

文章编号:0559-9350(2021)09-1036-10

基于数字图像相关方法的黄河冰断裂性能研究

王娟¹, 黄樾¹, 邓宇², 李志军³, 张邀丹³

(1. 郑州大学 水利科学与工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 黄河水利委员会 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003;
3. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116042)

摘要: 河冰的断裂性能是衡量河冰承载力、模拟和预测开河的重要参数。为明晰黄河冰的断裂性能, 基于数字图像测量技术(Digital Image Correlation, DIC)开展了黄河冰的三点弯曲梁试验, 分析了不同条件下试样的断裂形态, 研究了温度和加载速率对黄河冰断裂韧度的影响。研究表明: DIC方法适用于黄河冰断裂试验的研究; 黄河冰试样的断裂形态主要受到晶体形态的影响, 试样的破坏形式以I型断裂为主; 黄河冰断裂韧度随着加载速率的增加而降低, 随着温度的升高而减小, 但在试验给定温度范围内降幅较小; 提出了黄河冰断裂韧度与温度、加载速率的关系式, 为极限荷载作用下河冰断裂过程的分析及冰荷载断裂参数的选用提供了依据。

关键词: 河冰; 断裂韧度; DIC; 加载速率

中图分类号: TV131

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20201064

1 研究背景

黄河内蒙河段由于其特殊的地理位置、水文气象条件和河道特性, 易于在凌汛期发生凌汛灾害, 从而引发凌洪、破坏水工结构物, 造成巨大的社会经济损失^[1]。目前, 在河冰的冰凌预测^[2-3]、冰-水力学数值模拟^[4-5]、冰与水工结构物相互作用^[6]、冰生消演变规律^[7-9]等方面有了较为丰富的研究成果, 而针对河冰力学性能试验研究有待深入。河冰作为一种天然复合材料, 其力学性能既受到温度、加载速率等外在因素的影响, 也受到冰晶体结构等内在因素的影响。其中, 温度是影响冰力学性能的主要因素, 郜国明等^[14]在-3℃到-15℃的温度范围内进行了黄河冰的劈裂试验, 结果表明, 在该温度范围下, 随着温度的增加, 黄河冰的劈拉强度增加, 断裂韧度先减小后增大。加载速率也是影响冰力学性能的重要因素, Snyder^[15]等通过试验分析了预应变对人工冰脆转变速率的影响, 结果表明, 在施加预应力后, 冰试样的脆转变速率增加了3~10倍。李志军等^[16]进行了乌梁素海冰的单轴压缩试验, 建立了乌梁素海冰压缩强度与温度、速率之间的计算模型。冰的细观晶体结构决定了冰的宏观变形过程, 也影响着冰的力学性能, Schulson^[17]通过试验发现粒状冰的脆性强度与其晶体直径的平方根成反比, 邓宇等^[18]和Gribanov等^[19]对冰的单轴压缩过程进行了数值模拟, 得到了与Schulson^[17]相近的结果。一般来说, 不同区域的天然冰结构具有一定的差别。与其他冰相比较, 黄河冰内含泥量高, 冰体分层结构多变, 不同晶体结构交替出现, 晶体结构形成及其组构有其鲜明的独特性^[10-11]。而冰的细观结构不仅影响冰的热力学和光学性质, 也直接影响冰的力学性质^[12-13]。因此, 有必要对不同条件下黄河冰的断裂性能进行深入研究, 分析黄河冰的断裂过程和破坏机理。

在冰力学试验中, 一般使用位移计、应变仪等设备来获得试样的位移^[20-21], 在试样表面粘结应变

收稿日期: 2020-12-23; 网络首发时间: 2021-05-31

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20210528.1616.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879116, 51979024); 河南省高校科技创新人才支持计划(21HASTIT013)

作者简介: 王娟(1981-), 副教授, 主要从事细观力学及损伤力学研究。E-mail: wangjuan@zzu.edu.cn

通讯作者: 邓宇(1978-), 教授级高级工程师, 主要从事河冰研究。E-mail: lanson0201@aliyun.com

片或安装应变仪具有一定的难度，可能会对试样造成破坏，影响试验的结果。也可通过测量试验机执行器的位移间接获得试样的位移^[22]，该方法测量得到的间接位移受到压头的刚度、压头与试样接触面平整度的影响，并且只能获得试样的整体位移。而DIC作为一种光学测量方法，与传统的电测量方法相比，具有可全场测量、无接触、操作简单的优点，在生物医疗^[23-24]、土木工程^[25-27]等研究领域中获得了较为广泛的应用。目前，已有学者将DIC技术应用于冰力学试验，Lian等^[28]基于DIC方法研究了湖冰单轴抗压试验过程中的应变变化，研究发现，通过执行器推算出的名义应变率与通过DIC方法得到的应变率有着较大的差异。Wang等^[29]利用DIC技术测量了海冰单轴压缩破坏过程中的位移场和应变场，验证了DIC方法的可靠性，为DIC技术应用于其他冰力学试验提供了依据。

为此，本文采用DIC技术结合三点弯曲梁试验方法，开展了不同温度和加载速率下黄河冰的断裂性能试验。利用DIC技术观测了试样在三点弯曲试验过程中的位移场和应变场，通过与位移计的测量结果比较，验证了DIC方法的可靠性，并分析了温度和加载速率对河冰断裂韧度的影响。

2 试验概况

2.1 试样采集 本次试验的试样来源于黄河封冻期内蒙河段河冰，采冰地点位于黄河什四份子弯道(N40°17'39", E111°02'41")。什四份子弯道是黄河内蒙古封冻河段的典型位置，河道由一个120°的弯道连接，每年冰情持续100天左右。采集冰胚时，首先使用冰尺在冰面上划出冰胚的边缘，确定冰胚的方位和大小，随后使用电链锯沿边缘切割，直至冰胚与冰盖分离，最后使用冰锥将冰胚提出水面。最终取出的冰胚如图1(a)所示，冰胚共计6块，尺寸为75 cm×65 cm×30 cm，冰胚分为三层，0~5 cm是冰雪反复融化冻结后形成的表面冰，内部含有泥沙颗粒，5~23 cm冰层呈乳白色，气泡含量较多，分层处较浑浊，为冰花凝结形成的粒状冰层，23~65 cm冰层透明无气泡，为自然生长的柱状冰层。将采集完成的冰胚使用塑料膜密封，并装入泡沫保温箱中运往实验室。

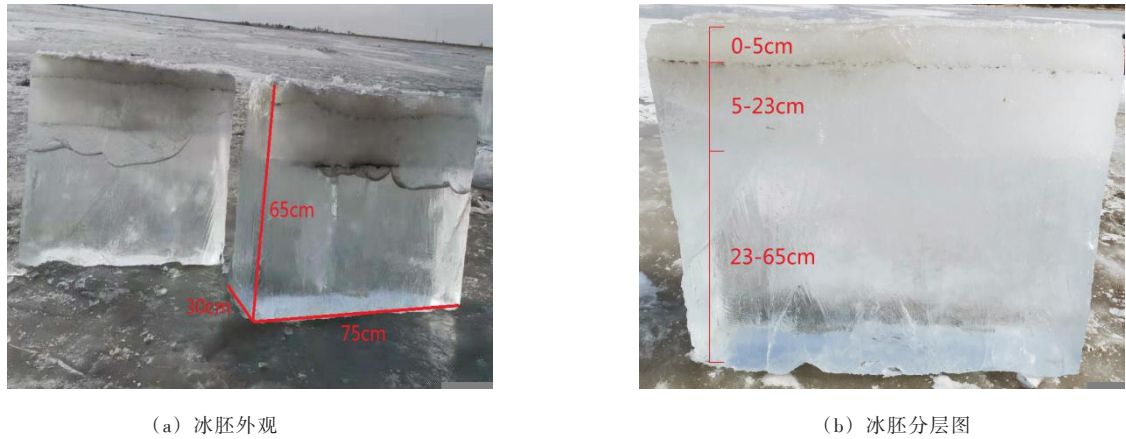


图1 冰胚的采集

2.2 样本的制备 使用锯骨机将冰胚加工成7 cm×7 cm×65 cm的三点弯曲梁试样，并在无缺口试样的中部，用手锯加工长3 cm的预制切口，试样的尺寸如图2所示，S代表有效跨度，W为试样的高度，a为预制裂纹长度，取为3 cm，试样的跨高比(S/W)取4。

DIC是一种基于物体表面散斑图像灰度分析的光测方法，通过比较物体变形前后表面的数字图像，获得物体运动和变形信息。冰是一种透明材料，为了能顺利得采集信息，使用哑光漆在试样DIC观测区制造人工散斑，以便获取冰断裂过程中的变形数据。首先，在试样的表面涂上一层白漆(图3(a))，为了防止透光以及喷涂不平整，白漆一共喷涂三次，每次喷涂后都将试样静置20 min，使喷漆完全冷却，与冰面融为一体。白漆喷涂完30 min后，在距离试样表面30 cm以上的位置喷涂黑漆，使黑漆均匀地落在试样表面，形成随机灰度散斑。喷涂完成后静置2 h以上，待喷漆完全凝结后再进行试验。

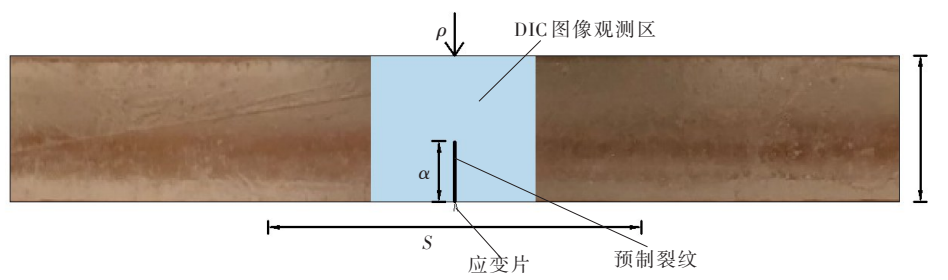
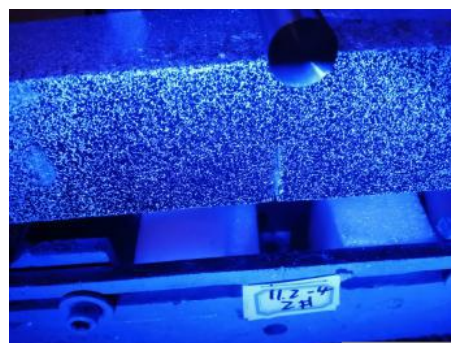


图2 三点弯曲梁示意图



(a) 喷涂白漆



(b) 散斑效果图

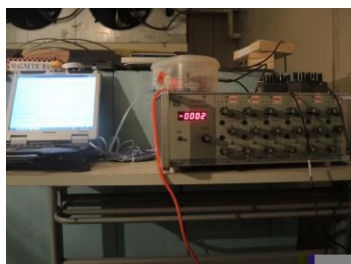
图3 试样人工散斑制作

制作完成的散斑试样如图3(b)所示。

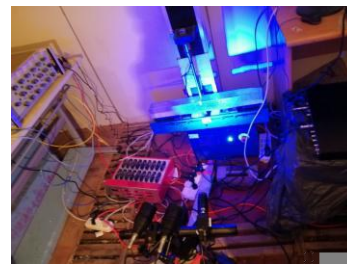
2.3 试验设备 试验装置由加载设备、力学采集设备和光学图像采集设备组成，如图4所示。试验所用的加载设备为byes-3005型电子万能试验机，最大加载力5 kN，加载速率控制范围为0.05 mm/min ~ 100 mm/min。力学采集设备由传感器及YD-28A型动态电阻应变仪组成，可以采集试验过程中的压力、位移过程曲线。光学图像采集装置主要包括两个Grasshopper3系列相机和两个高强度光源，根据加载速率的不同，相机采集速率设置在0.1 Hz ~ 8 Hz之间，为了减小平面外变形的影响，采集时相机平行试样放置，并与试样保持1 m以上的距离。



(a) 加载设备



(b) 力学采集设备



(c) 光学图像采集设备

图4 试验设备

2.4 试验方案 温度和加载速率是影响冰力学性能的主要因素，根据该河段气象数据统计资料^[30]，本次试验温度选定-2 ℃、-4 ℃、-8 ℃、-10 ℃四种工况，加载速率为 $10^{-6} \text{ s}^{-1} \sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ，在每种加载速率下进行了4到6根试样的加载，试验试样包含柱状冰和粒状冰，由于柱状冰具有各向异性，加载全部采用垂直冰面方向。加载前先将试样在低温恒温箱中恒温24 h以上，以确保试样达到热平衡。

试验中一共对6根粒状冰试样进行了DIC图像采集，试样的参数如表1所示。

表1 DIC图像采集方案

试样编号	晶体结构	温度/℃	加载速率/s ⁻¹	采集频率/Hz
A1	粒状	-8	4.46×10^{-6}	0.4
A2	粒状	-8	4.46×10^{-5}	4
A3	粒状	-8	8.93×10^{-4}	8
B1	粒状	-4	4.46×10^{-6}	0.4
B2	粒状	-4	4.46×10^{-5}	4
B3	粒状	-4	8.93×10^{-4}	8

3 试验结果分析

3.1 DIC方法测位移与传统方法的比较 以A1试样试验结果为例进行了分析,将使用DIC与使用应变片两种方法测量得到的荷载与裂纹开口位移(P-CMOD)曲线进行了对比,以评估DIC方法的准确性。在DIC分析时,将试样预制裂纹口两端的位移差作为CMOD,结合应变片测量得到的CMOD,绘制出如图5所示的P-CMOD曲线。分析可知,在整个加载过程中,采用DIC方法与应变片方法得到的P-CMOD曲线基本吻合,因此,DIC方法可以用于河冰三点弯曲试验的研究。

在冰力学试验中,一般将压头的位移作为试样的位移,进而计算试样的应变,通过这种方法得到试样的名义位移和名义应变。本次试验中,将DIC测量得到的位移与压头的位移进行了对比,如图6(a)所示,在计算区域的上表面选取阶段线MN,计算MN线上各点在加载过程中的竖向位移,将MN线上的最大位移值作为该时期试样的实际位移。图6(b)展示了A1试样在两种测量方法下的位移-时间图像,名义位移和实际位移都随着时间的增加呈线性增长,但在相同的时刻,名义位移约为实际位移的3.28倍。

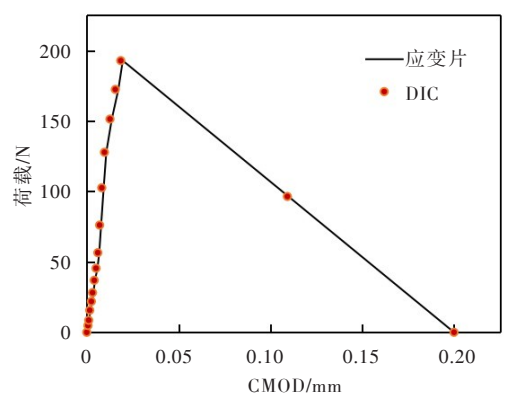
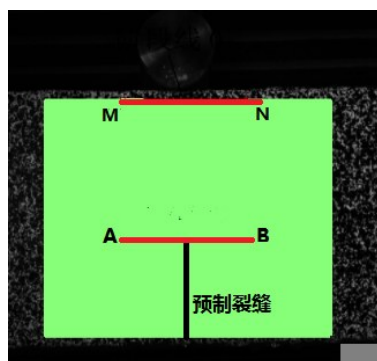
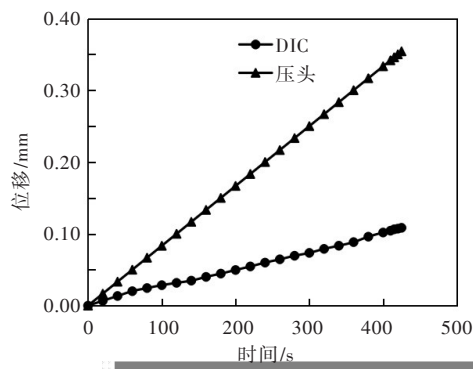


图5 DIC与应变片两种试验方法的P-CMOD曲线对比



(a) DIC方法测量位移



(b) 压头与DIC两种方法测量位移比较

图6 A1试样压头位移与DIC位移比较

基于上述方法,对所有DIC测量试样的名义位移和实际位移进行了计算分析,结果如表2所示,所有试样的压头位移均大于实际位移,前者为后者的2.8~3.3倍。分析可知,产生这种误差的主要原因是试验机执行器的刚度不足,执行器产生变形,使压头测量出的位移值包含了机器自身变形,

表2 采用压头和DIC两种方法得到的位移结果

试样编号	A1	A2	A3	B1	B2	B3
压头位移/mm	0.354	0.186	0.375	0.198	0.204	0.284
实际位移/mm	0.108	0.062	0.129	0.067	0.065	0.100
比值	3.28	3.00	2.91	2.96	3.13	2.84

从而高于试样实际变形。

3.2 试样的断裂破坏模式 试样破坏为脆性断裂，在试验过程中，从裂纹出现到试样断裂的整个过程在1秒内完成。但粒状冰试样和柱状冰试样在断裂时仍具有明显的差别：大部分粒状冰试样在破坏时没有明显的外观变化，试样在断裂之后保持一个整体，裂纹痕迹不明显，而柱状冰试样在破坏时会发出短促而轻微声响，试样直接断成两半。基于以上的现象，对不同试验条件下的试样断裂形态进行了记录，如图7所示，共记录了 $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 两种温度， $4.46\times 10^{-6}\text{ s}^{-1}\sim 8.93\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$ 共四种加载速率下柱状冰试样和粒状冰试样的破坏形态。可以看出，温度和速率对试样破坏形态的影响不大，但粒状冰试样和柱状冰试样的破坏形态具有一定的差异：粒状冰试样的裂纹清晰，断面平滑，断裂时没有碎屑的掉落；柱状冰试样的裂纹走向曲折，在断裂时裂纹附近会有冰碎屑掉落，导致裂纹变宽，试样断面契合效果较差。

粒状冰主要由细密的小晶粒组成，气泡含量普遍较柱状冰高，在断裂破坏时，裂纹大多沿着薄弱的晶界和气泡之间发展^[31]，穿晶破坏少，总体应力相对较小。因此，在破坏时很少出现碎屑的掉

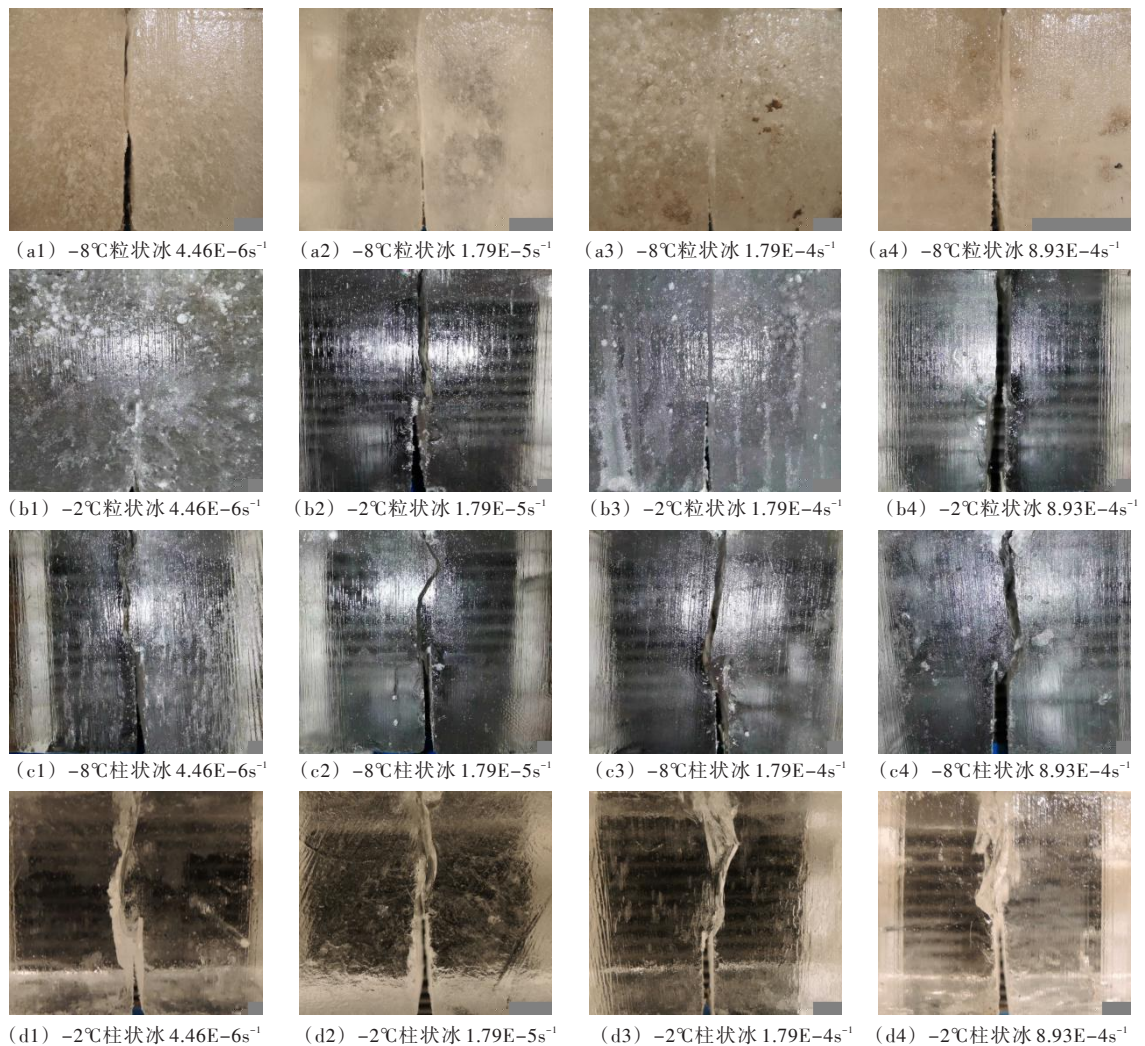


图7 黄河冰的破坏模式

落，破坏后试样仍为一个整体。柱状冰晶粒尺寸大，且在垂直方向为柱状晶粒，裂纹扩展时以穿晶破坏为主^[32]，破坏应力较大，在破坏时会发生试样断面冰碎屑掉落的现象。柱状冰试样的裂纹在遇见强度较高的大晶粒时，会转向薄弱的晶界扩展，形成弯曲的裂纹，这与图7显示的破坏形态一致。

3.3 裂纹张开位移及滑开位移 采用DIC方法对预制裂纹尖端的切线AB(图6(a))进行了位移观测，分析了试样断裂过程中的横向和竖向位移。在荷载上升段选取A、B、C、D四个时间节点进行位移分析，四个节点对应荷载分别为 $0.3P_{\max}$ 、 $0.6P_{\max}$ 、 $0.8P_{\max}$ 、 $P_{\max}$ 。

统计分析了A1试样在不同节点裂纹尖端切线的横向位移和竖向位移，如图8所示。可以看出，在预制裂纹尖端两侧产生了较大的横向位移，随着荷载的增大，横向位移的差值即裂纹尖端张开位移也逐渐增大。竖向位移呈现左边高右边低的趋势，并在预制裂纹尖端出现最大值，同时，随着荷载的增大，竖向位移整体增加。

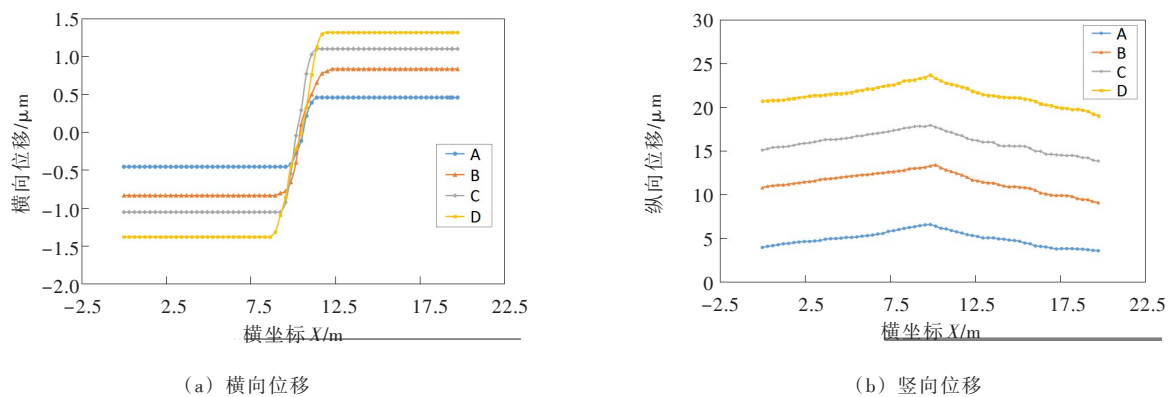


图8 不同节点处预制裂纹尖端切线位移分布

计算A—D四个节点预制裂纹尖端两侧位移的差值，得到试样断裂过程的裂纹张开位移值和裂纹滑开位移值，如表3所示。在不同时间节点，试样的滑开位移约为张开位移的13%~16%，因此，可将I型断裂作为研究黄河冰断裂性能的重点。

表3 不同节点处裂纹的张开位移和滑开位移

节点	A	B	C	D
张开位移 $u/\mu\text{m}$	0.915	1.412	2.157	2.742
滑开位移 $v/\mu\text{m}$	0.119	0.205	0.303	0.450
比值 v/u	13%	15%	14%	16%

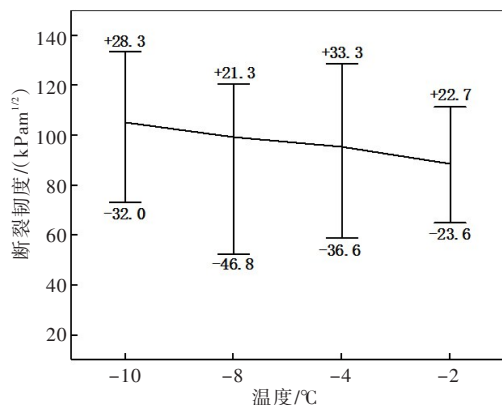
3.4 断裂韧度的影响因素 断裂韧度是冰力学性能的重要参数，本次试验采用三点弯曲试验，利用式(1)和式(2)^[33]计算河冰的断裂韧度。

$$K_{IC} = \frac{PS}{BW^{3/2}} f\left(\frac{\alpha}{W}\right) \quad (1)$$

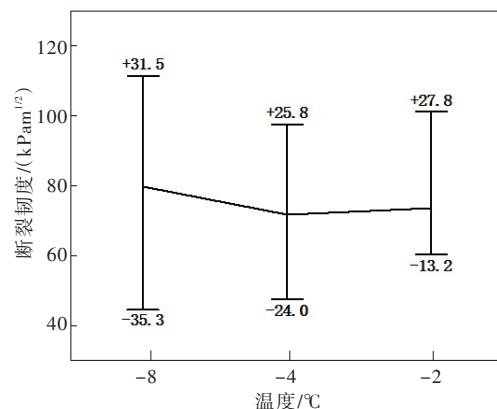
$$f\left(\frac{\alpha}{W}\right) = 3\left(\frac{\alpha}{W}\right)^{1/2} \times \frac{1.99 - (a/W) \left[2.15 - 3.93(a/W) + 2.70(a/W)^2 \right]}{2(1 + 2a/W)^{3/2}} \quad (2)$$

式中： P 为断裂时的荷载； S 为有效跨度； a 、 B 、 W 分别为预制裂纹长度、试样宽度、试样高度。

采用式(1)和式(2)对试样的断裂韧度进行计算，得到了柱状冰和粒状冰在不同温度和加载速率下断裂韧度的平均值，并统计了同一试验条件下不同试样断裂韧度的取值范围，将结果绘制为带误差棒的折线图，如图9和图11所示。图9(a)展示了柱状冰断裂韧度和温度的变化规律，在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下，断裂韧度的平均值分别为105、99、95和89 $\text{kPam}^{1/2}$ ，随着温度的增加，断裂韧度有小幅的减小。图9(b)展示了粒状冰断裂韧度和温度的关系图，温度从低到高，断裂韧度平均值分别为80、72和74 $\text{kPam}^{1/2}$ ，其中， $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下试样的断裂韧度略大于 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件



(a) 温度对柱状冰断裂韧度的影响



(b) 温度对粒状冰断裂韧度的影响

图9 温度对黄河冰断裂韧度的影响

下的结果，这是由于两者的温差较小，以及试样本身的差异，例如气泡含量、初始裂纹等因素所导致。

将本文试验测得的不同温度下黄河冰的断裂韧度与 Deng 等^[34]、Liu 等^[35]的试验结果进行比较，如图 10 所示。Liu 等^[35]的试验采用了蒸馏水制造而成的柱状冰，加载速率为 $1.6 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。可以看出，在 $-30^\circ\text{C} \sim -1^\circ\text{C}$ 范围内，断裂韧度随着温度的升高呈降低趋势。表 4 展示了三次试验在不同温度区间的断裂韧度平均值，在 $-12^\circ\text{C} \sim 0^\circ\text{C}$ 时，Liu 等^[35]试验得到的断裂韧度略高于本文试验的结果，这是由于 Liu 等^[35]试验使用的人工柱状冰，而本文试验采用了两种晶体结构的冰试样。相比黄河冰，人工柱状冰不含泥沙颗粒，气泡含量也较低，这导致其断裂韧度偏大。Deng 等^[34]采用黄河冰进行了巴西圆盘试验，得到的黄河冰断裂韧度略低于本文试验的结果，这是由于两种试验的具体试验方法有差异，且 Deng 等^[34]试验采用的加载速率 ($10^{-5} \text{ s}^{-1} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$) 略高于本文试验的速率。虽然试验条件的不同导致了断裂韧度值的不同，但断裂韧度随温度的变化而变化的趋势基本一致，冰断裂韧度和温度的关系可拟合为如下的线性函数：

$$K_{IC} = -2.14T + 77 \quad (3)$$

式中 T 为温度， $^\circ\text{C}$ 。

表4 不同温度区间的断裂韧度平均值

试验结果	Deng 断裂韧度/($\text{kPam}^{1/2}$)	Liu 断裂韧度/($\text{kPam}^{1/2}$)	本文试验断裂韧度/($\text{kPam}^{1/2}$)
$-12^\circ\text{C} \sim -9^\circ\text{C}$	74.7	116.3	105.1
$-9^\circ\text{C} \sim -6^\circ\text{C}$	65.1	—	99.3
$-6^\circ\text{C} \sim -3^\circ\text{C}$	61.7	110.5	90.0
$-3^\circ\text{C} \sim 0^\circ\text{C}$	76.9	92.0	88.6

图 11(a) 和图 11(b) 展示了柱状冰和粒状冰断裂韧度随加载速率的变化，柱状冰试样随着加载速率的增加，断裂韧度平均值分别为 $114 \text{ kPam}^{1/2}$ 、 $112 \text{ kPam}^{1/2}$ 、 $106 \text{ kPam}^{1/2}$ 、 $93 \text{ kPam}^{1/2}$ 、 $89 \text{ kPam}^{1/2}$ 、 $62 \text{ kPam}^{1/2}$ ，加载速率在 $10^{-5} \text{ s}^{-1} \sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 时，断裂韧度随着加载速率的增高呈降低趋势，加载速率小于 10^{-5} s^{-1} 时，断裂韧度的下降趋势较缓。粒状冰试样断裂韧度的变化规律与柱状冰试样相似，即在加载速率较高时随着加载速率的升高而降低，在低加载速率时下降趋势减缓。在相同加载速率下，粒状

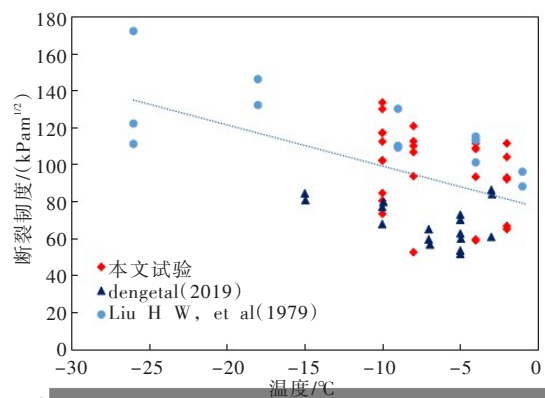


图10 断裂韧度温度效应试验结果比较

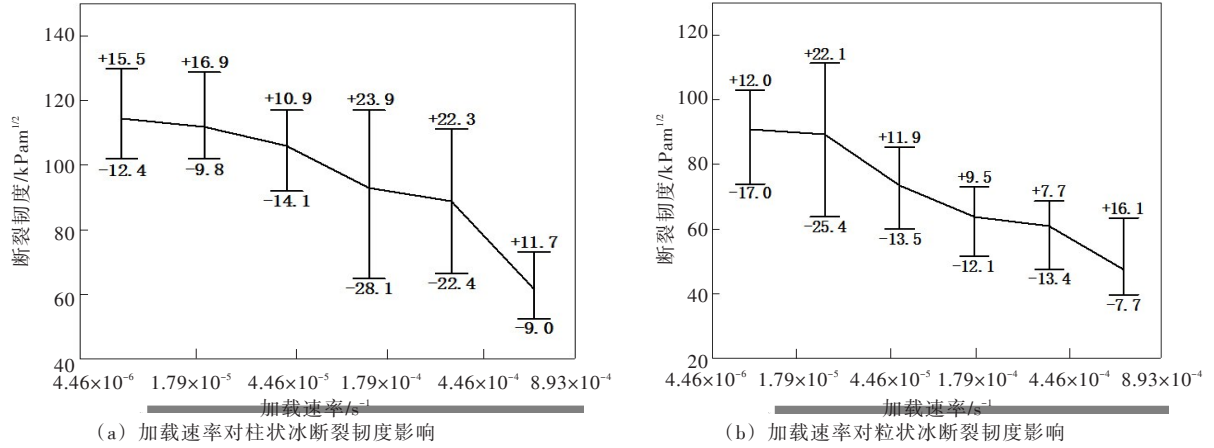


图 11 加载速率对黄河冰断裂韧度的影响

冰的断裂韧度低于柱状冰，在加载速率低于 $4.46 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 时，粒状冰断裂韧度比柱状冰低 20% ~ 21%，加载速率在大于 $4.46 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 时，粒状冰断裂韧度比柱状冰低 25% ~ 30%。

将黄河冰断裂韧度的试验结果与 Xu 等^[15]、张小鹏等^[17]的试验结果进行了分析比较(图 12)。两位学者都对人工淡水冰进行了三点弯曲试验，Xu 等^[15]的试验温度在 $-40^\circ\text{C} \sim -20^\circ\text{C}$ 之间，张小鹏等^[17]使用的试验温度为 $-10^\circ\text{C} \sim -2^\circ\text{C}$ 。可以看出，相比人工淡水冰，黄河冰断裂韧度的分布更加离散，这是由于人工淡水冰的晶体结构均匀，一般不含气泡等杂质，而黄河冰不同晶体类型交替出现，气泡、泥沙含量较高，在细观尺度上更加不均匀，从而导致宏观强度上的离散。在 $10^{-6} \text{ s}^{-1} \sim 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 加载速率范围内，人工淡水冰的断裂韧度在 $116 \sim 137 \text{ kPam}^{1/2}$ 之间，黄河冰的断裂韧度在 $93 \sim 130 \text{ kPam}^{1/2}$ 之间。加载速率为 $10^{-3} \text{ s}^{-1} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 时，人工淡水冰的断裂韧度在 $61 \sim 101 \text{ kPam}^{1/2}$ 之间，黄河冰的断裂韧度在 $36 \sim 73 \text{ kPam}^{1/2}$ 之间。可以看出，在加载速率一致时，人工淡水冰的断裂韧度要高于黄河冰，这主要源于两者细观结构上的差异。虽然三种冰的细观结构有一定的差别，但不同冰样的断裂韧度都表现出了相同的速率效应，在 10^{-7} s^{-1} 到 10^{-1} s^{-1} 的速率范围下，不同冰样的断裂韧度都随着加载速率的增加而降低，两者可拟合如下的指数函数：

$$K_{IC} = -8.0 \ln(\dot{\epsilon}) + 20.9 \quad (4)$$

式中 $\dot{\epsilon}$ 为加载速率， s^{-1} 。

通过上述的分析可知，断裂韧度和温度呈线性关系，断裂韧度与加载速率呈对数关系，结合式(3)与式(4)，假设断裂韧度与温度和速率有以下的关系：

$$K_{IC} = (A + BT) \ln(\dot{\epsilon}) + C + DT \quad (5)$$

式中 A 、 B 、 C 、 D 为拟合参数，结合不同的试验数据成果对式(5)进行拟合计算，得到如下公式：

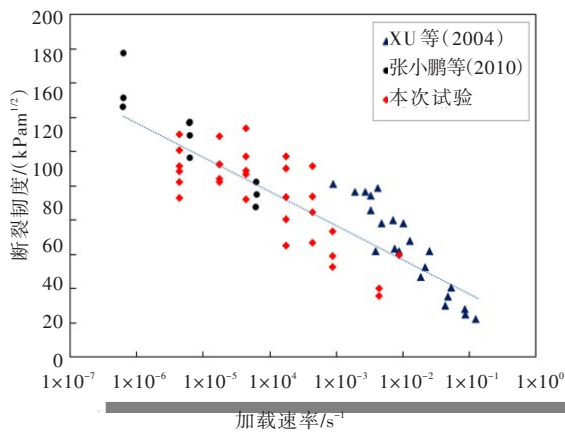


图 12 断裂韧度速率效应试验结果比较

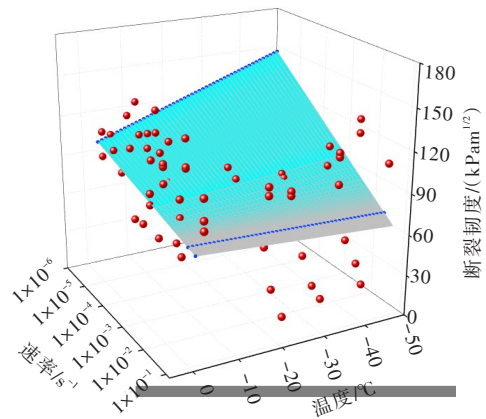


图 13 不同温度和加载速率下断裂韧度的拟合曲面

$$K_{IC} = (-2.37 + 0.13T) \ln(\dot{\epsilon}) + 74.01 + 0.47T \quad (6)$$

式(6)的拟合曲面如图13所示,随着加载速率的增加,断裂韧度的温度效应随之降低,在速率为 10^{-1}s^{-1} 时,断裂韧度基本不随温度的变化而变化;随着温度的升高,断裂韧度的速率效应随之降低,在温度为 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,断裂韧度随加载速率变化的趋势最明显。

4 结论

本文基于DIC方法,对不同温度和加载速率下黄河冰的断裂性能进行了试验研究,主要结论如下:

(1)通过DIC方法测量得到的P-CMOD曲线与应变片测量得到的曲线基本吻合,可将DIC方法应用于河冰断裂试验的位移测量。

(2)在本文研究的温度、速率范围内,试样的断裂模式对温度和加载速率不敏感,但受到晶体结构的影响较大,试样表现为脆性断裂,其中,柱状冰试样裂纹走向曲折,断面会发生碎屑崩落,粒状冰试样的裂纹清晰且平滑,大多数试样断面在破坏后仍可较好的吻合;在试样的断裂过程中,裂纹尖端的张开位移明显大于裂纹的滑开位移,可将I型断裂作为研究黄河冰断裂的主要形式。

(3)当温度在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、加载速率在 $4.46 \times 10^{-6} \text{s}^{-1} \sim 8.93 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ 范围内变化时,黄河冰的断裂韧度值在 $35 \sim 133 \text{kPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 之间变化,断裂韧度随着温度的升高呈降低趋势,随着加载速率的降低呈线性增长趋势,此外,在相同试验条件下,黄河粒状冰的断裂韧度比柱状冰低 $20\% \sim 30\%$ 。

(4)建立了温度、加载速度和断裂韧度的耦合关系式,为进一步分析冰的断裂性能提供了依据和参考。

参 考 文 献:

- [1] WU C G, WEI Y M, JIN J L, et al. Comprehensive evaluation of ice disaster risk of the Ningxia-Inner Mongolia reach in the upper Yellow River [J]. Natural Hazards, 2015, 75(2): 179-197.
- [2] 陈守煜, 冀鸿兰. 冰凌预报模糊优选神经网络BP方法[J]. 水利学报, 2004(6): 114-118.
- [3] 王涛, 杨开林, 郭新蕾, 等. 模糊理论和神经网络预报河流冰期水温的比较研究[J]. 水利学报, 2013, 44(7): 842-847.
- [4] 练继建, 罗昉昕, 赵新. 渠道冰凌下潜的数值模拟研究[J]. 水利学报, 2013, 44(6): 673-679.
- [5] 付辉, 杨开林, 谭水位, 等. 低温冰水动力学试验平台的开发与应用[J]. 水利学报, 2013, 44(3): 355-360.
- [6] 王军, 陈胖胖, 杨青辉, 等. 桥墩影响下冰塞水位变化规律的试验[J]. 水科学进展, 2015, 26(6): 867-873.
- [7] 赵水霞, 李畅游, 李超, 等. 黄河什四份子弯道河冰生消及冰塞形成过程分析[J]. 水利学报, 2017, 48(3): 351-358.
- [8] 茅泽育, 赵雪峰, 胡应均, 等. 开河期冰盖横向冰缝形成机理[J]. 水科学进展, 2009, 20(4): 572-577.
- [9] 茅泽育, 赵雪峰, 王爱民, 等. 开河期冰盖纵向冰缝形成机理[J]. 水科学进展, 2009, 20(3): 434-437.
- [10] JOHNSTON M E. Seasonal changes in the properties of first-year, second-year and multi-year ice [J]. Cold Regions Science and Technology, 2017, 141(9): 36-53.
- [11] 张邀丹, 郜国明, 邓宇, 等. 黄河巴彦淖尔段冰晶体、密度和含泥量调查[J]. 人民黄河, 2018, 40(11): 48-52.
- [12] SCHULSON E, PAUL D. Creep and fracture of ice [M]. Cambridge University Press, 2009.
- [13] 李志军, 贾青, 黄文峰, 等. 水库淡水冰的晶体和气泡及密度特征分析[J]. 水利学报, 2009, 40(11): 55-60.
- [14] 郜国明, 邓宇, 李书霞. 黄河封冻期河冰的劈裂性能试验研究[J]. 人民黄河, 2018, 40(9): 28-30, 82.
- [15] SNYDER S A, SCHULSON E M, RENSHAW C E. Effects of prestrain on the ductile-to-brittle transition of ice

- [J]. *Acta Materialia*, 2016, 108:110–127.
- [16] 李志军, 徐梓竣, 王庆凯, 等. 乌梁素海湖冰单轴压缩强度特征试验研究[J]. *水利学报*, 2018, 49(6): 662–669.
- [17] SCHULSON E M. The brittle compressive fracture of ice [J]. *Acta Metallurgica et Materialia*, 1990, 38(10): 1963–1976.
- [18] 邓宇, 王娟, 李志军. 河冰单轴压缩破坏过程细观数值仿真[J]. *水利学报*, 2018, 49(11): 1339–1345.
- [19] GRIBANOV I, TAYLOR R, SARRACINO R. Cohesive zone micromechanical model for compressive and tensile failure of polycrystalline ice[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2018, 196: 142–156.
- [20] MOSLET P O. Field testing of uniaxial compression strength of columnar sea ice [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2006, 48(1): 1–14.
- [21] TIMCO G W, WEEKS W F. A review of the engineering properties of sea ice [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2009, 60(2): 107–129.
- [22] ZHANG Limin, LI Zhijun, JIA Qing, et al. Experimental study on uniaxial compressive strength of reservoir ice [J]. *Transactions of Tianjin University*, 2012(2): 38–42.
- [23] HAN Y, KIM D W, KWON H J. Application of digital image cross-correlation and smoothing function to the diagnosis of breast cancer [J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2012, 14(5): 7–18.
- [24] HUSSEIN A, BARBONE P E, MORGAN E F. Digital volume correlation for study of the mechanics of whole bones [J]. *Procedia IUTAM*, 2012, 4(9): 116–125.
- [25] OKEIL A, MATSUMOTO K, NAGAI K. Investigation on local bond behavior in concrete and cement paste around a deformed bar by using DIC technique[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 109: 103540.
- [26] DAI Xiangjun, YANG Fujun, WANG Limin, et al. Load capacity evaluated from fracture initiation and onset of rapid propagation for cast iron by digital image correlation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(9): 1092–1101.
- [27] FAYYAD T M, LEES J M. Experimental investigation of crack propagation and crack branching in lightly reinforced concrete beams using digital image correlation [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2017, 182: 487–505.
- [28] LIAN Jijian, YANG Qunan, ZHAO Xin, et al. Uniaxial compressive strength and fracture mode of lake ice at moderate strain rates based on a digital speckle correlation method for deformation measurement[J]. *Science Letter*, 2017, 7: 495.
- [29] WANG Anliang, WEI Zhijun, CHEN Xiaodong, et al. Brief communication: full-field deformation measurement for uniaxial compression of sea ice using the digital image correlation method[J]. *The Cryosphere*, 2019, 13(5): 1487–1494.
- [30] 邓宇, GONCHAROV Vadim, 张宝森, 等. 气温变化对黄河封河期冰厚的影响分析[J]. *人民黄河*, 2019, 41(5): 19–22.
- [31] SINHA N K. Crack-enhanced creep in polycrystalline material: strain-rate sensitive strength and deformation of ice [J]. *Journal of Materials Science*, 1988, 23(12): 4415–4428.
- [32] WEI Y, DEMPSEY J P. Fractographic examinations of fracture in polycrystalline S2 ice[J]. *Journal of Materials Science*, 1991, 26(21): 5733–5740.
- [33] ASTM E1820–15. Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness[S].
- [34] DENG Yu, LI Zongkun, LI Zhijun, et al. The experiment of fracture mechanics characteristics of Yellow River ice [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2019, 168: 102896.
- [35] LIU H W, MILLER K J. Fracture toughness of fresh-water ice[J]. *Journal of Glaciology*, 1979, 22(86): 135–143.

Research on ice fracture of the Yellow River performance based on digital image correlation method

WANG Juan¹, HUANG Yue¹, DENG Yu², LI Zhijun³, ZHANG Yaodan³

(1. School of Water Conservancy and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China;

3. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116042, China)

Abstract: The fracture performance of river ice is an important parameter to measure the bearing capacity of river ice and to simulate and predict the data of ice breakup. In order to clarify the fracture performance of the Yellow River ice, a three-point bending beam test of the Yellow River ice was carried out in combination with Digital Image Correlation. The fracture morphologies of the ice sample were analyzed in different conditions, and the influence of temperature and loading rate on the fracture toughness of the Yellow River ice were studied. The results show that the DIC method is suitable for the fracture tests of river ice. The fracture morphologies of ice are mainly affected by the crystal structure, the failure mode of the ice sample is mainly type I fracture. The fracture toughness of the Yellow River ice decreases with the increase of the loading rate and temperature, but within the given temperature range, the range of decrease is small. A relationship formula of Yellow River ice between the fracture toughness, temperature and loading rate is proposed, which provides a basis for analyzing the fracture process of river ice under ultimate load and selecting the fracture parameters of ice load.

Keywords: river ice; fracture toughness; DIC; loading rate

(责任编辑: 李福田)

(上接第 1035 页)

Experimental study on equivalent bed resistance of river containing vegetation

GAO Xueping, LÜ Jianzhang, SUN Bowen, LIU Yinzhu

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: Vegetation exists widely in river channels, which can effectively improve the water ecological environment and increase open channels' flow resistance. Usually, the stick of different materials or bionic plants is used to simulate actual plants for experimental research, and plant resistance is added to the bed surface to form equivalent bed surface resistance together with the original bed surface resistance. The study on equivalent bed resistance of watercourses containing plants is not perfect because of the dissimilarity of simulating plants and actual plants. In this paper, applying actual velocity conditions to existing plant zones was proposed. According to the plant density in the field investigation of the river, the river was divided into transverse and vertical sections, and the actual flow velocity conditions were applied to the actual plant areas. The plant resistance in the zoned water body was experimentally studied, and the equivalent bed roughness representing the equivalent bed resistance was finally converted. Taking the upper reaches of Duliujian River as an example, three typical plants, namely arbors, shrubs and reeds, were selected to carry out experiments considering the velocity conditions of different zones in the cross-section of the river. The results showed that when the one-in-100-year flood occurs, the equivalent bed roughness of the arbor planting area is 0.060—0.066, and that of the shrub planting area is 0.083—0.099. The equivalent bed roughness in the reed planting area ranges from 0.698 to 0.989. The research results can provide theoretical support for flood control calculation and water environment treatment.

Keywords: vegetative channel; equivalent bed roughness; vegetation resistance; actual vegetation; flume experiment

(责任编辑: 王冰伟)