

冷冻温度对适航测试冰雹力学性能影响

葛鑫, 张丽芬, 刘振侠
(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 为研究航空飞行器透明外壳测试标准 (ASTM-F320-2010) 中含棉冰雹及航空发动机吸雹测试中纯冰冰雹的力学性能, 设计并制作冰雹模具。以自然冰雹冷冻温度为准, 采用不同冷冻温度制取冰雹并在万能试验机中对冰雹进行压缩, 得到了冰雹的准静态抗压强度数据及冷冻温度与冰雹力学性能间关系。结果表明, 冷冻温度在 $-10\sim-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变化时, 纯冰冰雹平均抗压强度略有提高, 约为 2 MPa , 而含棉冰雹平均最大抗压强度在该温度区间内并没有表现出明显地温度相关性; 冷冻温度下降至 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, 两种冰雹的平均抗压强度都有上升, 冷冻温度对纯冰冰雹影响更加剧烈, 纯冰冰雹上升更加显著; 提出可将 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 制作地测试冰雹加入我国未来商用航空发动机及民用大飞机适航测试试验考虑范围。

关 键 词: 人工冰雹; 适航审定; 准静态压缩测试; 冰雹冷冻温度; 冰雹抗压性能

中图分类号: V321.24 **文献标志码:** B

Effect of freezing temperature on mechanical properties of hail in airworthiness test

GE Xin, ZHANG Lifen, LIU Zhengxia
(School of Power and Energy,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to study the mechanical properties of cotton-containing hail in the test standard for transparent enclosures of aviation aircrafts (ASTM-F320-2010) and pure ice hail in aero-engine hail suction test, the hail mold was designed and manufactured. Based on natural hail freezing temperature, the hails were made in different temperatures and compressed in a universal testing machine. The quasi-static compressive strength data and the relationship between the freezing temperature and the mechanical properties were obtained. Results showed that the average compressive strength of pure ice hail increased slightly about 2 MPa when the freezing temperature changed from $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$; meanwhile the average maximum compressive strength of cotton-containing hail did not show significant change within this temperature range; the temperature dropped to $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, the average compressive strength of both hail increased significantly, and pure ice hails were more sensitive to temperature, and the rise was more significant. It is proposed that the test hail produced at $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ can be added to the consideration of the airworthiness test of future commercial aviation engines and large civil aircraft in China.

Key words: artificial hail; airworthiness certification; quasi-static compression test; hail freezing temperature; hail compressive strength property

收稿日期: 2019-12-28
作者简介: 葛鑫(1996—), 男, 硕士生, 主要从事航空发动机滑油系统研究。

引用格式: 葛鑫, 张丽芬, 刘振侠. 冷冻温度对适航测试冰雹力学性能影响[J]. 航空动力学报, 2020, 35(8): 1744-1751. GE Xin, ZHANG Lifen, LIU Zhengxia. Effect of freezing temperature on mechanical properties of hail in airworthiness test[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(8): 1744-1751.

飞行器的飞行安全一直是航空飞行器设计工作者最为关注的问题,当飞机不可避免地遭遇到冰雹气候时,就需要飞机在设计之初具有承受冰雹撞击的能力,主要体现在飞机外部机身结构及飞机发动机不会因冰雹撞击造成较为严重的机械损伤和停车等严重后果^[1]。

针对上述问题,国内外制定了各种标准对航空飞行器进行地面冰雹测试。美国提出 ASTM-F320 标准,在 2010 年进行修订,该标准旨在对航空飞行器透明附件进行测试,目前已在其他机身附件测试得到延伸^[2-4]。我国在 2002 年修订《航空发动机适航审定》中加入条款 33.78 作为发动机吸雹测试^[5]。不同结构所用测试标准冰雹并不相同,对飞行器透明外壳及其他外部机身附件采用 ASTM-F320 标准的含棉冰雹,而对航空发动机吸雹测试,一般采用纯冰冰雹。两种测试冰雹主要成分都为冰,而冰的冷冻温度对冰的力学性能影响显著。研究表明,冰的冷冻温度从 0~-40℃,冰的抗压强度提高约 4 倍,但拉伸强度仅增加 1.3 倍,冷冻温度与冰的晶体滑动现象有很大的关系^[6-7]。对不同温度下制作的冰柱进行准静态测试表明,冰可以看作一种脆性材料,冰柱的抗压强度与冰的冷冻温度呈负相关性^[8-12]。冰还是一种对应变率较为敏感的材料,在较低应变率下冰具有一定的韧性,应变率高于 10⁻⁴/s 时大多数冰会发生韧脆转变^[13-15]。可见,针对冰的冷冻温度问题,国内外已经做了一定的研究。但对于测试冰雹来说,含棉冰雹中不仅含有冰,还有一定的棉纤维,棉纤维对冰的影响是显著的^[16-17]。纯冰冰雹虽然本质为纯冰,但由于是球体,并不能判断冷冻温度对其抗压强度的影响。所以对于冷冻温度对测试冰雹力学性能的影响,还要进一步开展较为深入的研究。

本文结合自然冰雹冷冻温度 0~-40℃^[18],采用模具法在-10、-20、-30、-40℃分别冷冻制作直径为 25 mm 两种类型的测试冰雹,之后在低温万能试验机测试冰雹的准静态力学性能,探索了两种冰雹在不同冷冻温度下的力学特性。结果表明:含棉冰雹抗压强度对冷冻温度的敏感性较低,纯冰冰雹敏感性较高;两种冰雹在冷冻温度为-40℃的抗压强度比其他冷冻温度的抗压强度显著提升,提出可以将-40℃制成的冰雹加入适航取证测试试验的考虑范围。试验结论与数据对我国大飞机适航审定及适航标准的制定提供参考。

1 冰雹试验

1.1 冰雹制备

根据本次试验目的,结合 ASTM-F320-2010 标准,设计如表 1 所示的冰雹样本,以 25 mm 直径冰雹为代表,每组工况样本不少于 5 个,制作过程中于恒温箱中制备,保持温度基本不变。

表 1 测试样本
Table 1 Test sample

冰雹直径/mm	棉纤维质量/g	含棉质量分数/%
25	0	0
	442	6
	884	12

分别在冷冻温度 $t = -10, -20, -30, -40^{\circ}\text{C}$ 下制备冰雹样本,试验冰雹样本使用模具法制作。如图 1 所示:上半模具顶部开有注水孔,两半模具之间与螺栓连接,模具中间设置定位销孔,可保持制作过程中模具一一对齐,模具材料为表面涂特氟龙的不锈钢制成,保证较高的导热效率同时,使模具内表面较为光滑、平整。

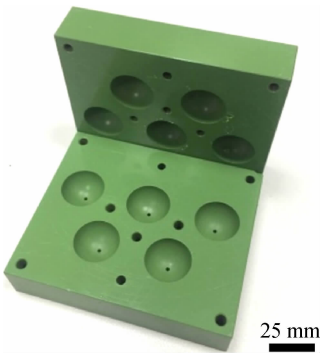


图 1 模具图
Fig. 1 Stencil drawing

含棉冰雹填充物为医用脱脂棉,如图 2 所示。基本制雹流程如下:使用高精度天平称量棉纤维,将称好的棉纤维均匀撕开,放入模具中,然后向模具中注入蒸馏水,将注水后的模具放入水中浸泡 5 min,消除模具空腔中的气泡,将模具表面擦干放入事先调好温度的恒温箱,冷冻 24 h 后取出模具,放于常温空气中 15~20 min 使冰雹表面与模具脱离,打开模具取出冰雹,选取表面无裂缝和没有明显缺陷的冰雹如图 3 所示。



图 2 医用棉纤维
Fig. 2 Medical cotton fibers

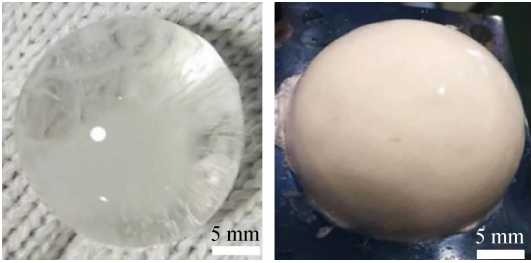


图 3 25 mm 直径纯冰冰雹及含棉冰雹
Fig. 3 25 mm diameter pure ice hail and cotton-containing hail

1.2 试验设备

试验机采用 WDW-20 微机控制低温万能试验机,如图 4 所示,最大载荷为 20 kN,载荷精度为±0.01%,测量精度在示值的±0.5%以内,位



图 4 低温试验万能试验机
Fig. 4 Universal testing machine for low temperature test

移分辨率高达 0.000 1 mm,试验控速范围为 0.001~500 mm/min,可分段控制,最大行程为 1200 mm,两压杆之间装设一个低温箱,一般情况下,整个压缩过程在-20℃下进行,避免由于冰雹融化而影响测试结果。

1.3 试验方法

试验前,将装有不同含棉量水的模具分别在-10,-20,-30,-40℃冷冻,保持冷冻时间相同,都为 24 h,制备不同含棉量的人工冰雹,选取表面无明显裂缝的冰雹,放于低温万能试验机进行试验,试验前,开启低温箱,使箱内温度及夹板温度低至-20℃。本次试验保证试验机箱内温度低于 0℃,试验加载速度保持在 15 mm/min,应变率 ϵ 定义为

$$\epsilon = \frac{V}{D} \tag{1}$$

式中 V 为万能试验机加载速率; D 为冰雹直径。本次试验应变率为 0.01 s^{-1} 。

2 试验结果分析

2.1 不同冷冻温度下纯冰冰雹力学性能

图 5 为纯冰冰雹破碎瞬间状态图,纯冰冰雹在压缩过程中在很小的位移内就发生断裂,可以看作完全脆性球体。冰雹最重要的一个力学性能为它的最大抗压强度,使用 Russell 和 Wood^[19] 研究得到的完全脆性球体压缩强度解析式来估算抗压强度,纯冰的泊松比为 0.325,压缩方程归纳为

$$\sigma_c \approx 0.44 \frac{F_0}{\pi r^2 \sin^2 \theta_0} \tag{2}$$

式中 F_0 为加载力, θ_0 为与接触面积有关的角度, r 为球的半径, σ_c 为纯冰冰雹抗压强度,其关系可以用图 6 表示。

图 7 为不同冷冻温度下 25 mm 直径纯冰冰

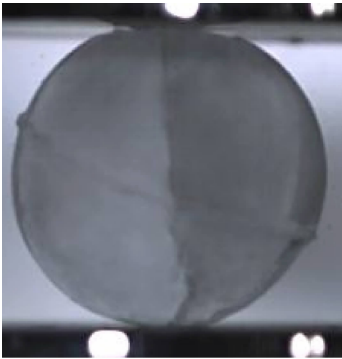


图 5 纯冰冰雹破碎瞬间状态
Fig. 5 Instant state of pure ice hail breaking

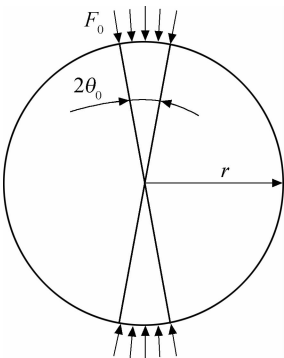


图 6 压力预估参数图解^[19]

Fig. 6 Schematic diagram of pressure estimation parameters^[19]

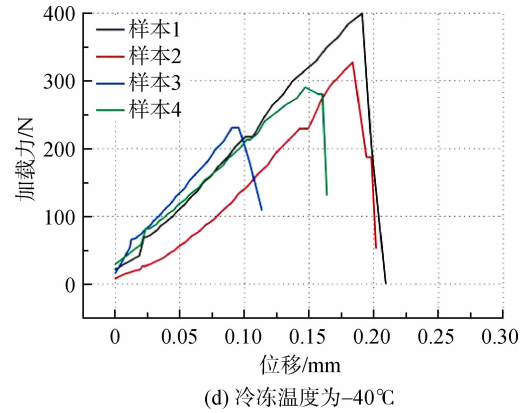
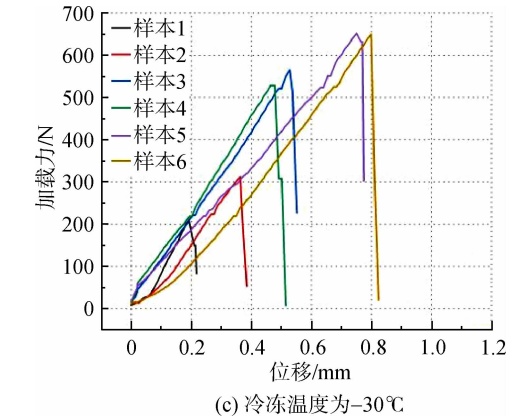
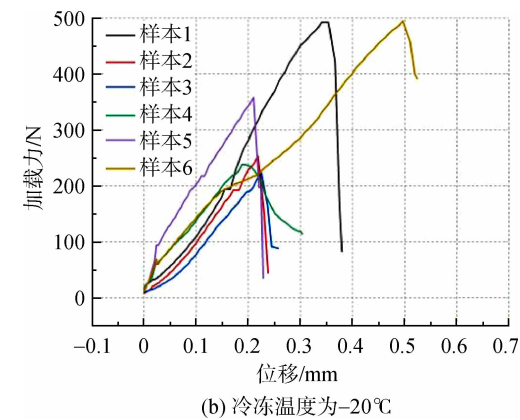
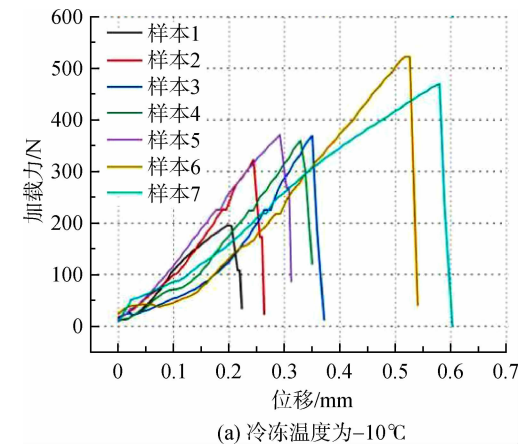


图 7 不同冷冻温度纯冰冰雹加载力-位移曲线图
Fig. 7 Curves of loading force-displacement of pure ice hail at different freezing temperatures

雹试验所得数据,对不同冷冻温度下的纯冰冰雹压缩曲线,可以看出纯冰冰雹在很小的变形下,发生断裂破坏。也可以看出,相同冷冻温度下每组样本一致性较差,这是因为本次试验所采用的的模具为刚性模具,在纯冰冰雹形成过程中,模具势必会对冰雹造成挤压。冰雹脱模过程中,由于应力释放,冰雹内部会形成很细微裂纹,而表面裂纹到表面裂缝出现是加载位移图峰值的关键,所以很难保持冰雹在位移载荷图一致。

从纯冰冰雹位移-加载力曲线较难分析出冷冻温度对其力学性能的影响。故将原始数据代入式(2)中,估算纯冰冰雹在不同冷冻温度下抗压强度,并作散点图,结果如图 8 所示。可以看出:从平均抗压强度来看,纯冰冰雹估算抗压强度和冷冻温度呈负相关性,在冷冻温度为-10~-30℃时,所测 25 mm 纯冰冰雹的估算抗压强度范围在 5~15 MPa 间,而且随着冷冻温度的降低,平均抗

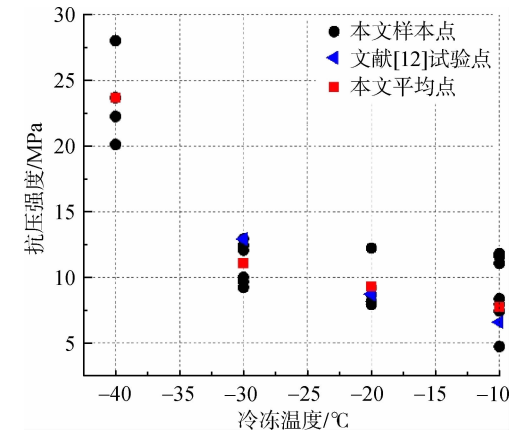
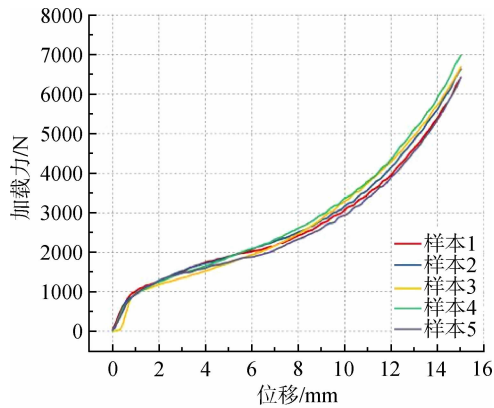


图 8 抗压强度与冷冻温度的关系($\epsilon=0.01\text{ s}^{-1}$)
Fig. 8 Relationship between compressive strength and freezing temperature ($\epsilon=0.01\text{ s}^{-1}$)

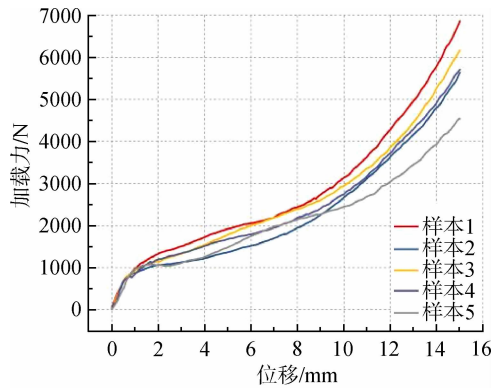
压强度逐渐增大,整体上升较为平缓,但在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,纯冰冰雹的估算抗压强度明显增大,且涨幅较大。冷冻温度为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰雹的平均抗压强度比冷冻温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的抗压强度提升了大约 4 倍,这与 Hayes^[6]的结论基本一致。将本文中数据与张永康等^[12]所做的同等温度、相同应变率下冰柱的抗压强度对比,可以看出, -10 、 -20 、 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 数据基本一致。这说明对于脆性球体,采用上述方法估算抗压强度可行,本次试验的估算抗压强度数据具有一定可靠性。

2.2 不同冷冻温度下含棉冰雹力学性能

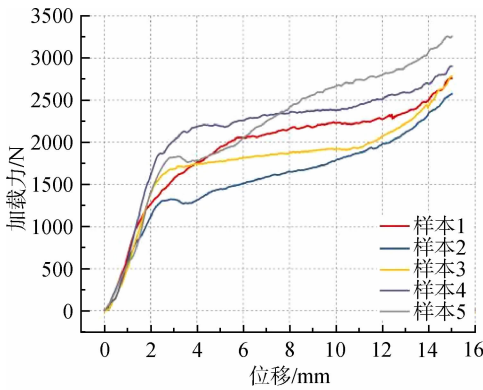
保持与纯冰冰雹相同的加载速率,不同冷冻温度下含棉质量分数为 6%、12% 的冰雹的压缩曲线如图 9、图 10 所示,对比发现,含棉质量分数为 6% 的冰雹在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 较低冷冻温度下,样本数据的离散度提高,但基本趋势一致。曲线可分为 3 个阶段,第 1 阶段线弹性增长阶段,该阶段位移很小,但加载力增长较快;第 2 阶段较为平缓的屈服阶段,位移变化较大,但加载力增长较小;第 3 阶段冰雹失效阶段,该阶段冰雹破裂。冰雹加入棉纤维后离散性大大降低,且含棉质量分数为 12% 比含棉质量分数为 6% 的冰雹一致性好。为方便对比各工况冰雹力学性能的变化,由



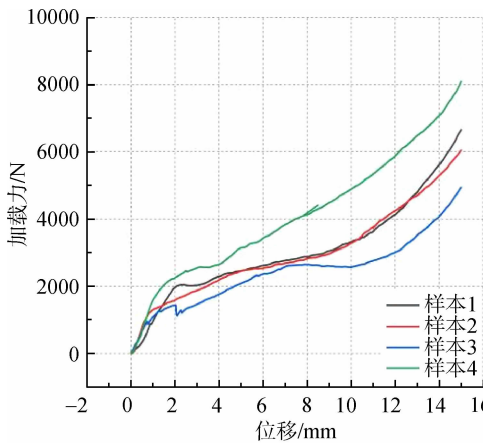
(a) 冷冻温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$



(b) 冷冻温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$



(c) 冷冻温度为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$

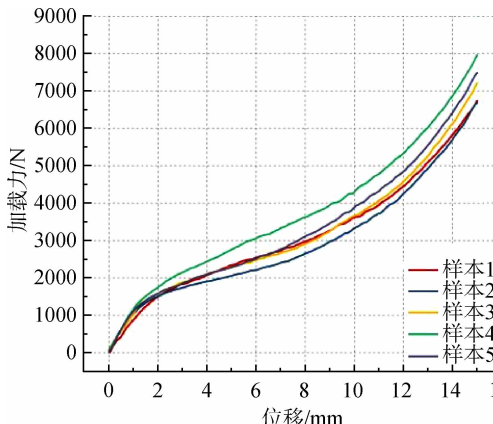


(d) 冷冻温度为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$

图 9 6% 含棉质量分数的冰雹不同冷冻温度下的加载力-位移曲线图

Fig. 9 Loading force-displacement curves of 6% mass fraction cotton-containing hail at different freezing temperatures

于本次试验每组样本采点的位移值不同,不能直接平均,所以使用移动平均法对每一组样本数据进行处理。移动平均法处理后的曲线如图 11、图 12 所示,该曲线可以综合每个工况样本的位移-加载力数据,可以直观地反映各冷冻温度下冰雹力学性能的变化。



(a) 冷冻温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

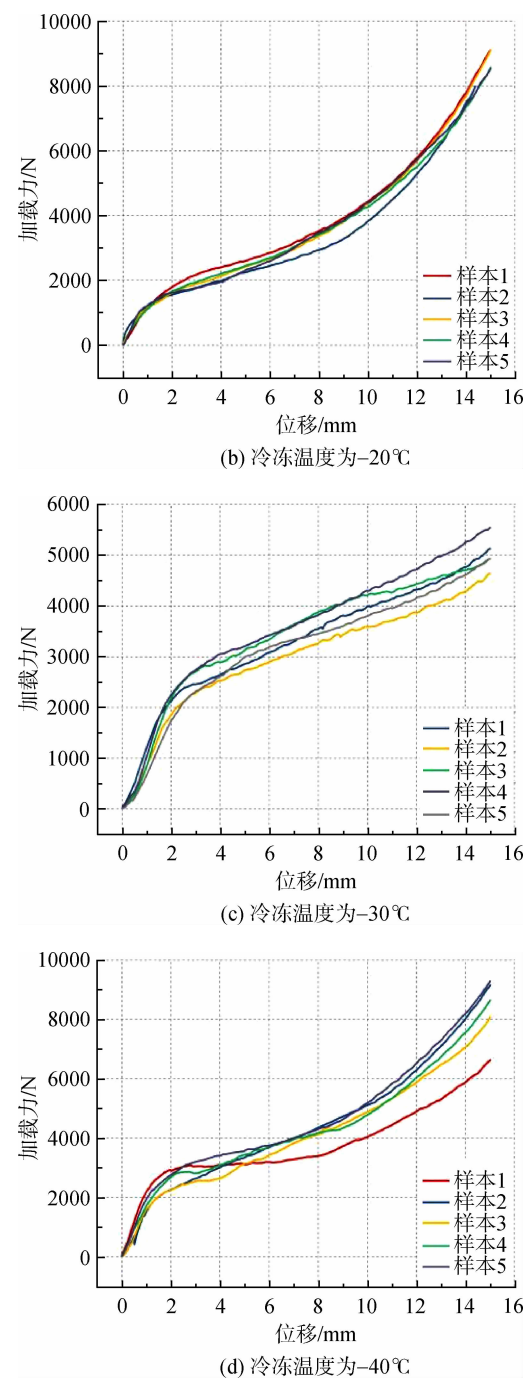


图 10 12%含棉质量分数冰雹不同冷冻温度下
加载力-位移曲线

Fig. 10 Loading force-displacement curves of 12% mass fraction cotton-containing hail at different freezing temperatures

由曲线数据分析可知,随着冷冻温度的降低,曲线线性增长阶段的最大加载力提高,在-30℃冷冻温度下,含棉冰雹屈服阶段增长。图 13 为含棉冰雹压缩过程中的状态图,可以看出在压缩过程中随着位移的增大,含棉冰雹的截面积也在增大,用下式估算含棉冰雹抗压强度,并作位移-抗压强度图,如图 14、图 15。

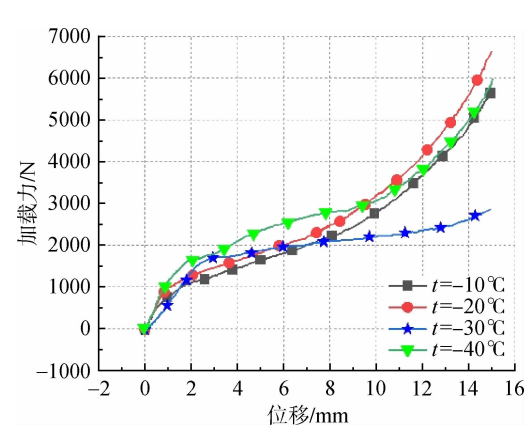


图 11 6%含棉质量分数冰雹不同冷冻温度下平均
加载力-位移曲线

Fig. 11 Mean loading force-displacement curves of 6% mass fraction cotton-containing hail at different freezing temperatures

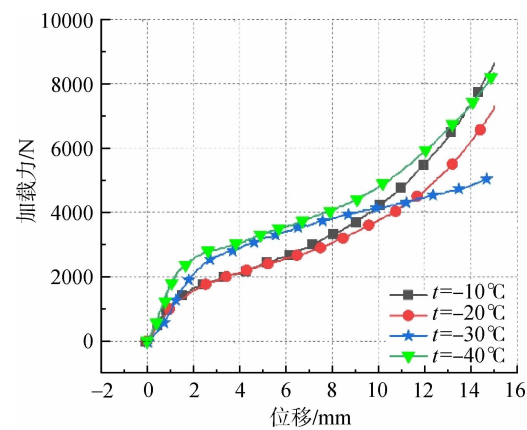


图 12 12%含棉质量分数冰雹不同冷冻温度平均
加载力-位移曲线

Fig. 12 Mean loading force-displacement curves of 12% mass fraction cotton-containing hail at different freezing temperatures

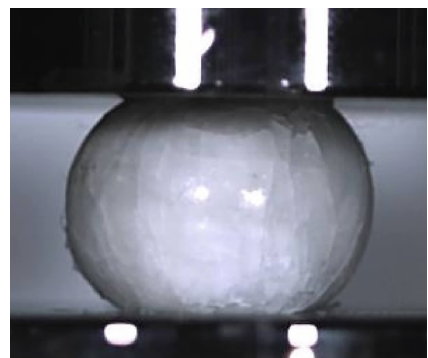


图 13 含棉冰雹压缩状态

Fig. 13 Compression state of cotton-containing hail

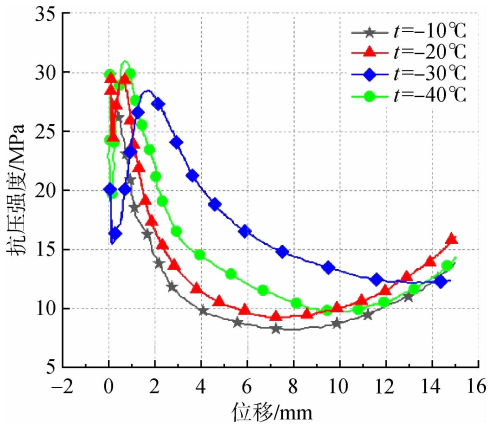


图 14 6%含棉质量分数冰雹位移-抗压强度
Fig. 14 Displacement-compressive strength of 6% mass fraction cotton-containing hail

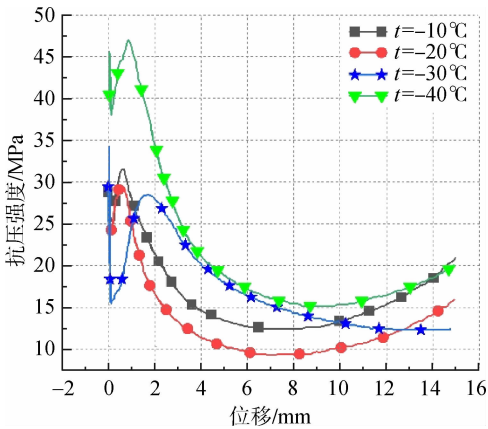


图 15 12%含棉质量分数冰雹位移-抗压强度
Fig. 15 Displacement-compressive strength of 12% mass fraction cotton-containing hail

$$S = \pi \left(rx - \frac{1}{4} x^2 \right) \quad (3)$$

$$\delta_c = \frac{F}{S} \quad (4)$$

式中 S 为截面积, x 为单向位移, δ_c 为含棉冰雹抗压强度。

从位移-抗压强度图可以看出:首先,6%含棉质量分数和12%含棉质量分数冰雹在冷冻温度为 $-10\sim-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间最大抗压强度没有表现出冷冻温度相关性,抗压强度基本不变,范围在25~35 MPa之间。冷冻温度降至 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,12%含棉质量分数冰雹抗压强度有了显著的增长,最大抗压强度可达45 MPa,而6%含棉质量分数冰雹增加较少。其次,结合位移-抗压强度曲线可以看出含棉冰雹最大抗压强度点出现在线性增长阶段的终点,即含棉冰雹在线弹性阶段与屈服阶段临界点。

3 结 论

本文基于 ASTM F320-2010 标准结合自然冰雹冷冻温度,对 25 mm 直径纯冰冰雹,含棉质量分数为 6%、12% 的含棉冰雹在不同冷冻温度下的压缩力学性能进行试验研究,结论如下:

1) 纯冰冰雹平均抗压强度随着冷冻温度的降低而增大,冷冻温度在在 $-10\sim-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,平均抗压强度增加量相对较小,约为 2 MPa,冷冻温度降低至 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均抗压强度明显增大,增加量可达 17 MPa。

2) 冷冻温度在 $-10\sim-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变化时,含棉冰雹抗压强度没有表现出明显的温度相关性,抗压强度几乎不变,冷冻温度降至 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$,12%含棉质量分数冰雹抗压强度有明显增加,可达 15 MPa。含棉冰雹最大抗压强度出现在线弹性阶段末端。

3) 对于两种不同的测试冰雹,可将冷冻温度为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 制成的冰雹作为适航测试补充。在我国未来大飞机适航测试及航空发动机吸雹试验中,本文数据可作为范围参考。

本文中冰雹的压缩试验研究为准静态试验,应变率比实际撞击试验低很多,所以本次试验可做实际撞击试验先行测试,试验数据可做为范围参考与定性分析,不同尺寸冰雹的准确的高速撞击强度数据需进一步研究。

参考文献:

[1] FIELD P R, HAND W. Hail threat standardisation[R]. European Aviation Safety Agency, EASA-REP-RESEA-2008-5, 2008.

[2] ASTM. Standard test method for hail impact resistance of aerospace transparent enclosures; ASTM F320-1994 [S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 1994: 1-7.

[3] ASTM. Standard test method for hail impact resistance of aerospace transparent enclosures; ASTM F320-2010 [S]. West Conshohocken, PA, US: ASTM International, 2010: 1-7.

[4] 刘有丹. 民机复材结构适航设计要求和符合性方法初探[J]. 航空标准化与质量, 2012, 12(1): 8-12.

LIU Youdan. Preliminary study on airworthiness design requirements and compliance methods of civil aircraft composite material structure[J]. Aviation Standardization and Quality, 2012, 12(1): 8-12. (in Chinese)

[5] 中国民用航空总局. 中国民用航空总局关于修订《航空发动机适航标准》的决定[EB/OL]. [2019-11-27]. http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/MHGZ/201511/t20151102_8523.html, 2020.

[6] HAYES F D. Effecet of temprature on the strength of snow-ice[J]. Corps of Engineers,1978,45:78-27.

[7] SCHULSON E M. The structure and mechanical behavior of ice[J]. Feature Overview,1999,12(15):21-27.

[8] 张辽远,陈浩,姚俊. 人造柱状冰特性的研究[J]. 实验力学,2011,26(1):73-75.
ZHANG Liaoyuan, CHEN Hao, YAO Jun. Study on the characteristics of artificial columnar ice[J]. Experimental Mechanics,2011,26(1):73-75. (in Chinese)

[9] 徐洪宇,赖远明,于文兵. 人造多晶冰三轴压缩强度特性试验研究[J]. 冰川冻土,2011,25(10):1120-1124.
XU Hongyu, LAI Yuanming, YU Wenbin. Experimental study on triaxial compressive strength characteristics of artificial polycrystalline ice[J]. Glacial Frozen Soil,2011,25(10):1120-1124. (in Chinese)

[10] 张大长,刘明远,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.
ZHANG Dachang, LIU Minyuan, BAO Tao. Experimental study on uniaxial compression characteristics of freshwater ice[J]. Engineering Mechanics,2011,28(7):238-244. (in Chinese)

[11] 张丽敏,李志军,贾青. 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.
ZHANG Liming, LI Zhijun, JIA Qing. Experimental study on uniaxial compressive strength of artificial freshwater ice[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2009,40(11):1392-1396. (in Chinese)

[12] 张永康,李玉龙,汤忠斌. 冰在低温下的单轴压缩力学行为和破坏机制[J]. 固体力学学报,2018,39(5):531-538.
ZHANG Yongkang, LI Yulong, TANG Zhongbin. Mechanical behavior and breaking mechanism of uniaxial compression of ice at low temperature[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics,2018,39(5):531-538. (in Chinese)

[13] 岳前进,任晓辉,陈巨斌. 海冰韧脆转变实验与机理研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2005,13(1):35-42.
YUE Qianjin, REN Xiaohui, CHEN Jubin. Experimental and mechanism study on the tough and brittle transition of sea ice[J]. Journal of Basic Science and Engineering,2005,13(1):35-42. (in Chinese)

[14] SCHULSON E M, DUVAL P. Creep and fracture of ice [M]. London:Cambridge University Press,2009:101-152.

[15] 任晓辉. 冰的脆韧转变行为研究[D]. 辽宁 大连:大连理工大学,2005.
REN Xiaohui. Research on brittle-ductile transition behavior of ice[D]. Dalian Liaoning, Dalian University of Technology,2005. (in Chinese)

[16] 徐曼,陈勇,王安正. ASTM F320-2010 标准冰雹的抗压力学性能实验研究[J]. 科学技术与工程,2016,16(16):290-294.
XU Man, CHEN Yong, WANG Anzheng. Experimental study on the anti-stress performance of ASTM F320-2010 standard hail [J]. Science Technology and Engineering,2016,16(16):290-294. (in Chinese)

[17] 黄兴. 含棉纤维冰的抗压性能试验[J]. 河南科技大学学报,2016,37(6):1-4.
HUANG Xin. Compressive property test of cotton-containing fiber ice[J]. Journal of Henan University of Science and Technology,2016,37(6):1-4. (in Chinese)

[18] 雨顺. 冰雹概论[M]. 北京:科学出版社,1978.

[19] RUSSELL A R, WOOD D M. Point load tests and strength measurements for brittle spheres[J]. International Journal of Mechanical and Sciences,2009,46(2):272-280.

(编辑:叶 青、陈 越)