

腐蚀与防护

飞机迎风面蒙皮涂层高动态雨蚀损伤评价和机理

沙明工^{1,2}, 惠志强¹, 李雨桐¹, 孙莹³, 李明^{4,5}, 魏政⁶,
Babaytsev Arseny³, Fedotenkov Gregory³, Mednikov Aleksei⁷,
Tkhabisimov Aleksandr⁷, 李玉龙^{1,2}, 陈建军^{8*}

(1.西北工业大学 民航学院, 西安 710072; 2.西北工业大学太仓长三角研究院, 江苏 苏州 215400; 3.莫斯科航空学院国立研究大学, 莫斯科 125993 俄罗斯; 4.航空综合环境航空科技重点实验室, 北京 100028; 5.中国航空综合技术研究所, 北京 100028; 6.中航工业集团公司济南特种结构研究所, 济南, 250104; 7.国立研究大学 莫斯科动能学院, 莫斯科 111250 俄罗斯; 8.杭州萧山技师学院, 杭州 310000)

摘要: **目的** 飞机在雨中高速飞行时, 机体迎风面蒙皮涂层受到雨滴冲击作用而产生损伤, 出现表面开裂、剥离等典型损伤, 会降低结构的安全性和功能性, 因此需要对蒙皮涂层的雨蚀损伤机理进行深入研究。**方法** 利用一级轻气炮搭建的单射流试验平台和水切割装置改装的多射流试验平台模拟雨滴冲击。针对以碳纤维 T300 编制材料为基体, 表面涂有 3 种同等厚度的聚氨酯涂层材料, 在不同试验条件下对材料进行雨蚀试验研究。**结果** 在 617 m/s 冲击速度条件下, 以 0°、15°、30° 的冲击角度以及在 15° 冲击角度, 430、490 和 555 m/s 的冲击速度下对三种涂层材料进行单射流试验; 对三种涂层材料在 350、370 和 420 m/s 的冲击速度下, 进行 1 000 次冲击的多喷射流试验。结果表明: 随着冲击角度和速度的变化, 三种涂层材料的损伤趋势是一致的; 典型损伤形貌相同, 即当水锤压力低于涂层材料的屈服强度极限时, 损伤区域由环形损伤包围中央未损伤区域构成; 当水锤压力超过材料的屈服强度极限时, 水锤压力结合侧向射流会造成 1~2 倍液滴直径的损伤区域。多射流与单射流的试验结果具有相似性。**结论** 通过对比单射流与多射流试验下涂层材料的典型损伤形貌可知, 材料的雨蚀损伤机理与自身的力学性能关系密切。根据三种涂层材料在不同试验参数下的损伤结果, 材料 1 性能最佳, 在多种试验条件下均有良好的表现, 能够满足飞机在不同环境下的飞行需求。

关键词: 液固冲击; 雨蚀损伤; 水射流; 冲击动力学; 复合材料; 涂层

中图分类号: TG174 文献标志码: A 文章编号: 1001-3660(2026)02-0001-14

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2026.02.001

Evaluation and Mechanism of Highly Dynamic Rain Corrosion Damage to Aircraft Windward Side Skin Coatings

SHA Minggong^{1,2}, HUI Zhiqiang¹, LI Yutong², SUN Ying³, LI Ming^{4,5}, WEI Zheng⁶, Babaytsev Arseny³,

收稿日期: 2025-05-12; 修订日期: 2025-09-13

Received: 2025-05-12; Revised: 2025-09-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12261131505, U2241274); 俄罗斯科学基金(23-49-00133); 航空科学基金项目(20240002053002); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2025JC-YBMS-005); 陕西省重点研发计划项目(2024GX-YBXM-037); 太仓市基础研究项目(TC2024JC10)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (12261131505, U2241274); Russian Science Fund (23-49-00133); Aeronautical Science Foundation of China (20240002053002); Natural Science Basic Research Program of Shaanxi (2025JC-YBMS-005); Key Research and Development Program of Shaanxi (2024GX-YBXM-037); Basic Research Programs of Taicang (TC2024JC10).

引文格式: 沙明工, 惠志强, 李雨桐, 等. 飞机迎风面蒙皮涂层高动态雨蚀损伤评价和机理[J]. 表面技术, 2026, 55(2): 1-14.

SHA Minggong, HUI Zhiqiang, LI Yutong, et al. Evaluation and Mechanism of Highly Dynamic Rain Corrosion Damage to Aircraft Windward Side Skin Coatings[J]. Surface Technology, 2026, 55(2): 1-14.

*通信作者 (Corresponding author)

*Fedotenkov Gregory*³, *Mednikov Aleksei*⁷, *Tkhabisimov Aleksandr*⁷, *LI Yulong*^{1,2}, *CHEN Jianjun*^{8*}

(1. School of Civil Aviation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Yangtze River Delta Research Institute of NPU, Taicang, Jiangsu Suzhou 215400, China; 3. Moscow Aviation Institute National Research University, Moscow 125993, Russia; 4. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Aero Combined Environment, Beijing 100028, China; 5. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Aero Combined Environment, Beijing 100028, China; 6. The Research Institute for Special Structures of Aeronautical Composite AVIC, Jinan 250104, China; 7. Moscow Power Engineering Institute, National Research University, Moscow 111250, Russia; 8. Hangzhou Xiaoshan Technician College, Hangzhou 310000, China)

ABSTRACT: When an aircraft flies at high speed in the rain, the skin coating on the windward side of the fuselage is damaged by the impact of raindrops. In order to ensure the safety of flight, the rain erosion damage mechanism of the skin coating is studied in depth. To simulate the raindrop impact, a single-jet test platform constructed by a first-class light-air gun and a multi-jet test platform modified by a water-cutting device were utilized. Rain erosion tests were conducted on the materials under different experimental conditions, where the substrate is made of carbon fiber T300 woven fabric, and its surface is coated with three types of polyurethane coating materials of equal thickness. Single-jet flow tests were performed on three coating materials at an impact velocity of 617 m/s and impact angles of 0°, 15°, and 30° as well as on three coating materials at impact velocities of 430, 490, and 555 m/s and an impact angle of 15°. Multi-jet flow tests were performed on three coating materials at impact velocities of 350, 370, and 420 m/s with 1 000 impacts. The results showed that, with the change of impact angle and velocity, the damage trend of the three coating materials was consistent and the typical damage morphology was the same. For example, when the water hammer pressure was lower than the yield strength limit of the coating material, the damage area consisted of a ring-shaped region encircling the central uninjured area, and when the water hammer pressure was higher than the yield strength limit of the material, the combination of the water hammer pressure with the lateral jet would cause a damage area 1-2 times the diameter of the liquid droplet. Under the impact of a single jet, the damage profile of the coating material was not symmetrical, and the damage profile in the transverse direction was larger than that in the longitudinal direction. This occurred because the jet was affected by gravity during flight, which produced a downward drop, resulting in hindered lateral jet propagation in the vertical direction. Under the impact of multiple jets, the damage critical velocities of materials 1 and 2 were in the range of 320-350 m/s and the damage critical velocity of material 3 was slightly lower than 320 m/s. Different materials produced distinct erosion pit shapes under the impact of multiple jets. These shapes affected further erosion differently: flat-bottomed pits promoted erosion, while sharp-bottomed pits mitigated it. There was a similarity between the test results for single and multiple jets. Comparing the typical damage morphology of the coating materials under single-jet and multi-jet tests, it was found that the rain-etching damage mechanism of the materials was closely related to their own mechanical properties, but not to the impact mode. Based on the damage results of the three coating materials under different test parameters of single and multiple jets, material 1 performs best under different rain field impacts simulated by the test and can adapt to the aircraft under different flight conditions.

KEY WORDS: liquid-solid impact; rain erosion damage; water jets; impact dynamics; composites; coatings

飞机雷达罩、机身、风挡玻璃、发动机叶片等结构迎风面在高速飞行过程中易受到雨滴冲刷而导致的侵蚀现象,称为雨蚀。随着航空技术的发展,飞机的飞行速度和运行效率不断提高,由雨滴冲蚀所造成的机体材料分层断裂、涂层脱落等结构损伤和功能性损伤等问题日趋显著^[1-2],不仅影响结构的安全性和经济性,还可能缩短关键部件的使用寿命^[3-6],已成为高速飞行器隐身和结构安全设计中的瓶颈问题之一。1927年,Honegger^[7]研究暴露于潮湿环境中的蒸汽轮机叶片材料的疲劳情况,观察到液滴以 200 m/s 的速度撞击固体材料导致其表面侵蚀,这是人类首次关注到液滴的冲蚀现象。美国 B-29 轰炸机 1945 年在

太平洋执行任务后遭遇雷暴,地面检修时发现飞机雷达罩损伤严重,这也是工程单位第一次观测到真实的飞行器雨蚀损伤^[8]。

材料的雨蚀研究手段最早通过飞行试验完成^[9-11]。美国空军^[12]对比飞行试验与地面旋臂式雨蚀试验,得出结论,在旋转臂上获得的材料的抗雨蚀评价与实际飞行时得到的结果一致。旋臂式在地面试验中广泛使用^[13],可通过模拟低速雨场侵蚀环境,定量评估材料的抗雨蚀能力。随着飞行器速度的提升,射流设备因具备高动态响应特性、紧凑型结构设计、人机交互友好性及参数可控制等优势,被广泛应用于地面试验,通常用来研究液固冲击理论问题以及模拟高速雨滴对材料

的冲击破坏机理^[14-18]。Cook^[19]将水锤压力理论应用在液固冲击理论中, 全面解释了材料的雨蚀损伤机理。Springer^[20]基于一种材料的特性建立了雨蚀侵蚀模型, 将损伤区域划分为潜伏区、稳定质量损失区、最终侵蚀区; 定义了三个重要参数: 潜伏期、总质量损失、潜伏期后的质量损失率。Field^[21]结合前人的研究成果, 分析表明在液固冲击初期, 液固交界面存在超音速膨胀, 是材料受损的主要诱因。Gujba 等^[22]研究了 Ti-6Al-4V 材料的雨蚀损伤行为, 结果表明冲击速度越高, 侵蚀开始时间越快, 最大侵蚀速率越大。O'Carroll 等^[23]利用纳米压痕法评估了材料的抗雨蚀性能。研究表明: 储能模量和硬度的降低有利于提高材料的抗雨蚀性能。Wang 等^[24-25]研究了定向和非定向有机玻璃 (PMMA) 在不同射流条件下的抗雨蚀性能, 得出非定向 PMMA 的抗雨蚀性能更好; 随着冲击速度的增加, 由于水膜厚度的减小, 水膜的缓冲效果逐渐减小。Coto 等^[26]利用物理气相沉积钛涂层, 进行雨蚀试验, 结果表明涂层厚度会影响其抗雨蚀性能。

液固两相高速冲击作用普遍存在于高速度、高湿度的服役环境中, 除了飞行器的雨滴冲击外, 风力发电叶片的雨滴侵蚀^[27-29]、蒸汽轮机的叶片水蚀^[30]、核电站冷却管侵蚀^[31]等应用领域都会涉及该问题。聚氨酯涂层材料凭借耐磨性好、附着力强、硬度大等突出优势, 成为上述工程领域蒙皮防护涂层的核心材料^[32-33]。然而其抗雨蚀性能却鲜少见于公开报道, 不仅缺乏翔实的试验数据, 还缺少对雨蚀损伤演化过程、影响规律、失效机理等方面的深入认识。因此, 本文为了探究蒙皮涂层在复杂雨场环境下的耐受表现, 针对带有防护涂层的碳纤维复合材料开展单射流与多射流试验, 以此模拟涂层所面临的多种雨场工况。在研究过程中, 通过对材料损伤形貌的表征分析, 评估了不同涂层材料的抗雨蚀性能。在不同冲击方式与冲击条件下, 深入探究了材料雨蚀损伤的内在机理和破坏机制。研究成果为工程实践提供了关键数据支撑, 对提升高速运动装备服役安全性和延长使用寿命具有重

要工程价值。

1 液固冲击理论

射流冲击固体可以分成液体压缩和侧向释放两个过程。当高速液滴首次接触固体表面时, 如图 1a 所示, 两者接触界面的速度高于液体内部冲击波的速度, 接触界面阻碍冲击波传播, 形成包络面, 包络面里面的液体被压缩, 形成瞬态高压, 称为水锤压力^[19]。假设固体是刚体, 水锤压力为:

$$p = \rho_1 c_1 v \quad (1)$$

式中: ρ_1 、 c_1 分别是液体的密度和波速, v 是冲击速度。当认为固体为弹性时, 水锤压力为^[34]:

$$p = \frac{\rho_1 c_1 \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} v \quad (2)$$

式中: ρ_2 、 c_2 分别是固体的密度和波速。液体在高速冲击过程中内部产生激波, 导致液体波速改变, 修正后的液体波速为:

$$c_{11} = c_1 + kv \quad (3)$$

式中: k 为常数, 水的 k 值为 2^[35]。水锤压力作用范围的半径为^[36]:

$$R = \frac{rv}{c_1} \quad (4)$$

式中: r 为液滴冲击头部的曲率半径。初始阶段的持续时间只有几微秒, 持续时间可以定义为:

$$t = \frac{3rv}{2c_1^2} \quad (5)$$

当液滴内部冲击波速度接近液固接触界面速度时, 冲击波脱离界面, 形成了向液体和材料内部传播的卸载拉伸波, 如图 1b 所示。纵波和横波都在材料内部传播, 而瑞利波则在表面传播, 纵波前沿和横波前沿的位置与接触区域的界面一致, 因为这两种波仍附着在加载区域的边缘^[37]。但是, 纵波由于在材料内部的速度差而与横波分离, 并继续向材料内部传播。纵波和横波的传播速度可以表示为:

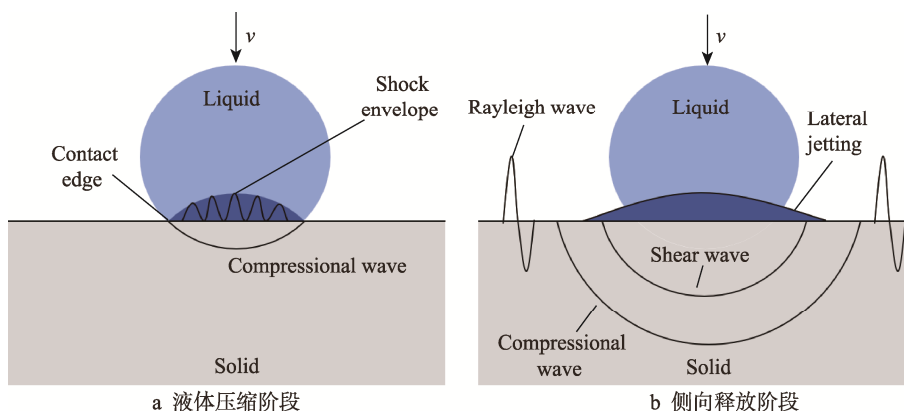


图 1 射流冲击过程示意图^[38]

Fig.1 Schematic diagram of the jet impact process^[38]: a) liquid compression phase; b) lateral release phase

$$C_1 = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\nu(1-2\nu)(1+\nu)}} \quad (6)$$

$$C_1 = \sqrt{\frac{E}{2\nu(1+\nu)}} \quad (7)$$

式中： E 和 ν 分别是材料的杨氏模量和泊松比。纵波在固体内部以压缩拉伸方式传播，当波前迅速向前扩展时，会产生径向拉伸应力。而横波中的质点运动与传播方向垂直，会在固体中产生剪应力和周向拉应力。具有垂直分量和水平分量的瑞利面波会产生相应的拉应力和剪应力。

当液固冲击趋于稳定时，中心轴上的压力就会降至数值更小的伯努利静压 p_i ，其计算公式为：

$$p_i = \frac{\rho_1 v^2}{2} \quad (8)$$

2 试验方法与试样

2.1 试样

本试验的涂层试样由基体、底漆、面漆三部分构成，其中基体为3 mm的T300碳纤维编织复合材料，底漆和面漆的材料不同，厚度分别为200 μm 和300 μm ，如图2所示。材料1的底漆和面漆分别为丙烯酸聚氨酯底漆和聚氨酯无光磁漆；材料2由环氧自干底漆和丙烯酸聚酰胺聚氨酯磁漆制成；材料3的底漆为无铬高固体含量环氧底漆，面漆为无光高固体含量聚氨酯磁漆。制备涂层时先通过预处理，去除表面污渍和最外层含有脱模剂的部分，使涂层可以直接和树脂部分接触，进一步增强涂层与基体的附着力。涂覆方式主要有刷涂、刮涂、喷涂、滚涂等，其中由于喷涂法具有漆膜质量好、涂装效率高以及涂层厚度可控等优点，因此采取交叉喷涂法制备涂层。经喷涂试验得出

交叉喷涂一次的厚度大约为46 μm ，通过喷涂次数来调节涂层厚度，先喷涂底漆，待底漆完全固化后再进行面漆喷涂，面漆交叉喷涂4次，厚度为(282 \pm 24) μm ，底漆交叉喷涂2次，厚度为(192 \pm 12) μm 。喷涂后对涂层进行固化处理，采取120 $^{\circ}\text{C}$ -1 h的固化方式。由于涂层为整体喷涂，为了方便后续雨蚀试验固定涂层试样，提高试样的利用率，故将试样切割成面积为40 mm \times 40 mm大小的试样，方便进行不同工况的试验。采用水切割机对试件进行切割，以获得试验所用的涂层试件。后续根据损伤结果表征所需要的试件形状，采用金刚石线锯进行小面积切割。

使用纳米压痕仪器对涂层力学性能进行测量，并使用高倍镜记录样品表面粗糙度。涂层的粗糙度如图2所示，材料1最粗糙，材料2居中，材料3最光滑。涂层材料的压痕模量和硬度性能的具体参数见表1。

2.2 单射流试验设备

单射流试验设备如图3a所示，基于10 mm口径的一级轻气炮搭建，包括气室、炮管、子弹、橡皮垫、喷嘴，使用高压气体推动子弹撞击喷嘴，挤压液体从喷嘴处喷射，产生高速射流。实验前需在不锈钢喷嘴内注满水，使用氯丁橡胶垫密封；并将子弹装入套有橡胶圈的弹托内，通过电磁阀控制轻气炮压力调节射流速度。该试验设备可产生200~700 m/s的射流。

使用Phantom VEO高速摄像机拍摄冲击过程，观测射流形态并测量射流速度。试验中采用的帧率为210 000 Hz，通过射流前端像素点的距离变化计算射流速度。本次试验中的气炮压力为0.31 MPa，喷嘴直径为1.2 mm。根据图3b，将距喷嘴的位置划分为3个区域：0~10 mm为加速区域，此区域内射流速度不断增大；10~12 mm为稳定区域，此区域内射流速度达到一个相对稳定的值；12 mm后为衰减区域，此区

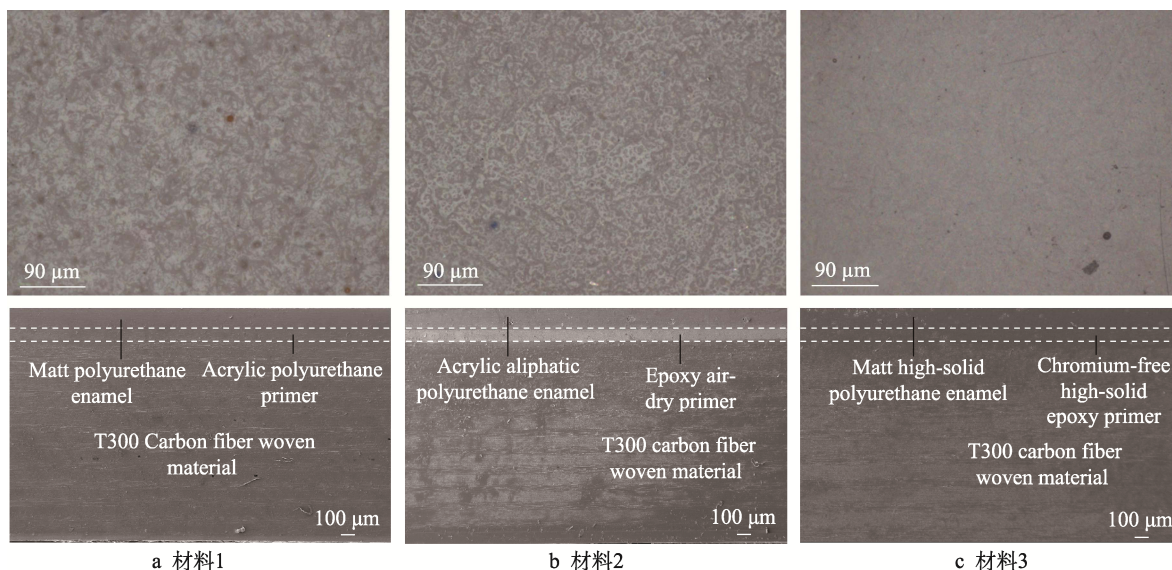


图2 三种涂层的纳米压痕显微图像及横截面图像

Fig.2 Nanoindentation micrographs and cross-sectional images of three coatings: a) material 1; b) material 2; c) material 3

表 1 三种涂层的模量和硬度数据
Tab.1 Modulus and hardness data for three coatings

Material	Indentation modulus/GPa	Hardness/GPa
1	5.805 602 2	0.240 234 6
2	3.850 652 0	0.161 498 6
3	2.414 338 2	0.110 977 8

域内射流速度受阻力的影响逐渐减小。为了保证实验的重复性和结果的稳定性,将试样固定在距喷嘴 10 mm 的位置,稳定后的射流形态如图 3c 所示。射流的核心部分是前端的“蘑菇头”形状,因为这是引起材料损伤的主要因素,整个冲击过程如图 4 所示。

基于上述装置研究了三种涂层材料在高速射流冲击下的损伤行为。试验条件为冲击速度 430、490、555、617 m/s,冲击角度 0°、15°、30°。试验中所使用的喷嘴直径为 1.2 mm,产生的射流直径约为 5 mm。为了得出有效结论,每组工况至少进行 3 次重复冲击试验。

2.3 多射流试验设备

多射流试验设备如图 5a 所示,是基于水切割装

置搭建的,由电机、旋转盘、水箱、喷嘴组成,其原理是通过水切割机产生高速连续射流,利用一个带孔的旋转圆盘将连续射流切割为间断射流。圆盘的最大转速为 3 000 r/min,圆盘的孔径为 1 mm。

采用与单射流同样的装置观测射流形态及测量射流速度。图 5b 为射流速度随距离喷嘴位置的变化图,射流速度在 0~20 mm 范围内不断提高,在 20~30 mm 的范围内保持不变。为了保证实验结果的稳定性,一般将样品放置在射流最稳定和最集中的距离范围内。本文的试样放置在距离圆盘 30 mm 的位置。稳定后的射流形态如图 5c 所示,表现为一小段液柱,在尾部拖拽着雾化液滴。在 370 m/s 速度下射流随时间的形态变化如图 6 所示。

通过此装置研究了三种涂层材料在多次射流冲击下的损伤行为。冲击速度为 350、370、420 m/s,冲击次数为 1 000 次。试验使用直径为 1 mm 的喷嘴,产生的射流直径约为 1.5 mm。为了得出有效结论,每组工况至少进行 3 次重复冲击试验。

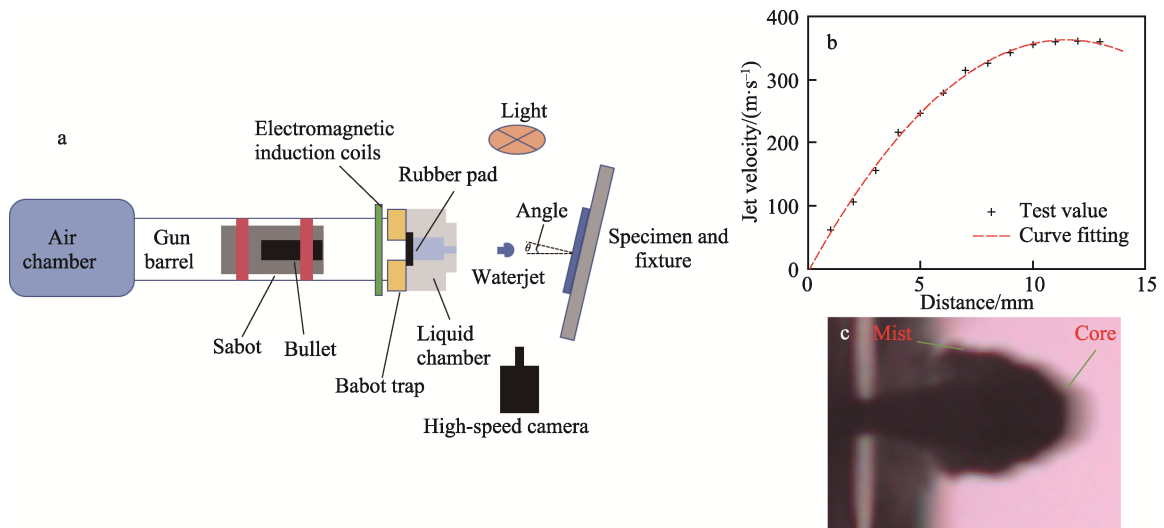


图 3 单射流实验设备示意图 (a); 射流速度随距离的变化 (b); 稳定后的射流形态 (c)
Fig.3 Schematic diagram of the single-jet experimental equipment (a), variation of jet velocity with distance (b) and jet morphology after stabilization (c)

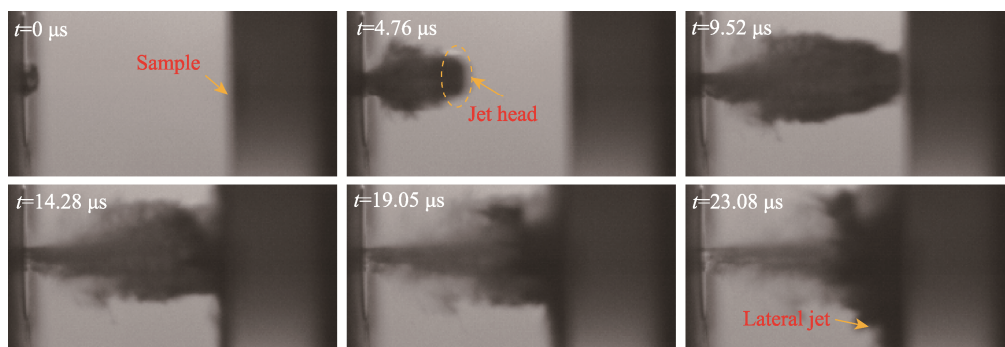


图 4 单射流撞击过程
Fig.4 Single-jet impact process

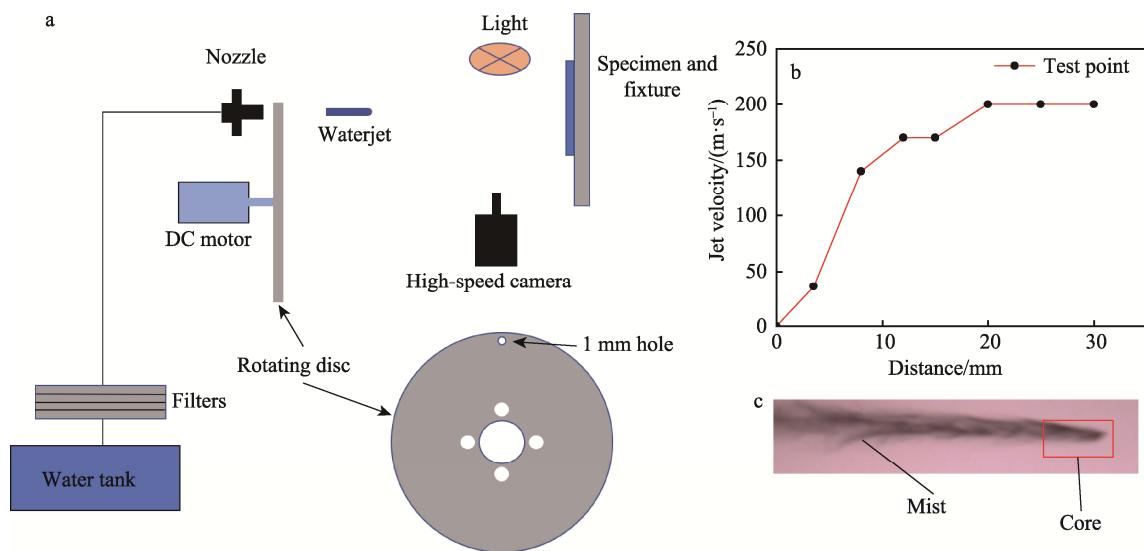


图5 多射流试验设备示意图 (a); 射流速度随距离的变化 (b); 稳定后的射流形态 (c)
Fig.5 Schematic diagram of the multi-jet experimental equipment (a), variation of jet velocity with distance (b) and jet morphology after stabilization (c)

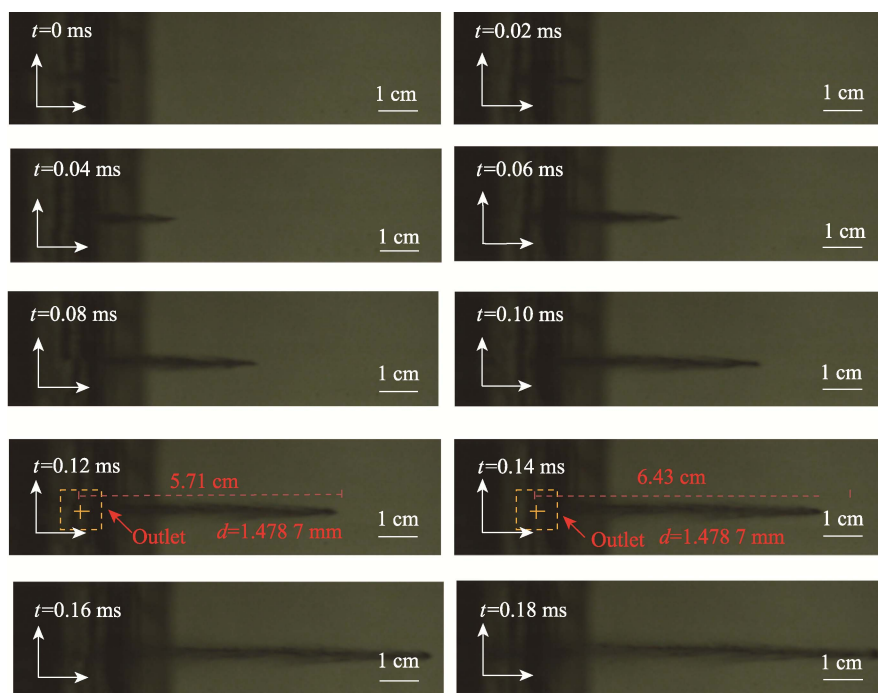


图6 在 370 m/s 速度下射流随时间的形态变化
Fig.6 Morphological changes of jet with time at a velocity of 370 m/s

3 结果与分析

3.1 单射流冲击下的损伤机理分析

为了探究不同涂层材料在不同单射流条件下的损伤行为,分别在 617 m/s 冲击速度条件下以 0°、15°、30°的冲击角度,以及在 15°冲击角度,430、490、555 m/s 的冲击速度下对三种涂层材料进行射流试验。试验结果表明,虽然三种涂层材料的力学性能不同,但在射流冲击下表现出的损伤响应具有一致性,即在同一冲

击速度下,损伤程度随着冲击角度的增加而变弱,具体表现为:在 0°冲击角下,三种涂层材料的面漆和底漆漆层被严重破坏,大范围暴露出碳纤维基体;在 15°冲击角下,面漆漆层被破坏,暴露出底漆漆层;在 30°冲击角下,三种材料只是面漆漆层部分受到损伤。在 15°冲击角度下,随着冲击速度的提升,损伤程度逐渐增加。当冲击速度低于 490 m/s 时,三种涂层材料都表现为面漆擦伤;当冲击速度为 555 m/s 时,三种材料呈现出水平不一的损伤,其中材料 3 破坏程度最严重,基体第一层碳纤维被破坏。

接下来, 对上述试验结果进行具体分析。根据液固冲击理论可知, 液固冲击过程的两个阶段都会对材料造成侵蚀。一般情况下, 由于侧向射流的速度是液体冲击速度的 3~5 倍, 所以材料表面率先出现侧向侵蚀。在图 7d、图 8d、图 9e 中可以看到, 在损伤中央存在一个近似圆形的未损伤区递进损伤域, 四周由一个环形损伤区域包围, 损伤模式包括表面擦伤、不规则凹坑等。当冲击速度相对较低, 材料的屈服极限大

于水锤压力, 在液体压缩阶段不会对材料表面造成损失, 所以才会材料表面形成圆形未损伤区域; 当水锤压力结束进入侧向射流阶段后, 高速侧向射流向四周冲刷材料表面, 造成环形损伤。而随着冲击速度的增加, 材料屈服极限最终小于水锤压力, 造成材料中央区域损伤; 水锤压力与侧向射流共同作用, 会造成 1~2 倍液滴直径的损伤区域, 如图 7a、8a、9a 所示, 图中红色圆框为液滴直径的大小。

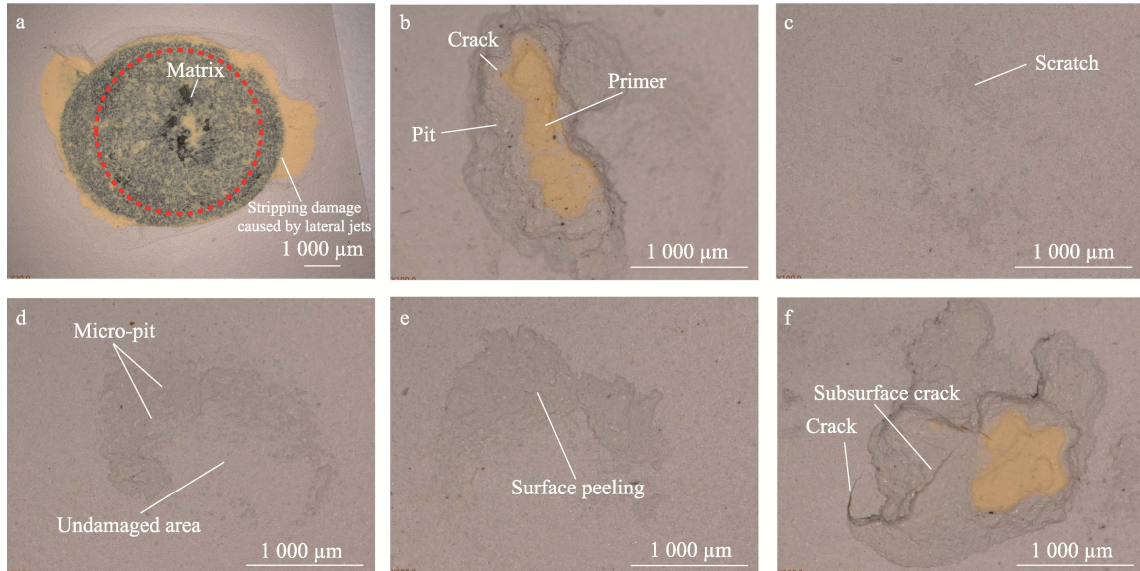


图 7 材料 1 的损伤形貌: a~c) 在 617 m/s 下, 冲击角度为 0°、15°、30° 的损伤结果;
d~f) 在 15° 下, 冲击速度为 430、490、555 m/s 的损伤结果
Fig.7 Damage morphology of material 1: a-c) damage results at 617 m/s and impact angles of 0°, 15°, and 30°; d-f) damage results at 15° and impact velocities of 430, 490, and 555 m/s

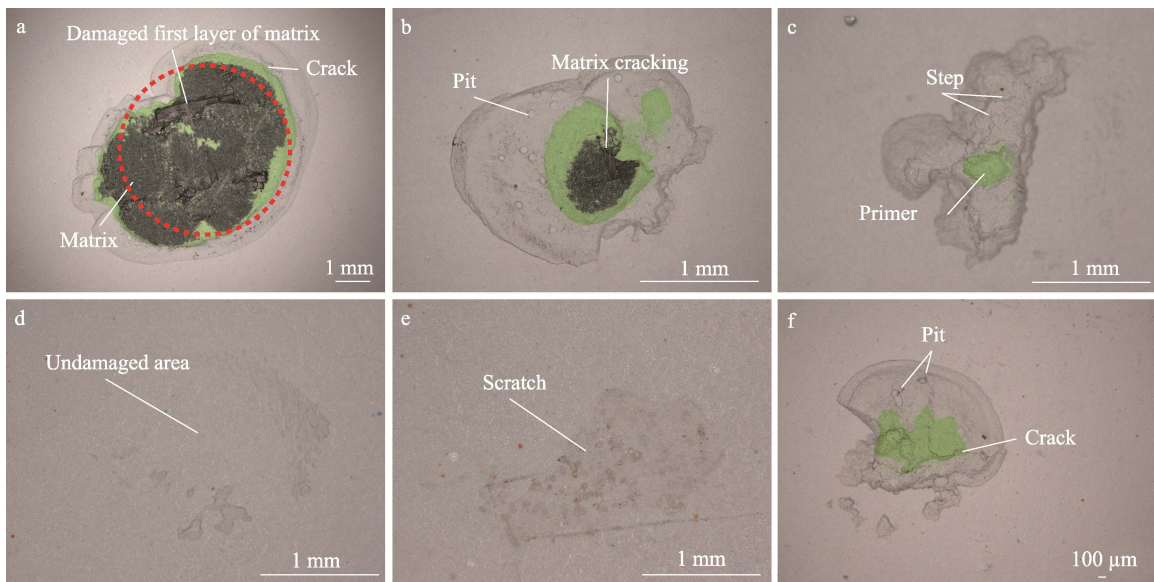


图 8 材料 2 的损伤形貌: a~c) 在 617 m/s 下, 冲击角度为 0°、15°、30° 的损伤结果;
d~f) 在 15° 下, 冲击速度为 430、490、555 m/s 的损伤结果
Fig.8 Damage morphology of material 2: a-c) damage results at 617 m/s and impact angles of 0°, 15°, and 30°; d-f) damage results at 15° and impact velocities of 430, 490, and 555 m/s

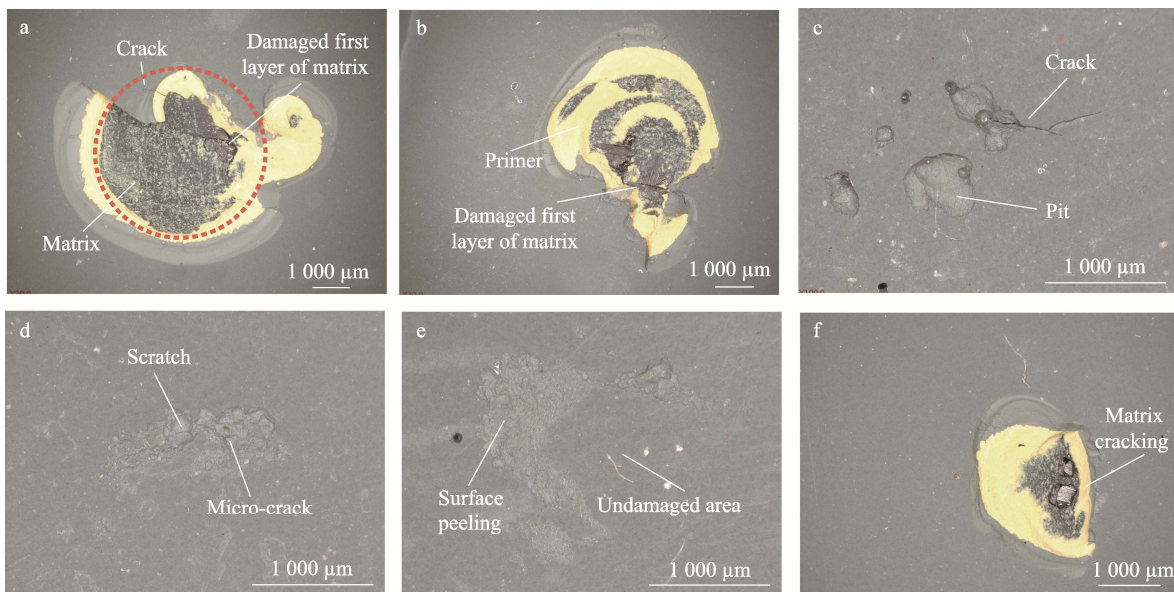


图9 材料3的损伤形貌；a~c) 在617 m/s下，冲击角度为0°、15°、30°的损伤结果；
d~f) 在15°下，冲击速度为430、490、555 m/s的损伤结果
Fig.9 Damage morphology of material 3: a-c) damage results at 617 m/s and impact angles of 0°, 15°, and 30°; d-f) damage results at 15° and impact velocities of 430, 490, and 555 m/s

使用数码显微镜的三维轮廓扫描重构功能，得到材料的损伤面积和损伤体积，结果如表2所示。根据试验数据得到三种材料在不同角度和速度下的损伤参数，如图10所示。在0°冲击角下，材料1的损伤面积和损伤体积在三种材料中都是最大值，在15°和30°冲击角下，材料1的损伤程度会急剧下降。材料2和材料3随着冲击角度的增加，损伤面积和损伤体积随角度的变化没有材料1显著。在不同冲击速度下，三种材料的损伤程度都表现出相同的趋势，即损伤先缓慢增加，达到一定速度后迅速增加。材料1的损伤速率增加最慢，在低于490 m/s的速度下，损伤面积和体积都高于其余两种材料，而在555 m/s速度下，损伤程度却低于其余两种材料。

选取三种材料在0°、617 m/s和15°、555 m/s两

组工况下，在材料损伤最深处分别扫描水平和垂直两个方向的损伤轮廓，得到材料损伤处的轮廓曲线，如图11所示。试样垂直于平面，横向为水平方向，纵向为竖直方向。在0°、617 m/s工况下，三种材料的损伤轮廓类似，均表现为横向损伤大于纵向损伤。这表明，在正向冲击下，侧向射流向四周的扩散具有一定的方向性。在15°、555 m/s工况下，三种涂层材料的损伤轮廓不仅表现出更明显的方向性，损伤轮廓曲线的侧边不再是一条垂直的线，而是带有一定的角度；在纵向深度上损伤轮廓曲线两侧的陡峭程度有明显的差异。当液滴垂直撞击试样并向四周扩散时，会受到重力和阻力的影响，其中纵向受到重力与阻力的联合作用，使得纵向速度的衰减要大于横向速度的衰减，导致两个方向的损伤开口长度不一样。当液滴

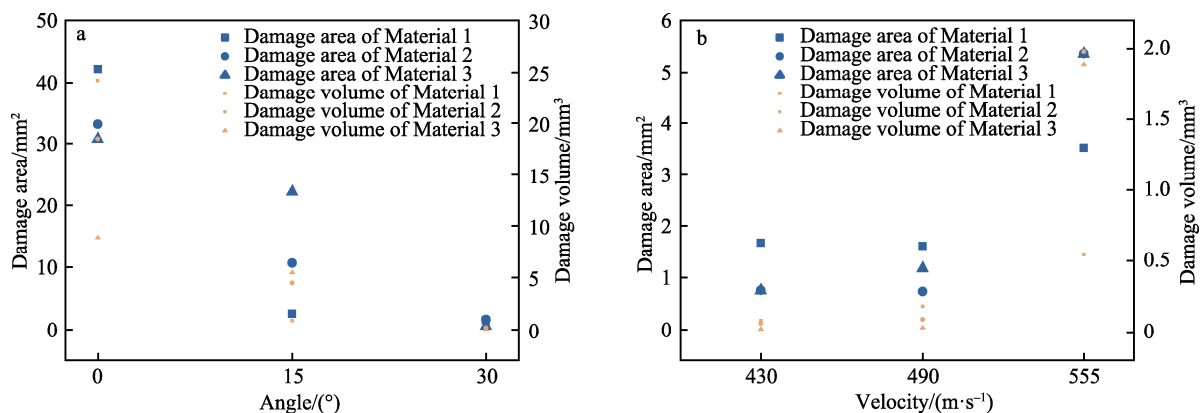


图10 三种涂层材料在不同角度下损伤面积与损伤体积的变化 (a)；
三种涂层材料在不同速度下损伤面积与损伤体积的变化 (b)

Fig.10 Changes in damage area and damage volume of three coating materials at different angles (a) and changes in damage area and damage volume of three coating materials at different velocities (b)

表 2 三种涂层材料损伤面积和损伤体积数据
Tab.2 Damage area and damage volume data for three coating materials

Factor		Material 1	Material 2	Material 3
Angle	0°	42.18 mm ² /24.18 mm ³	33.20 mm ² /18.45 mm ³	30.74 mm ² /8.86 mm ³
	15°	2.57 mm ² /0.84 mm ³	10.58 mm ² /4.43 mm ³	22.22 mm ² /5.42 mm ³
	30°	1.56 mm ² /0.04 mm ³	1.66 mm ² /0.19 mm ³	0.55 mm ² /0.03 mm ³
Velocity	430 m/s	1.67 mm ² /0.08 mm ³	0.75 mm ² /0.06 mm ³	0.76 mm ² /0.02 mm ³
	490 m/s	1.61 mm ² /0.18 mm ³	0.73 mm ² /0.09 mm ³	0.18 mm ² /0.03 mm ³
	555 m/s	3.53 mm ² /0.54 mm ³	5.35 mm ² /1.98 mm ³	5.36 mm ² /1.89 mm ³

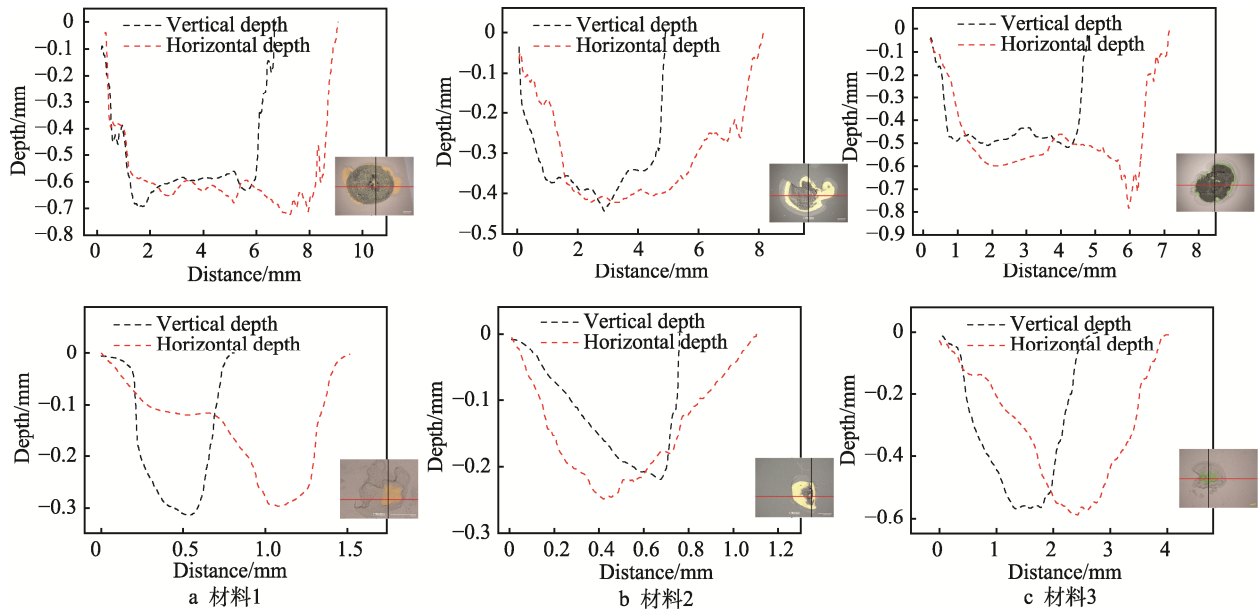


图 11 不同涂层材料的损伤轮廓曲线 (左侧为 0°、617 m/s 工况, 右侧为 15°、555 m/s 工况)
Fig.11 Damage contour curves of different coating materials (the left side is for 0° and 617 m/s condition, the right side is for 15° and 555 m/s condition): a) material 1; b) material 2; material 3

以某角度冲击试样时, 在纵向方向上并不是同时接触, 且纵向两端的受力角度不同, 最终导致了轮廓曲线两侧的倾斜程度不同。斜向冲击中的速度 V 可以分解为垂直于冲击表面的分量 $V\cos\theta$ 和平行于冲击表面的分量 $V\sin\theta$, 其中垂直分量 $V\cos\theta$ 主导了水锤压力的数值, 侧向射流 V_j 的数值正比于撞击速度的垂直分量 $V\cos\theta$ 。当斜角撞击发生时, 水锤压力随 $\cos\theta$ 而降低, 造成了损伤程度随 θ 的增加而降低。侧向射流在沿撞击投影方向得到加强, 其速度可以看作是 V_j 与撞击速度平行分量 $V\sin\theta$ 的叠加, 反方向的射流速度则是 $V_j - V\sin\theta$, 剪切力与侧向射流的速度呈正相关, 各方向除撞击投影方向之外的侧向射流速度均下降, 对应的剪切力也下降, 从而造成两个方向损伤程度的差异, 如图 12 所示。

对三种材料的损伤剖面使用 SEM 观测。如图 13 所示, 在 0°、617 m/s 的工况下, 三种材料在涂层侧壁处都出现了侵蚀坑, 这表明在侧壁处仍存在液固冲击作用过程。当材料的屈服极限小于液滴的水锤压力后, 材料被破坏, 同时产生微小液滴。这些微液滴再次与涂层作用, 从而产生侵蚀坑。在材料 2 底部有一

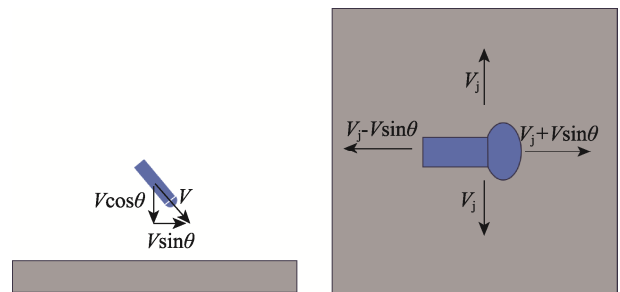


图 12 斜向冲击各方向射流速度分析
Fig.12 Velocity analysis of jet in each direction for oblique impacts

条向上延伸的裂纹, 放大后可以看到碳纤维基体被抬起, 形成了二次裂纹。裂纹与侵蚀坑产生的原因不同, 液滴被释放后产生侧向射流, 冲击侧壁形成裂纹。裂纹产生在底漆与基体交接的底部, 也说明材料 2 的底漆与碳纤维基体间的结合力不如其他两种材料。在材料 3 侧壁上可以看到一些条纹, 表明了水射流的传播方向以及材料 3 被剥离的路径。如图 14 所示, 在 15°、555 m/s 冲击条件下, 可以直观地看到侵蚀坑横截面的具体形貌。材料 1 和材料 2 在底部能够观察到, 在侵蚀坑尾部延伸出一条微裂纹。材料 3 在侧壁上可以

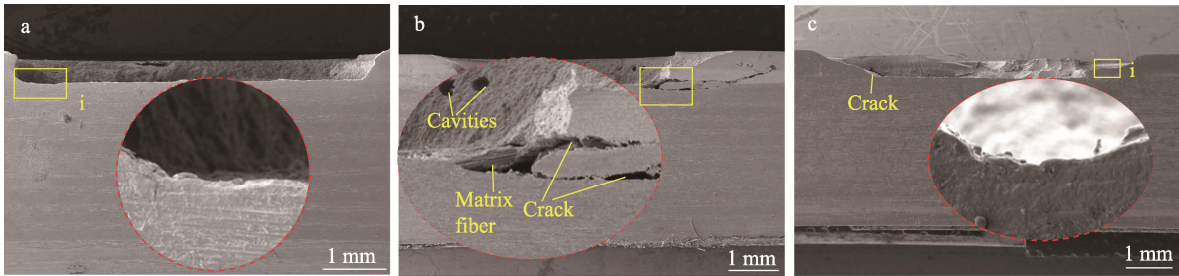


图 13 在 0°、617 m/s 工况下三种材料的 SEM 图像：a) 材料 1；b) 材料 2；c) 材料 3
 Fig.13 SEM images of three materials under 0° and 617 m/s conditions: a) material 1; b) material 2; c) material 3

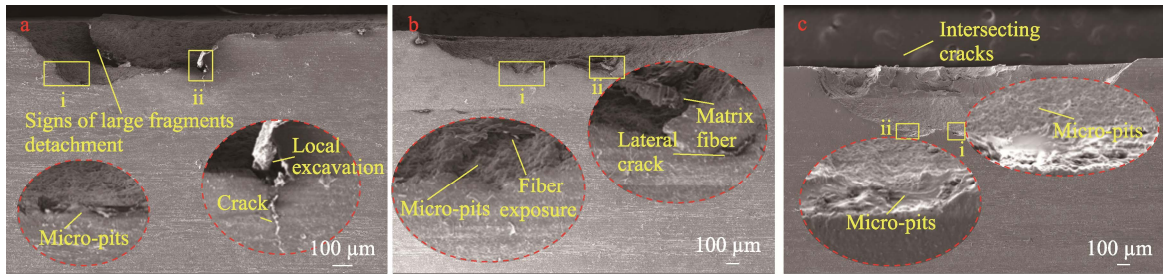


图 14 在 15°、555 m/s 工况下三种材料的 SEM 图像：a) 材料 1；b) 材料 2；c) 材料 3
 Fig.14 SEM images of three materials under 15° and 555 m/s operating conditions: a) material 1; b) material 2; c) material 3

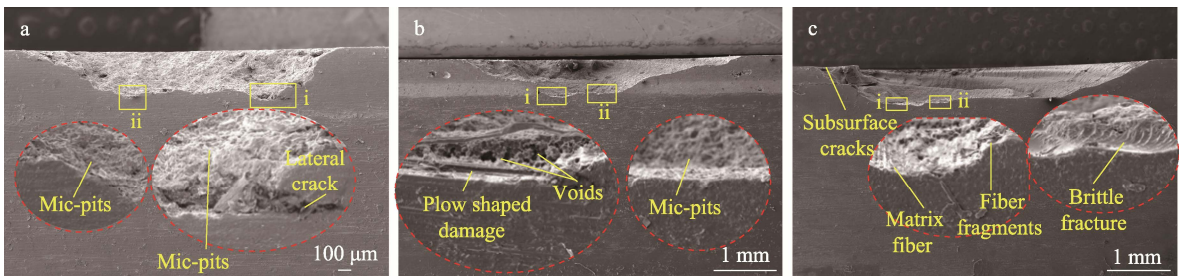


图 15 在 15°、617 m/s 工况下三种材料的 SEM 图像：a) 材料 1；b) 材料 2；c) 材料 3
 Fig.15 SEM images of three materials under 15° and 617 m/s conditions: a) material 1; b) material 2; c) material 3

观察到裂纹网，裂纹网破坏了材料的完整性，会加速材料受损。如图 15 所示，在 15°、617 m/s 冲击条件下，损伤结果要更加严重，其中材料 1 仍能观察到由于射流作用而产生的微裂纹；材料 2 在基体纤维处产生了小块材料剥离；材料 3 的侧壁条纹分布更加密集，同时在侧壁上的侧向裂纹进一步扩展，并且在底部能够观察到犁状条纹，这表明材料在应力波作用下出现了脆性断裂和大块剥蚀。

在单射流冲击过程中，在接触表面产生瞬间高压，形成向材料内部传播的应力波。应力波反射导致材料内部及界面处局部出现应力集中，入射波与反射波在材料内部及界面处相互作用产生拉伸力共同作用。在上述两种机制作用下首先产生微裂纹，进一步扩展导致大裂纹和层间开裂现象出现。基于三种涂层材料的单射流试验结果，考虑到实际飞行过程中液滴与机体迎风面的接触总是带有一定的角度，可以认为材料 1 在实际飞行中应对大液滴冲击的效果最佳。

3.2 多射流下的损伤机理分析

图 16 为 1 000 次冲击次数下，三种材料受到 350、370、420 m/s 射流速度冲击后的损伤形貌。三种材料

的损伤程度均随冲击速度的增加而不断加重。材料 1 在 350 m/s 的冲击速度下，只是面漆受损，其余两种材料都不同程度地暴露出底漆。除此以外，对材料 1 和材料 2 在 320 m/s 的冲击速度下进行了 1 000 次冲击，但由于没有出现肉眼可见的损伤，因此并未在这里展示。由此可以推断，材料 1 和材料 2 在 1 000 次冲击下的损伤阈值速度应在 320~350 m/s。在 320 m/s 速度下对材料 3 进行了 1 000 次冲击，结果表明出现极小的损伤，由此可以推断，材料 3 在 1 000 次冲击下的损伤阈值速度略低于 320 m/s。而在 370 m/s 的冲击速度下，涂层的面漆脱落，底漆表面可见点状侵蚀坑和微小裂纹；在 420 m/s 的冲击速度时，损伤进一步加剧至面漆完全脱离，损伤面积增加。具体损伤面积数据见表 3。这表明材料 1 在应对密集雨场时，能够抵御更多次的冲击。

在材料的雨蚀损伤模式中，侵蚀坑是损伤演化的一个重要特征，其轮廓影响后续的侵蚀过程。为了明晰侵蚀坑的演化过程，使用数字显微镜观测了三种材料在 1 000 次冲击下不同冲击速度时的侵蚀坑轮廓，如图 17 所示。可以看出，随着冲击速度的增加，三

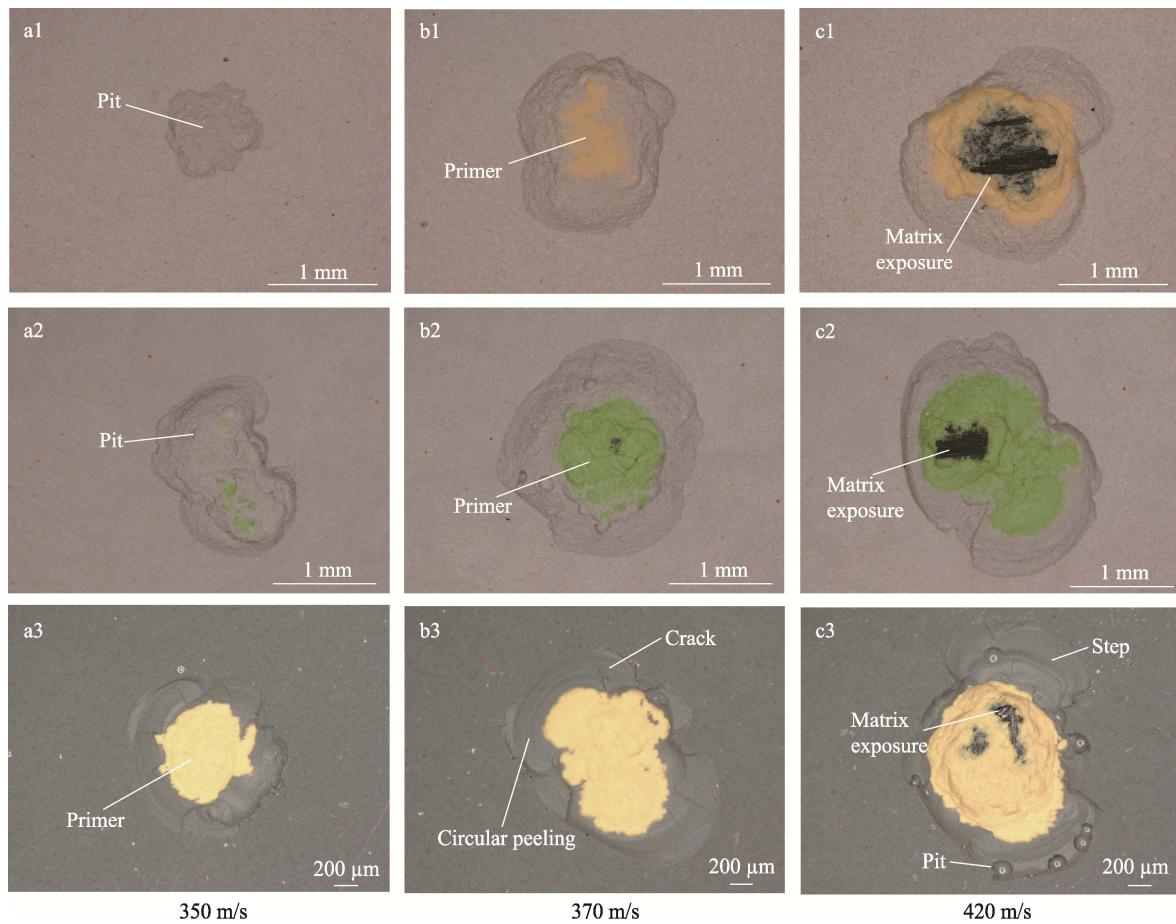


图 16 在 1 000 次冲击次数下三种涂层材料在不同冲击速度下的损伤形貌: a) 材料 1; b) 材料 2; c) 材料 3
 Fig.16 Damage morphology of three coating materials at different impact velocities under 1 000 impacts:
 a) material 1; b) material 2; c) material 3

表 3 三种涂层材料在多射流冲击下的损伤面积
 Tab.3 Damage area under multi-jet impact for three coating materials

Velocity/(mm·s ⁻¹)	Material 1 Damage area/mm ²	Material 2 Damage area/mm ²	Material 3 Damage area/mm ²
350	0.587	1.943	2.781
370	1.541	2.797	2.981
420	1.786	2.713	3.247

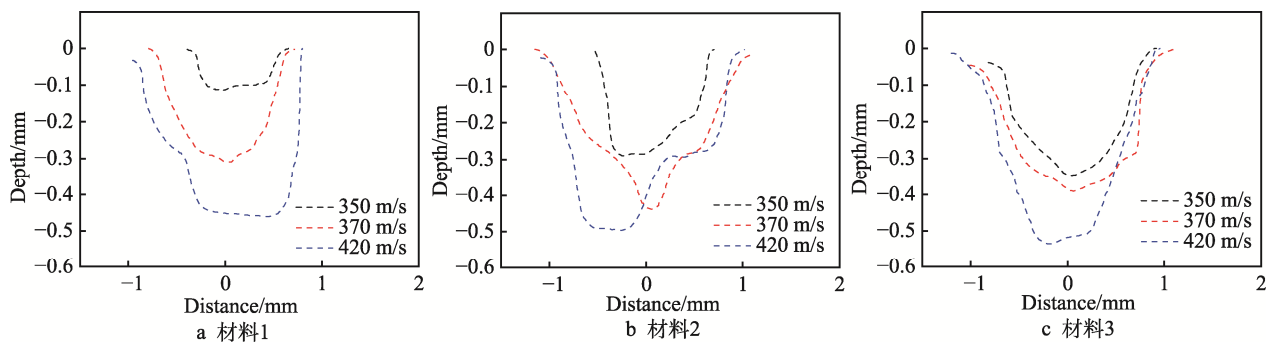


图 17 三种涂层材料在多射流冲击下的侵蚀坑轮廓曲线

Fig.17 Profile curves of erosion pits under multi-jet impact for three coating materials: a) material 1; b) material 2; c) material 3

种材料侵蚀坑的宽度和深度都在增加。材料 1 随着速度增加, 侵蚀坑口的宽度和深度均增加, 侵蚀坑底部相对平整。材料 2 随着速度增加, 侵蚀坑口的宽度先增加, 达到一定宽度后, 侵蚀坑深度再增加, 侵蚀坑

体积不断增大; 侵蚀坑底部相对平整, 但整个侵蚀坑轮廓高度不对称。材料 3 随着速度增加, 侵蚀坑口的宽度略微增加, 深度在不断增加, 侵蚀坑底部相对尖锐。对比两者侵蚀坑的发展, 可以看到材料 1 在深度

的增长速率要高于材料3，这表明平底侵蚀坑促进了侵蚀深度的演化，尖底侵蚀坑抑制了侵蚀深度的继续发展。平底有利于侵蚀坑底部水锤压力产生的冲击波的传播，从而促进侵蚀深度的增加。但是由于材料1的力学性能最优，阻碍了材料被进一步破坏，这也表明力学性能是影响材料在多次冲击下损伤程度增加的主要因素。

同样，使用SEM对三种材料的剖面多射流损伤形貌进行观测。如图18、图19、图20所示。在350 m/s的条件下，材料1只在面漆层出现剥离损伤；材料2受到了侧向射流的影响，在底部出现了局部损伤，如图18b~i所示；材料3损伤最严重，出现贯穿整个侵蚀坑的水平裂纹。在370 m/s条件下，材料1损伤进一步增大，但未观察到明显裂纹；材料2在底部出现裂纹；材料3出现大块剥离，损伤进一步加大。在420 m/s条件下，材料1出现剥离损伤；材料2出现侧向裂纹，同时侧壁出现突起和沟槽，表明有大块剥离；材料3的损伤最严重，侧壁存在侧向裂纹，伴随着大量的突起和沟槽。由公式(2)可知，当材料保

持不变时，水锤压力与冲击速度相关。冲击速度越大，产生的水锤压力越大，越容易发生初始损伤。

对比三种材料受到单射流与多射流两种冲击方式的SEM图像可知，两种试验方式下的材料损伤机理具有相似性。多射流冲击时，每一次射流冲击都会产生一次高压冲击波和随后的反射拉伸波，形成一个应力循环。在一定区域内多个应力循环重叠，导致局部区域长时间承受高幅值应力波。当应力幅值超过材料的疲劳极限时，裂纹开始萌生，随着冲击次数的增加，裂纹逐渐扩展形成损伤。对液固冲击而言，冲击能量可以简单地等于冲击液滴的动能^[39]。在两种试验中均可以观察到由于液滴二次冲击造成的侵蚀坑，由侧向射流产生的裂纹，以及由于材料脆性断裂而形成的犁状条纹。这表明单滴大能量射流冲击与多滴小能量射流冲击对材料的损伤贡献类似。液滴直径、冲击速度的平方效应对冲击能量有很大影响。单次大液滴的能量远小于多次小液滴的能量累计，但单次大液滴对材料的损伤大于多次小液滴对材料造成的损伤，表明在实际工程应用中应该更多关注雨场中大液滴的分布。

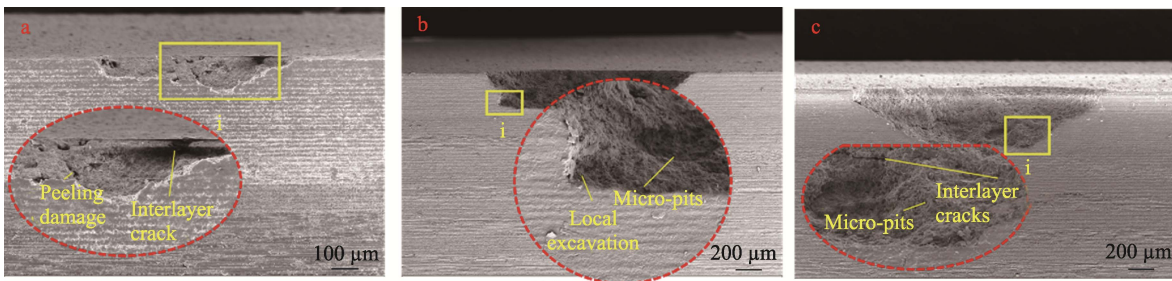


图18 350 m/s、1 000次下三种材料的SEM图像：a) 材料1；b) 材料2；c) 材料3
Fig.18 SEM images of three materials at 350 m/s under 1 000 times: a) material 1; b) material 2; c) material 3

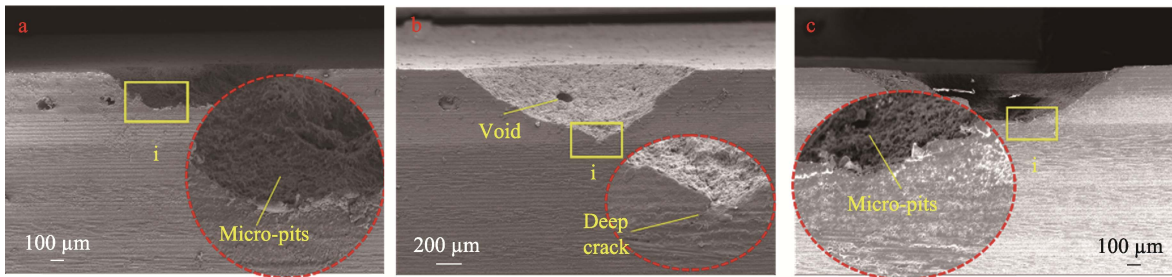


图19 370 m/s、1 000次下三种材料的SEM图像：a) 材料1；b) 材料2；c) 材料3
Fig.19 SEM images of three materials at 370 m/s under 1 000 times: a) material 1; b) material 2; c) material 3

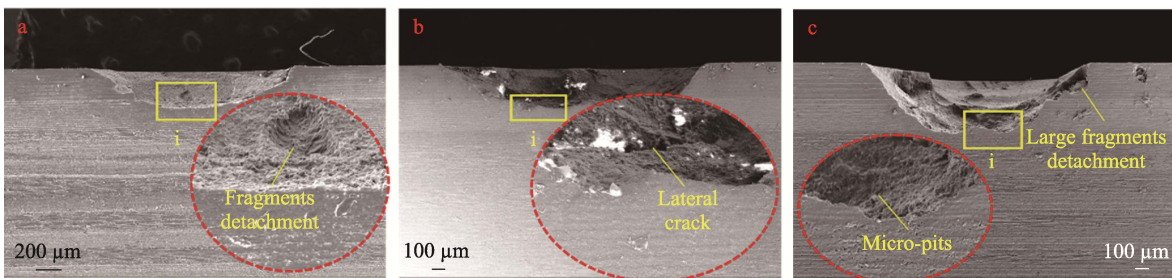


图20 420 m/s、1 000次下三种材料的SEM图像：a) 材料1；b) 材料2；c) 材料3
Fig.20 SEM images of three materials at 420 m/s under 1 000 times: a) material 1; b) material 2; c) material 3

4 结论

本文利用一级轻气炮搭建的单射流试验平台和水切割搭建的多射流试验平台,对三种等厚度的飞机复合材料蒙皮涂层板进行了冲击试验。探究了不同实验参数(速度、角度、冲击次数)对材料的影响机制,揭示了材料在不同冲击方式下的损伤机理。主要研究结论如下:

1) 在单射流冲击下,三种蒙皮涂层材料的损伤模式表现为:材料的屈服极限大于水锤压力,损伤区域由环形损伤包围中央未损伤区域构成;材料的屈服极限小于水锤压力,水锤压力联合侧向射流造成 1~2 倍液滴直径的损伤区域。应力波反射会使材料内部及界面处出现局部应力集中现象。与此同时,入射波与反射波在材料内部及界面处相互作用产生的合力,会进一步加剧这种应力集中效应。在这两种机制的共同作用下,材料首先会产生微裂纹,微裂纹进一步扩展,最终导致大裂纹形成以及层间开裂现象出现。

2) 在单射流冲击下,三种涂层材料在各方向上的损伤尺寸存在差异,损伤轮廓具有非对称性,这表明侧向射流在释放过程中具有方向性,这种方向性受到重力和冲击角度的影响。

3) 在多射流冲击下,不同形状的侵蚀坑会影响侵蚀的进一步发展,平底侵蚀坑利于坑底水锤压力的传播,促进了侵蚀深度的发展,尖底侵蚀坑抑制了侵蚀深度的发展。

4) 材料 1 在单射流试验和多射流试验不同试验参数下的损伤结果优于其他两种材料,表明材料 1 是一种优良的抗雨蚀蒙皮涂层,也表明材料的力学性能是抵御冲击的关键因素。

5) 多射流冲击涂层时,每一次射流冲击都会产生一次高压冲击波,随后形成反射拉伸波,二者共同构成一个应力循环。在特定区域内,多个这样的应力循环相互重叠,使得该局部区域长期处于高幅值应力波的作用之下。一旦应力幅值超出材料的疲劳极限,裂纹便会开始萌生;并且随着冲击次数的不断累加,已萌生的裂纹会逐步扩展,最终形成明显的损伤。

参考文献:

- [1] JENKINS D C. Erosion of Surfaces by Liquid Drops[J]. *Nature*, 1955, 176(4476): 303-304.
- [2] KENNEDY C F, FIELD J E. Damage Threshold Velocities for Liquid Impact[J]. *Journal of Materials Science*, 2000, 35(21): 5331-5339.
- [3] DI J, WANG S S, YAN X J, et al. Experimental Research on Water Droplet Erosion Resistance Characteristics of Turbine Blade Substrate and Strengthened Layers Materials[J]. *Materials*, 2020, 13(19): 4286.
- [4] ZHANG Z Y, LIU T Y, ZHANG D, et al. Water Droplet Erosion Life Prediction Method for Steam Turbine Blade Materials Based on Image Recognition and Machine Learning[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2021, 143(3): 031009.
- [5] BURSON-THOMAS C B, WELLMAN R, HARVEY T J, et al. Water Droplet Erosion of Aeroengine Fan Blades: The Importance of Form[J]. *Wear*, 2019, 426/427: 507-517.
- [6] ELHADI IBRAHIM M, MEDRAJ M. Water Droplet Erosion of Wind Turbine Blades: Mechanics, Testing, Modeling and Future Perspectives[J]. *Materials*, 2020, 13(1): 157.
- [7] HONEGGER E. Tests on Erosion Caused by Jets[J]. *Brown Boveri Rev*, 1927, 14(4): 95-104.
- [8] ROSATO D V, ROSATO D V, ROSATO M G, et al. *Plastics Institute of America Plastics Engineering, Manufacturing & Data Handbook*[M]. Boston, MA: Springer US, 2001.
- [9] METHVEN T J, FAIRHEAD B. A Correlation between Rain Erosion of Perspex Specimens in Flight and on a Ground Rig[J]. *Wear*, 1960, 3(6): 485.
- [10] WEAVER J H. *Electroplated Nickel Rain Erosion Resistant Coating*[R]. US Air Force: Air Force Materials Laboratory, 1968.
- [11] BROTHERHOOD P, BROWN D W. Flight Measurements of the Effects of Simulated Leading-edge Erosion on Helicopter Blade Stall, Torsional Loads and Performance[J]. *Aeronautical Research Council Reports & Memoranda*, 1976, 37: 76039.
- [12] SCHMITT J G F. *Flight Test-whirling Arm Correlation of Rain Erosion Resistance of Materials*[R]. Wright-Patterson Air Force Base: Air Force Materials Laboratory, 1968.
- [13] TOBIN E F, YOUNG T M, RAPS D, et al. Comparison of Liquid Impingement Results from Whirling Arm and Water-Jet Rain Erosion Test Facilities[J]. *Wear*, 2011, 271(9/10): 2625-2631.
- [14] 沙明工, 孙莹, 李雨桐, 等. 高速雨滴冲击下飞行器蒙皮涂层损伤行为动态实验研究[J]. *爆炸与冲击*, 2023, 43(8): 92-105.
- [15] SHA M G, SUN Y, LI Y T, et al. Dynamic Experimental Study on Damage Behaviors of Aircraft Envelope Coating under the Impact of High-Speed Raindrops[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(8): 92-105.
- [16] SHA M G, SUN Y, LI Y T, et al. Impact Damage Testing Based on High-Speed Continuous Water Jet Aircraft Coatings[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2024, 37(10): 249-264.
- [17] SHA M G, LIU Y M, SUN Y, et al. Dynamic Experimental Study on Water Droplet Erosion Damage Behavior of Composite Coating Structures for Supersonic Aircraft[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2025, 37: 2214-2226.
- [18] 杨昭君, 李雨桐, 李明, 等. 高动态雨滴冲击飞机蒙皮涂层的抗雨蚀影响因素与损伤机理[J]. *表面技术*,

- 2025, 54(10): 82-95.
- YANG Z J, LI Y T, LI M, et al. Affecting Factors of Rain Erosion Resistance and Damage Mechanisms of the Aircraft Skin Coating Impacted by High Dynamic Raindrops[J]. *Surface Technology*, 2025, 54(10): 82-95.
- [18] OBARA T, BOURNE N K, FIELD J E. Liquid-Jet Impact on Liquid and Solid Surfaces[J]. *Wear*, 1995, 186/187: 388-394.
- [19] COOK S S. Erosion by Water-Hammer[J]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1928, 119(783): 481-488.
- [20] SPRINGER G S. *Erosion by Liquid Impact*[M]. New York: John Wiley & Son Inc, 1976, 1-279
- [21] FIELD J E. ELSI Conference: Invited Lecture[J]. *Wear*, 1999, 233/234/235: 1-12.
- [22] GUJBA A K, HACKEL L, KEVORKOV D, et al. Water Droplet Erosion Behaviour of Ti-6Al-4V and Mechanisms of Material Damage at the Early and Advanced Stages[J]. *Wear*, 2016, 358/359: 109-122.
- [23] O'CARROLL A, HARDIMAN M, TOBIN E F, et al. Correlation of the Rain Erosion Performance of Polymers to Mechanical and Surface Properties Measured Using Nanoindentation[J]. *Wear*, 2018, 412/413: 38-48.
- [24] WANG X, XU J J, CHEN S R, et al. Damage Behavior and Assessment of Aeronautical PMMA Subjected to High-Velocity Water-Jet Impact[J]. *Wear*, 2023, 534/535: 205145.
- [25] WANG X, CHEN S R, XU J J, et al. Comparative Study on the Water Droplet Erosion Behavior between Stretched and Casted Aeronautical PMMA[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2024, 183: 104806.
- [26] COTO B, HALLANDER P, MENDIZABAL L, et al. Particle and Rain Erosion Mechanisms on Ti/TiN Multilayer PVD Coatings for Carbon Fibre Reinforced Polymer Substrates Protection[J]. *Wear*, 2021, 466/467: 203575.
- [27] MA D N, HARVEY T J, WELLMAN R G, et al. Characterisation of Rain Erosion at Ex-Service Turbofan Blade Leading Edges[J]. *Wear*, 2019, 426/427: 539-551.
- [28] SCHRAMM M, RAHIMI H, STOEVE SANDT B, et al. The Influence of Eroded Blades on Wind Turbine Performance Using Numerical Simulations[J]. *Energies*, 2017, 10(9): 1420.
- [29] FÆSTER S, JOHANSEN N F, MISHNAEVSKY L Jr, et al. Rain Erosion of Wind Turbine Blades and the Effect of Air Bubbles in the Coatings[J]. *Wind Energy*, 2021, 24(10): 1071-1082.
- [30] LI D J, JIANG P, SUN F, et al. Water-Droplet Erosion Behavior of High-Velocity Oxygen-Fuel-Sprayed Coatings for Steam Turbine Blades[J]. *Corrosion Reviews*, 2022, 40(1): 39-49.
- [31] FUJISAWA N, YAMAGATA T, HAYASHI K, et al. Experiments on Liquid Droplet Impingement Erosion by High-Speed Spray[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2012, 250: 101-107.
- [32] 王天聪, 侯国梁, 苏琼, 等. 抗气蚀聚氨酯涂层的研究进展[J]. *表面技术*, 2023, 52(6): 153-165.
- WANG T C, HOU G L, SU Q, et al. Research Progress of Anti-Cavitation Erosion Polyurethane Coating[J]. *Surface Technology*, 2023, 52(6): 153-165.
- [33] XIAO S, LAUX K A, WANG H L, et al. Physical Correlation between Abrasive Wear Performance and Scratch Resistance in Model Polyurethane Elastomers[J]. *Wear*, 2019, 418/419: 281-289.
- [34] LESSER M B, FIELD J E. The Impact of Compressible Liquids[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1983, 15: 97-122.
- [35] HEYMANN F J. On the Shock Wave Velocity and Impact Pressure in High-Speed Liquid-Solid Impact[J]. *Journal of Basic Engineering*, 1968, 90(3): 400-402.
- [36] ENGEL O G. Damage Produced by High-Speed Liquid-Drop Impacts[J]. *Journal of Applied Physics*, 1973, 44(2): 692-704.
- [37] LU Y Y, HUANG F, LIU X C, et al. On the Failure Pattern of Sandstone Impacted by High-Velocity Water Jet[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 76: 67-74.
- [38] ADLER W F. Rain Impact Retrospective and Vision for the Future[J]. *Wear*, 1999, 233/234/235: 25-38.
- [39] KEEGAN M H, NASH D H, STACK M M. On Erosion Issues Associated with the Leading Edge of Wind Turbine Blades[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2013, 46(38): 383001.