = \dfrac{C_0}{l_s}(\varepsilon_I - \varepsilon_R - \varepsilon_T) \end{cases}, \tag{1}$$

式中：C_0、A_0 和 E_0 分别为 SHPB 装置压杆的弹性波波速、截面积及弹性模量；l_s 和 A_s 为试件的长度与截面积；ε_I、ε_R 及 ε_T 分别为测得的入射、反射及透射应变，$\dot{\varepsilon}_s$为加载应变率。

1.3　系数修正和恒应变率

试验中所选设备超动态应变仪 LK2109A 的应变片灵敏度系数为 2.0，为保证数据准确可行，要对灵敏度系数进行修正[12]。试验使用的电阻应变的灵敏度系数 K_p 值为 2.11，可由下式得出此时实际的应变值 ε_p：

$$\varepsilon_p = \frac{2\varepsilon_c}{K_p}, \tag{2}$$

式中 ε_c 为测得的应变值。根据式(2)修正后的实际应变波形图如图 4 所示。

海冰作为脆性材料，纵波波速较高，破坏应变较小，试验过程中，试件常常在达到应力平衡前便产生局部破坏。为防止这一现象发生，在试验前对入射波进行整形处理。本试验中在入射杆的撞击端贴上紫铜片，这样可以保证整形器在使用的同时，试件在破坏前最大程度地得到恒定应变率。图 5 为海冰试件的应力、应变率相对于应变的曲线，可以看出在较低加载速度下可在应力峰值后达到应变率的平台期。

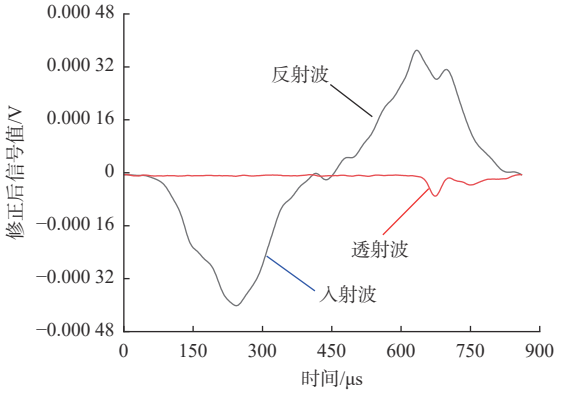


图 4 修正后的原始波形

Fig. 4 Revised original waveform

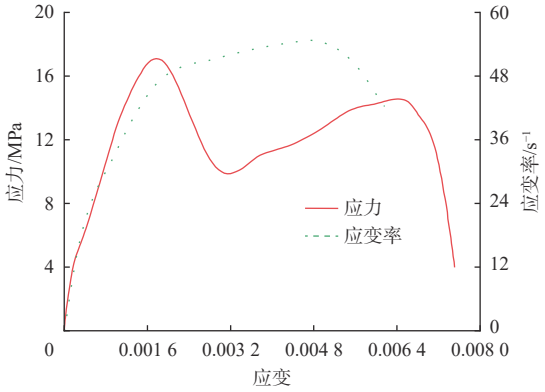


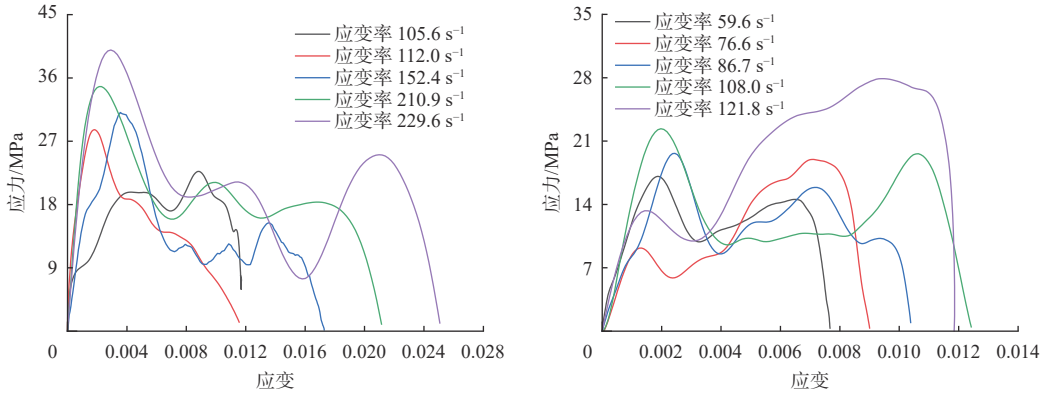
图 5 海冰试件应力、应变率相对应变的曲线

Fig. 5 Curves of the stress and strain rate relative to the strain of the sea ice specimens

2 海冰材料的动态压缩特性分析

2.1 应力-应变曲线分析

图 6 为长径比不同的 2 种试件在不同应变率条件下的应力应变曲线。从图 6 可以看出，同种长径比海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。



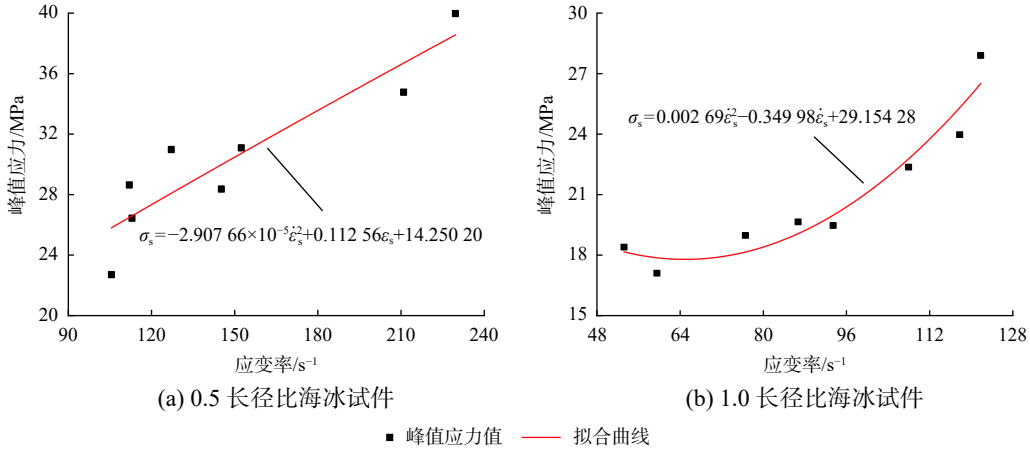
(a) 0.5 长径比海冰试件 (b) 1.0 长径比海冰试件

图 6 不同应变率下海冰试件的应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of the sea ice specimens under different strain rates

峰值应变指应力-应变曲线中达到峰值强度的应变。图 7、图 8 为根据试验数据绘制长径比为 0.5 和 1.0 的海冰试件峰值应力和峰值应变随应变率的变化曲线，从图 7 中可以清晰地看出不同应变率对海冰试件压缩强度的影响，在温度相同的条件下，应变率对海冰的强度有明显的影响。随着应变率增加，海冰试件的应变率峰值随之增大，海冰试件的弹性变形也随之更为明显，从而产生大量裂纹，试件出现断裂或者劈裂，从而形成破坏。随加载强度增加，应力应变曲线出现峰值，并出现急剧下降，其后曲线仍有上升趋势。对 0.5 长径比的试件来说，应变在 0～0.024，应力在 0～45 MPa，其图像峰值在应变值为 0～0.004 区间出现，在峰值过后出现下降趋势；对 1.0 长径比试件，应变在 0～0.012，应力在 0～28 MPa，其图像峰值出现在应变值为 0～0.003 区间。长径比不同，

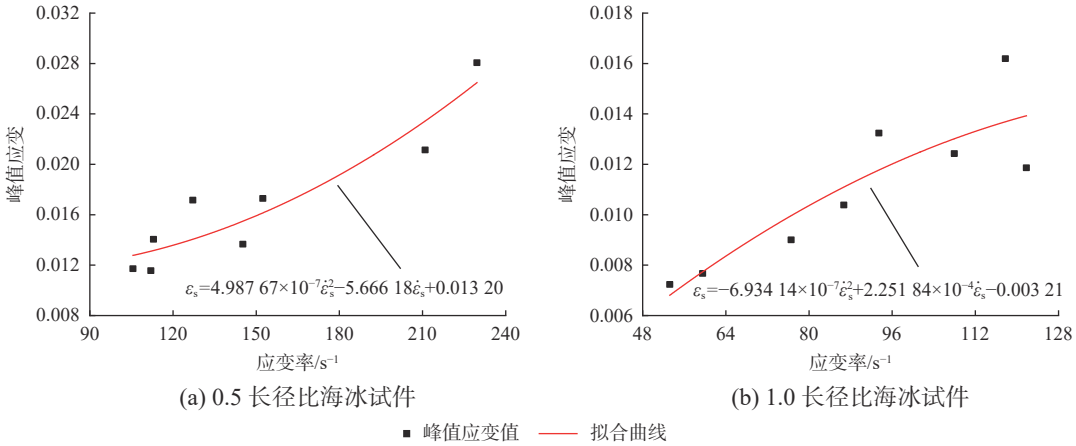
所呈现的应变率的峰值也不同，应变率相近时，在峰值点后，海冰试件承载能力急剧下降，变形增大，海冰试件的动态弹性模量和应变率峰值均随应变率的提高而增大。



(a) 0.5 长径比海冰试件　　(b) 1.0 长径比海冰试件

图 7　峰值应力随应变率的变化

Fig. 7　Changes of peak stress with strain rate



(a) 0.5 长径比海冰试件　　(b) 1.0 长径比海冰试件

图 8　峰值应变随应变率的变化

Fig. 8　Changes of peak strain with strain rate

2.2　峰值强度的变化特征

表 1 为峰值强度随应变率的变化，表中描述了海冰试件在不同加载气压下，峰值应力、峰值应变及应变率变化情况。在试验过程中，对海冰进行动态加载试验，试验过程时间较短，所以需要较大应力来提供试件破碎所需要的能量。在试件制备过程中，由于不可控因素，试件会出现瑕疵，瑕疵对试件外形、体积及空间分布等方面都会产生影响，会给海冰试验结果带来微小误差，峰值应力得出的数据也具有一定的分散性。

在冲击荷载作用下，海冰试件的峰值应力会随应变率的变化而变化，此过程可以分成 2 个阶段，在 0.5 长径比的一组中，应变率从 105.6 s^{-1} 增加到 229.6 s^{-1}，海冰试件峰值应力也呈现上升趋势；在 1.0 长径比的一组中，应变率从 53.2 s^{-1} 增加到 121.8 s^{-1}，海冰试件峰值应力也呈现上升趋势，但上升趋势较为平缓。

表 1 峰值强度随应变率的变化

Table 1 Changes of peak strength with strain rate

试件编号	应变率/s^{-1}	加载气压/MPa	峰值应力/MPa	峰值应变/%	试件编号	应变率/s^{-1}	加载气压/MPa	峰值应力/MPa	峰值应变/%
0.5-7	105.6	0.13	22.7	1.17	1.0-3	53.2	0.11	18.4	0.72
0.5-1	112.0	0.10	28.6	1.16	1.0-2	59.6	0.11	17.1	0.77
0.5-6	113.0	0.12	26.4	1.40	1.0-8	76.6	0.17	19.0	0.90
0.5-4	127.2	0.11	31.0	1.72	1.0-10	86.7	0.18	19.6	1.04
0.5-5	145.2	0.11	28.4	1.37	1.0-13	93.5	0.22	19.5	1.32
0.5-8	152.4	0.14	31.1	1.73	1.0-14	108.0	0.23	22.4	1.24
0.5-13	210.9	0.22	34.8	2.11	1.0-15	117.8	0.26	24.0	1.62
0.5-14	229.6	0.27	40.0	2.81	1.0-16	121.8	0.27	27.9	1.19

注：试件编号中 0.5 和 1.0 分别对应 0.5 和 1.0 长径比海冰试件。

如图 7 和图 8 所示，应变率与峰值应力和应变率与峰值应变均呈正相关，随着应变率增加，峰值应力和峰值应变也随之增大，所以利用曲线拟合的方法得出长径比为 0.5 的试件峰值应力随应变率变化关系式如下：

$$\sigma_s = -2.907\,66\times10^{-5}\dot{\varepsilon}_s^2 + 0.112\,56\dot{\varepsilon}_s + 14.250\,20; \tag{3}$$

1.0 长径比试件峰值应力随应变率变化关系式如下：

$$\sigma_s = 0.002\,69\dot{\varepsilon}_s^2 - 0.349\,98\dot{\varepsilon}_s + 29.154\,28; \tag{4}$$

长径比为 0.5 峰值应变随应变率变化关系式如下：

$$\varepsilon_s = 4.987\,67\times10^{-7}\dot{\varepsilon}_s^2 - 5.666\,18\dot{\varepsilon}_s + 0.013\,20; \tag{5}$$

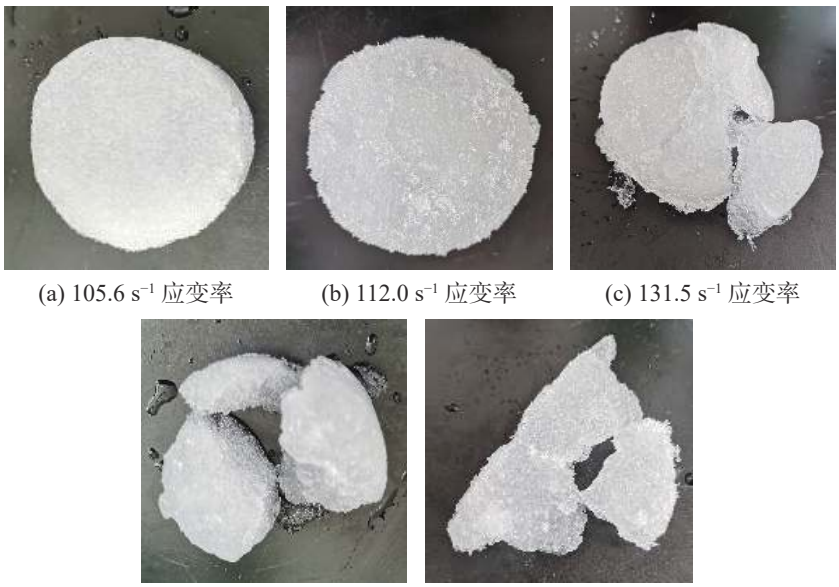
1.0 长径比试件峰值应力随应变率变化关系式如下：

$$\varepsilon_s = -6.934\,14\times10^{-7}\dot{\varepsilon}_s^2 + 2.251\,84\times10^{-4}\dot{\varepsilon}_s - 0.003\,21。 \tag{6}$$

3 海冰能量耗散规律及冲击破碎形态分析

3.1 海冰试件动态断裂破坏形态特征

图 9、图 10 为不同强度的冲击荷载作用下的 2 种长径比海冰试件破坏形态图。从图 9 可以看出，0.5 长径比试件在 105.6 s^{-1} 应变率作用下受到单向压缩，但表面未产生明显的裂纹；在 112.0 s^{-1} 应变率作用下，海冰试件表面产生径向裂纹。在 131.5 s^{-1}、145.2 s^{-1}、152.4 s^{-1} 应变率作用下，海冰试件断裂成较大的三部分，裂纹沿径向的方向拓展贯通。从图 10 可以看出，1.0 长径比海冰试件受压应力作用，最终表现出塑性压剪破坏特征。在 76.6 s^{-1} 的应变率作用下，岩样破坏碎裂更加严重，但在冰的黏性作用下仍保持为一个整体。随着应变率的增高，在 87.3 s^{-1} 应变率作用下，试件断裂，破碎为不同大小的碎块体，其中一部分为锥形体。在 93.5 s^{-1} 应变率作用下，碎块明显更为破碎，较小的碎块数量骤增，其破碎程度更大，部分试件破碎成粉。



(a) 105.6 s^{-1} 应变率　(b) 112.0 s^{-1} 应变率　(c) 131.5 s^{-1} 应变率

(d) 145.2 s^{-1} 应变率　(e) 152.4 s^{-1} 应变率

图 9　0.5 长径比海冰在不同应变率用下的破坏形态

Fig. 9　Destruction patterns of the sea ice with an aspect ratio of 0.5 under the action of different strain rates

(a) 53.2 s^{-1} 应变率　(b) 63.5 s^{-1} 应变率　(c) 76.6 s^{-1} 应变率

(d) 87.3 s^{-1} 应变率　(e) 93.5 s^{-1} 应变率

图 10　1.0 长径比海冰在不同应变率用下的破坏形态

Fig. 10　Destruction patterns of the sea ice with an aspect ratio of 1.0 under the action of different strain rates

3.2　海冰破碎能耗特性

分离式霍普金森压杆装置通过冲击弹头撞击实现能量的输入，根据一维应力假设，忽略应力波在杆中传播所造成的能量衰减，则可将入射波能量 E_I、反射波能量 E_R 和透射波能量 E_T 表示为：

$$E_I = A_0 C_0 E_0 \int_0^t \varepsilon_I^2(t)\,\mathrm{d}t, \tag{7}$$

$$E_R = A_0 C_0 E_0 \int_0^t \varepsilon_R{}^2(t)\,\mathrm{d}t, \tag{8}$$

$$E_T = A_0 C_0 E_0 \int_0^t \varepsilon_T{}^2(t)\,\mathrm{d}t。 \tag{9}$$

在冲击试验过程中，一般将压杆与试件接触界面损失的能量忽略不计，认为入射波能量 E_I 全部转化为反射波能量 E_R、透射波能量 E_T 和试件耗散能量 E_D：

$$E_I = E_R + E_T + E_D。 \tag{10}$$

根据式(7)～式(10)计算得到不同应变率下人工海冰 SHPB 动态冲击试验的入射能、反射能、透射能和耗散能，对相应数据进行整理，从而完成海冰试件断裂破坏的能量分析。将不同应变率作用下各能量值进行统计，结果如表 2 所示。为减小入射能对试验分析造成的影响，采用比值法对 0.5 和 1.0 长径比试件的能量结构进行分析，其中试件能量吸收率 ω 为试件耗散能与入射能的比值，它代表了动态破坏过程中能量的利用效率，ω 计算式如下：

$$\omega = \frac{E_D}{E_I}。 \tag{11}$$

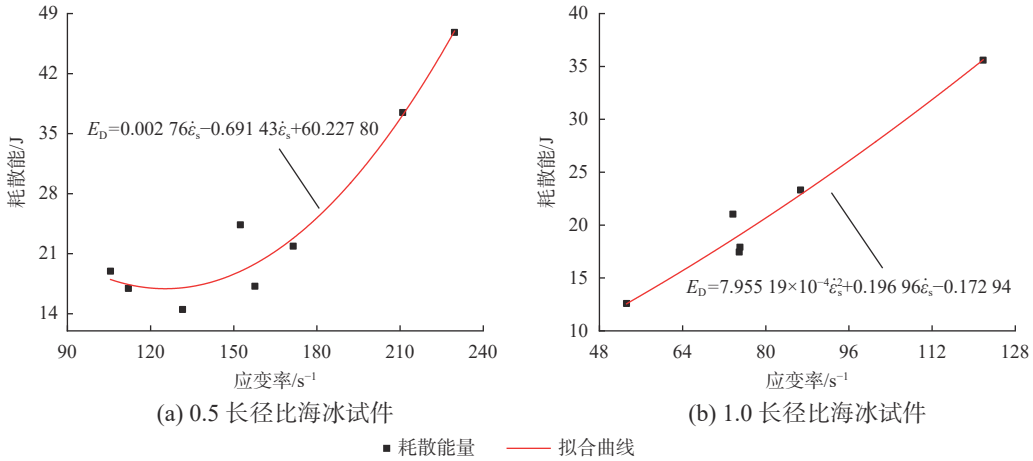
由表 2 可知，在 SHPB 系统中，0.5 长径比和 1.0 长径比海冰试件的入射能和反射能均随应变率的增大呈递增趋势。海冰试件的耗散能与应变率的关系曲线如图 11 所示，由图 11a 可以看出，0.5 长径比试件的透射能随应变率增加呈现先减小、后增大的趋势，由 105.6 s^{-1} 时的 19.0 J 减小到 131.5 s^{-1} 时的 14.5 J，随后逐渐增大，最终在 229.6 s^{-1} 时达到 46.8 J，较 105.6 s^{-1} 时提高了 55%。由图 11b 可以看出，1.0 长径比海冰试件的耗散能随应变率的增加不断增大，由 53.2 s^{-1} 的 12.6 J 增大到 121.8 s^{-1} 时的 35.6 J，提高了 222.7%。

表 2 系统中各能量值随应变率变化统计

Table 2 Statistics of the change of energy values with strain rate in the system

试件编号	应变率/s^{-1}	入射能/J	反射能/J	透射能/J	耗散能/J	能量吸收率
0.5-7	105.6	24.3	5.3	0.012 3	19.0	0.782
0.5-1	112.0	24.5	7.6	0.004 5	16.9	0.691
0.5-3	131.5	26.9	12.4	0.009 0	14.5	0.538
0.5-8	152.4	42.7	18.3	0.001 6	24.4	0.571
0.5-9	157.6	39.4	22.2	0.029 2	17.2	0.437
0.5-11	171.5	45.6	23.7	0.002 3	21.9	0.479
0.5-13	210.9	81.3	43.8	0.001 3	37.5	0.461
0.5-14	229.6	98.7	51.9	0.001 9	46.8	0.474
1.0-3	53.2	23.2	10.7	0.000 6	12.6	0.541
1.0-9	73.7	42.3	21.2	0.001 8	21.0	0.497
1.0-4	74.9	36.4	19.0	0.000 6	17.4	0.479
1.0-7	75.0	39.3	21.4	0.000 7	17.9	0.456
1.0-10	86.7	51.1	27.7	0.001 2	23.3	0.457
1.0-16	121.8	99.9	64.3	0.006 7	35.6	0.356

注：试件编号中 0.5 和 1.0 分别对应 0.5 和 1.0 长径比海冰试件。



(a) 0.5 长径比海冰试件　　(b) 1.0 长径比海冰试件

图 11　耗散能随应变率的变化

Fig. 11　Changes of dissipation energy with strain rate

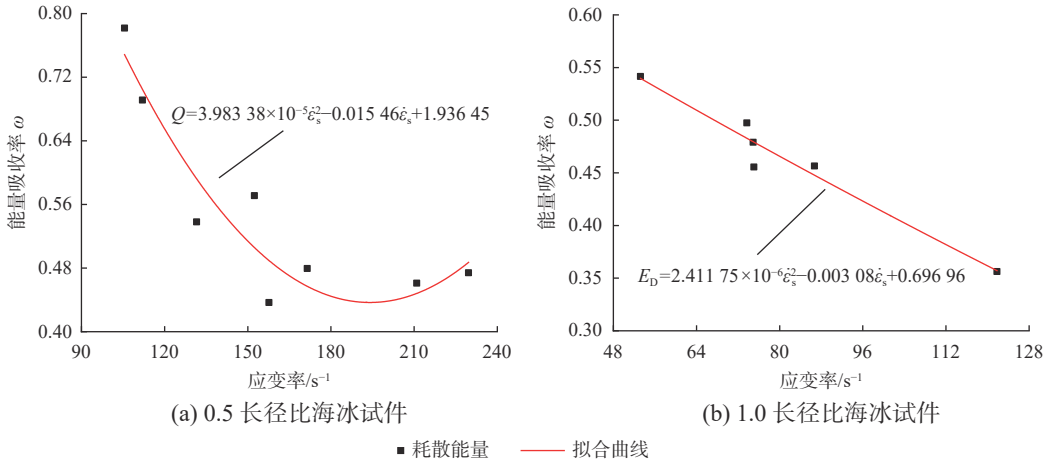
对 0.5 长径比海冰试件在 105.6～229.6 s^{-1} 应变率范围内耗散能与应变率的相关数据进行拟合，得到：

$$E_{D(0.5)} = 0.002\,76\dot{\varepsilon}_s^2 - 0.691\,43\dot{\varepsilon}_s + 60.227\,8 \qquad R^2 = 0.951\,09; \tag{12}$$

对 1.0 长径比海冰试件在 53.2～121.8 s^{-1} 应变率范围内耗散能与应变率的相关数据进行拟合，得到：

$$E_{D(1.0)} = 7.955\,19\times10^{-4}\dot{\varepsilon}_s^2 + 0.196\,96\dot{\varepsilon}_s - 0.172\,94 \qquad R^2 = 0.968\,71。 \tag{13}$$

图 12 为海冰试件能量吸收率 ω 与应变率的关系。如图 12a 所示，海冰试件长径比为 0.5 时，ω 随着应变率的增大呈现先减小后增大的趋势，在应变率为 195 s^{-1} 左右时达到较高的能量吸收率。如图 12b 所示，海冰试件长径比为 1.0 时，ω 随着应变率的增大呈现线性增大趋势。2 种长径比试件应变率对海冰的动态破坏的能量吸收率 ω 均具有较大的影响，但能量吸收率 ω 与应变率的关系曲线表现出不同的趋势。说明不同长径比对海冰破碎过程的能量吸收具有重要影响。



(a) 0.5 长径比海冰试件　　(b) 1.0 长径比海冰试件

图 12　能量吸收率 ω 随应变率的变化

Fig. 12　Changes of energy absorption rate ω with strain rate

对 0.5 长径比海冰试件在 105.6～229.6 s^{-1} 应变率范围内能量吸收率 ω 与应变率的相关数据进行拟合得到：

$$E_{D(0.5)} = 3.983\,38\times10^{-5}\dot{\varepsilon}_s^2 - 0.015\,46\dot{\varepsilon}_s + 1.936\,45 \qquad R^2 = 0.885\,25; \tag{14}$$

对 1.0 海冰试件在 53.2～121.8 s^{-1} 应变率范围内能量吸收率 ω 与应变率的相关数据进行拟合得：

$$E_{D(1.0)} = 2.411\,75\times10^{-6}\dot{\varepsilon}_s^2 - 0.003\,08\dot{\varepsilon}_s + 0.696\,96 \qquad R^2 = 0.955\,40。 \tag{15}$$

4 结 论

本文设计开展了 2 种长径比海冰试件在不同应变率下的冲击动力学试验，对不同应变率下海冰试件的动态力学特性和能量规律进行分析，主要结论如下。

1)在冲击荷载作用下，海冰试件的峰值应力会随应变率的变化而变化。长径比为 0.5 时，应变率从 105.6 s^{-1} 增加到 229.6 s^{-1}，海冰试件峰值应力也呈现上升趋势；长径比为 1.0 时，应变率从 53.2 s^{-1} 增加到 121.8 s^{-1}，海冰试件峰值应力也呈现上升趋势，但上升趋势较为平缓。

2)海冰试件长径比为 0.5 时，ω 随着应变率的增大呈现先减小后增大的趋势，在应变率为 195 s^{-1} 左右时达到较高的能量吸收率；海冰试件长径比为 1.0 时，ω 随着应变率的增大呈现线性增大趋势。

3)2 种长径比试件应变率均对海冰动态破坏的能量吸收率 ω 具有较大的影响，但能量吸收率 ω 与应变率的关系曲线表现出不同的趋势。说明不同长径比对海冰破碎过程的能量吸收具有重要影响。

参考文献 (References)：

隋俊鹏, 李宝辉, 赵倩, 等, 2021. 卤水体积和应变率影响下的渤海海冰单轴压缩强度分布[J]. 海洋预报, 38(4): 38-44. SUI J P, LI B H, ZHAO Q, et al, 2021. Uniaxial compressive strength distribution of Bohai sea ice under the influence of brine volume and strain rate[J]. Ocean Forecast, 38(4): 38-44.

汪洋, 李玉龙, 刘传雄, 2011. 利用SHPB测定高应变率下冰的动态力学行为[J]. 爆炸与冲击, 31(2): 215-219. WANG Y, LI Y Y, LIU C X, 2011. Dynamic mechanical behavior of ice under high strain rate was measured by SHPB[J]. Explosion and Impact, 31(2): 215-219.

于哲敏, 张大勇, 王国军, 等, 2017. 辽河口海冰压缩强度基本特性分析[J]. 应用海洋学学报, 36(1): 119-124. YU Z M, ZHANG D Y, WANG G J, et al, 2017. Analysis of basic characteristics of sea ice compressive strength in Liaohe Estuary[J]. Applications Journal of Oceanography, 36(1): 119-124.

FASANELLA E L, BOITNOTT R L, KELLAS S, 2006. Test and analysis correlation of high speed impacts of ice cylinders[C]. 9th International LS-DYNA Users Conference. Dearborn, Michigan, USA: 14-42.

HYONNY K, JOHN N K, 2007. Compressive strength of ice at impact strain rates[J]. Journal of Materials Science, 42(8): 2802-2806.

JONES S J, CHEW H A M, 1983. Effect of sample and grain size on the compressive strength of ice[J]. Annals of Glaciology, 4: 129-132.

MOSTAFA S, VIKAS P, BRADLEY A L, 2008. High strain-rate behavior of ice under uniaxial compression[J]. International Journal of Solids and Structures, 46(6): 1499-1515.

Research on Dynamic Mechanical Properties of Sea Ice Based on SHPB Test

MENG Qiang[1]，ZHANG Jiuyang[2]

（1. *Chengyuan Mining Development Co*., *Ltd*, Liaoyang 111299, China；
2. *School of Mining Engineering*, *University of Science and Technology Liaoning*, Anshan 114051, China）

Abstract: In order to study the dynamic mechanical properties of sea ice at high strain rate, a device of split Hopkins pressure bar (SHPB) is used to conduct dynamic impact tests on 2 kinds of sea ice specimens and a three-wave method is used to process the test data. Thus, the stress-strain relationship and the energy dissipation law of the sea ice specimens are obtained and the energy consumption characteristics of sea ice breaking are summarized. The results of the test show that the dynamic compressive strength of the sea ice is 17.1−40.0 MPa within a range of strain rate of 53.2−229.6 s^{-1}. Under the same air pressure, the sea ice specimen with an aspect ratio of 1.0 is smaller in both the strain rate and the peak stress than the specimen with an aspect ratio of 0.5. Under the action of the compressive stress the sea ice specimens show finally the characteristics of plastic pressure shear failure. When the strain rate is small, the sea ice remains as a whole after its destruction due to the viscosity of the ice. With the increasing of strain rate, the specimens are fractured and broken into pieces of blocks with different sizes. The strain rates of the specimens with the two aspect ratios influence greatly on the energy absorption rate ω of the sea ice dynamic destruction. However, the relationship curve between the energy absorption rate ω and the strain rate shows a different trend.

Key words: sea ice；SHPB；impact load；strain rate effect；energy dissipation

Received: July 30, 2022