

DOI: 10.11883/bzycj-2024-0453

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 621999;
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, 首先, 通过试验对冰球在高速冲击下的撞击力特性进行了研究, 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; 最后, 对相同厚度的靶板进行了冰球重复撞击试验, 结果表明, 其宏观损伤程度随撞击次数的增加而加重, 且碳纤维板中心点的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。

关键词: 冰球; 高性能碳纤维层合板; 撞击力; 损伤特性

中图分类号: O347.3; V258

国标学科代码: 13015

文献标志码: A

Damage characteristics of T800 carbon fiber plates subject to typical hail impact loads

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 621999, Sichuan, China;

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

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

Abstract: With the deterioration of the natural climate, hail impact has become a threat that cannot be ignored by civil aircraft. To study the hail impact damage characteristics of high-performance carbon fiber composites used for civil aircraft, we first investigated the impact force characteristics of ice spheres under high-speed impact through experiments, and the impact force time history curves of ice spheres under different speeds were obtained using an air cannon test system. At the same time, to make the speed range of the ice sphere more extensive, some existing experiment data were 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 test was conducted on the T800/3200 carbon fiber composite laminates. It was found that the concave of the front 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 depends on the initial speed of the ice sphere. To further quantify the relationship between the damage degree of the laminate and the kinetic energy of the ice sphere, ultrasonic C-scanning was used to obtain the damaged

* 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

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, repeated impact tests of ice spheres were carried out on the target plate with the same thickness, and as expected, the macro damage degree increased with the number of impacts. Finally, the front and back surfaces of the composite laminates were completely delaminated, resulting in a large number of fibers being pulled out and displaying a penetrating through-thickness damage pattern. 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. The apex of the parabola can well reflect the accumulated kinetic energy required for the target plate penetration.

Keywords: ice sphere; high performance carbon fiber laminate; impact force; damage characteristic

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,冰雹砸伤飞行器事故已发生多起。民航客机机体的主要组成材料是高性能碳纤维,尤其是中大型宽体客机,如波音 787,高性能碳纤维占比可达 50%^[1],如图 1^[2]所示。T800 碳纤维作为高性能复合材料,研究其在典型冰雹载荷作用下的损伤特性具有重要意义。

目前,不少学者通过试验和数值模拟对冰雹的动态力学行为进行了研究。如 Holotiuk 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,发现在一定范围的高应变率(400~2600 s⁻¹)下,冰的抗压强度随应变的增大而增大;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;Pernas-Sánchez 等^[6]将不同直径的冰球高速发射至测压元件上,发现所测得的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,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 等^[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,结果显示,冰被撞击破碎后,会在撞击处形成圆形碎片云而不会反溅,碎片速度也会随着与撞击中心距离的增大而降低。其他学者^[9-10]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。

对冲击载荷下靶板的破坏,Wang 等^[11]对受冰球影响的 CFRP(carbon fiber reinforced polymer)层压板进行了系统的试验研究,结果表明,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曲面碳/环氧树脂复合板的动力学行为和破坏行为,发现冰球冲击对面板的损伤是以应力波为主的动力响应,当冰球冲击速度达到最小阈值时,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,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(polymethacrylimide)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(carbon fibre/PMI foam sandwich)靶板的损伤程度和吸能效率随冲击速度的增大而增大,而随撞击角的增大而降低,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;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,冰与复合材料作用期间有更大的位移和更好的能量吸收性;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,

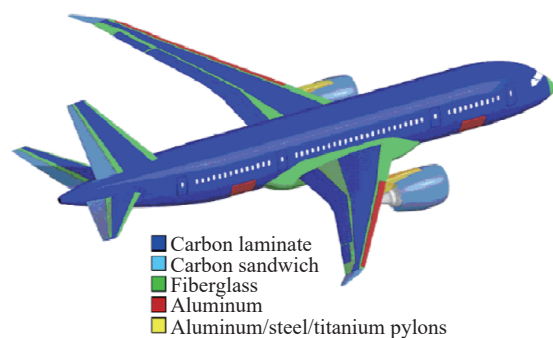


图 1 波音 787 的复合材料^[2]

Fig. 1 Composites in Boeing 787^[2]

并按损伤严重程度定义了 6 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了其损伤特性; 张晓琪^[17] 对冰弹正撞 CF/BMI 复合材料进行了试验, 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试验研究, 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方法对相关内容进行了研究, 如刘建刚等^[19]、Tang 等^[20]、Pernas-Sánchez 等^[21] 以及王计真^[22], 均在研究冰弹撞击复合材料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, 而对冰雹撞击致损的量化表征研究较少。本文中基于对 60 mm 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试验, 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时, 遇到直径超过 50 mm 的冰雹撞击事件并不罕见^[23], 考虑设计应具有一定的安全性和容错性, 采用直径为 60 mm 的冰球, 金属杆选用铝合金材料, 杆直径为 80 mm。如图 2 所示, 容器为 2 个半球形铝合金制模具, 将其用螺栓拧紧且密封后, 通过预留的 1 mm 小孔往模具中注入蒸馏水, 放置在温度为 -18 °C 的环境中, 冷冻超过 24 h 后取出。

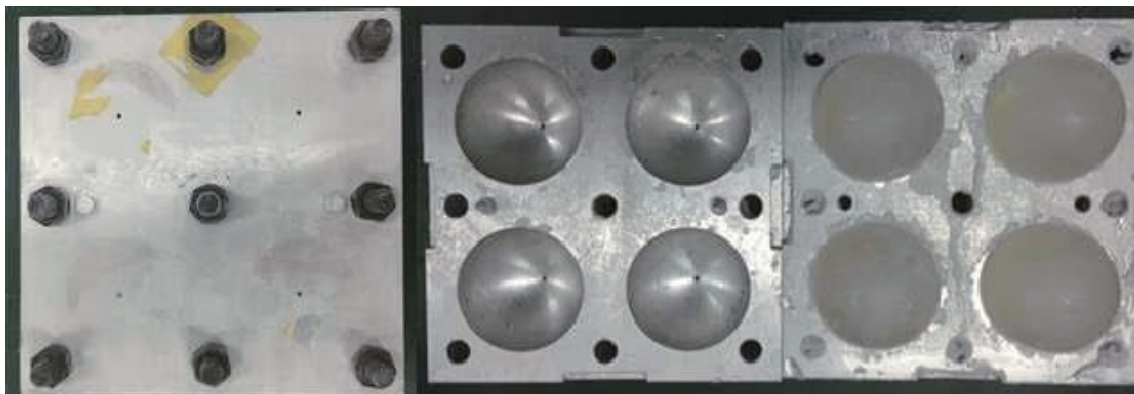


图 2 60 mm 冰球制备模具

Fig. 2 Mold for preparation of 60 mm ice spheres

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的撞击力:

$$F(t) = \varepsilon(t) E_0 A_0 \quad (1)$$

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

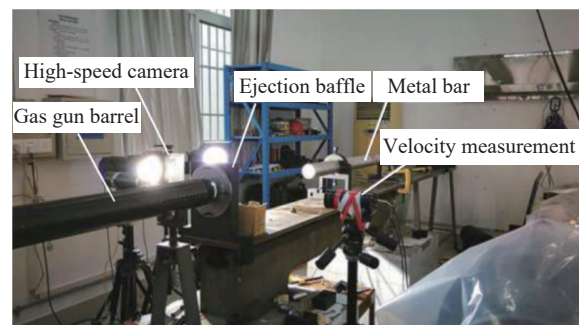


图 3 冰球撞击杆试验装置

Fig. 3 Test device of ice spheres impacting bars

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。为防止空气炮发射时对冰球造成损坏,设置冰球弹托使冰球均匀受力,并在枪管口处通过弹托挡板使二者分离,如图 4 所示。试验具体参数如表 1 所示。



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

Table 1 Experimental conditions for the high-speed impact of ice spheres on bars

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

根据试验中测得的金属杆的应变,由式(1)绘制出冲击力时程曲线,如图 5 所示。图 6 显示了高速摄影下不同速度的冰球从接触到破坏的撞击历程,图中 Δt 为时间间隔。由图 5 可知,冲击力峰值随冰球初速度的增大而增大,而冲击力持时反映其动量传递能力演变历程。Song 等^[12]和 Tippmann 等^[24]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 80 m/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,使冰球提前丧失动量传递能力所致^[25]。

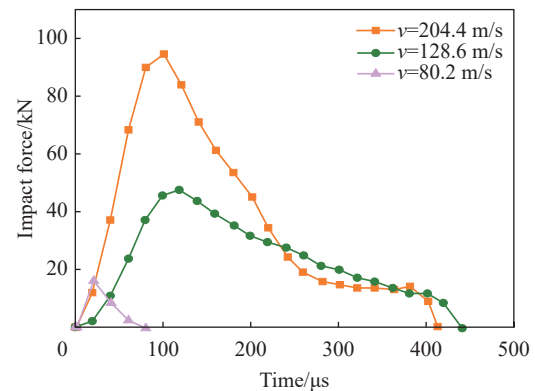


图 5 撞击力时程曲线

Fig. 5 Impact force history curves

由于其他相关研究^[26]中,在正常无初始缺陷的情况下,70~210 m/s 速度区间内的冰球冲击力持时均一致地保持在 400~450 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的研究。

试验测得初速度为 80.2、128.6、204.4 m/s 的冰球峰值冲击力分别为 17.2、48.8、95.6 kN。为进一步获得峰值冲击力与冰球动能之间的关系,引入 Tippmann 等^[24]的试验数据,见图 7。其试验所使用的冰球直径为 61 mm,与本试验所采用的冰球直径相近。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 为冰球的初始动能。

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 550~1250 J 的中间阶段, Tippmann 等^[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^[27]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 400~1400 J 范围内,适用程度相对较低且与直径无关。因此,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地出现偶然误差,致使离散性较大, Tippmann 等^[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。因此, 综合各组试验数据, 可认为峰值冲击力与冰球初始动能之间为线性增长的关系。

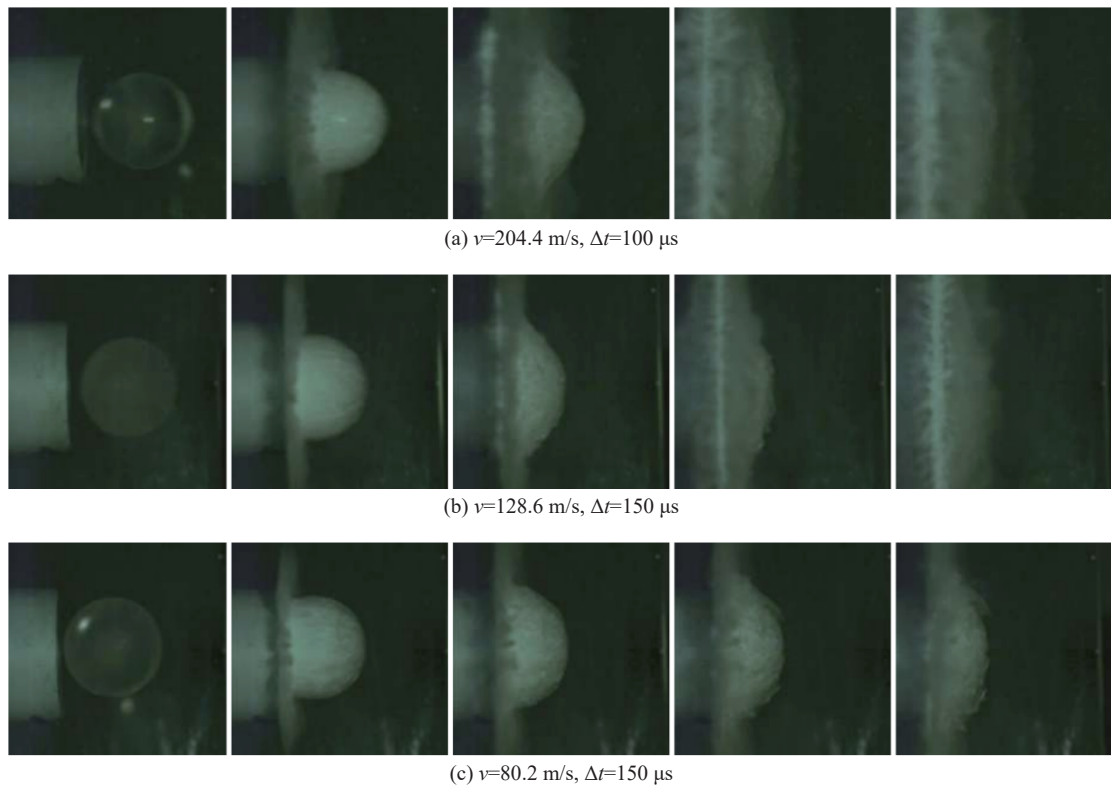


图 6 高速摄影下冰球撞击金属杆过程

Fig. 6 Process of ice spheres impacting metal rod under the high-speed camera

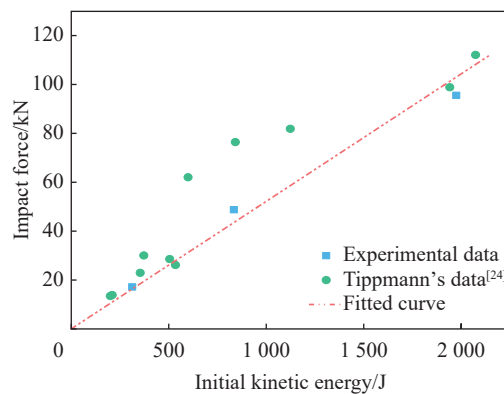


图 7 初始动能与峰值冲击力的关系

Fig. 7 Relationship between initial kinetic energy and impact force peak

2 冰雹单次撞击碳纤维板的损伤特性

基于冰雹撞击力特性的研究, 开展冰雹撞击 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试验数据与超声 C 扫描结果分析靶板表面与内部的损伤形态、损伤面积及损伤模式。

2.1 试验装置与试验方案

试验装置如图 8~9 所示, 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固定, 靶板中心与炮管圆心位于同一水平线。

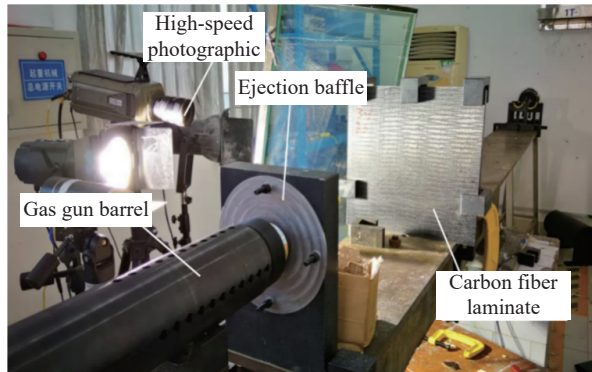


图 8 冰球撞击靶板试验装置

Fig. 8 Test device of ice spheres impacting target

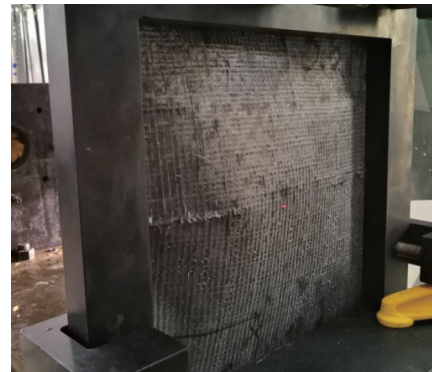


图 9 固定钢框架

Fig. 9 Steel frame fixer

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 50 mm 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 5.69 mm , 旨在研究单次冰冲击载荷作用下, 具有不同初速度或初始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 60 mm 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

Table 2 Experimental conditions for ice spheres impacting carbon fiber plates

序号	靶板厚度/mm	铺层方式	冰球质量/g	冰球速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	初始动能/J
1	5.69	$[45/-45/90/0/90/-45/45/90/0/90/45/-45/90/90/-45/45]_s$	97.9	65.1	207.5
2			98.0	89.7	394.3
3			97.7	108.3	573.0
4			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高度一致, 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 高速摄影下冰球撞击 T800/3200 靶板过程

Fig. 10 The process of ice spheres impacting T800/3200 target under the high-speed camera

靶板被撞击后的损伤情况如图 11 所示, 其损伤程度随冰球初始动能的增大而增大。由于靶板 1~2 受冰球撞击的初速度较低, 对靶板造成的损伤程度相应也较小, 靶板 1 无论是撞击面还是背面几乎

均未产生视觉可见的损伤, 靶板 2 在背面有零星的基体脱落现象, 但程度极轻; 对于靶板 3~4, 对应的冰球初始动能分别为 569.8、965.3 J, 其撞击正面均出现了视觉可见的损伤和变形。其中靶板 3 的正面中心区域出现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, 而靶板 4 由于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靶板 3 更严重。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 2 条平行且与靶板边界呈 45° 的分界线, 如图 11(a) 中红色线框所示。分析其原因有以下 2 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], 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(1000 s⁻¹ 以上, 对应撞击速度约为 30 m/s)下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 2 条较为明显的分界线。针对靶板 3~4 背面出现损伤的原因, 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, $\rho_A c_A$ 为介质 A 的波阻抗, $\rho_B c_B$ 为介质 B 的波阻抗。

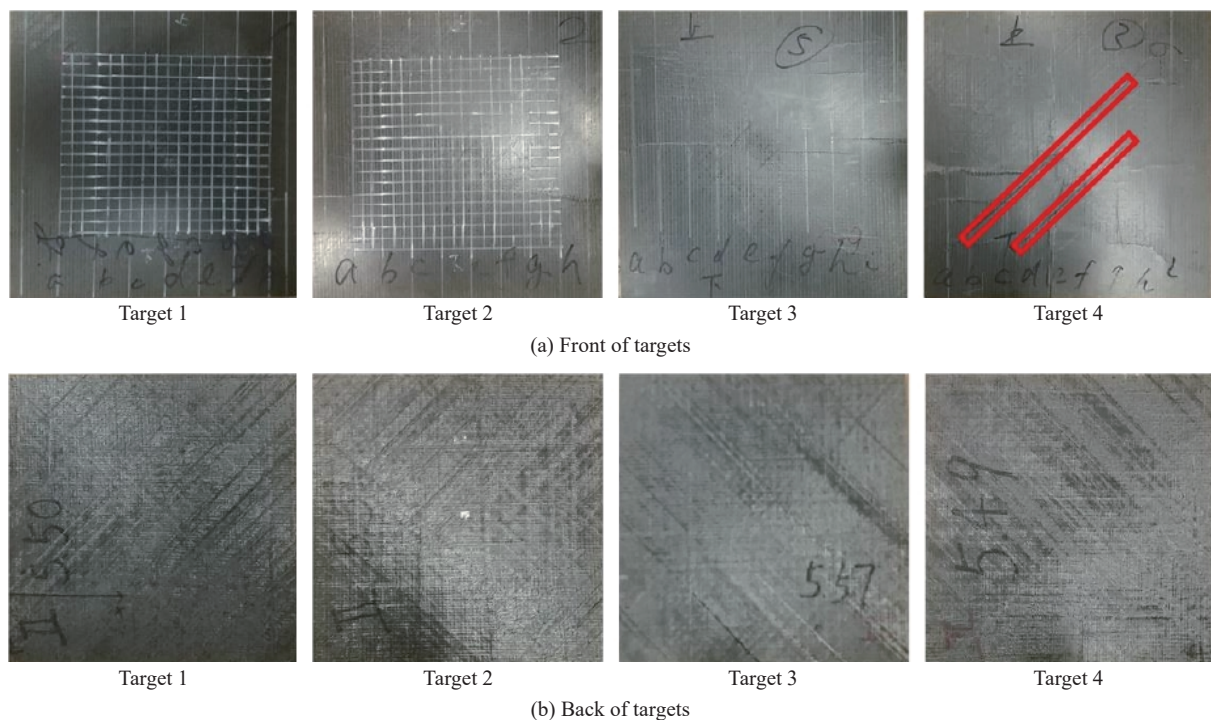


图 11 5.5 mm 靶板受冰球撞击后的毁伤形态

Fig. 11 Damage pattern of 5.5 mm thick targets after hit by ice spheres

本试验中介质 A 即为碳纤维靶板, 介质 B 则为空气, 其波阻抗视为零, 此时有:

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

即在撞击面受到冰球冲击后, 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。靶板 2 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。

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用环氧树脂将多层碳纤维按照一定的排布方式粘结而成, 在视觉上只能观测到表面损伤, 其内部损伤情况需用超声 C 扫描的方式进行探查。

为方便分析损伤层间情况, 对扫描结果进行了图像处理, 如图 12 所示, 红色区域代表层间损伤。损伤情况与预期一致: 随着撞击动能由 207.5 J 增至 972.2 J, 超声扫描结果中的红色区域面积也不断增大, 表明随着冲击力和冰球初始动能的增大, 其内部各层碳纤维之间的脱粘情况加剧且脱层范围扩大; 中心白色区域面积同样随着冰球动能的增大而增大, 其原因是, 随着冲击力的增大, 撞心附近小范围内基体出现粉碎性破坏, 脱层和变形较大, 损伤加重, 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引起的; 靶板 3~4 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。

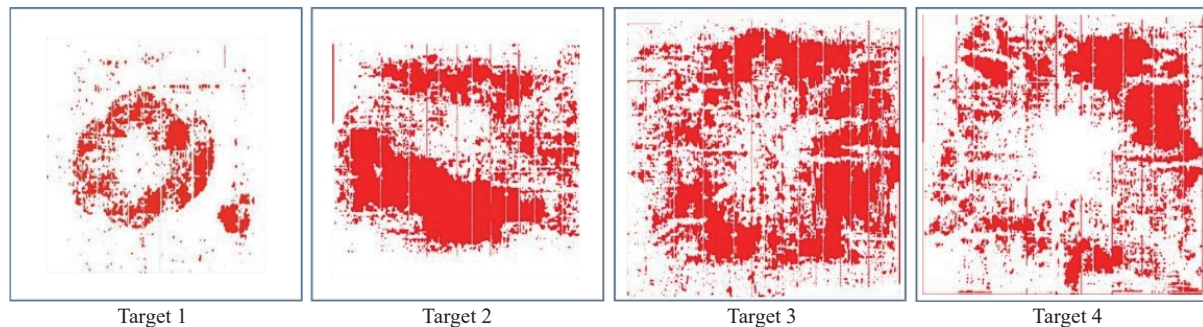


图 12 超声扫描结果

Fig. 12 Results of ultrasonic C-scan

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面积与冰球动能之间的关系, 提取了超声检测结果中靶板分层损伤面积百分比, 发现靶板 4 的损伤面积百分比相较于靶板 3 有一定幅度的下降, 甚至略小于靶板 2 的损伤面积。原因是靶板 4 损伤更严重, 因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。因此, 为了确保结果的可靠性, 不以靶板 4 的损伤数据为拟合点, 仅对靶板 1~3 的超声扫描结果进行拟合, 如图 13 所示, 发现损伤面积百分比与初始动能近似呈线性关系:

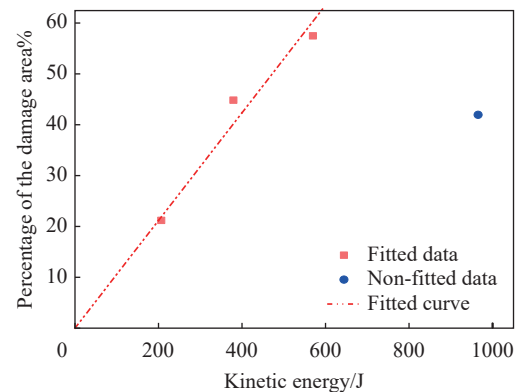


图 13 靶板损伤面积百分比与冰球初始动能的关系

Fig. 13 Relationship between the percentage of target damage area and the initial kinetic energy of ice sphere

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

式中: S_{DP} 为损伤面积百分比。

因此, 对于该厚度下的 T800/3200 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始动能呈线性关系。

进一步, 为得到峰值冲击力与靶板分层损伤面积的关系, 联立式 (2)、(4) 可得:

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

同时, 将靶板 1~3 的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 所示的曲线。可以看到, 与预期情况一致, 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再适用, 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, 需用其他方式进行表征。

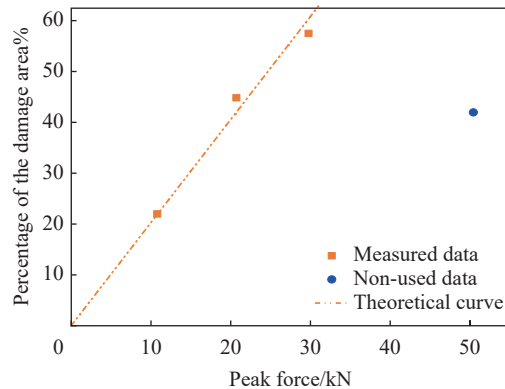


图 14 靶板损伤面积百分比与冰球峰值冲击力的关系

Fig. 14 Relationship between the percentage of target damage area and the peak impact force of ice sphere

值得注意的是, 在靶板 1~2 的表面并未出现肉眼可见的损伤的情况下, 超声 C 扫描却反映出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时, 其内部损伤会早于外表损伤, 这一结果与文献 [27] 中的结论一致。

3 冰球多次撞击碳纤维板损伤特性

为更贴近民航客机在巡航时所遇冰雹撞击情况, 在单次撞击试验的基础上, 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。

3.1 试验装置和试验方案

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 60 mm, 靶板尺寸 400 mm×400 mm, 考虑到其冲击的初始动能均较大, 故其厚度仍然采用 6 mm 级, 实测厚度为 5.63 mm, 以防止未完成试验预设撞击次数就发生贯穿或完全破坏。试验工况如表 3 所示。

每发试验后均对靶板的损伤情况进行拍照记录, 从外部观察其变形和损伤情况。由于在多次撞击后冰球对靶板造成的损伤和变形很大, 因此, 不必也无法采用超声 C 扫描探测碳纤维板的内部损伤情况。

3.2 试验结果分析

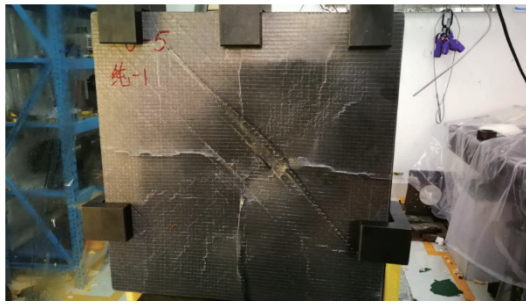
3.2.1 宏观损伤分析

图 15~16 记录了每一次撞击后碳纤维靶板的损伤情况, 由于各次冰球初始动能均超过 1 000 J, 因此, 在第 1 次撞击后就使得碳纤维层间脱粘以及部分基体被破坏, 此时靶板具有明显的凹陷变形和纤维轻微拔出的特征; 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°方向的完全拔出, 且损伤呈放射状扩展至四周, 背面有较为明显的挠度。

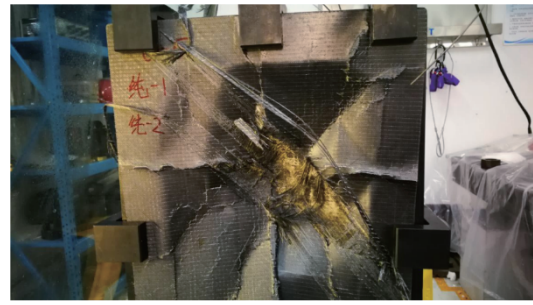
表 3 冰球多次冲击碳纤维靶板的试验工况

Table 3 Experimental conditions for repeated impacts of ice spheres on carbon fiber plates

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			157.3	1207.8
2			152.1	1132.1
3	60	5.63	153.2	1147.0
4			154.9	1177.2
5			151.6	1132.1



(a) Front surface after the 1st impact



(b) Front surface after the 2nd impact



(c) Front surface after the 3rd impact

图 15 第 1~3 次冲击后靶板的损伤情况

Fig. 15 Damage situation of the target after 1st to 3rd impact



(a) Front surface after the 4th impact



(b) Side after the 4th impact



(c) Front surface after the 5th impact



(d) Side after the 5th impact

图 16 第 4~5 次冲击后靶板的损伤情况

Fig. 16 Damage situation of the target after 4th to 5th impact

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, 因此, 碳纤维断裂并向外裸露拔出, 形成直径约 150 mm 的黑色空洞区, 透过此坑能清晰看见层合板的内部基体和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, 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黏聚作用, 因此, 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。

从图 16(a)~(b) 可以看到, 完成第 4 次撞击后, 靶板完全分层, 失去黏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大并已扩散至下边缘, 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)~(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连接。

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 所示, 并将其损伤程度划分为 5 个等级, 其中第 5 次撞击后靶板贯穿, 因此无法测得其中心点挠度。同时, 猜测其中心点挠度与冰球动能之间存在一定的关系, 为得到其数学表达式, 结合实际情况中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, 因此, 采用二次多项式进行拟合, 并给出了冰球累积动能-中心点挠度曲线, 如图 17 所示。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 为靶板中心点挠度, mm; E_{KC} 为冰球撞击的累积动能, J。

表 4 冰球撞击后的挠度及损伤程度
Table 4 Deflection and damage extent after impact 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

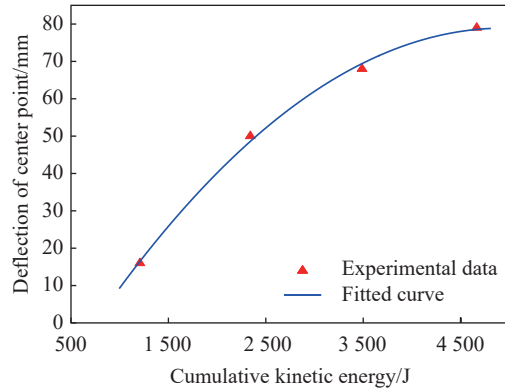


图 17 冰球累积动能-挠度曲线

Fig. 17 Cumulative kinetic energy-deflection curve of ice spheres

在该曲线拟合下, 其最大误差的绝对值仅为 1.32%, 容易发现, 在累积动能达到 4 664.1 J 时, 即第 4 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 16(a)~(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, 因此, 该拟合函数对实际情况的描述具有较好的吻合性。

由于式 (7) 与图 17 中的自变量是冰球的累积动能, 即冰球单次动能的数值求和, 为了获得冰球的峰值冲击力与靶板中心点挠度的关系, 本文中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的单次撞击动能, 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, 再联立式 (7)~(8) 得到碳纤维板的挠度与冰球峰值冲击力之间的函数关系:

$$X_D = -1.911 \times 10^{-3} F_{\text{peak}}^2 + 0.899 F_{\text{peak}} - 33.535 \quad (9)$$

同样, 将所得曲线即式 (9) 与实测数据绘制在图 18 中。该函数能较好地描述冰球在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, 后续研究将进一步提出相关理论。

4 结 论

选用直径 60 mm 的冰球, 基于撞击杆试验得出的冰雹撞击力特性, 对 400 mm×400 mm 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, 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, 得到的主要结论如下。

(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始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的增大而增大, 由超声 C 扫描结果可知, 碳纤维板层间脱粘损伤面积与冰球初始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的凹陷区方向, 其本质由靶板内部碳纤维密度决定。

(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而加重, 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。靶板中心点挠度与冰球累积动能之间呈二次方增长关系, 直至靶板完全贯穿, 可通过两者之间的关系预测靶板产生静态挠度的临界动能。

参考文献:

- [1] 刘爱平, 林仁伟, 陈壁茂. 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: 10.3969/j.issn.1672-0989.2021.01.022.
LIU A P, LIN R W, CHEN B M, et al. Study on an environmental control method for in-site repair of civil aircraft composite structure [J]. *Aviation Maintenance & Engineering*, 2021(1): 60–62. DOI: 10.3969/j.issn.1672-0989.2021.01.022.
- [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 [D]. 广州: 暨南大学, 2014.
SONG Z H. The dynamic response of stringer-stiffened curved composite panels under the hail ice impact [D]. Guangzhou: Jinan University, 2014.
- [3] HOLOTIUK M, NALOBINA O, HOMON S, 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. DOI: 10.1007/s10853-006-1376-x.
- [5] MÜLLER F, BÖHM A, HERRNRING H, 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].

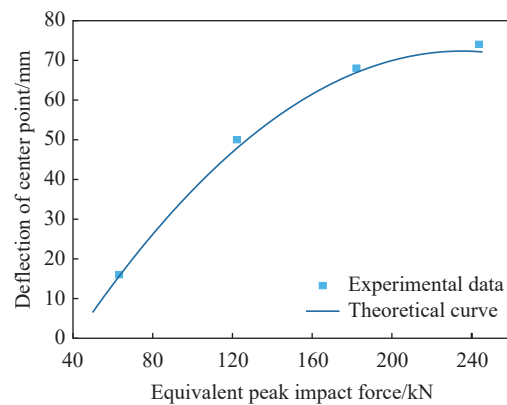


图 18 等效峰值冲击力-挠度曲线

Fig. 18 Equivalent peak impact force-deflection curve

- Experimental Mechanics*, 2015, 55(9): 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 Y N, ZHANG H, LU P, 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 [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, 38(10): 786–795. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2011.05.003.
- [9] 张永康, 李玉龙, 汤忠斌, 等. 冰雹撞击下泡沫铝夹芯板的动态响应 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(2): 373–380. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0232.
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] BURCHELL M J, HARRISS K H. 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] WANG Z G, ZHAO M Q, LIU K, 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] SONG Z H, LE J, WHISLER D, 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] LIU X, QU J, MAO J Z, 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] BANIK A, ZHANG C, KHAN M H, 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] APPLEBY-THOMAS G J, HAZELL P J, DAHINI G. 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试验和数值模拟研究 [D]. 宁波: 宁波大学, 2021.
LIN Q. Experimental and numerical simulation of ice ball impact on carbon fiber composite plate [D]. Ningbo: Ningbo University, 2021.
- [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.
ZHANG X Q. Damage characteristics of carbon fiber/bismaleimide impacted by ice projectile [D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2021. DOI: 10.27323/d.cnki.gsgyc.2021.000321.
- [18] GAO Y B, SHI L T, LU T, 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 J G, LI Y L, SUO T, 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] TANG E L, WANG X X, HAN Y F, 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] PERNAS-SÁNCHEZ J, ARTERO-GUERRERO J A, LÓPEZ-PUENTE J, et al. Numerical methodology to analyze the ice impact threat: application to composite structures [J]. *Materials & 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(8): 51–56. DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2023.08.007.
WANG J Z. Modeling and verification of the dynamic constitutive of the hailstone [J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2023, 34(8): 51–56. DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2023.08.007.
- [23] ZHOU Y, XUE B, GUO Y X, 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] TIPPMANN J D, KIM H, RHYMER J D. 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试验 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(11): 113301. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0047.
- 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): 113301. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0047.
- [26] KIM H, WELCH D A, 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/S1359-835X(02)00258-0.
- [27] PERNAS-SÁNCHEZ J, ARTERO-GUERRERO J A, VARAS D, 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.
- [28] DOLATI S, FERREIDON A, SABET A R. Experimental investigation into glass fiber/epoxy composite laminates subjected to single and repeated high-velocity impacts of ice [J]. *Iranian Polymer Journal*, 2014, 23(6): 477–486. DOI: 10.1007/s13726-014-0242-y.

(责任编辑 曾月蓉)