

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201903071

复合冰材料单轴压缩性能试验

娄晓楠, 武岳, 刘秀明

(结构工程灾变与控制教育部重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090)

摘要:为解决纯冰在作为建筑材料时存在的强度低、脆性破坏等问题,采用原生纸浆纤维作为增强材料制备了一种复合冰材料.首先以 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为标准温度,对含有不同纤维质量(0%、1%、2%、4%、6%)的复合冰材料进行单轴压缩全过程试验研究,然后在 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下进行了相同工况的试验,探究温度对其性能的影响.研究表明:复合冰材料的强度和延性明显优于纯冰材料,纯冰的破坏属脆性破坏,复合冰的破坏属延性破坏,且变形能力相比纯冰大大增强;温度升高时,复合冰材料的强度、峰值应变和弹性模量均减小;纤维含量提高时,复合冰材料的强度和峰值应变增大,弹性模量减小.基于概率可靠度直接设计法确定了材料强度的标准值,所得结论为复合冰材料在建筑中的应用提供参考.

关键词: 复合冰;单轴压缩;温度;纤维含量;标准值

中图分类号: TU599

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2019)12-0137-07

Uniaxial compression performance test of fiber-reinforced ice

LOU Xiaonan, WU Yue, LIU Xiuming

(Key Lab of Structures Dynamic Behavior and Control (Harbin Institute of Technology),
Ministry of Education, Harbin 150090, China)

Abstract: In order to solve the problems of low strength and brittle failure of fresh ice when used as building material, a kind of fiber-reinforced ice (FRI) material was prepared by using primary pulp fiber as reinforcing material. Firstly, the uniaxial compression tests were carried out for composite ice materials with different fiber contents (0%, 1%, 2%, 4%, 6%) at $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. To investigate the effects of temperature on the properties of the composite ice materials, tests were also carried out at $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ under the same conditions. The results show that the strength and ductility of the composite ice material were obviously better than fresh ice. Unlike the brittle failure of fresh ice, the failure of FRI was ductile failure, and the deformation ability was greatly enhanced compared with fresh ice. The strength, peak strain, and modulus of elasticity of the composite ice materials decreased with the increase of temperature, while the strength and peak strain of the composite ice materials increased with the increase of fiber content, and the elasticity modulus decreased. Based on the test results, the standard values of material strength were determined by the direct design method of probability reliability. The conclusions could provide reference for the application of composite ice materials in buildings.

Keywords: fiber-reinforced ice; uniaxial compression; temperature; fiber content; standard strength

冰是大自然赋予的一种天然工程材料,不仅有较好的承载力和可塑性,而且可以就地取材、绿色无污染.冰雪建筑历史悠久,特色鲜明.近年来,以冰雪运动为特色的冰雪产业在世界范围内迅猛发展,冰雪建筑为现代冰雪产业提供了重要支撑.另外,极地开发中基础设施的建造可以因地制宜,利用极地区域丰富的冰雪资源以及常年低温的自然环境,建造安全高效、绿色环保的冰雪建筑^[1].

但是冰作为建筑材料,也存在强度偏低和脆性

破坏等问题.针对上述问题,文献[2]提到,英国学者 Geoffrey Pyke 在 1942 年提出复合冰的概念,即在冰冻结过程中加入均匀掺混的纤维材料,如木屑等,以改变冰内部结构,抑制裂纹的扩展,实现材料整体力学性能的提升.他将这种材料称之为“Pykrete”.

文献[3]介绍了一些学者针对不同增强方法的研究. Dunaev (1957) 研究用锯末和炉渣等对纯冰进行加强以及用藻类等植物对海冰进行加强; Dykins (1963) 提出了用玻璃纤维对冰进行加强的建议; Cohie 和 Kingery (1963) 用木制品、玻璃纤维和石棉等材料对冰进行加强; Kagan (1965) 和 Wuori (1963) 对木屑加强冰的性能进行了广泛的研究; Jarrett 和 Biggar (1980) 研究了土工织物对冰的加强作用; Glockner (1988) 提出用玻璃纤维纱对纯冰材料进行

收稿日期: 2019-03-08

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51778182)

作者简介: 娄晓楠(1993—),男,博士研究生;

武岳(1972—),男,教授,博士生导师

通信作者: 武岳, wuyue_2000@163.com

加强,并采用该方法在寒冷地区建造冰屋用来临时储存物品.

近年来,各位学者还开展了对复合冰材料力学性能的探究. Kokawa^[4]用冰雪混合材料建造了大跨度的冰壳,并对其长期蠕变变形进行了监测. Janssen 等^[5]对不同种类和不同纤维含量的木屑复合冰材料进行了力学试验,发现复合冰的抗压强度可达到纯冰的 4 倍,抗弯强度可达纯冰的 3 倍,同时用木屑加强冰材料实现了大跨度冰壳结构的建造. Cruz 等^[6]采用纤维素复合冰材料建造了达芬奇桥和马鞍形壳体,并进行了复合冰材料取样,利用切割机制备边长 10 cm 的复合冰立方体试件和纯冰进行了轴压试验,发现复合冰的抗压强度最高可达到纯冰的 4 倍. Tabassum 等^[7]对纤维素复合冰材料的抗压强度、弹性模量和蠕变行为进行了研究,分别在不同加载速率和应力水平下对不同纤维含量的复合冰材料进行了抗压和蠕变试验,发现复合冰材料的强度最高约是纯冰强度的 2.5 倍,蠕变速率是纯冰的 1/12 ~ 1/10. Li 等^[8]提出在“Pykrete”中加入 SGPC 凝胶材料制备“New Pykrete”,发现“New Pykrete”相比“Pykrete”其抗压强度和抗弯强度可分别提高 1.75 和 1.65 倍.

从已有研究来看,在复合冰材料的单轴压缩力学性能方面,不同学者在试验中采用的试件尺寸、加载速率等试验参数各有不同,造成试验结果存在一定的差异,再有大多研究以立方体试件为研究对象,探究加载速率对抗压性能的影响,而立方体试件在加载中由于受到两端约束,不能很好地代表单轴压缩试验结果. 此外,冰材料是一种温度敏感材料,关于温度对冰材料力学性能的研究也有待完善. 因此本文首先对复合冰材料的试验方法进行了探究,然后主要针对温度和纤维含量对复合冰材料单轴压缩力学性质的影响展开试验研究,从而为复合冰材料的推广使用奠定基础.

1 试验准备与方法

1.1 试验环境与试件制备

本文采用原生纸浆纤维作为增强材料来制备复合冰材料 (fiber reinforced ice, fri), 相比于传统的“Pykrete”,原生纸浆纤维比木屑具有更好的观感,自重较轻,能更好地与水融合且不易沉降. 复合冰材料中纤维含量为纤维质量与加入的水的质量比值.

试件的制备在低温试验室中进行,冻结时间在 72 h 左右,调节试验室温度分别在 -15 ℃、-5 ℃,利用温湿度传感器对内部环境进行监测,在试验周期内,整个环境温湿度相对平稳,温度在 ±0.5 ℃ 的

范围内波动;湿度在不同的温度下相差不大,整体环境的湿度在 70% ~ 75% 波动.

复合冰材料的制备过程中首先采用搅拌机将纤维与水均匀混合,之后将混合材料放入自制的 PVC 管模具中进行冻结. 脱模时,采用蒸汽熨斗对 PVC 管表面进行微加热至试件与模具分离. 脱模完成后,将试件套上保鲜膜封闭起来,避免其在环境中升华,然后在相应的温度下放置 24 h 进行养护,以消除脱模过程中可能造成的影响. 复合冰试件见图 1. 用游标卡尺测量脱模后试件的尺寸,得知试件尺寸精度在 ±1 mm 范围内. 加载设备采用带有恒温箱的 UTM 万能试验机(图 2),恒温箱的温度可进行数字控制,调控范围为 -25 ℃ ~ 室温,精度为 ±0.5 ℃,试验时调至与试件冻结相同的温度.



图 1 复合冰试件
Fig. 1 Specimens of fri



图 2 UTM 万能试验机
Fig. 2 Universal testing machine

1.2 试验方法

1.2.1 单轴压缩试验方法

通过试验机自身的力与位移传感器得到试件加载的荷载位移曲线,应力、应变数据分别按照式 (1)、(2) 进行计算处理得到. 对于冰材料而言,当应力达到峰值应力的 1/4 ~ 1/3 左右时,开始出现裂

缝^[9-10],复合冰材料的弹性模量的取值由应力应变曲线的直线上升段,按照式(3)进行计算求得,上升段中应力一般不超过峰值应力的 1/3.

$$\sigma = \frac{F}{A},$$

(1)

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L},$$

(2)

$$E = \frac{\Delta F \times L}{A \times \Delta L}.$$

(3)

式中: σ 为应力值, ε 为应变值, F 为荷载值, A 为试件初始横截面积, L 为试件原始长度, ΔF 为荷载变化量, ΔL 为试件变形长度.

1.2.2 加载速率

文献[9]提到,纯冰的强度受到加载速率的影响.纯冰的破坏在不同加载速率下存在脆韧转变的现象.当加载速率较小时,纯冰呈韧性破坏且强度随着加载速率的增大而提高,当加载速率较大时,纯冰呈脆性破坏且强度随加载速率的增大而降低.

对于纯冰脆韧转变的临界速率,受到温度、晶粒大小等多重因素影响,不同学者通过试验得到的脆韧转变速率也大有不同. Arakawa 等^[11]在 $-10 \sim -173\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内通过试验发现不同温度下脆韧转变速率不同,当温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,临界应变率约为 10^{-2} s^{-1} . Batto 等^[12]在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下对晶粒大小为 $1 \sim 10\text{ mm}$ 的试件进行了试验,得到临界速率在 $10^{-3} \sim 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 范围内. Kermani 等^[13]认为在压缩试验中当加载应变率小于 10^{-4} s^{-1} 时,冰表现出韧性行为;韧脆行为的转变在 $10^{-4} \sim 10^{-2}\text{ s}^{-1}$,超过此范围为脆性破坏.

考虑到复合冰材料的强度也可能受到加载速率的影响,本文在 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下对纤维含量为 2% 的复合冰材料进行了单轴压缩试验,其中试件尺寸根据 Schwarz^[14]建议,采用直径 70 mm,高度 140 mm 的圆柱体试件. 本文主要探究复合冰材料的准静力受压特性,因此选取范围较小的加载速率为研究对象,加载速率控制在 $10^{-5} \sim 5 \times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$,具体工况与结果见表 1.

表 1 不同加载速率下复合冰强度值

Tab. 1 Strength of fri at different loading rates

$\dot{\varepsilon}/$ (10^{-5} s^{-1})	试件 个数	强度均值/ MPa	标准差/ MPa	变异系数
1	10	5.28	0.46	0.09
5	10	6.05	0.50	0.08
10	10	6.15	0.54	0.09
20	10	7.09	0.23	0.03
50	10	7.68	0.70	0.09

试验发现(图 3),在所试验的加载速率范围内,复合冰材料的均值强度随着加载速率的提高而增加,且与加载速率之间基本呈指数关系,根据试验结果所得的拟合公式为

$$\sigma = 6.48\dot{\varepsilon}^{0.1}, R^2 = 0.94.$$

(4)

式中: σ 为强度均值,MPa; $\dot{\varepsilon}$ 为加载速率, 10^{-4} s^{-1} .

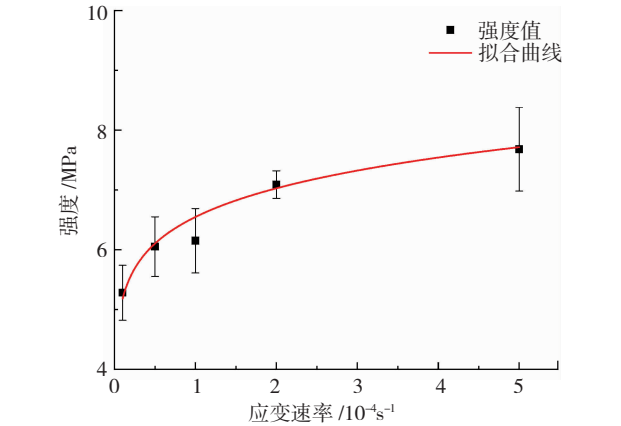


图 3 复合冰强度与应变速率关系

Fig. 3 Relationship between strength and strain rate of fri Schwarz^[14]提到,对于冰单轴受压的应变速率应控制在 $10^{-5} \sim 10^{-1}\text{ s}^{-1}$,在混凝土轴压试验中静力加载的应变速率为 10^{-5} s^{-1} . 考虑到复合冰试件在加载时间较长时存在蠕变的问题,加载速率不宜过慢. 为探究复合冰材料在准静力作用下的力学性能,本文选取 10^{-4} s^{-1} 作为标准加载应变速率,以下试验均在此速率下进行.

1.2.3 尺寸效应

根据 Schwarz^[14]的建议,在单轴压缩试验中试件宜选用直径在 $7 \sim 10\text{ cm}$,长径比为 $2 \sim 3$ 的圆柱体. 本文在 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,分别制备了直径分别为 7、8.5、10 cm,长径比为 2 的三种复合冰圆柱体试件,探究尺寸效应对强度的影响,其中复合冰材料的纤维含量均为 2%. 试验结果见表 2.

表 2 不同尺寸复合冰强度值

Tab. 2 Strength of fri for different sizes of samples

尺寸/mm	试件 个数	强度均值/ MPa	标准差/ MPa	变异系数	α
$\varphi 100 \times 200$	10	5.91	0.51	0.09	0.96
$\varphi 85 \times 170$	10	6.03	0.71	0.12	0.98
$\varphi 70 \times 140$	10	6.15	0.54	0.09	1.00

注: α 是指不同尺寸的试件均值强度与所选用标准尺寸($\varphi 70 \times 140$)试件均值强度的比值.

由试验可知,当高径比为 2 时,试件尺寸对于轴心抗压强度的影响不是很大,随着试件尺寸的减小,轴心抗压强度略有增强,这可能是由于端部效应的影响,即试件尺寸较小时,试件端部受到试验机的约束作用越强,所测得的强度值越高.

1.3 试验工况

试验采用单一变量的原则,分别探究温度(−15 ℃、−5 ℃)和纤维含量(0%、1%、2%、4%、6%)对冰材料单轴压缩力学性能的影响,共计 10 种工况,每种工况下试件个数见表 3,共计 131 个试件.试件尺寸为 $\varphi 70 \times 140$ mm.

表 3 试件个数

Tab. 3 Number of specimens

温度/℃	纤维含量				
	0%	1%	2%	4%	6%
−15	13	15	15	14	14
−5	12	12	12	12	12

2 试验分析结果

2.1 复合冰材料单轴压缩特性

图 4 为 −15 ℃ 下纯冰和复合冰材料(2%) 在单轴压缩下的典型应力-应变曲线,其中 *O* 点为应力应变曲线的原点,*P* 点为应力峰值点,该点对应的强度为峰值应力,对应的应变为峰值应变.

纯冰试件在加载初始阶段,先出现较小的竖向

和斜向裂缝,随着荷载的增加,裂缝逐渐开始延伸扩展,当达到应力峰值点 *P* 时,突然形成贯穿裂缝,试件失去承载能力.在整个加载过程中,当荷载达到峰值应力的 40% ~ 50% 时,即图 4(a) 中 *A* 点时,部分试件局部出现贯穿裂缝.在整个过程中,纯冰表现出脆性特征,其破坏状态见图 5.

复合冰的破坏过程与纯冰有所不同.复合冰试件在加载初期,即图 4(b) 中 *OA* 段,*A* 点应力约为峰值应力的 20% ~ 30%,试件表面出现较小的竖向和斜向裂缝,此阶段曲线斜率变化不大,继续增大荷载,复合冰材料的塑性变形和微裂缝逐渐发展,曲线的斜率渐减,当达到峰值应力的 80% ~ 90% 时(对应 *B* 点),此时内部微裂缝有较大开展,其后曲线斜率变化较快,在达到峰值应力时,试件并没有出现明显的破坏,随着荷载的继续增加,试件中部的裂缝逐渐开展,承载力逐渐下降.承载力下降过程相对平稳,呈膨胀型延性破坏(图 6).结合图 4(a)、(b) 中应力-应变曲线 *PC* 段可看出,纯冰具有极强的脆性破坏特征,而复合冰材料则表现出延性特征.

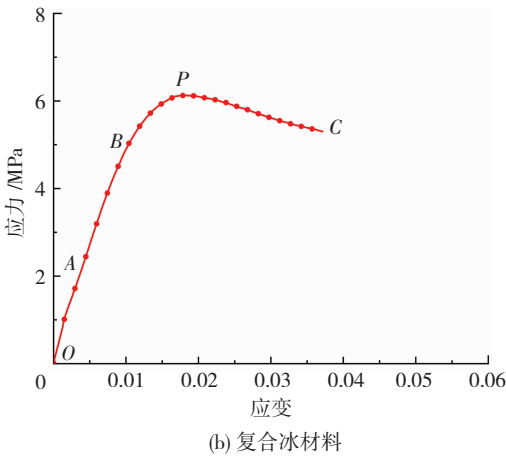
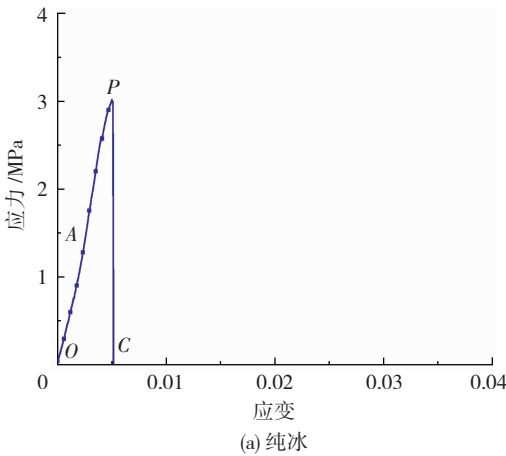


图 4 冰材料应力-应变典型曲线

Fig. 4 Typical stress-strain curves of ice materials

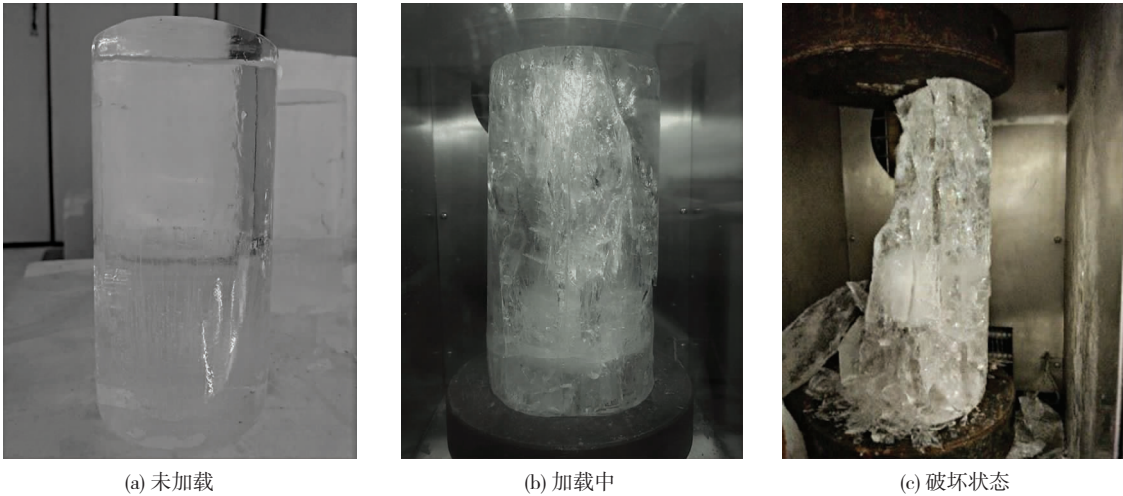


图 5 纯冰压缩破坏状态

Fig. 5 Compression failure state of fresh ice

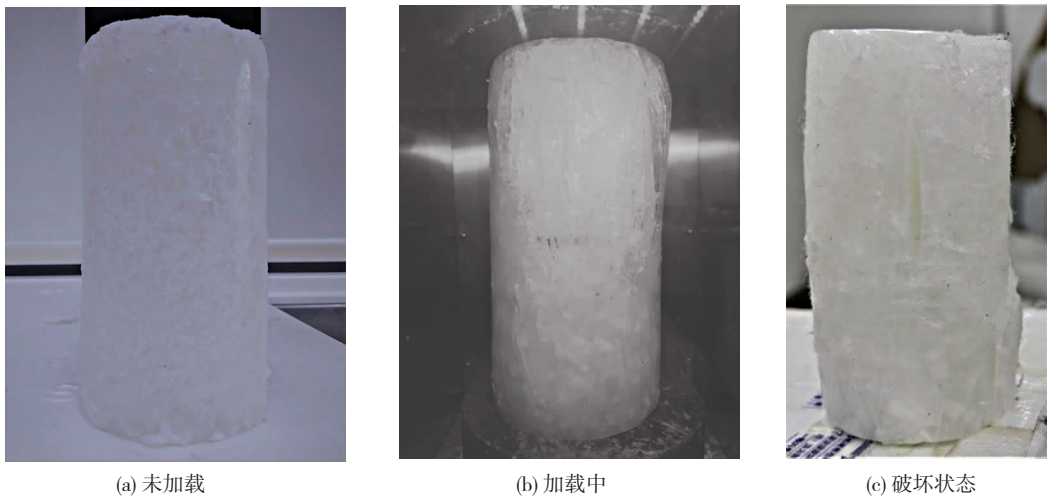


图 6 复合冰压缩破坏状态

Fig.6 Compression failure state of fri

文献[15–16]对纯冰的破坏进行了研究. 其中滑移与裂纹扩展机制对纯冰破坏过程的解释得到广泛认可. 冰作为晶体结构,在压缩作用下,晶体的滑移使晶界处产生裂缝,且在较宜扩展的裂缝尖端迅速产生集中拉应力,使裂缝迅速扩展贯通甚至进入晶体,裂缝较集中且平行于受力方向. 在复合冰材料中,纤维的存在增强了晶界黏聚力,使得冰晶体之间的滑移能力大大增强,同时可抑制应力集中下裂纹的扩展,使得冰材料的强度得以提升.

2.2 影响因素讨论

对试验结果中特征参数峰值强度、峰值应变和弹性模量在不同工况下的均值、标准差以及变异系数进行统计,见表 4.

2.2.1 纤维含量对单轴压缩性能的影响

图 7 为 -15 ℃ 下纤维含量对峰值强度、峰值应变和弹性模量的影响结果. 可发现相比纯冰材料,随

着纤维含量的提升,复合冰材料在提高纯冰强度的同时也使得冰材料的变形能力大大提高. 不同纤维含量复合冰材料的强度随着纤维含量的增加而提高,最高可达纯冰强度的 2.65 倍,但是强度增大的比率逐渐降低,强度与纤维含量基本成指数函数形式,如式(5)所示. 需要注意的是,在制作纤维含量为 6% 的复合冰材料时,由于大量纤维的存在使得自由水分减少,试件表面出现孔洞,显然不利于复合冰材料强度的进一步增强. 在 Cruz 等^[6]的试验中也发现,纤维含量为 10% 的复合冰试件强度低于纤维含量为 5% 的复合冰材料.

纤维的存在大大提高了冰材料的变形能力,复合冰材料的峰值应变明显大于纯冰的峰值应变,且随着纤维含量的提高,峰值应变提高,可达纯冰的 4 倍. 当纤维含量在 1% 到 6% 之间时,峰值应变与纤维含量基本呈线性关系,回归公式见式(6).

表 4 复合冰材料峰值抗压强度和峰值应变均值试验结果

Tab.4 Results of mean values of peak compressive strength and peak strain of fri

纤维含量/ %	温度/ ℃	强度均值/ MPa	标准差/ MPa	变异系数	峰值应变 均值	标准差	变异系数	弹性模量/ GPa	标准差	变异系数
0	-15	3.08	0.67	0.22	0.005 3	0.000 6	0.11	0.72	0.085	0.12
	-5	1.78	0.32	0.18	0.004 4	0.000 4	0.09	0.55	0.110	0.20
1	-15	4.61	0.70	0.15	0.016 6	0.001 5	0.09	0.65	0.100	0.15
	-5	2.46	0.25	0.10	0.013 8	0.004 0	0.29	0.45	0.102	0.23
2	-15	6.14	0.79	0.13	0.018 0	0.002 7	0.15	0.60	0.056	0.09
	-5	3.81	0.59	0.16	0.015 2	0.001 8	0.12	0.40	0.045	0.11
4	-15	7.49	0.75	0.10	0.020 5	0.002 7	0.13	0.54	0.052	0.10
	-5	4.85	0.54	0.11	0.017 5	0.002 1	0.12	0.35	0.085	0.24
6	-15	8.01	1.20	0.15	0.022 5	0.002 5	0.11	0.52	0.042	0.08
	-5	5.53	0.50	0.09	0.018 7	0.002 0	0.11	0.32	0.045	0.14

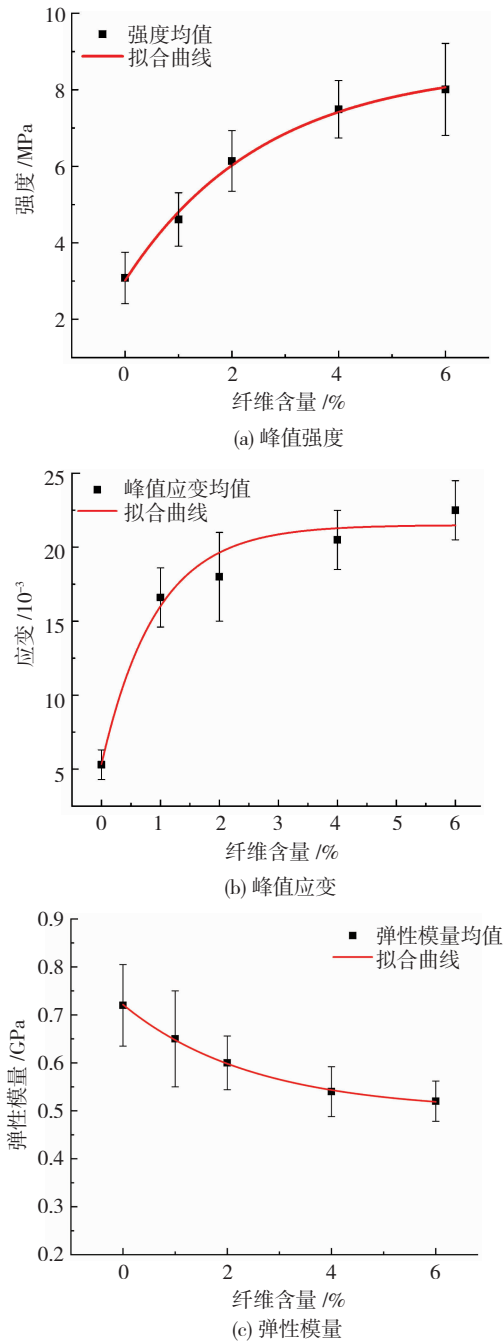


图 7 纤维含量对单轴压缩性能的影响

Fig. 7 Effect of fiber contents on uniaxial compression performance

纤维含量的提高在提高复合冰材料和变形能力的同时,复合冰材料的弹性模量在逐渐降低,且低于纯冰的弹性模量,约为纯冰材料的 0.65~0.91 倍.这是因为纤维在水中软化并分离成片状或颗粒状,同时纤维的存在增加了冰材料整体的孔隙,降低了材料的整体刚度.弹性模量与纤维含量的关系见式(7).

$$\sigma = 8.79 - 5.77 \times 0.70^\omega, \quad R^2 = 0.99; \quad (5)$$

$$\varepsilon = 0.0214 - 0.016\exp(-\omega), \quad R^2 = 0.95; \quad (6)$$

$$E = 0.50 + 0.22\exp\left(\frac{-\omega}{2.48}\right), \quad R^2 = 0.99. \quad (7)$$

式中: σ 为峰值强度,MPa; ε 为峰值应变; E 为弹性

模量,GPa; ω 为纤维含量,%.

2.2.2 温度对单轴压缩性能的影响

图 8 给出了温度对各纤维含量的复合冰材料峰值强度、峰值应变和弹性模量的影响情况.可知,复合冰材料的力学性质具有温度敏感性.当温度升高时,纯冰和复合冰材料的强度、峰值应变和弹性模量都随着温度的降低而提高.试验表明,当温度为 -5℃ 时,其强度约为 -15℃ 下强度的 53%~65%;峰值应变约为 -15℃ 下的 83%~85%;弹性模量约为 -15℃ 下的 62%~76%.可发现,温度对复合冰材料的影响是显而易见的,且对强度的影响最大.

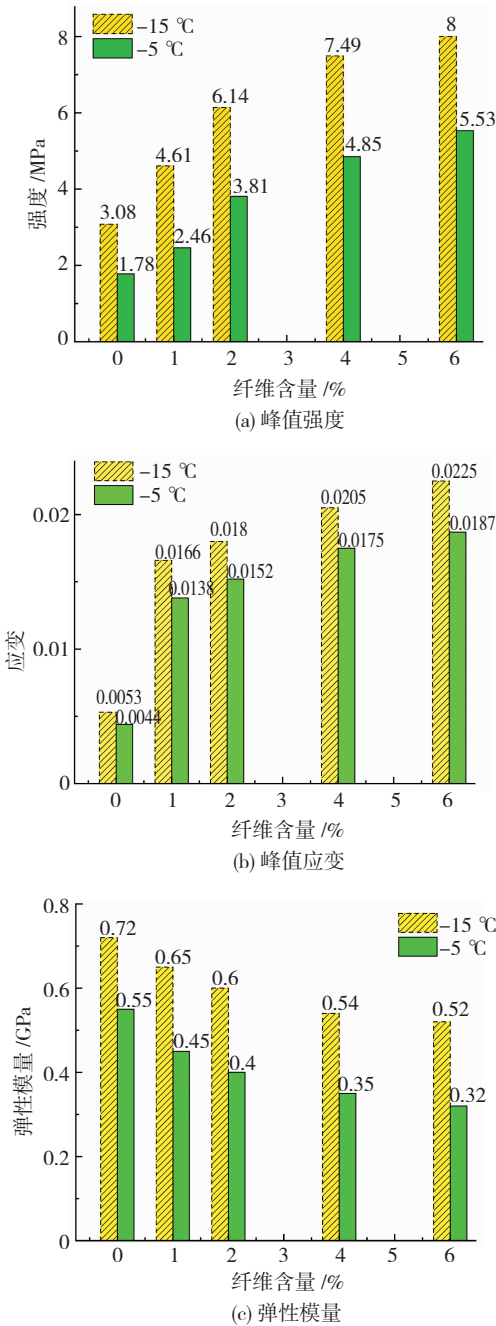


图 8 温度对单轴压缩性能的影响

Fig. 8 Effect of temperature on uniaxial compression performance

3 复合冰材料强度建议取值

通常按概率可靠度直接设计法确定材料强度的标准值.材料强度标准值 f_k 的取值原则为,在材料强度实测值的总体中,强度标准值应具有一定的保证率.一般认为,材料强度的分布服从正态分布,且用概率表示某种现象发生的可能性很小时,通常用 5% 表示,即分位值为 0.05.在设计和分析中,当统计分析的数据不足即小样本时,要考虑统计不确定性的影响.此时材料强度标准值按照式(8)进行计算,表 5 给出了分位值为 0.05 时的单侧容限系数 k_{nk} 的取值.

$$f_k = \bar{f}_m (1 - k_{nk} \delta_{fm}), \tag{8}$$

式中: $\bar{f}_m$ 为材料强度的平均值, k_{nk} 为材料强度概率分布的单侧容限系数, δ_{fm} 为材料强度样本变异系数.

表 5 分位值为 0.05 时单侧容限系数 k_{nk}

Tab. 5 Unilateral tolerance coefficient k_{nk} at quantitative value of 0.05

n	δ_{fm} 已知	δ_{fm} 未知
3	1.90	3.37
4	1.84	2.63
5	1.80	2.34
6	1.78	2.18
8	1.74	2.01
10	1.73	1.92
20	1.69	1.77
30	1.67	1.73
∞	1.65	1.65

注: n 为样本总量.

其中纯冰的变异系数根据试验结果和 GB5102—2016^[17]的建议,取值为 0.25,复合冰材料的变异系数根据试验结果同时考虑到复合冰材料的相对稳定性,取值为 0.15,基于试验得到的均值强度,进而得到纯冰与复合冰材料的标准值,见表 6.

表 6 复合冰材料强度标准值

Tab. 6 Reference of standard value of fri MPa

温度/℃	纤维含量/%				
	0	1	2	4	6
-15	2.30	3.44	4.58	5.59	5.98
-5	1.33	1.84	2.84	3.62	4.13

4 结 论

1)纯冰在单轴压缩中呈脆性破坏,相比纯冰而言,复合冰材料的强度明显高于纯冰材料,且变形能力大大增强,其破坏形式是一种延性破坏.

2)复合冰材料的力学性质与纤维含量和温度均相关.复合冰材料的强度和弹性模量都随着温度的升高而降低,当温度为 -5℃ 时,其强度约为 -15℃ 下强度的 53%~65%;峰值应变约为 -15℃

下的 83%~85%;弹性模量约为 -15℃ 下的 62%~76%.在相同温度下,复合冰材料的强度和峰值应变都随着纤维含量的提高而提高,强度可达纯冰强度的 3 倍,峰值应变可达纯冰应变的 3~4 倍;但弹性模量随着纤维含量的提高而减小,弹性模量约为纯冰的 0.6~0.9 倍.

3)基于试验结果,按概率可靠度直接设计法确定了材料强度的标准值,为复合冰结构的设计提供参考.

参考文献

[1] 张屹.中国参与极地开发与治理的前景透视[J].青岛科技大学学报(社会科学版),2016,32(4):75
ZHANG Yi. Perspective of China's participation in polar development and governance[J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology (Social Science Edition), 2016, 32(4): 75

[2] VASILIEV N K, PRONK A D C, SHATALINA I N, et al. A review on the development of reinforced ice for use as a building material in cold regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2015, 115: 56

[3] VASILIEV N K. On development of fibre-ice-composites[J]. Cold Regions Science and Technology, 1993, 21: 195

[4] KOKAWA T. Field experiment of ice dome spanning 20 - 30 meters [J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2012, 12(4): 265

[5] JANSSEN F H M E, HOUBEN R W G. Reinforced ice structures: A research on the building method fort and application of ice composite [D]. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2013

[6] CRUZ P J S, BELIS J. Compressive strength of ice and cellulose-ice composite[M]. London: Taylor & Francis Group, 2016: 348

[7] TABASSUM S. Study of mechanical properties of cellulose reinforced ice[D]. Espoo: Aalto University, 2017

[8] LI J H, WEI Z, WU C. Preparation and properties of novel building materials at low temperature[J]. Materials and Design, 2015, 67: 464

[9] PETRENKO V F, WHITWORTH R W. Physics of ice [M]. London: Oxford University Press, 2010

[10] SCHULSON E M. The structure and mechanical behavior of ice [J]. Journal of the Minerals, Metals & Materials Society, 1999, 51(2): 21

[11] ARAKAWA M, MAENO N. Mechanical strength of polycrystalline ice under uniaxial compression [J]. Cold Regions Science and Technology, 1997, 26(3): 215

[12] BATTO R A, SCHULSON E M. On the ductile-to-brittle transition in ice under compression [J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1993, 41(7): 2219

[13] KERMANI M, FARZANEH M, GAGNON R. Compressive strength of atmospheric ice [J]. Cold Regions Science and Technology, 2007, 49(3): 195

[14] SCHWARZ J. Standardized testing methods for measuring mechanical properties of ice [J]. Cold Regions Science and Technology, 1981, 4: 245

[15] GOLD L W. Some observation on the dependence of strain on stress for ice[J]. Canadian Journal of Physics, 1958, 36: 1265

[16] SCHULSON E M. Brittle failure of ice [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2001, 68: 1839

[17] 冰雪景观建筑技术标准:GB 51202—2016[S].北京:中国建筑工业出版社,2016
Technical standards for building landscape of ice and snow: GB 51202—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016

(编辑 赵丽莹)