

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0013

HONG Jialin, JIAO Fengqi, YING Yonghan, et al. The effect of cyclic loading on the compressive strength of compacted snow[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(1):251-261. [洪嘉琳, 焦凤琪, 应咏翰, 等. 循环载荷对压实雪冰抗压强度的影响研究[J]. 冰川冻土, 2022, 44(1):251-261.]

循环载荷对压实雪冰抗压强度的影响研究

洪嘉琳^{1,2}, 焦凤琪¹, 应咏翰¹, 李金奇¹, 王义超¹, 邵 也¹, 范晓鹏^{2,3,4}

(1. 吉林大学 建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 吉林大学 极地研究中心, 吉林 长春 130026; 3. 吉林大学 地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130026; 4. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 世界强国针对南极科技前沿、地缘政治、开发利用权益的争夺日趋激烈。中国建设和运营南极航空基础设施, 有利于提升中国在南极的综合影响力、扩大南极科学考察规模、满足人员和物资快速投送需求, 因此, 南极机场建设的战略发展价值突出, 而压实雪层跑道是中国在南极建设大型机场路面的首选形式。采用压实雪的方法制备人工冰样, 结合冰雪跑道所承受的飞机载荷特征, 在 $(-10.0 \pm 0.3)^\circ\text{C}$ 温度条件下, 以 1.0 MPa 为平均加载应力, 以 0.03 Hz 为加载频率, 应力幅值为 $0.2\sim 1.0\text{ MPa}$, 循环次数 $100\sim 900$ 为循环条件, 开展在 $1.0\times 10^{-3}\sim 1.0\times 10^{-1}\text{ s}^{-1}$ 应变速率下循环载荷压实雪冰的抗压强度试验, 以及 $5.0\times 10^{-4}\sim 1.0\times 10^{-1}\text{ s}^{-1}$ 应变速率下单调载荷压实雪冰的抗压强度试验。结果表明: 单调载荷下的压实雪冰抗压强度在韧性区内随着应变速率的增加而增加, 在韧性-脆性过渡区达到最大值, 然后在脆性区中显著减少; 在高应变速率和一定循环次数范围内, 循环载荷对压实雪冰的抗压强度具有强化作用; 当超过一定循环次数时, 循环载荷对压实雪冰的抗压强度会产生弱化作用。以上试验结果可为压实雪层跑道的设计和维护提供理论依据。

关键词: 南极; 循环载荷; 单调载荷; 压实雪冰; 抗压强度

中图分类号: U421.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)01-0251-11

0 引言

世界强国针对南极科技前沿、地缘政治、开发利用权益的争夺趋于激烈。目前, 世界各国在南极大陆以及周边所建科学考察站已突破100个, 机场超过50座^[1]。在世界极地科考强国稳步加大南极布局投入的态势下, 中国南极科考有可能被其他国家进一步拉大差距, 重要原因之一是中国未能在南极拥有大型机场。根据中国完成的多次蓝冰区考察结果可知, 在中山站附近建设蓝冰机场的可能性较低, 压实雪层跑道是中国在南极建设大型机场的首选形式^[2]。从美国、俄罗斯此类跑道的压实雪层技术原理可以看出使用人工方式大幅度提高雪层强度是建设雪层跑道的核心技术, 而定期修正冰面

形状维护压实雪层跑道是长期运维南极航空网络的必要条件。压实雪层跑道的累积永久塑性变形主要取决于飞机荷载和人工改造雪层的力学性质。飞机在跑道运行时每次滑行都相当于对地基进行了一次加载卸载作用, 载荷作用的频率与滑行速度有关; 不同机型在起落时对跑道施加的应力幅值有所不同^[3]。因此, 开展冰在循环载荷下的力学特性研究具有重要的实践和理论指导意义。

自然界中大部分海冰或湖冰都在海浪和潮汐作用下承受循环载荷; 人造冰雪路面、跑道或桥梁结构物在使用中受车辆、飞机等电动机械的振荡作用也会承受循环载荷; 此外, 冰具有高透明度和易达到较高的同系温度等特点, 可作为诸如陶瓷等多晶体疲劳裂纹扩展和破坏细观研究的替身。因此,

收稿日期: 2021-07-26; 修订日期: 2021-08-23

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41806220); 冰冻圈科学国家重点实验室开放基金项目(SKLC2020-01); 吉林大学大学生创新创业训练计划(S202110183463)资助

作者简介: 洪嘉琳, 讲师, 主要从事冰物理力学性质研究. E-mail: hjl2398@126.com

通信作者: 范晓鹏, 副教授, 主要从事极地钻探研究. E-mail: heaxe@126.com

在不同频率、应力幅值、平均应力和温度条件下,针对海冰、湖冰、人造淡水柱状冰、人造盐水柱状冰和人造多晶冰等不同类型冰,已经开展了压缩变形、压缩破坏、旋转弯曲、四点弯曲、拉压破坏等不

同类型的实验,探究了循环载荷下冰的疲劳破坏、裂纹扩展机制以及对蠕变特性和强度的影响,表1所示为循环载荷对冰力学性质影响的代表性研究^[4-20]。

表1 循环载荷对冰力学性质影响的代表性研究

Table 1 Representative studies of cyclic loading effect on the mechanical properties of ice

年份	冰的类型	冰样尺寸/mm		晶粒尺寸/ mm	平均应力/ MPa	应力振幅/ MPa	温度/℃	频率/Hz	实验类型
		直径	长度						
1980 ^[4]	海冰	75 或 100	75~200	—	0.49~3.43	0.49~3.43	-2~-24	0.013	压缩变形
1981 ^[5]	人造多晶冰	50.8	127	1.2	1.0~1.5	1.0~1.5	-5	0.043~0.500	压缩变形
1987 ^[6]	人造多晶冰	98.4 或 34.9	209.6	3~8	0	0.24~0.72	-7~-30	2.8	旋转弯曲
1991 ^[7]	人造淡水 S2 柱状冰	50 mm×100 mm×400 mm		2.4	0.4~0.5	0.5~0.8	-5	5	四点弯曲裂纹
1992 ^[8]	人造淡水 S2 柱状冰	80 mm×100 mm×220 mm		4.5	0.25	0.25	-10	0.0167	压缩变形
1995 ^[9]	人造盐水 S2 柱状冰	102	300	3.2~15.5	0	0.1~0.8	-5~-50	0.001~1.000	拉压破坏
1995 ^[10]	人造多晶冰	61.8	150.0	3.24	0.42~1.35	0.084~1.080	-1	0.03~10.00	压缩变形
1997 ^[11]	人造淡水 S2 柱状冰/多晶冰	100 mm×100 mm×400 mm		3.6 或 1.5	0	0.6~1.0	-5	0.01	四点弯曲 裂纹
1998 ^[12]	海冰	100	250~300	1.4~4.5	0	0.1~0.5	-10	0.001~10.000	拉压
2002 ^[13]	人造淡水 S2 柱状冰	152 mm×152 mm×25 mm		4~8	—	—	-10	0.03	双轴压缩 破坏
2006 ^[14]	海冰	100	300	—	0 或 0.2~0.3	0.1~0.3 或 0.2~0.3	-5~-3	0.001~1.000	拉压/压缩
2017 ^[15]	人造盐水 S2 柱状冰	75	175	—	—	—	-10	0.001~0.100	压缩变形
2017 ^[16]	人造淡水 S2 柱状冰	75 mm×13 mm×300 mm		5.5	0	1.3~2.6	-10	0.1	四点弯曲破坏
2020 ^[17]	人造盐水 S2 柱状冰	16 mm×85 mm×300 mm		3.6~3.8	0	0.2~0.7	-10	0.1~0.6	四点弯曲破坏
2020 ^[18]	S2 柱状湖冰	45 mm×100 mm×600 mm		17±3	0.1~0.66	0.1~0.7	-12	0.1	三点弯曲破坏
2020 ^[19]	人造盐水 S2 柱状冰	100 mm×300 mm×600 mm		3.5	0.020~0.125	0.020~0.125	-10.0~-2.5	0.001~1.000	压缩变形
2020 ^[20]	人造淡水 S2 柱状冰	13 mm×75 mm×300 mm		5.5	0.1~2.6	0.1~2.6	-3~-25	0.03~2.00	四点弯曲破坏

综合冰在循环载荷下的力学性质研究现状,目前的研究情况总结如下:(1)就研究对象而言,主要进行了海冰、人造柱状冰和人造多晶冰的试验研究,各实验所使用的冰样尺寸不尽相同,但大多满足高度是直径(宽度)的2倍以上;冰样形状因试验类型而异,拉压和旋转弯曲类实验多为圆柱状,三点或四点弯曲实验多为板状或长柱状;晶粒尺寸为毫米到厘米级别,人造冰样均采用冻水成冰法制成;(2)就研究内容而言,涵盖了冰自身物理特性(如晶体结构类型和盐度等)、环境因素(温度)和试验条件(频率、应力幅值和循环次数等)多个方面对冰裂纹扩展、形变和强度等冰力学性质的影响,其中关于冰疲劳裂纹扩展、蠕变形变和抗弯强度的研究较多,缺乏抗压强度研究。冰在循环载荷下的强度是指在位移或载荷控制模式下,以三角波、梯形波或余弦波等加载形式,在一定频率、平均应力、应力幅值、加载次数和有无围压条件下,测得的强度

极限。现有研究表明,循环载荷对冰强度的影响主要存在循环弱化和循环强化两种观点。循环弱化指冰在循环载荷作用下,会在远低于其强度极限的应力下产生(疲劳)破坏;循环强化指冰在受循环载荷作用后的强度极限高于单调载荷作用下的强度极限。冰在循环弱化作用下,抗弯强度可下降40%^[21],抗压强度可下降25%^[11]。冰在循环强化作用下的抗弯强度,具有温度敏感性,在-3℃到-25℃范围内,随着温度的降低稍有增大;在0.1~2.6 MPa 应力幅值范围内,与应力幅值呈线性正相关;在0.03~2.00 Hz 频率范围内,随着频率的增大稍有增加;在3~7 000 次循环次数范围内,随着次数的增多,先增大,在达到300 次后趋于稳定;尚未针对应变速率敏感性开展研究^[20]。

综上所述,已开展的冰单轴循环压缩载荷试验研究,多为循环载荷对冰形变或蠕变特性的影响,缺乏循环载荷对冰强度的影响研究,更鲜见针对压

实雪所形成的压实雪冰抗压强度研究。人造压实雪层跑道在使用中受车辆、飞机等电动机械的振荡作用,多承受压缩循环载荷;其制作工艺多为夯实积雪,通过增大压力促进雪的压实,提高密度起到密实化作用,进而形成压实雪冰提高冰雪强度,达到所需承载力。因此,有必要开展压实雪冰在循环载荷作用下的单轴抗压强度研究,探究循环载荷对压实雪冰抗压强度影响,为压实雪层跑道的承载力设计和维护奠定理论基础。

1 试验方法

1.1 冰样的制备

南极原位冰具有所含离子和不可溶性粒子浓度较小的特点,试验使用制冷铝排冷凝器上的霜花作为雪颗粒原料。制备人工冰样采用压实雪的方法,雪颗粒在 $-12.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 70 MPa 温压条件下压制 30 min ,所得人工冰样的平均密度为 $0.913\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。以样品长度应为直径的2倍以上为制样准则^[22-23],冰样直径为 26 mm ,高度应控制在 $52\sim 78\text{ mm}$,本试验选用样品的平均高度为 65 mm ,即高径比 2.5 。使用游标卡尺和天平测量冰样的高度和质量各三次并计算冰样密度,将冰样放入自封袋内并标记冰样参数,将冰样放入 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冷柜中低温保存。

1.2 单轴抗压强度试验

南极航空后勤保障常用的飞机类型有C130、C41、C5A、C7A、A320和IL76,其在冰雪跑道上产生轮胎压力范围在 $0.64\sim 1.30\text{ MPa}$ ^[24],以此为参照确定循环载荷实验的平均应力为 1.0 MPa ,应力幅值为 $0.2\sim 1.0\text{ MPa}$ 。已有研究表明,循环载荷的频率在 $0.03\sim 2.00\text{ Hz}$ 范围内对冰的抗弯强度影响相比于循环次数和应力幅值作用不大,本文采用固定频率 0.03 Hz ,以循环次数和应力幅值为研究变量。循环载荷实验采用载荷控制模式,以等幅度三角波为加载波形, 1.0 MPa 为平均加载应力, 0.03 Hz 为加载频率,应力幅值为 0.2 MPa 、 0.5 MPa 、 0.8 MPa 和 1.0 MPa ,循环次数为 100 、 300 、 500 、 700 和 900 为加载条件;单调载荷实验采用位移控制模式,以获得压实雪冰的标准抗压强度,与循环载荷条件下的单轴抗压强度对比。抗压强度试验所选用的应变速率为 $1.0\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ 、 $5.0\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ 、 $1.0\times 10^{-2}\text{ s}^{-1}$ 、 $5.0\times 10^{-2}\text{ s}^{-1}$ 和 $1.0\times 10^{-1}\text{ s}^{-1}$,为与已有研究结果对比,单调载荷实验应变速率增加一组 $5.0\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$,实验温度均为 $(-10.0\pm 0.3)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。表2为压实雪冰单轴抗压强

度试验的设计方案,该试验在低温单轴压缩试验机上进行,试验仪器及冰样如图1所示。

本次压实雪冰单轴抗压强度试验的具体步骤如下:(1)将环境箱温度设置为 $-10.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,并等待其内部温度达到设置温度;(2)从冷柜中取出冰样,放入环境箱内的下压盘中心孔内,保证试样的几何轴线与试验机的中心线重合,防止出现偏心加载的现象。升高下压盘至冰样上端与上压盘距离 1 mm 左右,静置冰样 $20\sim 30\text{ min}$ 使冰样达到 $(-10\pm 0.3)\text{ }^{\circ}\text{C}$;(3)冰样静置的同时,开启试验机测控系统,按自封袋上的样品参数标记查找冰样的高度,而后根据表2所示实验方案设定试验参数,并安装好应变传感器;(4)冰样温度达到试验温度时开始加载,试验首先进入预加载模式,保证样品与压盘之间无间隙,而后再进入加载模式;(5)在试样破坏后,试验机自动停止加载,数据采集系统自动保存数据,调整下压盘至初始位置,迅速开关环境箱门,将破坏的试样尽快取出,减少箱内与箱外空气间的热交换;将破坏的冰样放回自封袋中低温保存,再开始下一次试验。通过试验得到的极限应力作为冰的单轴抗压强度 $\sigma_f(\text{MPa})$,即

$$\sigma_f = F_{\max}/A \quad (1)$$

式中: F_{\max} 为荷载-时间曲线上所达到的最大荷载,单位为N; A 为试样原始横截面积,单位为 mm^2 。

2 试验结果及分析

2.1 压实雪冰单调载荷实验应力与应变关系曲线

相同温度和不同应变速率条件下,压实雪冰单调载荷试验的应力-应变关系曲线及其所对应的破坏照片如图2~3所示,应力-应变曲线是冰在压应力破坏全过程特征的最完整体现,可以全面反映冰破坏前后的力学特征。在本文中,冰的脆性是指受外力作用时,在变形很小时即发生破裂的性质,而韧性则是指冰能够承受较大变形而不丧失其承载力的性质。基于压实雪冰单调载荷试验的应力-应变关系曲线和试样的破坏照片,可以得出:

(1)在 $5.0\times 10^{-4}\sim 5.0\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ 应变速率下,应力会随着应变线性增加,然后增加的速度即斜率,逐渐减小变为零,而后变为负值,应力以圆峰形式达到极值,最大值出现时所对应的应变介于 $1.5\%\sim 3.0\%$ (如图2);试样以鼓胀破坏形式为主,冰样表面存在许多狭小的裂缝,没有明显的主裂缝,试验结束时,样品仍保持完整,不产生剥离的碎块(如图

表2 压实雪冰单轴抗压强度试验方案

Table 2 Uniaxial compressive strength test scheme of compacted snow

序号	加载方式	温度/℃	I 恒速率位移控制	II 循环载荷控制			
			应变速率/s ⁻¹	频率/Hz	平均应力/MPa	应力幅值/MPa	循环次数
1	I	-10.0±0.3	5.0×10 ⁻⁴	—	—	—	—
2	I	-10.0±0.3	1.0×10 ⁻³	—	—	—	—
3	I	-10.0±0.3	5.0×10 ⁻³	—	—	—	—
4	I	-10.0±0.3	1.0×10 ⁻²	—	—	—	—
5	I	-10.0±0.3	5.0×10 ⁻²	—	—	—	—
6	I	-10.0±0.3	1.0×10 ⁻¹	—	—	—	—
7	II +I	-10.0±0.3	1.0×10 ⁻²	0.03	1.0	0.2	100
8	II +I	-10.0±0.3	1.0×10 ⁻²	0.03	1.0	0.5	100
9	II +I	-10.0±0.3	1.0×10 ⁻²	0.03	1.0	0.8	100
10	II +I	-10.0±0.3	1.0×10 ⁻²	0.03	1.0	1.0	100
11	II +I	-10.0±0.3	1.0×10 ⁻³	0.03	1.0	1.0	100
12	II +I	-10.0±0.3	5.0×10 ⁻³	0.03	1.0	1.0	100
13	II +I	-10.0±0.3	5.0×10 ⁻²	0.03	1.0	1.0	100
14	II +I	-10.0±0.3	1.0×10 ⁻¹	0.03	1.0	0.2	100
15	II +I	-10.0±0.3	1.0×10 ⁻¹	0.03	1.0	0.5	100
16	II +I	-10.0±0.3	1.0×10 ⁻¹	0.03	1.0	0.8	100
17	II +I	-10.0±0.3	1.0×10 ⁻¹	0.03	1.0	1.0	100
18	II +I	-10.0±0.3	1.0×10 ⁻²	0.03	1.0	0.5	300
19	II +I	-10.0±0.3	1.0×10 ⁻²	0.03	1.0	0.5	500
20	II +I	-10.0±0.3	1.0×10 ⁻²	0.03	1.0	0.5	700
21	II +I	-10.0±0.3	1.0×10 ⁻²	0.03	1.0	0.5	900
22	II +I	-10.0±0.3	1.0×10 ⁻²	0.03	1.0	1.0	300
23	II +I	-10.0±0.3	1.0×10 ⁻²	0.03	1.0	1.0	500
24	II +I	-10.0±0.3	1.0×10 ⁻²	0.03	1.0	1.0	700
25	II +I	-10.0±0.3	1.0×10 ⁻²	0.03	1.0	1.0	900



图1 低温单轴压缩试验机和冰样

Fig. 1 Low temperature uniaxial compression testing machine and ice sample

注：a 为载荷传感器；b 为低温环境箱；c 为固定上压盘；
d 为可移动下压盘；e 为伺服电机；f 为数据采集系统

a: load sensor; b: low-temperature environment box; c: fixed upper pressure plate; d: movable press disk; e: servo motor;
f: data acquisition system

3)。试样表现出韧性性质,将该应变速率范围称为韧性区。

(2)在 $1.0\times10^{-2}\text{ s}^{-1}$ 应变速率下加载时,应力以稍快的速度增加到一个极值,出现直径相对较小的圆峰,然后逐渐减小,抗压强度出现所对应的应变介于 $1.0\%\sim1.5\%$ (如图2);在 $1.0\times10^{-2}\text{ s}^{-1}$ 应变速率下试样均以劈裂破坏形式为主,表现为存在与加载方向一致并且贯穿上下表面的裂缝,但试样中心未完全破坏,伴有不同尺寸的碎块掉落。试样同时表现出脆性与韧性性质,将该应变速率范围称为脆性-韧性过渡区。应力-应变曲线同时表现出韧性和脆性双重特征的过渡应变速率为 $1.0\times10^{-2}\text{ s}^{-1}$,这与Arakawa等^[25]在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下获得的结果一致。

(3)在 $5.0\times10^{-2}\sim1.0\times10^{-1}\text{ s}^{-1}$ 应变速率下加载时,应力会随着应变快速线性增加到一个极值,然后突然跌落为0,出现一个尖锐峰值,抗压强度出现所对应的应变小于 1% (如图2)。在 $5.0\times10^{-2}\text{ s}^{-1}$ 应

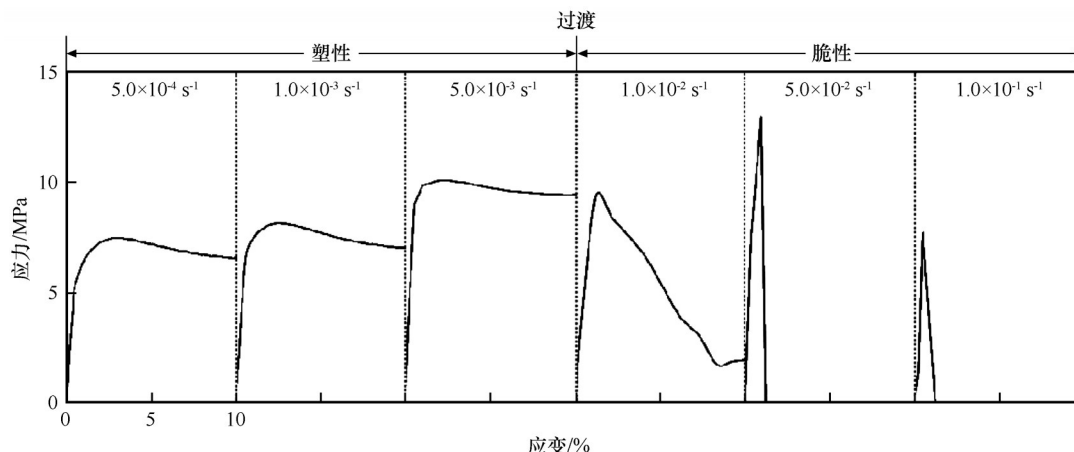


图2 单调载荷不同应变速率条件下压实雪冰的应力与应变关系

Fig. 2 Stress and strain relationship of compacted snow at different strain rates under monotonic load

变速率下试样均以劈裂破坏形式为主,表现为存在与加载方向一致的局部密集裂纹使试样出现崩裂掉块,端部出现完全破碎,伴有不同尺寸的碎块掉落(如图3),随着应变速率的增大,碎块剥落情况更为明显,破碎程度更为剧烈。试样表现出脆性性质,将该应变速率范围称为脆性区。

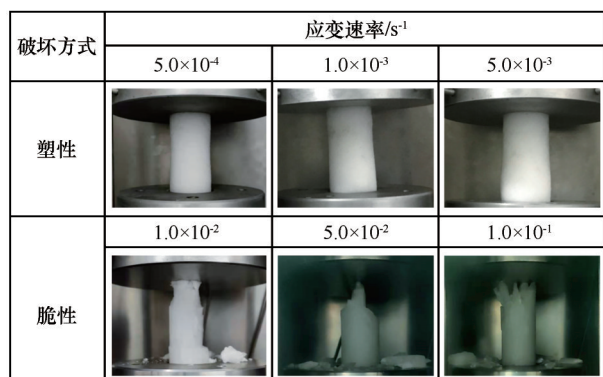


图3 不同应变速率条件下压实雪冰样品在单调载荷作用后的破坏照片

Fig. 3 Damage photos of compacted snow under monotonic loading at different strain rates

2.2 压实雪冰循环载荷试验应力与应变关系曲线

不同应变速率、循环次数和应力幅值条件下循环载荷实验的应力-应变关系曲线如图4所示,循环加载与卸载阶段累计产生的应变随着循环次数和应力幅值的增大而增加。在本次试验条件范围内,循环加载阶段并没有导致冰样破坏。在单调加载阶段,应力以圆峰或较小圆峰的形式达到极值,所有试样均以鼓胀破坏形式为主,试验结束时,样品基本保持完整,几乎不产生剥离的碎块,试样表现出韧性性质。循环载荷对压实雪冰的破坏形式产生了显著的

影响,尤其是在 $1.0 \times 10^{-2} s^{-1}$ 至 $1.0 \times 10^{-1} s^{-1}$ 应变速率范围内,试样由单调载荷作用下的脆-韧性或者脆性破坏特征转变为韧性破坏特征。这说明,循环载荷改变了冰抗压性能对应变速率的敏感性。

2.3 循环次数对压实雪冰在循环载荷作用下单轴抗压强度的影响

压实雪冰在温度为 $(-10.0 \pm 0.3) ^\circ C$, 频率为 0.03 Hz、平均应力为 1.0 MPa、应力幅值为 0.5 MPa 和 1.0 MPa 以及循环次数为 100~900 的循环载荷试验条件下,在 $1.0 \times 10^{-2} s^{-1}$ 应变速率下获得的单轴抗压强度如图5所示,图中灰色虚线为相同应变速率条件下施加单调载荷所获得的抗压强度。由图可知在上述循环载荷作用下,循环加载次数对压实雪冰的抗压强度具有强化或弱化作用;当循环次数为 100、应力幅值为 0.5 MPa 和 1.0 MPa 时,所得抗压强度分别是单调载荷下抗压强度的 1.30 和 1.29 倍,当循环次数为 900、应力幅值为 0.5 MPa 时,所得抗压强度与单调载荷下抗压强度相同,而应力幅值为 1.0 MPa 时其所得抗压强度为单调载荷下抗压强度的 98.8%;压实雪冰的抗压强度与循环次数呈负线性关系,随着循环次数的增加抗压强度不断减小,直至低于单调载荷下的抗压强度;应力幅值的增大会加快强化与弱化作用的转变。图4中的拟合直线表明,在应力幅值为 0.5 MPa 和 1.0 MPa 时,抗压强度 σ_f 与循环次数 N 的线性关系分别为 $\sigma_f = 0.0036N + 13.693$, R^2 为 96.9%; $\sigma_f = 0.0093N + 13.463$, R^2 为 98.9%。当应力幅值为 1.0 MPa 条件下,循环次数达到 900 次时,抗压强度就已经稍低于单调载荷下的抗压强度;当应力幅值为 0.5 MPa 时,根据外推趋势线得出循环次数要将近 1 000 次时,抗压强度会

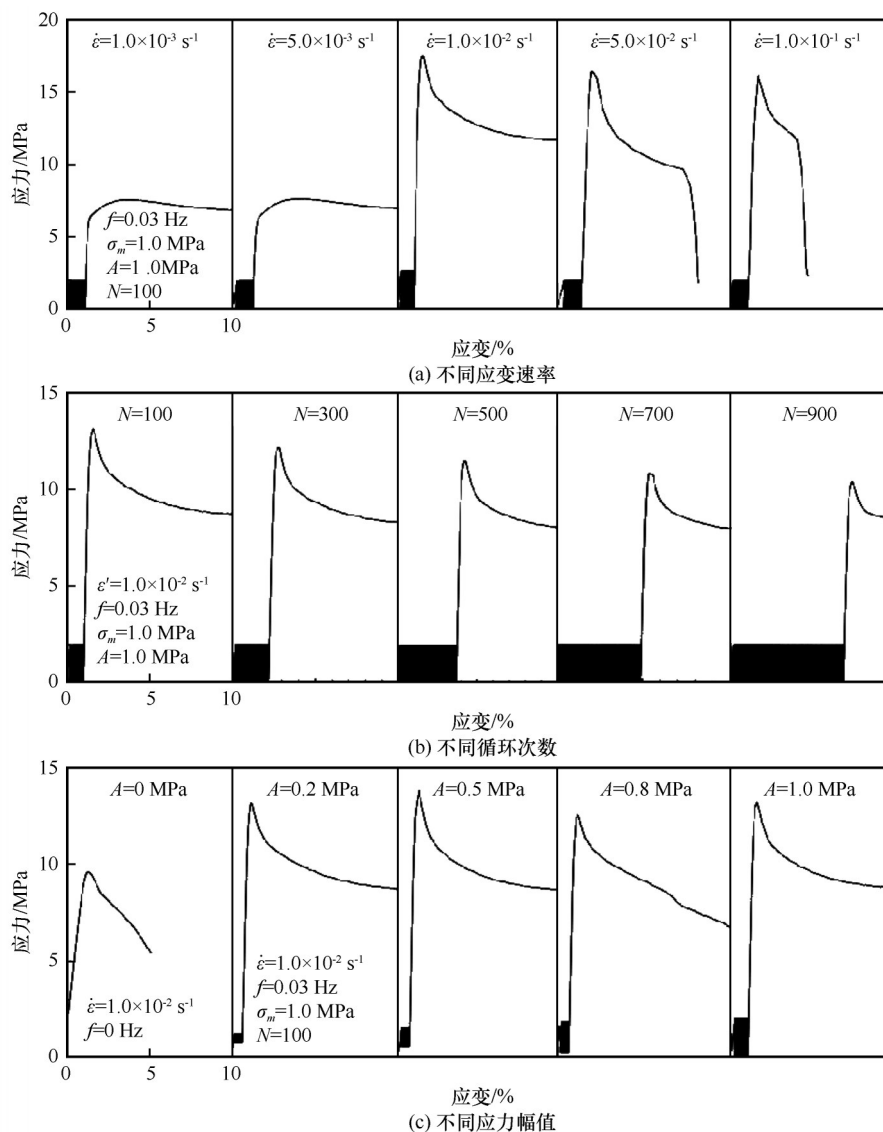


图4 循环载荷压实雪冰的应力与应变关系

Fig. 4 Stress and strain relationship of compacted snow at different strain rates under cyclic loading [different strain rate(a); b-different number of cycles(b); different stress amplitude(c)]

注: 实验温度为 $(-10.0 \pm 0.3)^\circ\text{C}$, A 为应力幅值, f 为频率, $\dot{\epsilon}$ 为应变速率, σ_m 为平均应力, N 为循环次数

Experimental temperature is $(-10.0 \pm 0.3)^\circ\text{C}$, A is stress amplitude, f is frequency, $\dot{\epsilon}$ is strain rate,

σ_m is the average stress, and N is the number of cycles

减小到稍低于单调载荷下的抗压强度。在本文的试验条件范围内,无法判断1~100次循环加载条件下,循环次数对抗压强度的影响规律,尚不能确定使压实雪冰抗压能力强化作用最显著的循环次数,仍需开展更多循环次数的试验,验证循环次数对抗压强度的弱化影响规律。

2.4 应力幅值对压实雪冰在循环载荷作用下单轴抗压强度的影响

压实雪冰在温度为 $(-10.0 \pm 0.3)^\circ\text{C}$ 、频率0.03 Hz、循环次数为100、平均应力为1.0 MPa以及应力幅值在0.2~1.0 MPa的循环载荷试验条件下,在 $1.0 \times$

10^{-2} s^{-1} 和 $1.0 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 应变速率下获得的单轴抗压强度与单调载荷条件下获得的抗压强度如图6所示,虚线为对应应变速率条件下抗压强度最大值与最小值限定的区间。由图可知在相同应变速率条件下,压实雪冰的抗压强度受循环载荷的影响,先大幅增加,而随着应力幅值的增加,其先稍有增大后趋于稳定,由于应力幅值增加而产生的抗压强度增幅并不大;在不同应变速率条件下,高应变速率在循环作用下的抗压强度增幅(11.4 MPa)是低应变速率下的抗压强度增幅(3.1 MPa)的3.68倍。在本文的实验条件范围内,应力幅值对循环载荷作用下

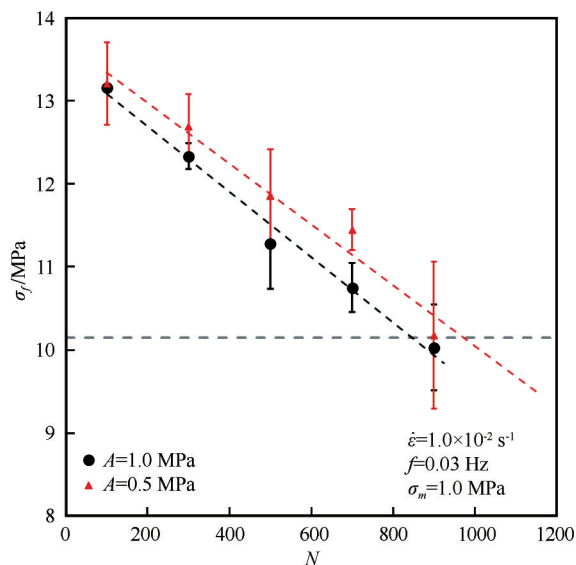


图5 不同循环次数下压实雪冰在循环载荷下的单轴抗压强度

Fig. 5 Uniaxial compressive strength of compacted snow under cyclic load at different cycles

注: 实验温度为 $(-10.0 \pm 0.3)^\circ\text{C}$, A 为应力幅值, f 为频率, $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率, σ_m 为平均应力, N 为循环次数; 图中灰色虚线为相同应变速率条件下单调载荷条件下所获得的抗压强度; 黑色虚线与红色虚线分别为应力幅值在1.0 MPa和0.5 MPa条件下, 表征循环载荷作用下的单轴抗压强度与循环次数间的线性关系拟合线

The experimental temperature is $(-10.0 \pm 0.3)^\circ\text{C}$, A is the stress amplitude, f is the frequency, $\dot{\varepsilon}$ is the strain rate, σ_m is the average stress, N is the number of cycles; The grey dotted line in the figure is the compressive strength obtained under monotonic loading at the same strain rate; the black dotted line and the red dotted line are the fitting lines of the linear relationship between the uniaxial compressive strength and the number of cycles under the cyclic loading when the stress amplitude is 1.0 MPa and 0.5 MPa, respectively

压实雪冰的抗压强度影响并不显著。

2.5 应变速率对压实雪冰在循环载荷作用下单轴抗压强度的影响

压实雪冰在温度为 $(-10.0 \pm 0.3)^\circ\text{C}$, 频率为0.03 Hz、循环次数为100、平均应力为1.0 MPa以及应力幅值在1.0 MPa的循环载荷实验条件下, 在 $1.0 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 应变速率下获得的循环载荷单轴抗压强度与单调载荷条件下获得的抗压强度如图7所示, 压实雪冰在单调载荷下的抗压强度在韧性区内随着应变速率的增加而增加, 在韧性-脆性过渡区达到最大值, 然后在脆性区中显著减少, 这种应变速率敏感性与Yasui等^[26]以及Schulson等^[27]所得出的结论是一致的; 在循环载荷作用下, 在 $1.0 \times 10^{-3} \sim 5.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 的低应变速率条件下, 压实雪冰的抗压强度与单调载荷下的抗压强度相比稍小, 数值上相差不大几乎没有影响, 而在高于 $1.0 \times$

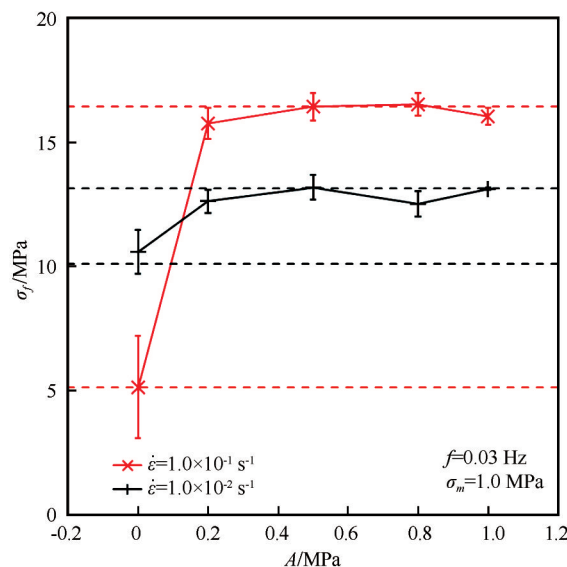


图6 不同应力幅值下压实雪冰在循环载荷下的单轴抗压强度

Fig. 6 Uniaxial compressive strength of compacted snow under cyclic loading at different stress amplitudes

注: 实验温度为 $(-10.0 \pm 0.3)^\circ\text{C}$, A 为应力幅值, f 为频率, $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率, σ_m 为平均应力

The experimental temperature is $(-10.0 \pm 0.3)^\circ\text{C}$, A is the stress amplitude, f is the frequency, $\dot{\varepsilon}$ is the strain rate, and σ_m is the average stress

10^{-2} s^{-1} 的高应变速率条件下, 压实雪冰的抗压强度相比于单调载荷下的抗压强度有了明显的提高, 随着应变速率的增加其增加幅度逐渐变小, 后趋于稳定。循环载荷对压实雪冰抗压强度强化作用, 从试样的破坏形式推断, 是通过延迟韧性-脆性的转变来实现的。在本文的试验条件范围内, 证明了在一定应变速率范围内, 循环载荷对压实雪冰的抗压强度具有强化作用, 但仍需开展更大应变速率范围内的试验, 以确定循环载荷在低应变速率条件下是否存在对压实雪冰抗压强度的弱化作用, 以及在更高应变速率范围内循环载荷对压实雪冰抗压强度的影响规律。

2.6 极限应力的临界应变和循环加载的累积应变

因循环载荷所产生的累积变形与循环条件(循环次数、应力幅值、频率等)有关, 为探究循环载荷对压实雪冰抗压强度对应的临界应变产生的影响, 仅考虑单调加载阶段引起的应变。将达到极限应力即抗压强度时对应的应变 $\Delta\varepsilon$ 定义为单调载荷条件下的临界应变, 将应力达到抗压强度时对应的应变与循环加载结束时对应的应变之差 $\Delta\varepsilon$ 作为循环载荷条件下的临界应变。对比结果如表3所示, 单调载荷与循环载荷(循环次数为100、应力幅值为

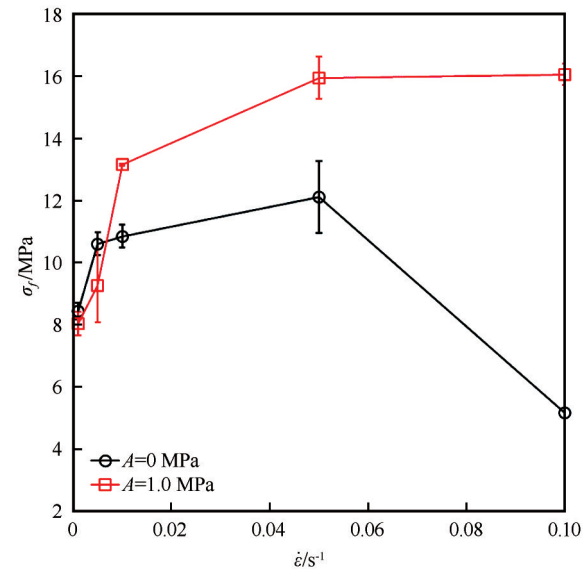


图7 不同应变下压实雪冰在单调载荷与循环载荷下的单轴抗压强度

Fig. 7 Uniaxial compressive strength of compacted snow under monotonic load and cyclic load at different strain rates

注：实验温度为 $(-10.0 \pm 0.3)^\circ\text{C}$ ，应力幅值在单调载荷时为0 MPa，应力幅值在循环载荷时为1.0 MPa，频率为0.03 Hz，平均应力为1.0 MPa，循环次数为100

The experimental temperature is $(-10.0 \pm 0.3)^\circ\text{C}$, the stress amplitude is 0 MPa under monotonic load, the stress amplitude is 1.0 MPa under cyclic loading, the frequency is 0.03 Hz, the average stress is 1.0 MPa, and the number of cycles is 100

1.0 MPa)在应变速率相同时获得的临界应变非常接近,最大标准差为0.32%;在不同应变速率条件下获得的临界应变在韧性破坏阶段具有显著差异,

在脆性破坏阶段浮动较小。当应变速率相同,应力幅值分别为0.5 MPa和1.0 MPa时,相同循环次数条件下获得的临界应变非常接近,最大标准差为0.07%;在不同循环次数条件下获得的临界应变更接近,标准差仅有0.05%。当循环次数相同,应变速率分别为 $1.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 和 $1.0 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 时,在相同应力幅值条件下获得的临界应变具有较为一致的标准差,约为0.11%;在相同应变速率(10^{-2} s^{-1} 或 10^{-1} s^{-1}),不同应力幅值条件下获得的临界应变标准差分别为0.18%和0.03%。基于以上结果分析得出,应变速率对极限应力的临界应变影响较为显著,在本文的试验条件范围内循环载荷对其影响并不明显,仍需进一步试验来确定应变速率是否为临界应变最主要的影响因素。

为探究循环载荷对压实雪冰抗压强度的强化和弱化作用与不同循环条件所产生的累积变形之间的关系,将循环加载结束时的应变 ϵ_c 定义为循环加载的累积应变。如表3所示,循环加载的累积应变在循环次数和应力幅值相同时基本一致(标准差在0.02%~0.13%),并随着循环次数和应力幅值的增加而增大。在本文试验条件范围内,循环载荷对压实雪冰抗压强度产生强化作用的临界条件为循环次数为100、应力幅值为1.0 MPa、应变速率为 $1.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 以及循环次数为100、应力幅值为0.2 MPa、应变速率在 $1.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 或 $1.0 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$,对应的循环加载累积应变分别为0.98%和 $(0.985\% \pm 0.085\%)$;

表3 压实雪冰在单调载荷和循环载荷条件下极限应力对应的临界应变和循环加载的终止应变

Table 3 Critical strain corresponding to ultimate stress and cyclic loading of compacted snow under monotonic load and cyclic load

应变速率/ s^{-1}		循环次数		应力幅值/MPa		$\Delta\epsilon^*$		ϵ_c^*	
1.0×10^{-3}	—	100	—	1.0	2.92%	3.02%	—	1.18%	—
5.0×10^{-3}	—	100	—	1.0	1.39%	2.03%	—	1.19%	—
1.0×10^{-2}	—	100	—	1.0	1.08%	0.80%	—	0.98%	—
5.0×10^{-2}	—	100	—	1.0	0.96%	1.01%	—	1.23%	—
1.0×10^{-3}	—	100	—	1.0	1.10%	0.99%	—	1.20%	—
1.0×10^{-2}	—	100	1.0	0.5	0.80%	0.74%	0.98%	0.82%	—
1.0×10^{-2}	—	300	1.0	0.5	0.82%	0.73%	2.22%	1.76%	—
1.0×10^{-2}	—	500	1.0	0.5	0.77%	0.72%	4.36%	2.38%	—
1.0×10^{-2}	—	700	1.0	0.5	0.72%	0.73%	4.43%	3.64%	—
1.0×10^{-2}	—	900	1.0	0.5	0.79%	0.65%	7.33%	5.05%	—
1.0×10^{-2}	1.0×10^{-1}	100	—	0.2	0.73%	0.96%	0.81%	0.98%	—
1.0×10^{-2}	1.0×10^{-1}	100	—	0.5	0.74%	0.94%	0.82%	0.86%	—
1.0×10^{-2}	1.0×10^{-1}	100	—	0.8	1.17%	0.96%	1.08%	0.95%	—
1.0×10^{-2}	1.0×10^{-1}	100	—	1.0	0.80%	1.02%	0.99%	1.24%	—

注： $\Delta\epsilon^*$ 指极限应力对应的临界应变； ϵ_c^* 指循环加载结束时的终止应变。

循环载荷对压实雪冰抗压强度产生弱化作用的临界条件为应变速率为 $1.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、应力幅值为 1.0 MPa 、循环次数为 900, 对应的循环加载累积应变为 7.33%。基于以上结果可以推测, 循环载荷对压实雪冰抗压强度强化或弱化作用与循环加载累积应变有关, 仍需进一步试验来确定产生强弱化作用的循环载荷临界条件及其对应的临界累积应变。

3 结论

根据中国完成的多次蓝冰区考察结果, 在中山站附近建设蓝冰机场的可能性较低, 压实雪层跑道事实上成为中国在南极建设大型机场的首选形式。建设压实雪层跑道的核心技术原理虽已有总结, 但中国尚未全面掌握该项技术。根据压实雪方法制作人工冰样, 以循环次数、应力幅值和应变速率为主要影响因素, 通过开展在位移控制模式下的单调载荷冰单轴抗压强度试验研究以及载荷控制模式下的循环载荷冰单轴抗压强度试验研究, 分析了循环载荷对压实雪冰单轴抗压强度的影响。实际上, 循环载荷对压实雪冰的抗压强度影响存在强化和弱化作用, 在设计机场运行指挥监测体系时, 应充分考虑执行任务的运输机、客机施加的循环载荷对压实跑道所产生的影响, 在设计和修缮雪冰道面时应结合循环载荷对雪冰抗压强度影响的临界值, 合理提出强度设计指标和维护周期与时段, 避免低估雪冰力学性能造成施工用料浪费或高估其强度疏于维护。结合试验结果及分析, 本文得到主要结论如下:

(1) 单调载荷下的压实雪冰抗压强度在韧性区内随着应变速率的增加而增加, 在韧性-脆性过渡区达到最大值, 然后在脆性区中显著减少。单调载荷下的压实雪冰应力-应变曲线同时表现出韧性和脆性双重特征的过渡应变速率为 $1.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。

(2) 在一定应变速率和循环次数范围内, 循环载荷对压实雪冰的抗压强度具有强化作用; 当超过一定循环次数时, 循环载荷对压实雪冰的抗压强度会产生弱化作用; 应力幅值相比于应变速率和循环次数, 其对抗压强度的影响并不显著, 但会改变其他影响因素产生弱化作用的临界值。在本文的实验条件范围内, 使压实雪冰抗压能力强化作用最显著的循环次数为 100 次; 在高于 $1.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 的高应变速率条件下循环载荷对压实雪冰抗压强度开始有强化作用。

(3) 循环载荷对压实雪冰抗压强度强化作用, 从试样的破坏形式推断, 可能是通过延迟韧性-脆性的转变来实现的; 循环载荷对压实雪冰抗压强度弱化作用, 可能是疲劳破坏引起的。在本文的实验条件范围内, 尚不能确定使压实雪冰抗压能力强化作用最显著的循环次数、循环次数对抗压强度的弱化影响规律, 循环载荷在低应变速率条件下是否存在对压实雪冰抗压强度的弱化作用, 以及在更高应变速率范围内循环载荷对压实雪冰抗压强度的影响规律。

参考文献(References):

- [1] COMNAP Antarctic Facilities List Council of Managers of National Antarctic Programs [EB/OL]. (2017-03-31) [2021-04-20]. https://static1.squarespace.com/static/61073506e9b0073c7eaaf464/t/611497cc1ece1b43f0eeca8a/1628739608968/COMNAP_Antarctic_Station_Catalogue.pdf.
- [2] Sun Bo, Tang Xueyuan, Xiao Enzhao, et al. Ice and snow runway engineering in the Antarctica: Current status and prospect [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(2): 161-168. [孙波, 唐学远, 肖恩照, 等. 南极机场冰雪跑道工程技术发展现状与展望[J]. 中国工程科学, 2021, 23(2): 161-168.]
- [3] Wang Xiaojian. Study on the long-term deformation characteristics of the frozen soil foundation under the dynamic load of the aircraft [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2018: 19-20. [王肖江. 飞机动荷载作用下跑道冻土地基长期变形特性研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2018: 19-20.]
- [4] Tabata T, Nohguchi Y. Failure of sea ice by repeated compression [M]//Tryde P. Physics and Mechanics of Ice. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1980: 351-362.
- [5] Mellor M, Cole D. Cyclic loading and fatigue in ice [J]. Cold Regions Science and Technology, 1981, 4(1): 41-53.
- [6] Nixon W A, Smith R A. The fatigue behavior of freshwater ice [J]. Le Journal De Physique Colloques, 1987, 48 (C1): C1-329.
- [7] Nixon W A, Weber L J. Fatigue-crack growth in fresh-water ice: Preliminary results [J]. Annals of Glaciology, 1991, 15: 236-241.
- [8] Derradji-Aouat A. Mathematical modelling of monotonic and cyclic behavior of polycrystalline freshwater ice [D]. Canada: University of Ottawa, 1992: 26-32.
- [9] Cole D M, Durell G D. The cyclic loading of saline ice [J]. Philosophical Magazine A, 1995, 72(1): 209-229.
- [10] Huang Maohuan, Li Gang, Zhang Jiayi, et al. Experimental study of ice deformation under cyclic loading [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1995, 17 (Suppl 1): 101-105. [黄茂桓, 李纲, 张家懿, 等. 振动荷载下冰的变形实验研究[J]. 冰川冻土, 1995, 17(增刊1): 101-105.]
- [11] Weber L J, Nixon W A. Fatigue of freshwater ice [J]. Cold Regions Science and Technology, 1997, 26(2): 153-164.
- [12] Cole D M, Johnson R A, Durell G D. Cyclic loading and creep response of aligned first-year sea ice [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1998, 103(C10): 21751-21758.
- [13] Iliescu D, Schulson E M. Brittle compressive failure of ice: Monotonic versus cyclic loading [J]. Acta Materialia, 2002, 50 (8): 2163-2172.

- [14] Cole D, Dempsey J. Laboratory observations of acoustic emissions from Antarctic first-year sea ice cores under cyclic loading [C]//18th International POAC Conference. 2006, 3: 1083-1092.
- [15] Heijkoop A N. Sea ice subjected to cyclic compression: laboratory experiments and a dislocation based model [D]. Netherlands: Delft University of Technology, 2017: 35-52.
- [16] Iliescu D, Murdza A, Schulson E M, et al. Strengthening ice through cyclic loading [J]. *Journal of Glaciology*, 2017, 63 (240): 663-669.
- [17] Murdza A, Schulson E M, Renshaw C E. Behavior of saline ice under cyclic flexural loading [J]. *The Cryosphere*, 2021, 15 (5): 2415-2428.
- [18] Murdza A, Marchenko A, Schulson E M, et al. Cyclic strengthening of lake ice [J]. *Journal of Glaciology*, 2021, 67 (261): 182-185.
- [19] Wei Mingdong, Polojärvi A, Cole D M, et al. Strain response and energy dissipation of floating saline ice under cyclic compressive stress [J]. *The Cryosphere*, 2020, 14(9): 2849-2867.
- [20] Murdza A, Schulson E M, Renshaw C E. Strengthening of columnar-grained freshwater ice through cyclic flexural loading [J]. *Journal of Glaciology*, 2020, 66(258): 556-566.
- [21] Langhorne P J, Squire V A, Fox C, et al. Break-up of sea ice by ocean waves [J]. *Annals of Glaciology*, 1998, 27: 438-442.
- [22] 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 (3): 245-253.
- [23] Zhang Dachang, Liu Mingyuan, Bao Tao. Experimental study on mechanical properties of fresh water ice subjected to uniaxial compressive load [J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28 (7): 238-244. [张大长, 刘明源, 包涛. 淡水冰单轴受压力学特性的试验研究 [J]. *工程力学*, 2011, 28(7): 238-244.]
- [24] White G, McCallum A. Review of ice and snow runway pavements [J]. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2018, 11(3): 311-320.
- [25] Arakawa M, Maeno N. Mechanical strength of polycrystalline ice under uniaxial compression [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1997, 26(3): 215-229.
- [26] Yasui M, Schulson E M, Renshaw C E. Experimental studies on mechanical properties and ductile-to-brittle transition of ice-silica mixtures: Young's modulus, compressive strength, and fracture toughness [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2017, 122(8): 6014-6030.
- [27] Schulson E M, Duval P. Creep and fracture of ice [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2009: 239-241.

The effect of cyclic loading on the compressive strength of compacted snow

HONG Jialin^{1,2}, JIAO Fengqi¹, YING Yonghan¹, LI Jinqi¹,

WANG Yichao¹, SHAO Ye¹, FAN Xiaopeng^{2,3,4}

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China; 2. Polar Research Center, Jilin University, Changchun 130026, China; 3. College of Earth Exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China; 4. State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The competition among world powers for the frontier of Antarctic science and technology, geopolitics, development and utilization rights is becoming increasingly fierce. The construction and operation of Antarctic aviation infrastructure in China is conducive to enhancing China's comprehensive influence in the Antarctic, expanding the scale of Antarctic scientific investigation and meeting the needs of rapid delivery of personnel and materials. Therefore, the strategic development value of Antarctic airport construction is prominent, and compacted snow runway is the preferred form of large airport pavement in Antarctic construction in China. Artificial ice samples were prepared by the method of compacted snow. Combined with the aircraft load characteristics of ice and snow runways, under the temperature of $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, with 1.0 MPa as the average loading stress, 0.03 Hz as the loading frequency, the stress amplitude of 0.2~1.0 MPa, and the cycle number of 100~900 as the cycle conditions, the compressive strength test of compacted snow ice under cyclic loading at the strain rate of $1.0\times 10^{-3}\sim 1.0\times 10^{-1}\text{ s}^{-1}$, and the compressive strength test of compacted snow ice under monotonic loading at the strain rate of $5.0\times 10^{-4}\sim 1.0\times 10^{-1}\text{ s}^{-1}$. The results show that the compressive strength of compacted snow ice under monotonic loading increases with the increase of strain rate in the ductile region, reaches the maximum in the ductile-brittle transition region, and then decreases significantly in the brittle region. In the range of high strain rate and a certain number of cycles, the cyclic load has a strengthening effect on the compressive strength of compacted snow ice. When more than a certain number of cycles, the cyclic load will weaken the compressive strength of compacted snow ice. The test results obtained in this paper can provide a theoretical basis for the design and maintenance of compacted snow track.

Key words: antarctic; cyclic load; monotonic load; compaction of snow; the compressive strength

(责任编辑: 温智)