

典型冰雹撞击载荷作用下 T800 碳纤维板的损伤特性*

赵浩川¹, 冯晓伟^{1,2*}, 刘瑶璐³, 李天宇¹, 胡艳辉¹, 谭晓军¹, 聂源¹

1. 中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621900;
2. 工程材料与结构冲击振动四川省重点实验室, 四川 绵阳 621010;
3. 重庆大学航空航天学院, 重庆 400044)

摘要: 为研究民航客机用高性能碳纤维复合材料的冰雹撞击损伤特性, 通过试验首先对冰球在高速冲击下的撞击力特性进行研究, 给出了冲击力时程曲线以及峰值冲击力与冰球动能的线性增长关系; 随后对 T800/3200 碳纤维复合材料层合板进行单次冰球撞击, 发现其损伤形态与碳纤维层合板的铺层方式有关, 而损伤程度则与冰球的初速度有关, 同时超声 C 扫描结果表明其内部层间脱粘面积与冰球撞击时的动能呈线性增长关系; 而后又对相同厚度的靶板进行了冰球重复撞击试验, 其宏观损伤程度随撞击次数增加而加重, 且碳纤维板中心点挠度与冰球累积动能呈二次关系, 并最终呈现前后贯穿且伴有大量纤维拔出的损伤形态。¹

关键词: 冰雹; 高性能碳纤维层合板; 撞击力; 损伤特性

中图分类号: V258

国际学科代码: 130.3530

文献标识: A

Research on damage characteristics of T800 carbon fiber plate under typical hail impact load

ZHAO Haochuan¹, FENG Xiaowei^{1,2*}, LIU Yaolu³, LI Tianyu¹, HU Yanhui¹, TAN Xiaojun¹, NIE Yuan¹

(1. Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China;

2. Shock and Vibration of Engineering Materials and Structures Key Lab of Sichuan Province, Mianyang 621010, China;

3. Chongqing University College of Aerospace Engineering, Chongqing 400044, China)

Abstract: With the deterioration of the natural climate, hail impact has become a threat that cannot be ignored by civil aircraft. In order to study the hail impact damage characteristics of high-performance carbon fiber composites used for civil aircraft, the impact force characteristics of ice spheres under high-speed impact were firstly investigated through experiments, and the impact time history curves of ice spheres under different speeds were obtained by using air cannon test system. At the same time, in order to make the speed range of the ice sphere more extensive, some existing experiment data are introduced as a comparison to obtain the linear growth relationship between the peak impact force and the kinetic energy of the ice sphere. Subsequently, a single ice sphere impact was conducted on the T800/3200 carbon fiber composite laminates, and it was found that the concave of the front

*收稿日期: 2024-11-18; 修回日期: 2025-01-19

基金项目: 国家自然科学基金(12102413)

第一作者: 赵浩川 (2000—), 男, 硕士研究生, 603389614@qq.com;

通信作者: 冯晓伟 (1984—), 男, 博士, 副研究员, 414fengxw@caep.cn。

core damage area forms a 45° angle with the boundary of the target plate, which is related to the carbon fiber layup mode, and the damage degree is related to the initial speed of the ice sphere. In order to further quantify the relationship between the damage degree of the laminate and the kinetic energy of the ice sphere, the ultrasonic C-scanning was used to obtain the damage area of the target plate, and the damage percentage was extracted by software analysis. The results show that the percentage of internal interlayer delamination increases linearly with the kinetic energy of the ice sphere. After that, the repeated impact tests of ice spheres were carried out on the target plate with the same thickness, and as expected, the macro damage degree increases with the number of impacts. Finally, the front and back surfaces of the composite laminates are completely delaminated, and a large number of fibers are pulled out, and the damage pattern of penetrating through-thickness is displayed. The deflection of the center point of the target plate was selected as the quantitative damage index, and according to the data analysis of the measured results, it was found that there is a quadratic relationship between the deflection of the center point of the carbon fiber plate and the accumulated kinetic energy of the ice sphere, and at the apex of the parabola, the accumulated kinetic energy required for the target plate penetration can be reflected well.

Keywords: ice sphere; High performance carbon fiber laminates; Impact force; Damage characteristic

0.引言

随着全球性极端恶劣天气的频发,冰雹撞击飞行器的问题日益突出,迄今为止国内外已发生多起冰雹砸伤飞行器事故。如:2016年7月,南航客机A320执飞广州至成都航班时遇冰雹天气,落地后经检查飞机机体结构和挡风玻璃出现损伤;2021年10月大连遭遇特大冰雹,该机场16架民航客机受到不同程度结构性损伤;2024年6月,奥地利航空公司一架客机从西班牙飞往奥地利维也纳时,突遇冰雹天气,致使飞机机头部分受损以及飞行员驾驶舱玻璃损坏。而对于民航客机而言,高性能碳纤维是其机体的主要组成材料,尤其是在中大型宽体客机,如波音787,其占比可达50%以上^[1],如图1所示。T800碳纤维层合板作为高性能复合材料之一,研究其在典型冰雹载荷作用下的损伤特性在工程实践上具有重要意义。

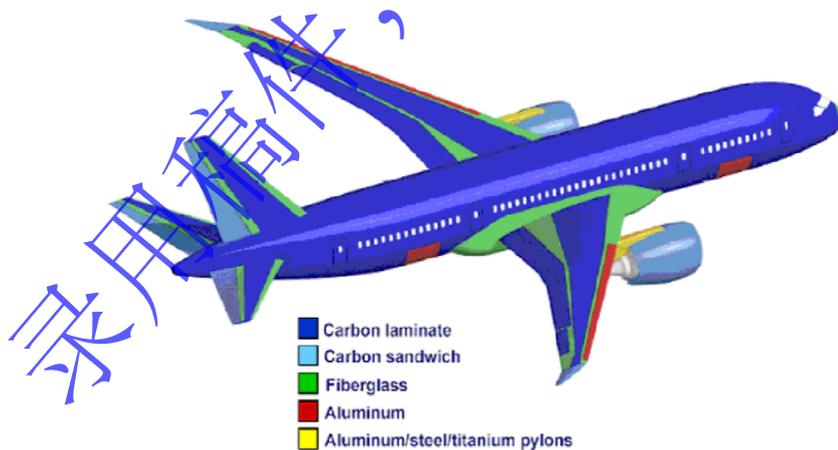


图1 波音787复合材料应用^[2]
Fig.1 Application of Boeing 787 composites^[2]

目前不少专家学者通过试验和数值模拟技术已经对冰雹的动态力学行为等具有了一定的研究。如Mykola Holotiu等^[3]研究了在实验室条件下,破坏性冲击元件使不同厚度的冰块破裂的过程;Kim等^[4]采用Hopkinson杆进行测试,表明了在一定范围的高应变率($400\text{ S}^{-1} - 2600\text{ S}^{-1}$)下冰的抗压强度随着应变的增加而增加;Franciska Müller等^[5]用不同形状的冰对靶板进行了冲击试验,发现冰试样的失效行为在很大程度上取决于试样的形状;J. Pernas-Sánchez等^[6]将不同直径的冰球高速发射至测压元件

上,发现所测得峰值冲击力与冰球直径无关,而是冲击能量的函数,且二者近似呈线性关系;崔一诺等^[7]研究了冰试样在不同冲击速度下的损伤特征,其发现冰样存在某个“临界状态”,当冲击速度超过阈值时,冰样会发生较为严重的破坏,所测得的冲击荷载会减小;Guégan^[8]通过空气炮研究了球形冰弹丸撞击刚性靶的碎裂化过程,其结果显示,冰的碎片在撞击破碎后,会在撞击处形成圆形碎片云而不会反溅,碎片速度也会随着距撞击中心的距离增大而降低。还有其他学者对冰在高速撞击下的动力学行为的研究也取得了相应的进展^[9-10]。

对于冲击载荷下靶板的破坏而言,Wang等^[11]对受冰球影响的CFRP层压板进行了系统的实验研究,表明细观分层机制可以应用于CFRP层合板的理论分层预测;Song等^[12]研究了受冰雹冲击的碳/环氧树脂复合板的动力学行为和破坏行为和破坏,结果表明冰球冲击对面板的损伤是以应力波为主的动力响应,当冰球达到最小阈值冲击速度时,面板的初始分层总是发生在表面-纵梁界面处,与加载位置无关,其采用的速率敏感冰模型和具有失效功能的复合材料层合板的有限元方法可以准确预测分层部位、总分层面积与冲击速度的关系;Liu等^[13]对碳纤维/PMI泡沫夹层结构在冰雹冲击下的动力学响应和损伤特性进行了研究,发现CPS靶板的损伤程度和吸能效率随冲击速度的增加而增加,而随着撞击角的增加而降低,且PMI泡沫的能量吸收与冰弹的法向速度之间存在二次正相关;Arnob Banik等^[14]研究了冰撞击器对钢和碳纤维增强聚合物夹层复合材料的低速冲击响应,结果表明冰与钢作用期间能观测到更大的峰值力,而随着撞击过程的继续,冰与复合材料的作用期间有更大的位移和更好的能量吸收性;Gareth J. Appleby-Thomas等^[15]采用超声探测手段对碳纤维板的内部损伤进行了扫描分析,提出了密度厚度理论用以消除不同板厚可能带来的对损伤分析的影响,并按损伤严重程度定义了六种损伤类型;林茜^[16]同样也对碳纤维复合材料在受到冰球撞击后的损伤程度进行了划分,并通过视觉观测和超声检测结果得到其损伤特性;张晓琪^[17]对冰弹正撞CF/BMI复合材料进行了实验,研究了靶板动态响应过程,并对撞击点的应力应变曲线进行了分析;Gao等^[18]对具有确定堆叠顺序的碳/环氧树脂层压板的弹道和分层机制进行了实验研究,结果表明等厚度的Al/CFRP/Al层合板比整体式层合板具有更好的防弹性能;也有部分专家学者采用数值模拟手段对相关内容进行了研究,如刘建刚^[19]等、Tang等^[20]以及J. Pernas-Sánchez等^[21]、王计真^[22],均在冰弹撞击复合材料目标以及冰雹的本构模型方面取得了较好成果。

总体而言,相关领域的大部分研究聚焦于碳纤维复合材料的宏观损伤特性,而对于冰雹撞击致损的量化表征研究较少。故本文基于对60mm直径冰球的撞击力特性研究,开展单次和多次冰球对T800碳纤维复合材料层合板的撞击实验,并量化分析损伤与峰值冲击力的关系。

1. 冰雹撞击力特性

1.1 试验流程

1.1.1 冰球制备

由于民航客机在起飞和降落过程中穿过云层所遇到直径超过50mm的冰雹撞击事件已经不算罕见^[23],考虑设计应具有一定的安全性和容错性,采用直径为60mm的冰球,金属杆选用铝合金材料,杆直径为80mm。如图2所示,容器为两个半球形铝合金制模具,将其由螺栓拧紧且密封后,通过预留的1mm小孔往模具中注入蒸馏水,放置在温度为-18℃的环境中,冷冻超过24小时后取出。



图 2 60mm 冰球制备模具
Fig.2 A mold for production of ice spheres with the diameter of 60mm

1.1.2 冰球撞击力测试原理与试验设计

试验系统和整体布置如图 3 所示。通过空气炮内产生的高压，使冰球以较高初速度撞击金属杆，并在杆中产生应力波，根据金属杆中的应变以及一维应力波理论计算出冰球撞击力：

$$F(t) = \varepsilon(t)E_0A_0 \quad (1)$$

式中： $F(t)$ 为撞击力； $\varepsilon(t)$ 为试验中所测得的金属杆应变； E_0 为金属杆件的弹性模量； A_0 为金属杆件的横截面积。

在空气炮管口的一侧布置了一台高速摄影机用以捕捉冰球从枪管发射到撞击破碎的全过程；另一侧布置激光测速系统，以测量冰球在撞击金属杆前的瞬时速度。且为防止空气炮发射时对冰球造成损坏，设置冰球弹托如图 4 所示，使冰球均匀受力，并在枪管口处通过弹托挡板使二者分离。试验具体参数如表 1 所示。

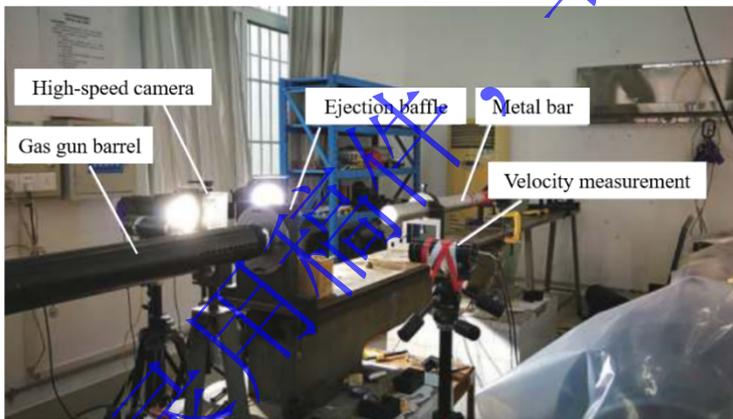


图 3 冰球撞击杆试验装置
Fig.3 The test device of ice spheres impacting bars



图 4 冰球弹托
Fig.4 Ice sphere with sabot

表 1 冰球高速撞击金属杆试验工况
Table1 The experiment condition of ice spheres impacting bar with high speeds

序号	冰球质量/g	冰球速度/(m·s ⁻¹)	冰球动能/J
1	97.1	80.2	312.3
2	100.3	128.6	829.4
3	98.6	204.4	2059.7

1.2 试验结果分析

根据试验中所测得金属杆的应变，由式(1)绘制出冲击力时程曲线如图 5 所示，图 6 则分别显示了高速摄影下不同速度冰球从接触到破坏的撞击历程。由图可知，冲击力峰值随冰球初速度增加而增加，而冲击力持时反应其动量传递能力演变历程。Song^[12]和 Tippmann^[24]等曾对相当速度甚至更低速度的冰球进行过峰值冲击力的相关研究，均未出现持时大幅下降等情况，对于本试验中初速度为 80m/s 的冰球冲击力持时不足 100 μ s 的现象，认为是该冰球中存在的初始缺陷在撞击过程中直接演化为贯穿裂纹而导致冰球提前丧失动量传递能力^[25]。

由于其他相关研究中^[27]，在正常无初始缺陷的情况下，70m/s 至 210m/s 速度区间内的冰球冲击力持时均一致地保持在 400 μ s 至 450 μ s 附近，且冲量为冰球冲击力对时间的积分，则在该场景下冲量的大小取决于峰值冲击力的大小，故暂未对冲击力持时进行更深入研究。

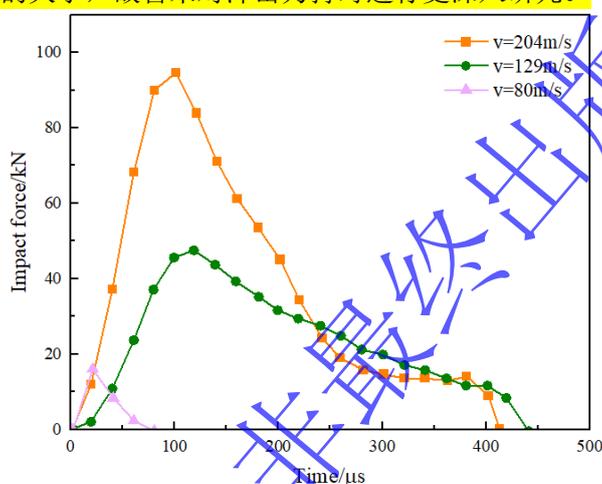
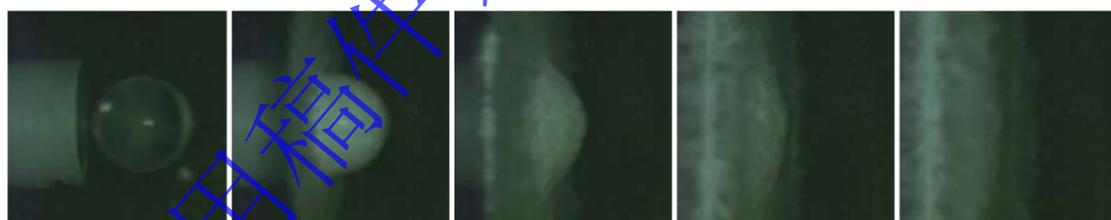


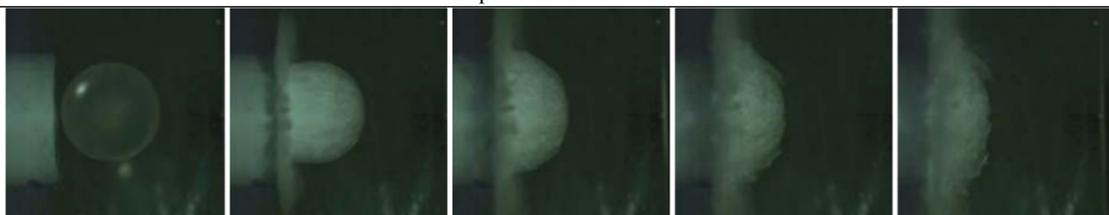
图 5 撞击力时程曲线图
Fig.5 Impact Force history traces



(a) $v = 204\text{m/s}$, 时间间隔 100 μ s



(b) $v = 129\text{m/s}$, 时间间隔 150 μ s



(c) $v = 80\text{m/s}$, 时间间隔 $150\mu\text{s}$

图 6 高速摄影下冰球撞击过程

Fig.6 The impact process of ice spheres under the high-speed camera

根据实验数据所得，初速度为 80.2m/s 、 128.6m/s 、 204.4m/s 的冰球峰值冲击力分别为 17.2kN 、 48.8kN 、 95.6kN 。为进一步获得峰值冲击力与冰球动能之间存在的关系，引入 Tippmann^[24] 的试验数据，见图 7。其试验所使用的冰球直径为 61mm ，与本试验所采用的直径相近。各点近似满足直线方程：

$$F_{\text{Peak}} = 0.05225E_K \quad (2)$$

式中： F_{Peak} 为峰值冲击力， E_K 为冰球初动能。

容易发现，在冰球动能处于较低以及较高状态时，该直线与各数据点的拟合程度较高，而在动能为 550J 至 1250J 的中间阶段，Tippmann^[24] 的数据却呈现较大的离散性。结合试验与冰球破坏历程分析出现该现象的原因可能有：1) Pernas-Sánchez 等^[26]的研究认为，线性函数虽能描述冰球动能与峰值冲击力的整体变化趋势，但在 400J - 1400J 范围内，适用程度相对较低且与直径无关。故推测在该动能范围内，冰球撞击呈独特破坏模式，演变历程的不同导致其峰值冲击力和达峰时间均有所增加；2) 该范围内的测试数据较少，试验过程中不可避免出现偶然误差致使离散性较大，Tippmann^[24]在其研究中提到，部分点呈现出较大离散性，但不影响整体变化趋势。故综合各组试验数据，可认为峰值冲击力随冰球动能呈线性增长关系。

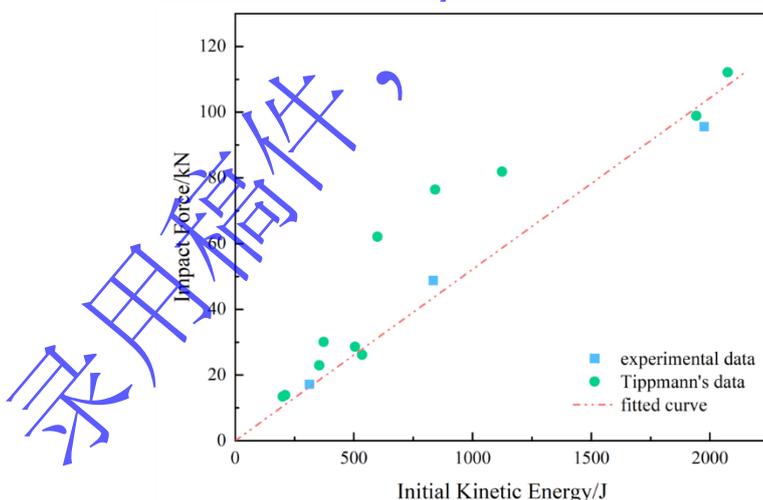


图 7 初始动能与峰值冲击力关系

Fig.7 The relationship between Initial kinetic energy and Impact Force peak

2. 冰雹单次撞击碳纤维板损伤特性

基于冰雹撞击力特性的研究，进而开展了冰雹撞击 T800/3200 碳纤维增强复合材料板的试验，并在其撞击靶板后结合实验数据与超声 C 扫描结果分析靶板表面与内部的损伤形态、面积及损伤模式。

2.1 试验装置与试验方案

本试验所采用的装置如图 8，发射装置仍采用空气炮试验系统，左侧为高速摄影设备，T800/3200 碳纤维复合材料层合板置于炮管正前方并由 5 个卡钳将其与后方钢框架进行固定，如图 9 所示，靶板中心与炮管圆心位于同一水平线。

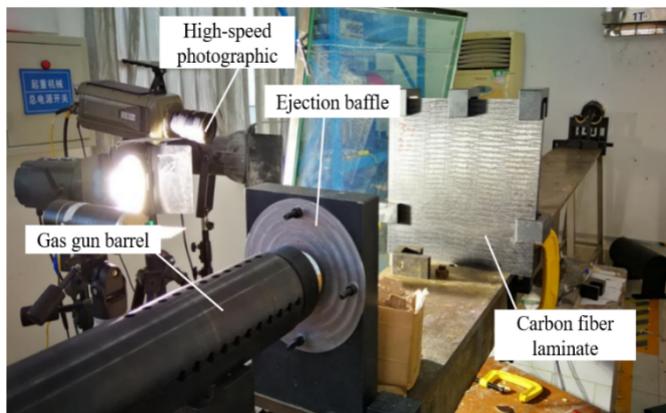


图 8 冰球撞击靶板试验装置
Fig.8 The test device of ice spheres impacting target

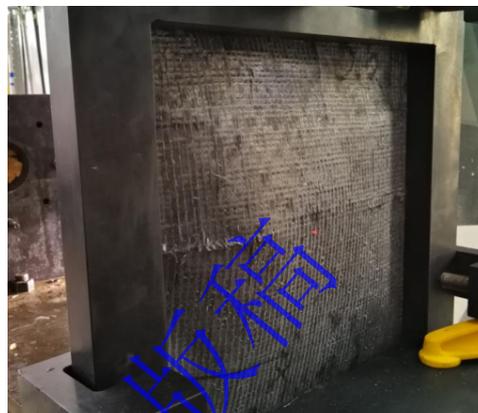


图 9 固定钢框架
Fig.9 The fixed steel frame

本试验所采用的 T800/3200 碳纤维复合材料层合板铺层方式为 $[45/-45/90/0/90/-45/45/90/0/90/45/-45/90/90/-45/45]_s$ ，尺寸为 $400\text{mm} \times 400\text{mm}$ ，扣除双侧 50mm 固定支撑后实际有效面积为 $300\text{mm} \times 300\text{mm}$ ，靶板实测厚度为 5.69mm ，旨在研究单次冰冲击载荷作用下，具有不同初速度或初动能的冰球对碳纤维靶板损伤程度和形态的影响。该试验同样使用直径 60mm 的冰球，具体试验工况如表 2 所示。

表 2 冰球冲击碳纤维靶板试验工况

Table2 The experiment condition of ice spheres impacting carbon fiber plate

序号	靶板厚度/mm	铺层方式	冰球质量/g	速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	动能/J
1	5.69	$[45/-45/90/0/90/-45/45/9$	97.9	65.1	207.5
2			98.0	89.7	394.3
3		$0/0/90/45/-45/90/90/-45/$	97.7	108.3	573.0
4		$45]_s$	98.5	140.5	972.2

2.2 试验结果分析

2.2.1 高速摄影与表面损伤结果

图 10 为高速摄像机捕捉到的冰球撞击 T800/3200 碳纤维增强复合材料板的全过程。可以看到，整个撞击过程与前文所述冰雹撞击金属杆的过程呈现高度一致性，均是由撞击点产生裂纹并迅速向整体扩散出高密度裂纹，并与撞击面成一定角度向四周形成碎片云区，且随着撞击过程的继续，碎片云区的面积急剧扩大直至冰球完全粉碎。



图 10 高速摄影下撞击靶板过程

Fig.10 The process of impacting target under the high-speed camera

靶板撞击后损伤情况如图 11 所示，其损伤程度随冰球初动能的增加而增加。由于 1、2 号靶板所受冰球撞击的初速度较低，其对靶板造成的损伤程度也相应较小，1 号板无论是撞击面或背面几乎均未产生视觉可见的损伤，2 号板在背面有零星的基体脱落现象，但程度极轻；对于 3、4 号板，对应的冰球初动能分别为 569.8J 和 965.3J，其撞击正面均出现了视觉可见的损伤和变形。其中 3 号板在靶板正面中心区域存在小范围基体脱落和凹陷的情况，背面则开始出现轻微的纤维裸露，而 4 号靶板由于所受冰球撞击的动能较大，其正面的基体脱落、凹陷情况以及背面的纤维裸露情况都较 3 号板更为严重。且值得注意的是，其正面核心损伤区域的凹陷与纤维裸露等损伤形态在该区域边界处形成了较为明显的两条平行且与靶板边界呈 45° 的分界线，如图 10(a)中红色线框所示。分析其原因有以下两点：1) 冰球在撞击靶板后，以撞心为圆心向四周展开形成一高密度碎片云区，迅速达峰的冲击力和较大的动量传递能力对撞心附近的小范围区域造成严重冲击并使其产生凹陷；2) 由于本组试验中碳纤维层合板的铺层方式为[45/-45/90/0/90/-45/45/90/0/90/45/-45/90/90/-45/45]_s，虽然该铺层方式能提高层合板韧性，具备良好的能量吸收性质^[28]，但在对应方向上的纤维密度相对较低，使得在此方向上承受冰冲击载荷的能力弱于其他方向，且碳纤维复合材料在较高应变率下（1000 s⁻¹ 以上，对应撞击速度约为 30m/s）表现出典型剪切破坏特征^[25]，故在冰球冲击载荷下其表面出现了纤维裸露和基体破坏等现象，并形成了斜向 45° 的两条较为明显的分界线。针对 3、4 号靶板背面出现损伤现象的原因，由应力波理论分析，入射波和反射波的应力关系可按式确定：

$$\frac{\sigma_R}{\sigma_I} = \frac{\rho_B c_B - \rho_A c_A}{\rho_B c_B + \rho_A c_A} \quad (3)$$

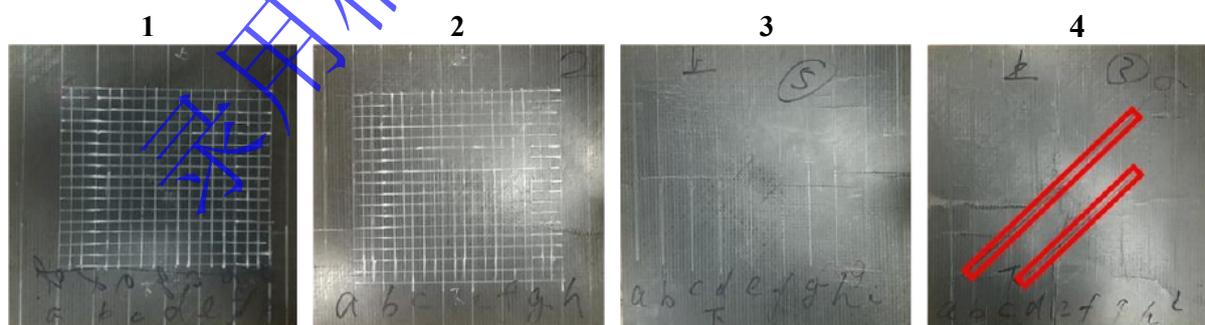
式中： σ_R 为反射波引起的应力； σ_I 为入射波引起的应力； $\rho_A c_A$ 为 A 介质的波阻抗； $\rho_B c_B$ 为 B 介质的波阻抗。

本试验中 A 介质即为碳纤维靶板，B 介质则为空气，其波阻抗视为 0，此时有：

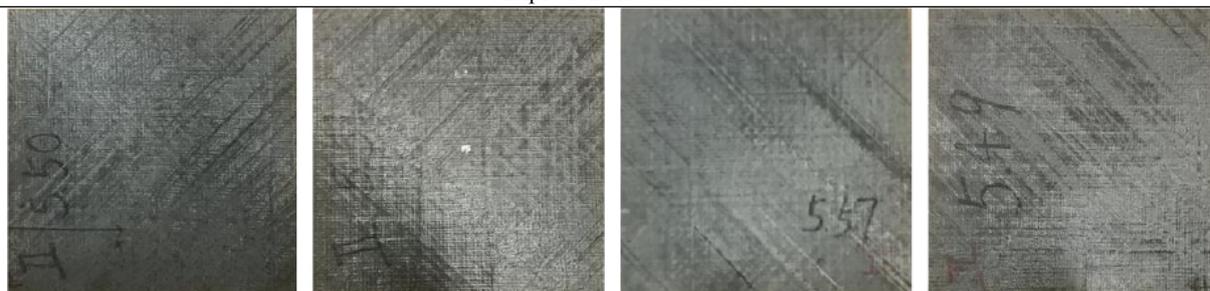
$$\sigma_R = -\sigma_I \quad (4)$$

式中： σ_R 与 σ_I 的含义同前。

即在撞击面受到冰球冲击载荷后，靶板内部应力以压缩波的形式传播，当其到达靶板背面时，压缩波在自由端反向变为拉伸波，且在面外方向拉伸载荷作用下，基体强度远低于在压缩载荷作用下的强度^[2]，这也导致了碳纤维脱层以及靶板背面出现损伤的范围相较于正面更广。2 号板正面几乎无损伤而背面却有零星基体脱落的原因也是如此。



(a) The front of targets



(b) The back of targets

图 11 5.5mm 靶板受冰球撞击后毁伤形态

Fig.11 The damage pattern of target with the depth of 5.5mm after being hitting by ice spheres

2.2.2 超声检测与层内损伤结果

T800/3200 碳纤维复合材料层合板是由多层碳纤维按照一定的排布方式用环氧树脂材料粘结在一起形成，故视觉上只能观测到表面损伤，对于内部损伤情况，需用超声 C 扫描的方式进行探查。

为了更好的获得损伤层间情况，对扫描结果进行了图像处理从而便于分析，如图 12 所示，红色区域代表层间损伤。与预期结果相符，随着撞击动能由 207.5J 增至 972.2J，超声扫描结果中的红色区域面积也不断增加，表明随着冲击力和冰球初始动能的增长，其内部各层碳纤维之间脱粘情况加剧且脱层范围扩大；可以发现的是，中心白色区域面积同样随着冰球动能的增加而增加，分析其原因是随着冲击力的增加，撞心附近小范围内基体出现粉碎性破坏，脱层和变形较大，损伤更为严重，使得超声波在传播过程中大幅衰减而无法有效捕捉反射波所引起的；3 号及 4 号中脱层损伤区域面积较大且已抵达靶板边缘，表明对于 T800/3200 碳纤维复合材料层合板，当其受冰雹冲击载荷时首先倾向于整体变形以及层间脱粘吸能而非局部贯穿损伤。

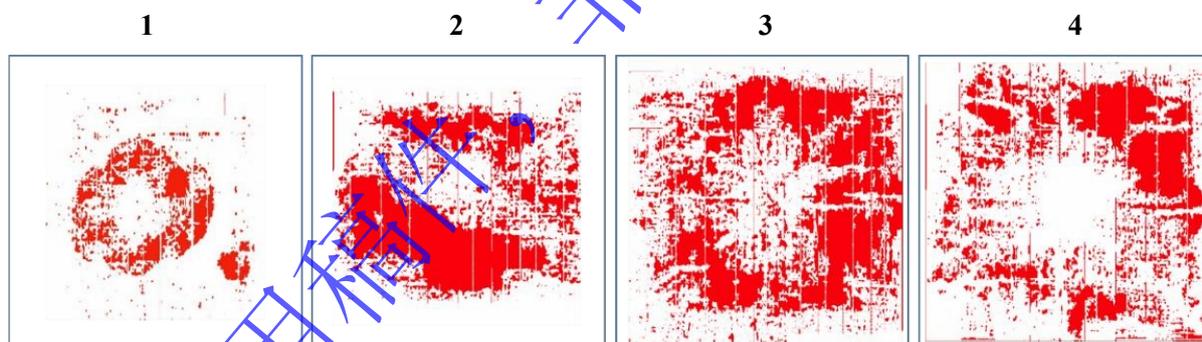


图 12 超声扫描结果

Fig.12 The Ultrasonic C-scan result

为进一步探明 T800/3200 碳纤维板在受冲击载荷后层间脱粘损伤区域面积与冰球动能之间的关系，提取出了超声检测结果中靶板分层损伤面积百分比，发现 4 号板的损伤面积百分比相较于 3 号板有一定幅度下降，甚至略低于 2 号板的损伤面积。经分析后可知，由于 4 号板因损伤更严重而具有更大的中心白色区域，在提取层间损伤面积时系统仅以红色部分为依据，未将白色区域面积作为分析对象，从而造成数据中损伤面积百分比下降。于是，为了确保结果的可靠性，不以 4 号板的损伤数据为拟合点，仅对前三块板的超声扫描结果进行拟合，如图 13 所示，发现损伤区域百分比与初动能近似满足直线：

$$S_{DP} = 0.10591E_K \quad (5)$$

式中： S_{DP} 为损伤面积占比； E_K 为冰球初动能。

故对于该尺寸厚度下的 T800 碳纤维复合材料层合板，在试验精确度允许的情况下，可认为层间脱粘损伤区域面积与冰球撞击时的初动能呈线性关系。

进一步，为得到峰值冲击力与靶板分层损伤面积的关系，考虑到第一章中已经得到的冰球初动能与峰值冲击力的线性方程即式(2)，并且符合程度较高，将其与式(4)联立可得：

$$S_{DP} = 2.02698F_{Peak} \quad (6)$$

式中： S_{DP} 与 F_{Peak} 的含义同前。

同时，将前三枚冰球实际损伤面积百分比与式(5)所描述的拟合函数绘制如图 14 所示。与预期相符，冰球的峰值冲击力同样与靶板的分层损伤面积呈线性增长关系，但该预测函数在冰球撞击速度达到一定值后不适用，即靶板的损伤不仅表现为层间脱粘等，还出现了其他较为严重的损伤形态，需用另外的方式进行表征。

值得注意的是，对于 1 与 2 号板而言，在其表面并未出现肉眼可见的损伤下，超声 C 扫描却反映了其内部存在的纤维脱层和基体损坏情况，表明碳纤维复合材料层合板在受冰球冲击载荷下其内部损伤会先于外表损伤出现，这一结果与 J. Pernas-Sánchez, et al.^[29]所得到的结论一致。

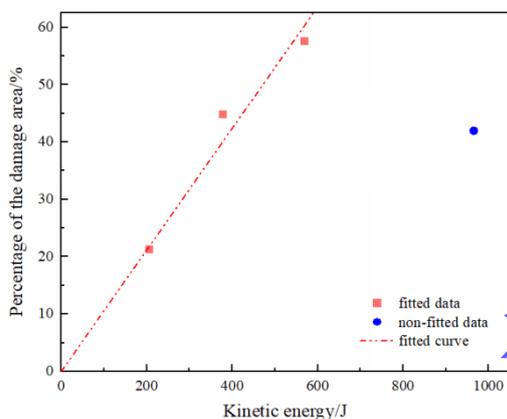


图 13 动能—损伤面积百分比

Fig.13 Kinetic energy-Percentage of damage area Curve

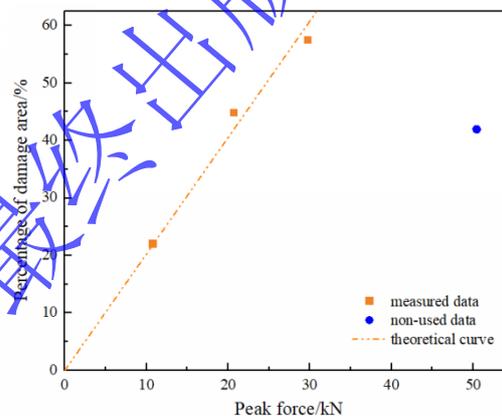


图 14 峰值冲击力—损伤面积百分比

Fig.14 The Peak force-Percentage of damage area curve

3.冰雹多次撞击碳纤维板损伤特性

在有了单次撞击的试验结论后，为更贴近民航客机在巡航时所遇冰雹撞击情况，本文进而又对 T800/3200 碳纤维复合材料层合板进行了冰球多次重复累积撞击试验，并对试验结果进行了分析讨论。

3.1 试验装置和试验方案

在本试验中采用的冰球发射装置以及整个试验系统的布置与前文所述一致，冰球直径仍采用 60mm，靶板尺寸仍为 400mm × 400mm，而考虑到其冲击的初始动能均较大，故其厚度仍然采用 6mm 级，实测厚度为 5.63mm，满足试验要求，用以防止未进行完试验预设撞击次数就发生贯穿或完全破坏。具体试验工况如表 3 所示。

表 3 冰球多次冲击碳纤维靶板试验工况
Table3 The experiment condition of ice spheres repeated impacting carbon fiber plate

撞击次数	冰球直径/mm	靶板厚度/mm	冰球速度/(m·s ⁻¹)	冰球动能/J
1	60	5.63	157.3	1207.8
2			152.1	1132.1

3	153.2	1147.0
4	154.9	1177.2
5	151.6	1132.1

在每发试验后对靶板的损伤情况进行了拍照记录，从外部观察其变形及损伤情况。可以预见的是，在多次撞击后冰球对靶板造成的损伤和变形很大，故不必也无法采用超声 C 扫描探测碳纤维板内部损伤情况。

3.2 试验结果分析

3.2.1 宏观损伤分析

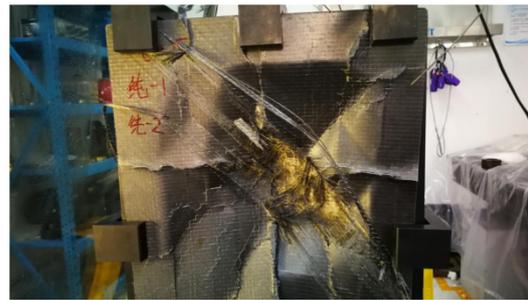
图 15 以及图 16 记录了每一次撞击后碳纤维靶板的损伤情况，由于各次冰球初动能均超过 1000J，在第 1 次撞击后就使得碳纤维层间脱粘以及部分基体破坏，靶板此时具有明显凹陷变形和轻微纤维拔出的特征；第 2 次撞击后损伤情况加剧，撞击面的基体大量粉碎性破坏并脱落，由于其固定的纤维铺层方式，导致损伤核心区纤维出现 45° 方向完全拔出，且损伤呈放射状已扩展至四周，背面已有较为明显的挠度。

当冰球完成第 3 次撞击后，靶板撞击面核心区域基体完全破坏并与靶板分离，此时碳纤维不再与基体共同作用，冰球冲击载荷产生的拉伸应力超过其抗拉强度，故碳纤维断裂并向外裸露拔出，形成直径约 150mm 的黑色空洞区，透过此坑能清晰看见层合板内部基体，纤维同样出现了严重损伤。冰球穿过撞击面后，在靶板内部冲击力达峰并形成贯穿裂缝，向四周溅射大量具备动量传递能力的碎片并急剧扩张，此时撞击面核心区的碳纤维已大量断裂而无法提供相应的约束力，并且根据前文超声 C 扫描结果可知，在单次撞击下层合板内部已经出现较大范围的层间脱粘，此时损伤核心区外围的环氧树脂也已无法提供粘聚作用，故在冰球碎片的扩散作用下靶板前表面向外凸起而非凹陷变形。

由图 16(a)和图 16(b)可以看到，完成第 4 次撞击后，靶板完全分层，失去粘结力后的两表面隆起程度加剧，靶板左右两侧也已完全脱离固定支架。撞击面的黑坑尺寸大幅增加并已扩散至下边缘，内部大量基体和碳纤维的破坏导致其形成较大区域空洞，但此时靶板背面仍残留有较薄的碳纤维层，直至最后一次撞击后才完全贯穿，如图 16(c)和图 16(d)所示。整个靶板几乎被分为了多个不连续部分，各部分之间仅靠固定支架和些许裸露拔出的碳纤维相联系。



(a) The front surface of the 1st impact



(b) The front surface of the 2nd impact



(c) The front surface of the 3rd impact

图 15 第一次至第三次冲击后损伤情况
Fig.15 The damage situation after 1st to 3rd impact



(a) The front surface of the 4th impact



(b) The side of the 4th impact



(c) The front surface of the 5th impact



(d) The side of the 5th impact

图 16 第四次至第五次冲击后损伤情况
Fig.16 The damage situation after 4th to 5th impact

3.2.2 挠度损伤分析

为进一步探究在冰雹重复冲击载荷下, T800/3200 碳纤维复合材料层合板的损伤演变, 对每一发冰弹完成撞击后靶板的静态挠度进行测量, 其结果如表 4, 并将其损伤程度划分为五个等级, 其中第五次撞击后靶板贯穿, 故无法测得其中心点挠度。同时, 猜测其与冰球动能具备一定的关系, 为得到其数学表达式, 且结合实际情况, 靶板在即将贯穿时, 其挠度几乎不会发生太大变化, 即存在挠度最大值, 故决定采用二次多项式进行拟合, 并给出了冰球累积动能—中心点挠度图, 如图 17 所示。其中红色三角形为所测得数据, 蓝色曲线为拟合曲线, 该多项式的函数表达为:

$$X_D = -5.218 \times 10^{-6} E_{KC}^2 + 0.047 E_{KC} - 33.535 \quad (7)$$

式中: X_D 表示靶板中心点挠度; E_{KC} 表示所受冰球撞击的累积动能。

在该曲线拟合下其最大误差的绝对值仅为 1.32%, 且容易发现, 在累积动能达到 4664.1J 时, 即第四次撞击完成后, 其挠度值位于抛物线顶点附近, 表明在该累积能量下靶板的中心点挠度几乎已达最大值, 结合图 17(a)与图 17(b)所记录的试验结果以及前文分析可知, 此时靶板后表面仅剩一纤维薄层, 后续的再冲击几乎不会增加其挠度, 故该拟合函数对实际情况的描述具有较好的吻合性。

由于式(6)与图 17 中自变量是冰球的累积动能, 即冰球单次动能的数值求和, 而为了获得冰球的峰值冲击力与靶板中心点挠度的关系, 本文预先假设碳纤维板所受冰球撞击的累积动能可等效于冰球

单次撞击动能，即：

$$E_{KC} = E_K \quad (8)$$

则可以由式(2)得到等效单次动能下的等效峰值冲击力，再与式(6)与式(7)联立可得碳纤维板的挠度与冰球峰值冲击力之间的函数关系：

$$X_D = -1.911 \times 10^{-3} F_{Peak}^2 + 0.899 F_{Peak} - 33.535 \quad (8)$$

式中： X_D 与 F_{Peak} 的含义同前。

同样，将所得曲线即式(8)与实测数据绘制在图 18 中。该函数能较好描述在冰球等效峰值冲击力下靶板的中心点挠度，表明将冰球重复冲击下的累积动能等效于大小相同的单次撞击动能这一假设，在误差允许范围内可认为其成立。但该函数并未考虑冰球与靶板在高速撞击下的弹性形变以及动态响应等，后续研究的推进将进一步提出相关理论。

表 4 冰球撞击后挠度及损伤程度
Table4 The deflection and the damage extent after impacting with ice spheres

撞击次数	冰球动能/J	靶板中心点挠度/mm	损伤程度
1	1207.8	16	轻度
2	1132.1	50	中度
3	1147.0	68	严重
4	1177.2	74	完全破坏
5	1132.1	—	贯穿

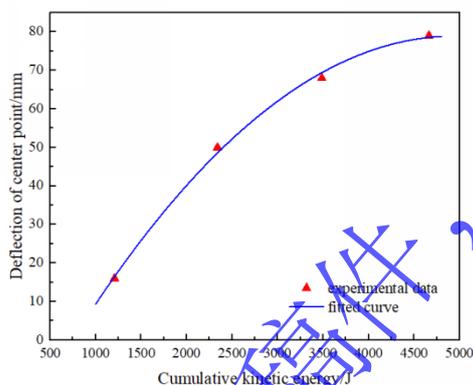


图 17 冰球累积动能—挠度曲线
Fig.17 The cumulative kinetic of ice spheres-Deflection curve

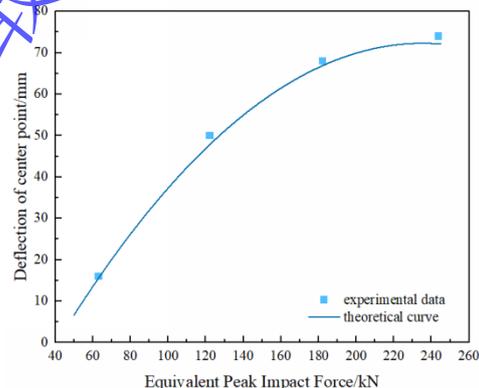


图 18 等效峰值冲击力—挠度曲线
Fig.18 The equivalent peak impact force-Deflection curve

4.结论

本文选用了 60mm 直径的冰球，基于撞击杆试验下得出的冰雹撞击力特性研究对 400mm × 400mm 规格的 T800/3200 碳纤维复合材料层合板开展了单次和多次撞击试验，并借助超声 C 扫描手段探究了单次冲击载荷下碳纤维靶板的内部分层损伤情况，以及对多次冲击下靶板的损伤和挠度进行了宏观分析与量化表征，主要结论如下：

(1) 冰球撞击目标后其冲击力迅速达峰，且冲击力峰值与冰球初动能呈线性增长关系，随后因裂纹贯穿以及整体崩溃，冲击力持续下降，整个过程可达数百微秒；

(2) 在单次撞击下，碳纤维层合板的表面凹陷、基体脱落以及层间脱粘等的损伤程度随冰球撞击动能增加而增加，由超声 C 扫描结果反馈，碳纤维板层间脱粘损伤面积与冰球初动能以及冲击力

峰值呈线性增长关系。而铺层方式则会影响靶板凹陷区方向，其本质是由靶板内部碳纤维密度所决定；

(3) 对于承受多次冰球撞击的碳纤维层合板，其损伤情况随撞击次数的增加，由最初基体脱落及表面凹陷逐次演变为前后贯穿且向四周延展的黑色空洞区，并伴有大量纤维拔出，各部分之间仅靠支架和少许碳纤维联系。靶板中心点挠度随冰球累积动能的增长而呈二次增长直至靶板完全贯穿，并可通过二者之间的二次关系预测靶板产生静态挠度的临界动能。

录用稿件，
非最终出版稿

参考文献

- [1] 刘爱平, 林仁伟等. 民用飞机复合材料结构在位修理环境控制方法研究[J]. 航空维修与工程, 2021, 1: 60-62. DOI: 10.19302/j.cnki.1672-0989.2021.01.016.
- LIU Aiping, LIN Renwei, et al. Study on an Environmental Control Method for In-Site Repair of Civil Aircraft Composite Structure[J]. AVIATION Maintenance and Engineering, 2021, 1: 60-62. DOI: 10.19302/j.cnki.1672-0989.2021.01.016
- [2] 宋振华. 冰载荷作用下碳纤维复合材料桁条加筋曲面板的冲击动力响应研究. 博士学位论文[D]. 广州: 暨南大学, 2014.
- [3] Mykola Holotiu, Olena Nalobina, Sviatoslav Homon, et al. Investigation of Ice Impact Destruction Process[J]. Procedia Structural Integrity, 2024, 59: 531-537. DOI: 10.1016/j.prostr.2024.04.075.
- [4] Kim H, Keune J N. Compressive strength of ice at impact strain rates [J]. Journal of Materials Science, 2007, 42(8): 2802-2806.
- [5] Franciska Müller, Angelo Böhm, Hauke Herrnring, et al. Influence of the ice shape on ice-structure impact loads[J]. Cold Regions Science and Technology, 2024, 221: 104175. DOI: 10.1016/j.coldregions.2024.104175.
- [6] PERNAS-SÁNCHEZ J, ARTERO-GUERRERO J A, VARAS D, et al. Analysis of ice impact process at high velocity [J]. Experimental Mechanics, 2015, 55: 1669-1679. DOI: 10.1007/s11340-015-0067-4.
- [7] 崔一诺, 张航, 卢鹏等. 冰冲击荷载试验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2022, 43(1): 25-31. DOI: 10.11990/jheu.202008048.
- CUI Yinuo, ZHANG Hang, LU Peng, et al. Experimental study on impact load on ice[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2022, 43(1): 25-31. DOI: 10.11990/jheu.202008048
- [8] Guégan P, Othman R, Lebreton D, et al. Experimental investigation of the kinematics of post-impact ice fragments. International Journal of Impact Engineering, 2011, 38: 786-795.
- [9] ZHANG Y K, LI Y L, TANG Z B, et al. Dynamic response of aluminum-foam-based sandwich panels under hailstone impact [J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(2): 373-380. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0232.
- [10] M.J. Burchell, K.H. Harriss. Catastrophic disruption by hypervelocity impact of multi-layered spherical ice targets[J]. International Journal of Impact Engineering, 2022, 168: 104294. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2022.104294.
- [11] Zhonggang Wang, Minquan Zhao, Kai Liu, et al. Experimental analysis and prediction of CFRP delamination caused by ice impact[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2022, 273: 108757. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2022.108757.
- [12] Zhenhua Song, Jacqueline Le, Daniel Whisler, et al. Skin-stringer interface failure investigation of stringer-stiffened curved composite panels under hail ice impact [J]. International Journal of Impact Engineering, 2018, 122: 439-450. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2018.09.014.
- [13] Xin Liu, Jia Qu, Jize Mao, et al. Mechanical responses and damage characteristics of the high-velocity impact of ice projectiles on foam sandwich structure[J]. International Journal of Impact Engineering, 2024, 191: 104994. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2024.104994.
- [14] Arnob Banik, Chao Zhang, M.H. Khan, et al. Low-velocity ice impact response and damage phenomena on steel and CFRP sandwich composite[J]. International Journal of Impact Engineering, 2022, 162: 104134. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2021.104134.
- [15] Gareth J. Appleby-Thomas, Paul J. Hazell, Gussan Dahini. On the response of two commercially-important CFRP structures to multiple ice impacts[J]. Composite Structures, 2011, 93(10): 2619-2627. DOI: 10.1016/j.compstruct.2011.04.029.

- [16] 林茜. 冰球撞击碳纤维复合材料板的实验和数值模拟研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2023.
- [17] 张晓琪. 冰弹撞击碳纤维/双马来酰亚胺的毁伤特性研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2021.
- [18] Yubo Gao, et al. Ballistic and delamination mechanism of CFRP /aluminum laminates subjected to high velocity impact[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2024, 295: 109797. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2023.109797.
- [19] 刘建刚, 李玉龙, 索涛等. 复合材料 T 型接头冰雹高速撞击损伤的数值模拟[J]. *爆炸与冲击*, 2014, 34(4): 451-456. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)04-0451-06.
- LIU Jiangan, LI Yulong, SUO Tao, et al. Numerical simulation of high velocity impact of composite T-joint by hailstone[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2014, 34(4): 451-456. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)04-0451-06.
- [20] Enling Tang, Xinxin Wang, Yafei Han, et al. Damage characteristics of ice projectile impacting on CF/BMI composite target at high speed[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, 167: 104285. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2022.104285.
- [21] J. Pernas-Sánchez, J.A. Artero-Guerrero. Numerical methodology to analyze the ice impact threat: Application to composite structures[J]. *Materials and Design*, 2018, 141: 350-360. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.12.044.
- [22] 王计真. 冰雹动态本构建模与验证 [J]. *航空科学技术*, 2023, 34: 51-56. DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2023.08.007.
- WANG Jizhen. Modeling and Verification of the Dynamic Constitutive of the Hailstone[J]. *Aeronautical Science and Technology*, 2023, 34: 51-56. DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2023.08.007.
- [23] Yong Zhou, Bin Xue, Yunxin Guo, et al. Mechanical responses of CFRP/PVC foam sandwich plate impacted by hailstone[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2023, 178: 104631. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2023.104631.
- [24] Jeffery D. Tippmann, Hyonny Kim, Jennifer D. Rhymer. Experimentally validated strain rate dependent material model for spherical ice impact simulation[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2013, 57: 43-54. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2013.01.013.
- [25] 谭晓军, 冯晓伟, 胡艳辉等. 层状结构冰球的高速撞击特性实验[J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(11). DOI: 10.11883/bzycj-2020-0047.
- TAN Xiaojun, FENG Xiaowei, HU Yanhui, et al. Experimental investigation on characteristics of layered ice spheres under high-velocity impact[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(11). DOI: 10.11883/bzycj-2020-0047.
- [26] J. Pernas-Sánchez, J.A. Artero-Guerrero, D. Varas, et al. Analysis of Ice Impact Process at High Velocity[J]. *Experimental Mechanics*, 2015, 11(55): 1669-1679. DOI: 10.1007/s11340-015-0067-4.
- [27] 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. DOI: 10.1016/S1359835X(02)00258-0.
- [28] Shokofeh Dolati, Abdoulhosein Fereidoon, Ali Reza Sabet. Experimental investigation into glass fiber/epoxy composite laminates subjected to single and repeated high-velocity impacts of ice[J]. *Iranian Polymer Journal*, 2014, 23:477-486. DOI: 10.1007/s13726-014-0242-y.
- [29] J. Pernas-Sánchez, J.A. Artero-Guerrero, D. Varas, et al. Experimental analysis of ice sphere impacts on unidirectional carbon/epoxy laminates[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 96: 1-10. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.05.010.