

影响冰单轴压缩强度因子的试验

周庆¹, 谢成玉², 张丽敏¹, 贾青¹, 李志军¹

(1. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 黑龙江省引嫩工程管理处, 黑龙江 安达 151400)

摘要:为探讨加载方向、加载速率以及试样尺寸等影响因子对冰单轴压缩强度的影响, 针对5种不同尺寸和2种不同加载方向的冰样进行385次单轴压缩加载试验, 阐明了冰单轴压缩强度关键影响因子的试验研究方案, 总结了试验中冰试样随加载速率不同所具有的典型破坏形式和分布。试验结果表明: 试样尺寸的大小不仅会导致脆性破坏时的强度变化, 同时也会使过渡区应变速率位置发生偏移; 柱状冰不同加载方向上的强度大小差别明显, 表现出各向异性。

关键词:冰; 压缩强度; 破坏形式; 尺寸效应; 各向异性

中图分类号: TU502 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2012)S2-0075-03

冰工程研究中的一个重点是冰力学性质研究。冰单轴压缩强度是冰力学性质之一, 它在计算冰对直立结构物的挤压作用时, 如河冰对桥墩的作用力, 海冰对海上直桩平台和码头的作用力时是关键参数。冰是复杂的天然材料, 其力学性质与众多因素有关。因此, 有必要开展不同类型冰的压缩强度试验, 研究其与影响因子之间的关系, 以便更深入地了解其特性, 并应用于实践。

本批试验在2012年1月至3月进行, 所使用的冰样于2011年12月底取自黑龙江省哈尔滨市, 取样时冰厚40~42 cm。为了研究冰试样尺寸效应及柱状冰的各向异性问题, 分别加工了截面尺寸为5 cm×5 cm, 7 cm×7 cm, 8.5 cm×8.5 cm, 10 cm×10 cm和12 cm×12 cm的长方柱试样, 长度方向(亦即加载方向)均为截面边长的2.5倍, 且分垂直和平行冰自然表面方向加工的两种试样。试样加工总数412个, 并成功进行了25组共计385例试验, 每组试验均在应变率为 $10^{-6} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 下进行。

1 单轴压缩强度和关键影响因子的试验方案

理论上材料的强度定义为材料开始产生基本破坏时的应力, 由于冰在荷载增加的同时, 内部缺陷也开始发展, 直到最后破碎, 所以不存在明显的破坏起始点, 试验中也很难测出该点的力。而在工程中常

用冰的强度来确定冰的最大抗力, 所以一般并不考虑冰内部微观结构的破损, 而是通过试验得到的极限应力作为冰的单轴压缩强度^[1], 即

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \tag{1}$$

式中: F 为荷载-时间曲线上所达到的最大荷载; A 为试样原始横截面积。

1.1 试验设备及改造

试验机是长春试验机研究所生产的CSS-44100型电子万能试验机。为了达到冰单轴压缩试验的低温恒温环境要求, 进行以下改进: (a) 横梁和压座之间加装小型恒温试验箱, 并为压杆预留孔洞; (b) 采用具有足够强度和刚度的电木杆替换原有铁制压杆, 用尼龙材料制作压头压座, 充分阻隔箱内外的热交换。

1.2 轴线性加载的保障方式

由于单轴压缩试验的冰样没有侧面约束, 必须保证试样加载的轴线性及均匀性^[2]。首先试样在加工时就要尽量保证为标准的长方柱体, 尤其上下两个端面需要手工仔细刨削磨平, 保证两者平行。在试验机上放置试样时尽量使试样轴线和试验机压杆轴线重合, 避免偏心加载。Sayed^[3]曾做过应变梯度对冰脆性破坏时的影响试验, 虽采用的是线荷载, 但对比轴心和偏心两种加载试验结果, 发现偏心加载对所测试样强度有显著影响。本文试验采用在固

基金项目: 国家自然科学基金目(51079021); 黑龙江省水利厅科研开发项目(HSKY 2011-04); 海岸和近海工程国家重点实验室(大连理工大学)开放基金(LP0903)

作者简介: 周庆(1987—), 男, 山东枣庄人, 硕士研究生, 主要从事冰物理和力学性质研究。E-mail: zhouqing_dut@163.com

定的底座上根据试样尺寸和底座圆心位置做标记的方法,简单有效地保证了加载过程的轴线性,和每次放置冰样时的准确和高效。

1.3 应变速率控制

冰的压缩强度对加载时冰发生的应变速率敏感^[4],速率的不同会直接影响强度值的大小,而且会使冰在试验中表现出不同的材料特性,发生不同形式的变形和破坏现象,因此应变率是压缩试验中的重要控制参数。应变率是试样应变对时间的变化率,而单轴压缩试验中常用的应变率是指名义应变率,即

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{X}}{L} \quad (2)$$

式中: $\dot{X}$ 为试验机压头的位移速率,mm/s; L 为试样原始高度,mm。

为了得到不同应变率下的强度值,试验前就需要根据试验涉及的应变率范围和试样尺寸对试验机进行校核。本试验涉及的应变率在 $10^{-6} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 量级, CSS-44100 型电子万能试验机可实现横梁在 $0 \sim 500 \text{ mm/min}$ 速率下平稳运行。经过式(2)转换,即便对于 $12 \text{ cm} \times 12 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ 的大试样也能达到最大 $2.7 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 的应变速率,满足试验需要。同时配套的采集系统可实现最大 50 Hz 的采样频率,保证高速加载时也能采集到足量数据。

1.4 温度控制

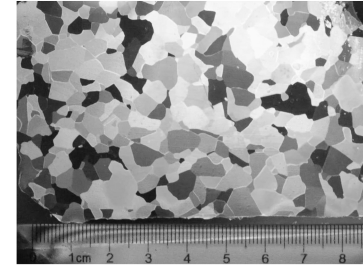
冰的物理、力学性质均受温度影响明显。同一种冰样,当加载条件相同时,温度的高低会显著影响压缩强度的大小^[5]。因此冰力学试验的全过程都需要温度控制。常见的冰力学试验温度多分布在 $-40 \sim 0^\circ\text{C}$,这正是高纬度地区天然冰所达到的温度,同时在室内也容易精确制冷并维持该温度范围。

本文试验温度均为 -10°C 。温度的控制包括试样贮存控温、试样恒温 and 试验过程中提供恒温环境。冰样制备完成后,放入 -15°C 的冷库中存放,以保证冰样较长时间保存并且冰晶体结构不发生大的变化^[6];同时将冰样放入密封袋以避免有空气对流存在时冰的快速升华。开始试验前,根据试样尺寸大小和温度差值,通过热传导方程计算试样完全恒温所需时间,再将试样放入控温精度 0.1°C 的恒温箱内做超过计算时间的恒温,使之充分达到热平衡。

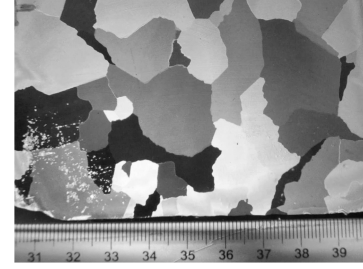
1.5 冰样晶体类型对冰各向异性效应的实现

不同环境下会生长出具有不同晶体类型、晶粒尺寸的冰,同一块冰在其不同部位(主要是深度)的晶体也有差别,如图1所示。物体的宏观性质总是与微观结构有关;同样,不同的内部结构会导致冰力学性质上的差异。典型的粒状冰,因为结构的关系,压缩强度对加载方向并不敏感,多表现出各向同性特征;而

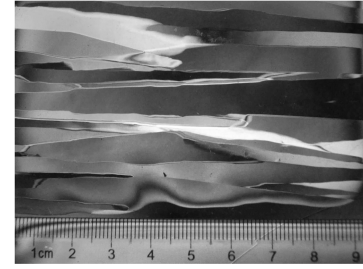
对于柱状冰,不同方向上的压缩强度值往往是不同的。为了简化冰各向异性试验研究,本文采用平行和垂直冰自然表面方向加载方式。因此,加工试样时分为试样长轴平行和垂直冰自然表面方向两种。



(a) 粒状冰(较小粒径)



(b) 粒状冰(较大粒径)



(c) 柱状冰

图1 不同晶粒尺寸的粒状冰和柱状冰

1.6 冰样尺寸对单轴压缩强度影响的实现

试样尺寸大小对试验结果的影响表现为尺寸效应。由 Weibull 理论,试样在脆性破坏时的强度会随着试样尺寸的增大而减小^[7]。在本试验中,选取 5 种尺寸大小的试样,即截面尺寸为 $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$, $7 \text{ cm} \times 7 \text{ cm}$, $8.5 \text{ cm} \times 8.5 \text{ cm}$, $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 和 $12 \text{ cm} \times 12 \text{ cm}$,长轴方向为截面边长 2.5 倍的长方柱试样。

2 试验结果的分析讨论

冰在不同的应变率下会呈现出不同的材料特性,最终会反映到材料的破坏过程和形式上的差别。随着加载时冰样应变速率的增加,在压缩强度和应变率关系曲线上会依次出现韧性区、过渡区和脆性区,各区域上具有的典型破坏形式在之前的文献中已有过讨论^[8]。本试验观测到的结果和这些结论略有不同并有所扩展。如图2所示,3条加载过程曲线 a, b, c 对应的应变速率依次为 $4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 10^{-4} s^{-1} 和 $3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,并分别处于韧性区、过渡区和

脆性区内。其中,b 试样最终为脆性破坏,但加载过程体现出一定的材料韧性。图 3 中的 3 组照片分别对应图 2 中的 3 个试样,可以看出,处于韧性区的试样 a 鼓胀破坏,亦带有劈裂的特点;过渡区中的试样 b 具有分布均匀且数量极多的裂纹,使之看起来“发白”,并常出现接近 45°的剪切面,表现为高强度特征;脆性区中的试样 c 碎裂成若干部分,裂纹少,且较易出现呈台阶状的扇形破坏面。

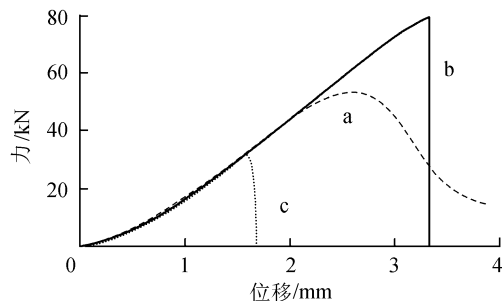


图 2 不同应变率下的加载过程曲线

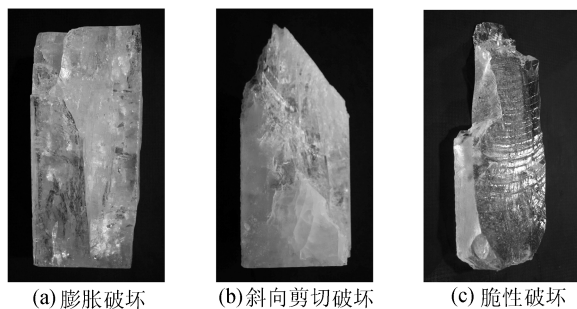


图 3 冰的不同破坏形式

虽然各区域存在其典型的破坏形式,但某一具体破坏形式的分布并不单一局限于某个区域,多是分布在相邻的两个区。如在试验中,鼓胀形式的破坏约有 2/3 存在于韧性区,1/3 于过渡区,但不会出现在脆性区;同样,具有斜切面和扇形破坏面的情况只在快速加载中可以见到。

本试验的冰晶体结构为柱状冰,当冰样截面边长分别为 5.0 cm,7.0 cm,8.5 cm,10.0 cm,12.0 cm 时,冰试样垂直与水平向加载的极限压缩强度的比值为 2.0,2.5,1.4,1.0,1.4。由此可以看出,垂直方向加载的强度要大于等于水平方向的强度,各向异性特点显著,但不同大小的试样比值有差别。

关于尺寸效应,为表明试样尺寸的大小关系和强度的大小,参照 Weibull 理论中的表示方式,将最小试样的体积和测得的强度分别定义为标准体积 V_0 和标准强度 σ_0 ,其他尺寸试样的体积 V 和强度 σ_c 与标准值的比值分别作为横纵坐标。在应变率为 10^{-3} s^{-1} 时(此速率下的点均分布在脆性区内),5 种不同试样尺寸的单轴压缩强度试验中,除 7 cm×7 cm×17.5 cm 试样的强度值偏低外,可以看到强度

随试样尺寸增大而减小的规律,如图 4 中的粗实线所示。再将不同尺寸冰样过渡区对应的应变率加入比较可发现,试样尺寸的大小还会影响过渡区的位置,表现为随着试样尺寸的增大,过渡区的存在区间向低应变速率偏移,如图 4 中的细实线所示。

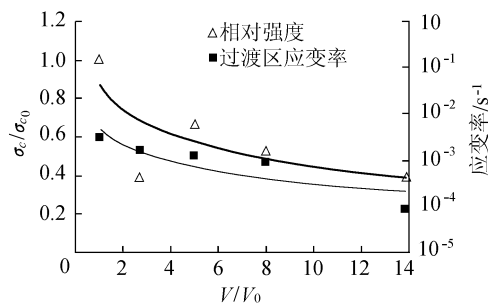


图 4 试样尺寸对压缩强度和过渡区的影响

3 结 论

a. 不同的加载速率会影响冰单轴压缩强度的大小,也会出现不同的破坏形式。低速加载时多出现较短的裂缝,并使试样鼓胀;高速加载时多出现斜切面和呈扇形的台阶状破坏面;而过渡区中的试样则多呈现裂纹数量极多、分布均匀的高强度特征,并常伴有多种破坏形式。

b. 柱状冰的各向异性明显,其中沿着垂直冰自然表面方向加载所得到的强度一般要明显大于水平方向上的强度,但比值会因试样尺寸的关系有所不同。

c. 随着试样尺寸的增大,试样在脆性破坏时的强度会减小,过渡区的位置会向低应变速率偏移。

参考文献:

- [1] 张明元,孟广琳,隋吉学,等. 黄河北部庄河附近海域海冰物理力学特性[J]. 海洋通报,1995,14(4):11-18.
- [2] 张丽敏,李志军,贾青,等. 人工淡水冰单轴压缩强度试验研究[J]. 水利学报,2009,40(11):1392-1396.
- [3] SAYED M. Strain gradient influence on brittle failure of ice[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 1990, 4(4): 179-191.
- [4] COLE D M. Strain-rate and grain-size effects in ice[J]. Journal of Glaciology, 1997, 115(33): 274-280.
- [5] 张明元,孟广琳,严德成,等. 大连近岸海区海冰压缩强度试验研究[J]. 海洋环境科学,1987,6(1):45-48.
- [6] SCHWARZ J, FREDERKING R, GAVRILLO V, et al. Standardized testing methods for measuring mechanical properties of ice[J]. Cold Regions Science and Technology, 1981, 4: 245-253.
- [7] 沈梧,李洪升,张小朋,等. 渤海冰尺寸效应的实验研究[J]. 大连工学院学报,1988,27(2):9-15.
- [8] 李福成,孟广琳,张明元. 应力率对海冰单轴抗压强度的影响[J]. 海洋学报,1986,8(5):619-625.

(收稿日期:2012-08-24 编辑:胡新宇)