

冷冻温度对层状冰雹电力学性能的影响*

石膏鹏^{1,2}, 方姜路^{1,3}, 解江^{1,2*}

(1. 民航航空器适航审定技术重点实验室, 天津 300300;

2. 中国民航大学科技创新研究院, 天津 300300;

3. 中国民航大学安全科学与工程学院, 天津 300300)

摘要: 为阐明层状结构对冰雹电力学性能的影响机制, 揭示不同冷冻温度下冰雹电力学性能的变化规律, 采用自制模具制备了直径为 50 mm 的透明冰雹及具有明显层间结构的层状冰雹, 利用万能试验机, 在不同冷冻温度 (-10、-20、-30、-40 °C) 下对透明冰雹和层状冰雹进行准静态压缩试验, 并结合微观结构观测, 分析其破坏机制。结果表明, 随着冷冻温度的降低, 透明冰雹和层状冰雹的抗压强度均显著提高, 层状冰雹对温度变化更为敏感, 在 -40 °C 时的平均抗压强度比 -10 °C 时提升约 6 倍, 而透明冰雹提升约 4 倍。层状冰雹在破坏时呈现多裂纹破坏, 而透明冰雹则是单一主裂纹破坏。层状冰雹的层间结构富含气泡, 该结构可改变裂纹方向, 从而提升其抗压强度。研究结果可为层状冰雹的制备及其后续力学行为研究提供基础。

关键词: 层状结构冰雹; 抗压强度; 温度效应; 准静态压缩试验

中图分类号: V216; O521.9

文献标识码: A

冰雹撞击具有高动能、短时强冲击的特性, 能够对飞机雷达罩、风挡玻璃、机翼前缘、发动机进气口等关键部位造成损伤, 轻则产生表面凹坑, 影响气动性能; 重则导致复合材料层合板分层、纤维断裂, 甚至击穿飞机蒙皮。自然界中的冰雹为多层结冰体, 如图 1 所示, 由透明与不透明的冰层相间交替组成^[1-2]。冰雹透明层与不透明层的形成机制主要取决于过冷水滴被雹块捕获后的冻结速率, 该速率受环境温度与液态水含量共同调控。在低温或低含水量条件下, 过冷水滴撞击雹块后发生瞬时冻结, 冰中空气溶解度较低且气泡未能及时逸出, 形成富含气泡的不透明冰层。高温或高含水量条件下, 水滴累积速率接近或超过冻结速率, 缓慢冻结过程促使气泡充分逸散, 从而形成低气泡含量的透明冰层。



图 1 层状冰雹的多层样貌^[1]

Fig.1 Multilayer construction of layered hail^[1]

*收稿日期: 2026-03-12; 修回日期: 2026-05-12

作者简介: 石膏鹏 (1987—), 男, 博士, 副教授, 主要从事民机结构冲击防护与民机客舱安全研究.

E-mail: xpshi@cauc.edu.cn

通讯作者: 解江 (1982—), 男, 博士, 教授, 主要从事航空器结构强度与客舱安全适航技术研究.

E-mail: xiejiang5@126.com

美国材料试验协会 (ASTM) 于 1994 年针对航空飞行器飞行材料冰雹撞击试验提出 ASTM F320-1994 标准^[3], 2021 年第二次修订为 ASTM F320-2021 标准^[4]。标准中采用含棉冰雹模拟自然冰雹, 并规定了含棉冰雹的各种标准参数, 如表 1 所示, 目前已成为制备人工冰雹的标准。然而, 自然界中的冰雹是由透明与不透明的冰层相间交替组成, 与 ASTM 规定的含棉冰雹存在差异, 学者们已经通过含棉冰雹的准静态试验研究了其力学性能^[5-10], 而关于层状冰雹的试验和研究仍然较少, 对层状冰雹的研究具有重要的工程意义。

表 1 冰雹标准化参数

Table 1 Standardization of ice balls

| Parameter | | | | Tolerance |
|-----------------------|---------------|-------------|--------------|-----------|
| Ice Ball Size/in (mm) | 0.5 (13) | 1.0 (25) | 2.0 (51) | |
| Weight/lb (g) | 0.0023 (1.0) | 0.018 (8.2) | 0.146 (66.4) | ±5% |
| Filler Weight/lb (g) | 0.0003 (0.14) | 0.0022 (1) | 0.0176 (8) | ±30% |
| Temperature/°C | -18 | -18 | -18 | |

Combesure 等^[11-14]开展了多组透明冰和低密度冰的高速冲击试验, 发现当冰雹的速度大于 180 m/s 时, 冰雹冲击力主要由其本身的形状和质量决定。Kim 等^[15-16]通过在一个分形球中进行不同方向的浇注得到了平行层状冰, Kim 首次制备了层状冰球, 但并未制备出符合实际情况的层状结构。谭晓军等^[17]首次制备了层状冰雹, 通过高速冲击试验研究了透明冰雹和层状冰雹致损能力的差异, 研究发现, 在高速撞击下测得的层状冰雹撞击力要高于单一性状冰雹。该研究提出了细线定位法制备了层状冰雹, 但研究使用的制冰模具较难制备出透明的外层冰雹, 且研究并未覆盖层状冰雹静态力学性能。罗刚等^[18]将密度作为区分层状冰雹与透明冰雹的重点, 将低密度冰作为自然界的层状冰, 通过高速冲击试验研究了高密度冰 (透明冰雹) 和低密度冰 (层状冰雹) 的动态响应和失效行为, 试验结果表明低密度冰的撞击响应显著低于同等质量或直径的高密度冰。该研究仅仅考虑了密度对层状冰雹的影响, 通过自制模具压实冰粉末来制备不同密度冰, 无法形成冰雹内部的层状结构。

为阐明层状结构对冰雹力学行为的影响机制, 并揭示不同冷冻温度下其冰雹力学性能的变化规律, 本文结合 ASTM F320-2021 标准规定的冰雹尺寸, 采用自制模具制备直径为 50 mm 的透明冰雹和层状冰雹; 在不同冷冻温度下开展了透明冰雹和层状冰雹的压缩试验并对其力学性能进行对比分析; 通过实验影像和冰雹切片显微观察明确了层状冰雹和透明冰雹不同的破坏模式, 并给出了可能导致发生不同破坏模式的原因, 为层状冰雹力学行为的深入研究提供实验数据支持。

1 实验

1.1 试件制备

根据 ASTM F320-2021 的尺寸要求, 设计了用于制备透明冰雹的专用模具 (直径 50 mm), 在冰雹制备过程中, 空气的排出并非仅由浮力决定, 而是同时受到冻结界面推进方向、模具几何结构以及空气聚集行为的共同影响。实验室使用的冰雹模具, 若采用向上排气方式, 随着冻结过程的进行, 水中的空气容易在模具上部及冻结末端区域聚集, 从而导致冰雹试样上部形成明显的含气泡区域, 影响冰雹试样的纯净度和内部均匀性。相比之下, 若采用向下排气的模具设计, 可以更好地协调气泡迁移路径与定向冻结过程, 促使气体在冻结界面推进过程中被及时引导并排出模具, 减少其在成型末端区域的滞留。实验结果表明, 该方法更有利于获得气泡含量较低、内部结构更均匀的纯净冰雹试样, 模具实物如图 2 所示。冰雹模具分为硅胶模具、储水盒、保温箱三个部分。硅胶模具用来制备 50 mm 大冰雹; 储水盒与硅胶模具之间留出一定空间, 目的是在冻结过程中向下排出硅胶模具中的空气, 使气泡聚集在储水盒下部。保温箱由泡沫材料制成, 其主要作用是提供良好的单向热传导条件, 使模具中的纯净水由上向下单向冻结。

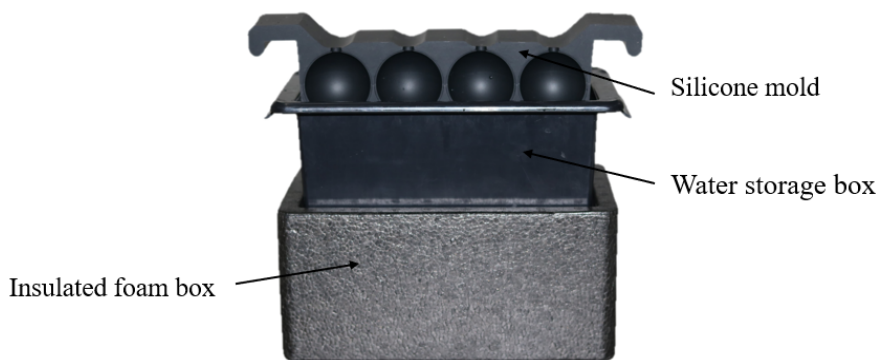


图2 冰雹制备模具

Fig.2 A mold for production of hail

制备透明冰雹时，向储水盒内注入纯净水，待水位到达储水盒刻度线后，把硅胶模具缓慢放入储水盒中，储水盒中的水会慢慢没过硅胶模具，直到硅胶模具完全置入储水盒后，将储水盒放入保温箱中。擦拭干净模具表面，放置于恒温保温箱中冷冻 24 h 以上。制备完成的冰雹如图 3 所示。

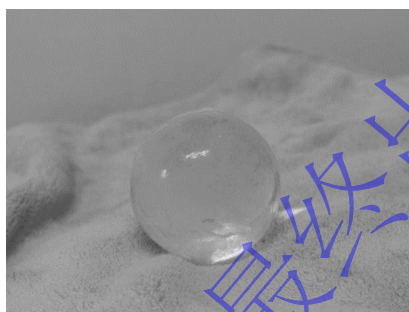


图3 50 mm 透明冰雹

Fig.3 50 mm pure hail

在上述直径 50 mm 透明冰雹（外层大冰雹）制备方法的基础上，本文进一步开发了层状冰雹的制备工艺。层状冰雹的制备分为三个阶段：内层小冰雹制备、内层小冰雹的定位、二次冻结。本文借鉴陈思宇制作透明冰雹的方法，设计了如图 4 的直径为 25 mm 的内层小冰雹制备模具^[19]。将预先制得的外层大冰雹置于上下模具之间，由于模具的热传导，外层大冰雹融化，并在导向柱引导和顶盖自重作用下逐渐形成一个的标准球形，大约 1 min 后，顶盖完全压实，取出内层小冰雹，放入恒温箱保存 10 h，以备后续使用。



图4 25 mm 冰雹制备模具

Fig.4 A mold for production of 25 mm hail

另取一个外层大冰雹，通过削冰刀切割约四分之一（约为 12.5 mm）作为固定内层小冰雹的底座，切割时间不超过 1 min。从恒温箱取出内层小冰雹，放置在冰底座的中心位置。图 5 为本文层

状冰雹的定位方法，在低温环境下，冰与冰之间通过一层薄水膜作为介质时，会快速重结晶并牢固结合。粘连着冰底座的内层小冰雹放入硅胶模具中冻结，同样由于水膜的作用，冰底座会固定在硅胶模具中，冻结时间大约为 30 s。待冰底座与硅胶模具结合牢固后，沿着储水盒边缘缓慢地注入纯净水，直至注满。将硅胶模具完全浸没于储水盒中，随后将储水盒置于保温泡沫箱内，擦拭表面后放入恒温箱，按前述透明冰雹制备方法冷冻 24 h 直至完全凝固。整个制备流程的实验室温度为室温，冰雹在室温下 2 min 内并不会发生融化。

图 6 为层状冰雹剖视图，在此单向冻结过程中，内层小冰雹周围的温度率先达到冰点，导致其周围的气泡因无法及时向下排出而被迅速冻结，从而包裹在内层小冰雹周围，形成了气泡层。该方法既能保证内层小冰雹在冻结过程中不融化，又能真实模拟层状冰雹中透明层与不透明冰层相间的自然结构。

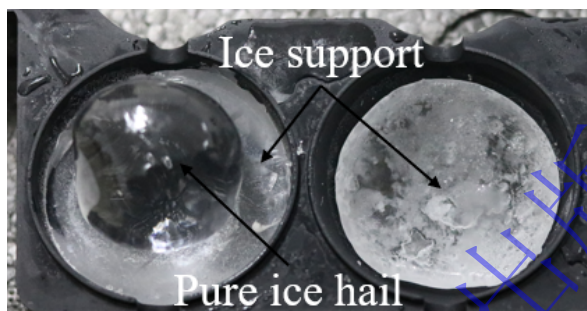


图 5 层状冰雹的定位方法

Fig.5 Positioning method for hail preparation

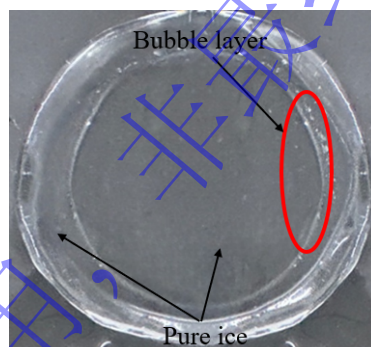


图 6 层状冰雹剖视图

Fig.6 Cutaway view of layered hail

1.2 试验方法

试验机采用 LE5000 系列微机控制电子万能试验机，试验控速为 500 mm/min。研究表明^[20]若实验在 120 s 内完成，试件的温度变化不会对试验的结果产生较大影响。为了保证试验数据的准确性，本研究的试验均在 120 s 内完成。应变率 $d\varepsilon/dt$ 定义为

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{V_{\text{head}}}{D} \quad (1)$$

式中： V_{head} 为试验机压头速率； D 为冰雹直径。试验应变率为 0.17 s^{-1} 。

2 试验结果与结论

2.1 冷冻温度对透明冰雹力学性能的影响

冰雹的最大抗压强度，使用 Russell 和 Wood 研究^[21]得到的完全脆性球体压缩强度解析式来估算抗压强度，压缩方程归纳为：

$$\sigma_c \approx 0.44 \frac{F_0}{\pi r^2 \sin^2 \theta_0} \quad (2)$$

式中： σ_c 为透明冰雹抗压强度， 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，图7为脆性球体压缩示意图。

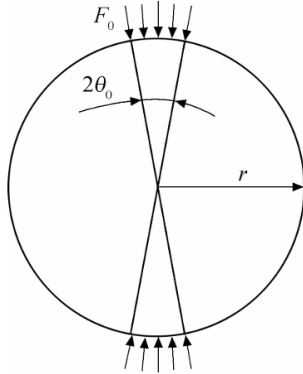


图7 脆性球体压缩示意图

Fig.7 Schematic diagram of compression of brittle spheres

图8为不同温度下透明冰雹的载荷—位移曲线，利用式(2)计算得到不同温度下透明冰雹的抗压强度，结果及误差范围如图9所示。由于在制备过程中试样内部微观结构差异仍难以完全避免，同时冰雹试样在转移及加载过程中还会受到表面结霜、局部融化及附着冰屑等因素影响，从而使试验结果的波动性能较大。透明冰雹抗压强度和冷冻温度呈负相关关系，平均抗压强度随着冷冻温度的降低而升高。当冷冻温度在-10~-30℃时，抗压强度上升趋势缓慢；当温度降至-40℃时，其抗压强度显著增大，较-10℃的抗压强度提升了大约4倍。该变化趋势与葛鑫研究结论^[9]基本一致。

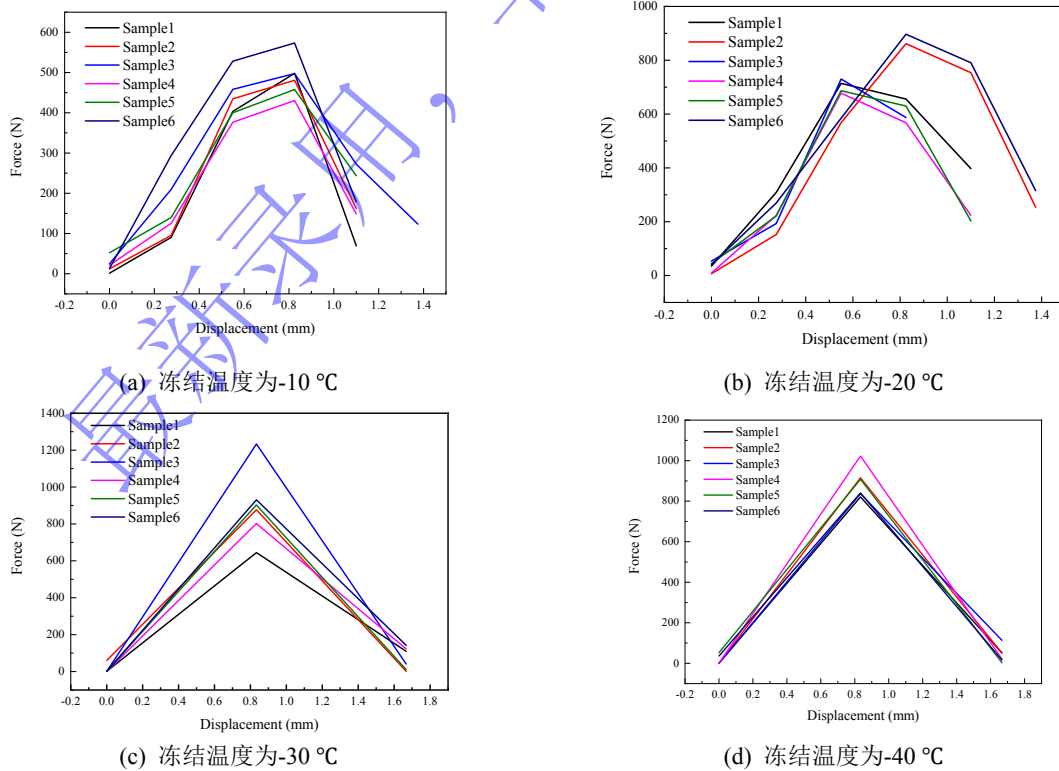


图8 透明冰雹的载荷—位移曲线

Fig.8 Loading-displacement curves of transparent hail

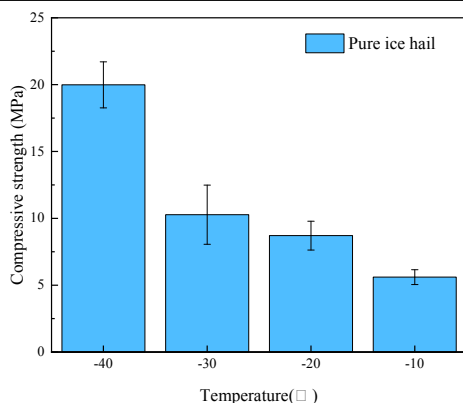


图9 冷冻温度对透明冰雹抗压强度的影响

Fig.9 The influence of freezing temperature on compressive strength of hail

2.2 冷冻温度对层状冰雹力学性能的影响

为了对比透明冰雹与层状冰雹差异，试验应变率为 0.17 s^{-1} ，图 10 为不同冷冻温度下层状冰雹的载荷—位移曲线。层状冰雹的抗压强度随冷冻温度的降低呈现明显的负相关关系。试验结果显示，50 mm 层状冰雹的抗压强度分布于 6~40 MPa 之间。随着冷冻温度下降，其平均抗压强度逐渐增大，且整体增长趋势较为显著。

图 11 为两种不同冰雹在不同冷冻温度下抗压强度的变化情况，当冷冻温度由 -10°C 降至 -40°C 时，层状冰雹的平均抗压强度增幅约为 6 倍。对比层状冰雹和透明冰雹抗压强度与冷冻温度的关系，在 -10°C 时，层状冰雹与透明冰雹的平均抗压强度相差不多，在 5~10 MPa 之间，而随着温度下降，层状冰雹的平均抗压强度明显增大，且涨幅较大，涨幅明显大于透明冰雹。冷冻温度降至 -40°C 时，层状冰雹的抗压强度增长最为显著，最大抗压强度可达 31 MPa。

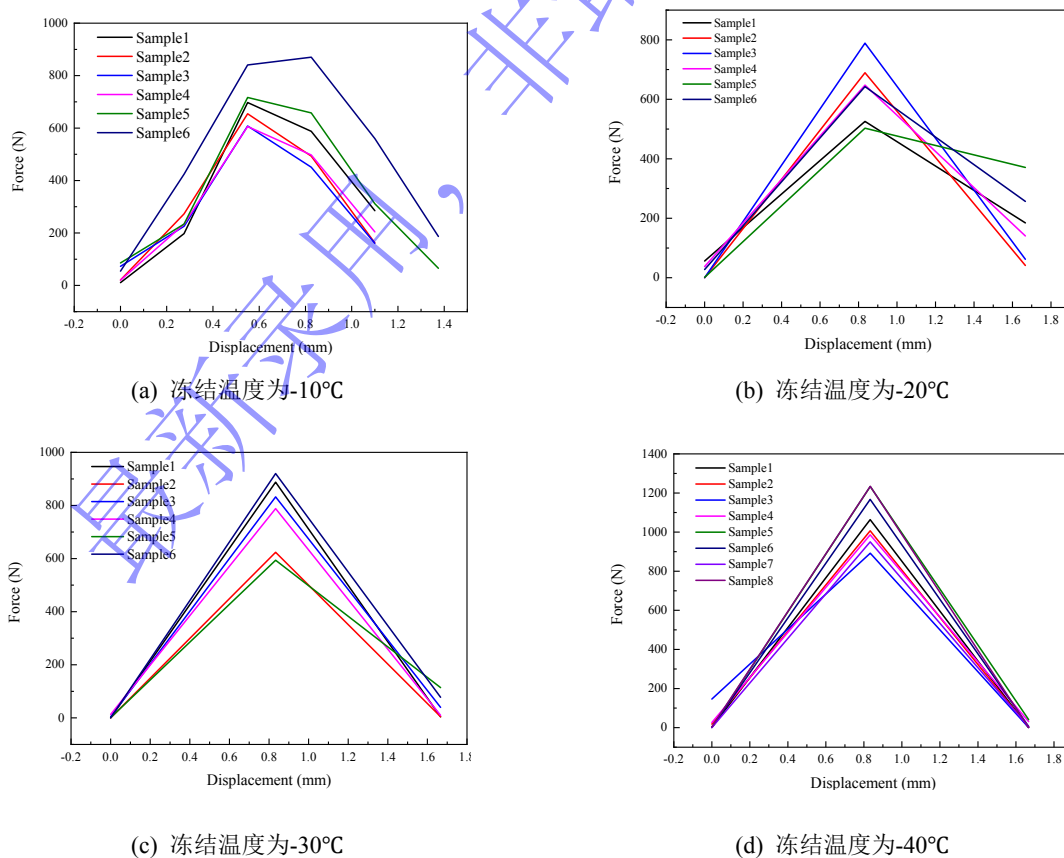


图 10 层状冰雹的载荷—位移曲线

Fig.10 Loading-displacement curves of layered hail

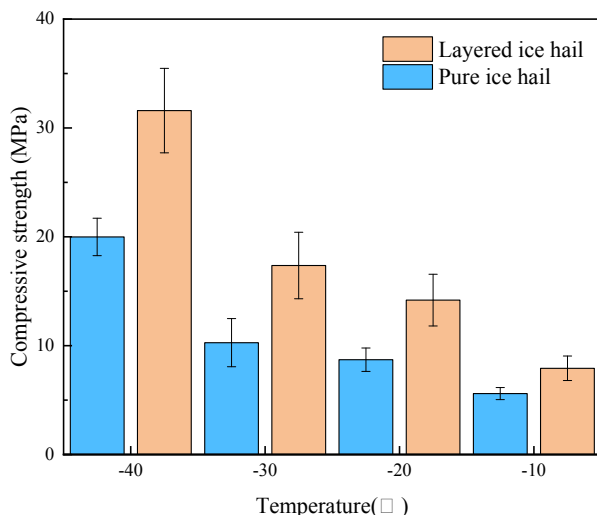


图 11 冷冻温度对两种冰雹的抗压强度的影响

Fig.11 The influence of freezing temperature on compressive strength of two types of hail

2.3 层状结构对冰雹力学性能的影响

图 12 为不同加载速率下不同种类冰雹的抗压强度，本文在 -20°C 下对两种冰雹继续开展不同加载速率（500 mm/min、300 mm/min、100 mm/min 和 50 mm/min）的压缩试验。从图 13 中可以看出，在低加载速率下，透明冰雹的抗压强度随着加载速率的增加而降低，层状冰雹的抗压强度在不同加载速率下变化较为平缓。当加载速率达到 500 mm/min 时，透明冰雹的抗压强度趋于稳定，平均抗压强度为 8.71 MPa，该趋势与相关试验研究^[22-25]的结论基本一致。而在此加载速率范围内，层状冰雹的抗压强度出现了逐步增加的趋势，平均抗压强度约为 14.19 MPa。上述结果表明，透明冰雹的抗压强度对加载速率变化非常敏感，表现出较强的脆性。而层状冰雹则因其能够更好地分散应力，从而在加载速率变化时仍能保持较为稳定的抗压强度。

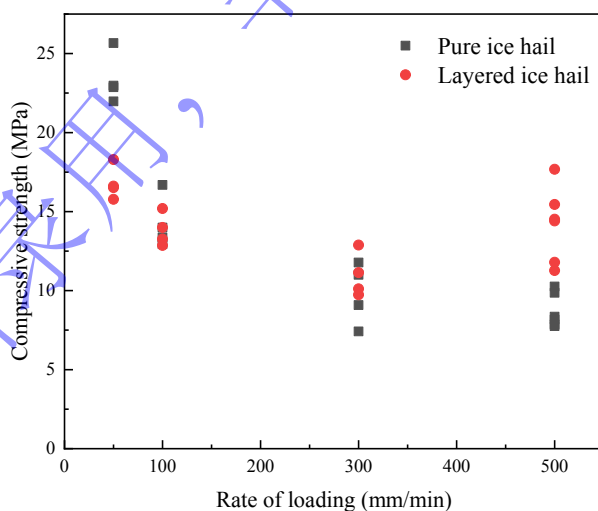
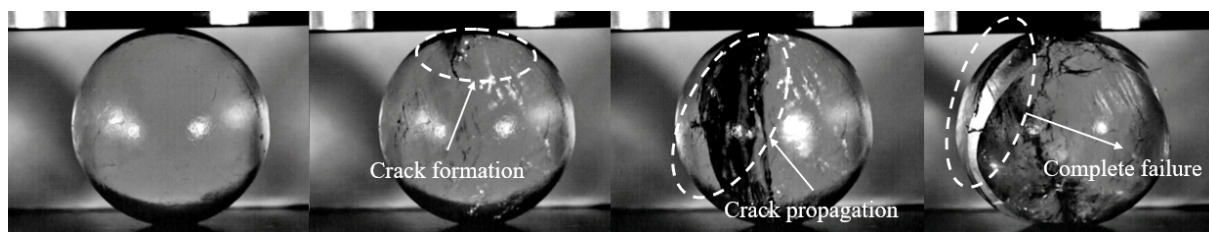


图 12 不同加载速率下不同种类冰雹的抗压强度

Fig.12 Compressive strength of different types of hail under varying loading rates

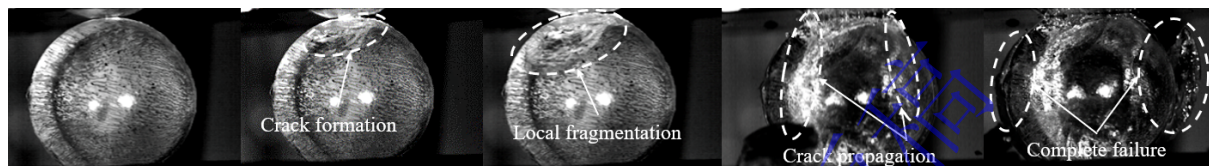
图 13 为不同种类冰雹的破碎过程。从图中可以看出，在压头接触透明冰雹后，上表面出现了一个细小的单裂纹。随着加载的持续，细小裂纹逐渐扩展，形成了一个明显的单一裂纹。在裂纹进一步扩展的过程中，破坏区域逐渐增大，裂纹沿冰雹的表面扩展，最终形成了一条贯穿性的主裂纹。最终，当裂纹完全扩展时，冰雹随即破裂为两部分；在压头接触到层状冰雹后，冰雹表面出现局部破碎。随着加载的继续，冰雹转动并再次被压实，上表面出现多条裂纹并缓慢向四周扩展。在裂纹扩展过程中，冰雹的多条裂纹会瞬间扩展至整个球体，最终导致冰雹完全破为多个部分。层状冰雹

在受力过程中表现出较为复杂的破碎行为，首先出现局部破碎，之后裂纹出现并逐渐向四周扩展，最终导致层状冰雹的破碎。而透明冰雹的单一裂纹一旦产生会迅速扩展，导致透明冰雹破碎。



(a) 透明冰雹的破碎过程

(a) Fracture process of transparent hail



(b) 层状冰雹的破碎过程

(b) Fracture process of layered hail

图 13 不同种类冰雹的破碎过程

Fig.13 Fracture process of different types of hail

图 14 为层状冰雹的层间微观结构，通过高倍显微镜对层状冰雹的切片进行了观察。可以看出在内外透明冰层之间存在一个清晰可见的富含微小气泡的过渡带。气泡层大致沿冰雹的球形轮廓分布，这种气泡层是导致层状冰雹与透明冰雹破坏模式和抗压强度存在显著差异的根本原因之一。

在层状冰雹中，坚硬的冰层和相对柔软、富含气泡的冰层交替排列。当一条裂纹从坚硬的冰层中萌生并扩展到气泡层时，气泡层的不均匀性会迫使裂纹改变方向，不再是直线前进，这种偏转使得裂纹的扩展路径变得曲折。整个破坏过程不再是“一裂到底”，而是需要克服多个界面的阻力。这意味着需要施加更大的外力（即更高的抗压强度）才能使其完全破坏。这与珍珠层的“砖—砂浆”结构和牙釉质的“刚—柔”结构^[26]和珍珠层的“砖—砂浆”结构^[27]的强韧机理类似。

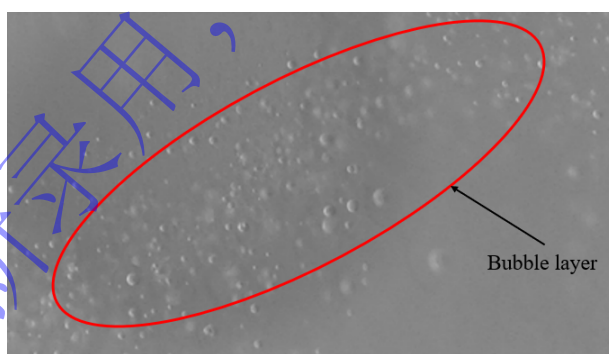


图 14 层状冰雹的层间微观结构

Fig.14 Microstructure of the interlayer in layered hail

3 结论

本文通过万能试验机对不同冷冻温度下的层状冰雹和透明冰雹开展压缩试验，并分析层状冰雹的层间微观结构，得到如下结论。

- (1) 透明冰雹和层状冰雹的力学性能均受到冷冻温度的显著影响。随着冷冻温度的降低，两种冰雹的抗压强度均明显提高。透明冰雹在 -40°C 时的平均抗压强度较 -10°C 时提升约 4 倍，而层状冰雹在相同温度区间内提升约 6 倍，表明层状冰雹对温度变化更为敏感。
- (2) 层状冰雹在低温环境下表现出更强的层间结合强度和更稳定的力学性能，但在较高温度

(如-10℃)下其力学性能离散性较大。层状结构的存在使得冰雹在受压时出现多裂纹破坏模式,与透明冰雹的单一主裂纹破坏模式有明显区别。

(3) 层状冰雹的层间结构富含气泡,该结构在裂纹扩展过程中会改变裂纹方向,从而提升了整体抗压强度。这一机制与珍珠层、牙釉质等生物复合材料的“刚—柔”强韧化原理高度相似。

(4) 本文仅制备了双层结构的层状冰雹,而自然界中冰雹大多为四层到五层。后续研究可基于本文的制备方法,进一步制备具有多层透明与不透明冰层交替结构的层状冰雹,并开展动态压缩试验,研究高应变率下透明冰雹和层状冰雹的力学性能,揭示在高应变率下两种冰雹不同的力学响应与破碎特性。

参考文献

- [1] 李光亮. 冰雹 [M]. 北京: 气象出版社, 2002.
LI G L. Bingbao [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2002.
- [2] 徐家骝. 冰雹微物理与成雹机制 [M]. 农业出版社, 1979.
XU J L. Hail microphysics and hail formation mechanisms [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1979.
- [3] ASTM. Standard test method for hail impact resistance of aerospace transparent enclosures: ASTM F320-1994 [S]. West Conshohocken: ASTM International, 1994.
- [4] ASTM. Standard test method for hail impact resistance of aerospace transparent enclosures: ASTM F320-2010 [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2021.
- [5] 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 M, CHEN Y, WANG A Z. Experiment on nonlinear mechanics of artificial hail based on ASTM F320—2010 [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(16): 290-294.
- [6] 刘业伟, 张丽芬, 葛鑫, 等. 存储参数对适航用冰雹力学性能的影响 [J]. 航空动力报, 2025, 40(03): 102-108.
LIU Y W, ZHANG L F, GE X, et al. Influence of storage parameters on the mechanical properties of hail for airworthiness [J]. Journal of Aerospace Power, 2025, 40(03): 102-108.
- [7] 聂飞晴, 马瑞强, 李志强. 含棉冰材料在低应变率下的抗压性能 [J]. 高压物理学报, 2023, 37(03): 52-61.
NIE F Q, MA R Q, LI Z Q. Compressive properties of ice containing cotton at low strain rates [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2023, 37(03): 52-61.
- [8] 黄兴. 含棉纤维冰的抗压性能试验 [J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2016, 37(06): 1-4+116.
HUANG X. Experiment on compressive properties of ice with cotton fiber [J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2016, 37(06): 1-4+116.
- [9] 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(08): 1744-1751.
GE X, ZHANG L F, LIU Z X. Effect of freezing temperature on mechanical properties of hail in airworthiness test [J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(08): 1744-1751.
- [10] 张丽芬, 葛鑫, 刘振侠. 人工制备冰雹的力学性能试验研究 [J]. 航空学报, 2021, 42(02): 174-183.
ZHANG L F, GE X, LIU Z X. Experimental study on mechanical properties of artificial hail [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(02): 174-183.
- [11] COMBESCURE A, CHUZEL-MARMOT Y, FABIS J. Experimental study of high-velocity impact and fracture of ice [J]. International Journal of Solids and Structures, 2011, 48(20): 2779-2790.
- [12] PEREIRA J, PADULA S, REVILOCK D, et al. Forces generated by high velocity impact of ice on a rigid structure: TM 2006-214263 [R]. NASA, 2006.

- [13] Hammett CI, Jones RL, Stauffacher HL, Schoenherr TF. Measurement and Modeling of supersonic hailstone impacts [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017; 99: 48-57.
- [14] GUÉGAN P, OTHMAN R, LEBRETON D, et al. Experimental investigation of the kinematics of post-impact ice fragments [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, 38(10): 786-795.
- [15] KIM H, KEDWARD K T. Modeling hail ice and predicting impact damage initiation in composite structure [J]. *AIAA Journal*, 2000, 38(7): 1276-1286.
- [16] KIM H, WELCH D, KEDWARD K T. Experimental investigation of high velocity ice impacts on woven carbon/epoxy composite panels [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2003, 34(1): 25-41.
- [17] 谭晓军, 冯晓伟, 胡艳辉, 等. 层状结构冰雹的高速撞击特性实验 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(11): 139-148.
TAN X J, FENG X W, HU Y H, et al. Experimental investigation on characteristics of layered ice spheres under high-velocity impact [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(11): 139-148.
- [18] Luo G, Zhang F, Cao W, et al. Numerical and experimental verification of spherically layered ice model for analysis on hail impacting aviation structures [J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2022, 1806623.
- [19] Chen S, Gad E, Zhang L, et al. Experiments on an ice ball impacting onto a rigid target [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, 167: 104281.
- [20] 李尚昆, 冯晓伟, 谢若泽, 等. 高应变率下纯水冰和杂质冰的动态力学行为 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(09): 76-83.
LI S K, FENG X W, XIE R Z, et al. Dynamic compression property of distill-water ice and impurity-water ice at high strain rates [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(09): 76-83.
- [21] Russell R A, Wood M D. Point load tests and strength measurements for brittle spheres [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, 46(2): 272-280.
- [22] 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.
ZHANG L M, LI Z J, JIA Q, et al. Experimental study on uniaxial compressive strengths of artificial freshwater ice [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 40(11): 1392-1396.
- [23] 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(06): 662-669.
LI Z J, XU Z J, WANG Q K, et al. Experimental study on uniaxial compressive strength features of ice from Wuliangsu Lake [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(06): 662-669.
- [24] 李志军, 周庆, 汪恩良, 等. 加载方式对冰单轴压缩强度影响的试验研究 [J]. *水利学报*, 2013, 44(09): 1037-1043.
LI Z J, ZHOU Q, WANG E L, et al. Experimental study on the loading mode effects on the ice uniaxial compressive strength [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(09): 1037-1043.
- [25] 王庆凯, 张宝森, 邓宇, 等. 黄河冰单轴压缩强度的试验与影响因素探究 [J]. *水利水电技术*, 2016, 47(09): 90-94.
WANG Q K, ZHANG B S, DENG Y, et al. Study on test of uniaxial compressive strength of ice in Yellow River and its influencing factors [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2016, 47(09): 90-94.
- [26] 宋昆昆. 硅酸盐基复合材料多尺度仿生制备与强韧化性能研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2024.
SONG K K. Study on Multi-Scale Biomimetic Preparation and Toughening Performances of Silicate-based Composites [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2024.

[27] 邱天. 贝壳珍珠层及其仿生结构的力学行为、强韧机理及热特性研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2025.

QIU T. Research on the mechanical behaviors, strengthening and toughening mechanisms, and thermal properties of nacre of shells and its biomimetic structures [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2025.

Effect of Freezing Temperature on Mechanical Properties of Layered Hail

SHI Xiaopeng^{1,2}, FANG Jiangu^{1,3}, XIE Jiang^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Civil Aviation Aircraft Airworthiness Certification Technology, Tianjin 300300, China;

2. Science and Technology Innovation Research Institute, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

3. School of Safety Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: This thesis clarifies the influence of layered structure and different freezing temperatures on the mechanical properties of hails. Transparent hails with a diameter of 50 mm and layered hail with distinct structures were prepared using a self-made mold. A series of quasi-static compression experiments were conducted for the simulated hails (both transparent and layered hail) through an universal testing machine at freezing temperatures of -10 °C, -20 °C, -30 °C, and -40 °C. By Combining with microscopic structure analysis, the failure mechanisms were determined. The experimental results revealed that as the freezing temperature decreases, the compressive strengths of both transparent and layered hails significantly increase. Among them, layered hails are more sensitive to the temperature change. At -40 °C, the average compressive strength of layered hails is approximately 6 times of that at -10 °C, while that of transparent hails is approximately 4 times of that at -10 °C. When layered hails fail, they exhibit multiple cracks, while transparent hails have single main crack. The layered structure is rich in bubbles, which can change the crack direction and thereby enhance its compressive strength. This work serves as a foundation for the preparation of layered hails and subsequent investigations into their mechanical behaviors.

Keywords: layered hail; compressive strength; temperature effect; quasi-static compression experiments