

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0357

# 基于单射流冲击试验的复合材料 高速雨滴撞击损伤研究\*

侯乃丹<sup>1,2</sup>, 王旋<sup>1,2</sup>, 李玉龙<sup>1,2</sup>

(1. 西北工业大学航空学院, 陕西 西安 710072;

2. 陕西省冲击动力学及工程应用重点实验室, 陕西 西安 710072)

**摘要:** 飞行器高速飞越云雨区时, 前表面会受到雨滴的冲击侵蚀。基于一级轻气炮搭建了一种单射流冲击试验平台用于材料雨蚀试验, 可产生速度 200~600 m/s、直径 4~7 mm、头部呈光滑圆弧形的稳定水射流; 并对一种碳纤维树脂基复合材料层合板进行了不同速度和直径的单射流冲击试验。结果表明, 复合材料单次水射流冲击的典型损伤形态为: 冲击表面凹陷, 中心几乎完好无损伤, 周围产生一环状损伤带, 环内有树脂去除、基体开裂、少量纤维断裂等损伤形式; 内部损伤主要由基体开裂和层间分层组成。损伤尺寸呈现典型的各向异性, 纵向尺寸大于横向尺寸; 随射流速度和直径的增加, 表面环状损伤和内部损伤的尺寸均向外扩展, 环状损伤面积和内部分层面积也随之增加。水锤压力的压缩和卸载、侧向射流的剪切和应力波的相互作用是造成复合材料单射流冲击损伤的主要机理。

**关键词:** 液固冲击; 水射流; 复合材料; 雨蚀损伤

中图分类号: O347.4

国标学科代码: 13015

文献标志码: A

## High-speed raindrop impingement damage of composites based on single waterjet impact tests

HOU Naidan<sup>1,2</sup>, WANG Xuan<sup>1,2</sup>, LI Yulong<sup>1,2</sup>

(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China;

2. Shaanxi Impact Dynamics and Engineering Application Laboratory, Xi'an 710072, Shaanxi, China)

**Abstract:** When an aircraft flies over the cloud at high speed, the front surface will be eroded by raindrops. In this paper, a single waterjet impact test platform was established based on the first-stage light gas gun in order to conduct the rain erosion tests on materials. Its principle was that the gas gun launches a metallic projectile to impact the water storage chamber sealed by the rubber piston, and then the liquid was driven from the small nozzle to form a high-speed waterjet. The apparatus could generate stable waterjets with speeds of 200–600 m/s, diameters of 4–7 mm and a smooth circular-arc head, which simulated a waterdrop with the same diameter. A series of single waterjet impact tests were carried out on a symmetrically cross-ply carbon-fiber-reinforced composite (CFRP) laminate under different waterjet velocities and diameters. The results show that the typical damage modes of CFRP laminates impacted by single waterjets are as follows. The impacted surface is depressed, and the surface damage consists of resin removal, matrix cracking, minor fiber fracture and fiber exposure around the rim of a central undamaged region. The internal damage range gradually expands from the impact surface to the bottom ply, mainly composed of intralaminar matrix cracking with a pyramid shape and interlaminar delamination with a diamond shape. Both the surface and internal damage are more extensive in the longitudinal than the transversal direction, thus presenting typical

\* 收稿日期: 2020-09-27; 修回日期: 2020-11-04

基金项目: 国家自然科学基金(11832015, 11527803)

第一作者: 侯乃丹(1995—), 女, 博士研究生, [hounaidan@163.com](mailto:hounaidan@163.com)

通信作者: 李玉龙(1961—), 男, 博士, 教授, [liyulong@nwpu.edu.cn](mailto:liyulong@nwpu.edu.cn)

anisotropy due to the anisotropic elastic and strength properties of CFRP materials. With the increase of waterjet velocity and diameter, both the surface annular damage and internal damage expand outwards, and the damage areas also increase correspondingly. Compression and release waves of water hammer pressure, shear stress of lateral jetting and interaction of stress waves are the main mechanisms leading to damage and failure of composites impacted by waterjets. The area of the undamaged center of the surface can be predicted by multiplying the contact boundary diameter of the water hammer pressure by a dimensionless damage function.

**Keywords:** liquid-solid impact; waterjet; CFRP; rain erosion damage

随着飞机、导弹、无人机等先进装备的不断提速,它们所面临的服役条件也更加苛刻,这对材料也提出了更高的要求。比如当飞机高速飞越云层或暴露于降水中时,前表面材料会受到不同直径雨滴的连续冲击侵蚀,它们之间极高的相对速度造成的冲击力不容小觑,很容易造成结构表面材料损伤甚至剥落;对于带隐身涂层的蒙皮表面还会造成隐身失效等问题,缩短飞行器的生命周期,这种现象被称为“雨蚀”。1945年,美国 B-29 轰炸机从日本返航时曾遭遇雷雨区,后来发现机上天线罩表面受损。经雨滴冲击模拟试验证明,天线罩表面损坏正是飞机高速飞行时由雨滴冲击造成的<sup>[1]</sup>。

对于雨蚀问题,较早的研究起始于 20 世纪 40~50 年代,可以抽象为液固高速冲击问题。早期 Engel<sup>[2]</sup>对雨蚀过程的力学机理进行了研究,将液滴的高速撞击等效为一个软金属球的低速撞击。20 世纪 60 年代, Cavendish 实验室研制出第一台单射流冲击设备(single impact jet apparatus, SIJA)<sup>[3]</sup>, 实现用试验手段研究高速液固撞击问题,随后雨蚀研究进入高速发展阶段。Adler<sup>[4]</sup>从材料损伤破坏的角度对液滴冲击研究做了回顾,认为由于材料的剥落,很难有一种理论对材料的液滴冲击损伤实现合理预测,基于同样的原因,要想建立材料的宏观力学特性和雨蚀损伤的定量关系也十分困难。Field<sup>[5]</sup>结合前及自己的研究成果,在基础理论及多领域应用、射流装置及高速相机等试验设备、材料雨蚀损伤结果等方面对液固冲击问题进行了综述,并指出,在碰撞的初始阶段,接触周边发生的超音速膨胀是液固碰撞损伤的主要原因。

在飞行器雨蚀损伤研究中,亚音速雨滴冲击侵蚀的工况是最常见的,但由于速度较低,单次冲击产生的压力值小,常常需要一定时间内成百上千次的连续冲击才能对材料或结构产生损伤破坏,常关注其疲劳载荷破坏机理,常用的试验装置为旋转臂装置,可用于研究低速(通常小于 250 m/s)连续雨滴侵蚀下材料的抗雨蚀性能<sup>[6]</sup>;而超音速雨滴冲击虽然发生概率较低,但其水锤压力脉冲峰值(可达 GPa 量级)远超许多材料的强度,单次或数次冲击就足以对材料或结构产生破坏,因而更关注冲击载荷破坏机理,而单射流发生装置由于场地小、简单易操作、试验条件可控等优点,在实验室级的材料雨蚀研究中是应用最广泛的,通常用来研究液固撞击的基础力学问题,以及模拟雨场中的高速(1 000 m/s 以内)大直径雨滴对材料的冲击破坏,也是本研究采用的试验方法。

施红辉等<sup>[7]</sup>、毛靖儒等<sup>[8]</sup>在 20 世纪末开始了雨蚀方面的实验研究,利用自行研制的超音速液体射流发生器,以及偏振光学系统研究了有机玻璃(PMMA)材料在高速射流冲击下的动力学响应。孙弼等<sup>[9]</sup>、张荻等<sup>[10-11]</sup>通过建立的液固撞击的非线性波动模型对高速液固撞击进行了数值模拟研究,并将研究成果应用于工程实践。王泽江等<sup>[12]</sup>开展了飞行器光学材料雨滴侵蚀试验,搭建了旋转臂实验平台,其旋转速度可达 1 570 r/min、试件中心线速度 200 m/s,为工程材料雨滴侵蚀研究提供了有效试验手段。目前国内关于材料雨蚀试验方法和损伤特征的研究仍较匮乏。

除飞行器的雨滴侵蚀外,蒸汽轮机的叶片水蚀、水射流切割等技术领域都涉及到液固高速撞击问题。因此深入研究液固高速撞击过程中流体和材料的动力学行为机制具有十分重要的工程意义。目前针对材料雨蚀损伤的研究主要集中于钛合金<sup>[13]</sup>、钢材<sup>[14]</sup>、铝合金<sup>[15]</sup>、有机玻璃<sup>[16]</sup>等均质材料,对于复合材料等非均质材料的雨蚀问题鲜有报道。随着复合材料在航空航天等领域的应用日益广泛,有必要针对复合材料进行系统的雨蚀损伤研究,一方面为复合材料结构的雨蚀损伤评估及维修检测提供理论基础,另一方面为复合材料抗冲击、抗雨蚀性能的改进、防护涂层的设计提供指导性建议。

## 1 液固冲击过程

液固冲击过程可以分为液体压缩和侧向喷射两个阶段。首先, 液体撞击固体表面的接触初期, 如图 1(a) 所示, 液滴与固体面间的接触边界速度高于液滴内部冲击波速度, 冲击波受到接触边界的阻碍而形成包络面, 包络面以内的液体被压缩, 形成瞬态高压。如果不考虑固体的变形, 液滴撞击固体平面的中心压力为:

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

这一压力被称为“水锤压力”<sup>[17]</sup>, 其中  $v$  为撞击速度,  $\rho_1$ 、 $c_1$  是液体的密度和波速。如果考虑固体的弹性, 根据应力波理论, 则有<sup>[18]</sup>:

$$p_c = \frac{\rho_1 c_1 \rho_s c_s}{\rho_1 c_1 + \rho_s c_s} v \quad (2)$$

式中:  $\rho_s$ 、 $c_s$  分别为固体的密度和波速。理论上讲, 如果这一压力超过了材料的屈服强度, 则有可能对材料造成破坏。对于本文的研究对象复合材料来说,  $\rho_s$ 、 $c_s$  可用下式估算<sup>[18]</sup>:

$$\rho_s = \rho_f \varphi_f + \rho_m \varphi_m, \quad c_s = \sqrt{E_{22}/\rho_s} \quad (3)$$

式中:  $\varphi$  为体积分数, 下标 f 和 m 分别表示纤维和基体,  $E_{22}$  是垂直于纤维方向上的等效杨氏模量。水锤压力在给定的接触半径内产生, 这一半径由下式给出<sup>[19]</sup>:

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

式中:  $r$  为水滴的曲率半径。

当液滴内部冲击波速度即将超过液固接触边界速度时, 冲击波脱离边界束缚而释放压力, 形成的卸载拉伸波分别向液体和材料内部传播, 如图 1(b) 所示, 液固冲击进入第 2 阶段, 压缩液体经卸载波后迅速喷射而出, 接触边界以水声速向自由表面扩展, 液体会沿着固体表面形成侧向射流。这一侧向射流速度一般会几倍于初始的液固冲击速度, 同时剪切波和瑞利波也会分别向材料内部和表面传播, 容易造成材料表面的剥落和微裂纹的扩展。

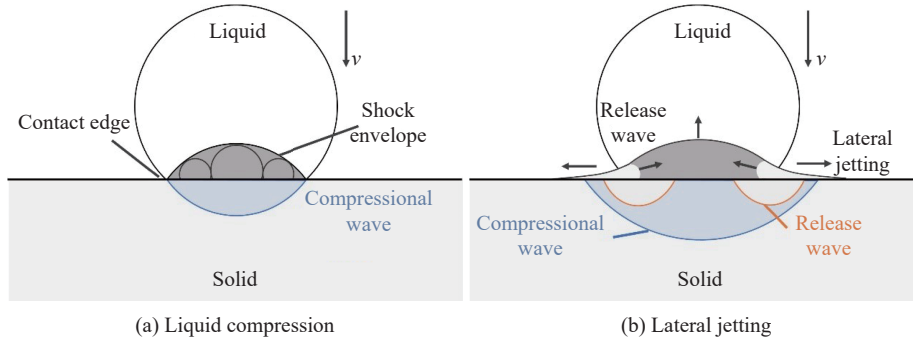


图 1 液固冲击过程示意图

Fig. 1 Diagram of liquid-solid impact

当液固表面产生的压缩波反射回液体中心时, 认为完成了水锤压力的卸载, 整个水锤压力的持续时间由下式给出:

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

此后液体在固体表面逐渐形成稳定的不可压缩流体, 固体表面中心点的压力会在相当长的时间内保持在一个较低的值, 这一数值由 Bernoulli 静压给出:

$$p_i = \frac{\rho_1 v^2}{2} \quad (6)$$

值得注意的是, 在高速液滴撞击时, 剧烈的压缩作用会使激波在液体中的传播速度发生明显变化, 这一影响的量化可由下式给出:

$$c_1 = c_0 + kv \quad (7)$$

式中:  $c_0$  为水的声速(约 1 500 m/s),  $k$  为常数, 撞击速度  $v < 1\ 000$  m/s 时, 可取  $k=2$ <sup>[20]</sup>。

从上述推导中可以发现, 水锤压力的大小和水滴直径无关, 而这一压力的持续时间和接触半径既取决于水滴直径和冲击速度, 也取决于液体的可压缩波速。

## 2 单射流冲击试验平台

采用的单射流冲击试验平台是根据卡文迪许实验室的单式射流装置(single impact jet apparatus, SIJA)的射流发生原理、基于 10 mm 口径的一级轻气炮改装搭建而成的。如图 2 所示, 试验平台包括 3 个主要部分: 第 1 部分是气炮发射装置, 用于发射高速子弹, 包括气室、炮管、加密封圈的弹托(①)、子弹(②)、脱弹器(④)等; 第 2 部分是试验台部分, 用于射流的发生, 包括储水腔体(⑤)及支架、试样夹具(⑦)等; 第 3 部分是附加测量设备, 可根据试验内容及试验目的进行调整, 如测量子弹速度的电磁感应线圈(③)、测量射流形态的高速摄像系统(⑥)等。实验前, 预先在不锈钢腔体内储满定量纯净水, 并用尺寸、厚度合适的氯丁橡胶密封腔体末端开口, 然后用高压气体驱动金属子弹撞击在密封橡胶上, 冲击产生的巨大动能会在腔体内形成瞬间高压, 驱动液体从细小的喷嘴处喷射, 从而形成高速液体射流。

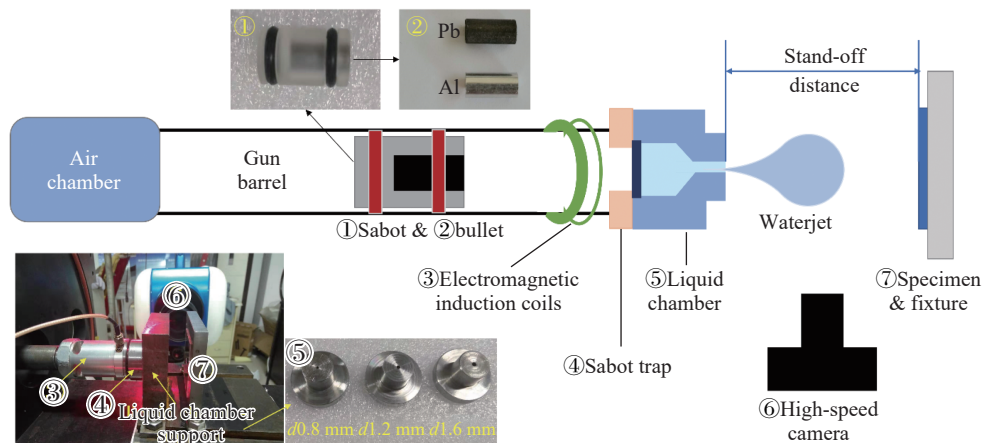


图 2 单射流冲击试验装置

Fig. 2 Single impact waterjet apparatus

为了实现不同直径的水射流, 设计了 3 个喷口直径分别为 0.8、1.2、1.6 mm 的储水腔体。试验所用子弹为铝制或铅制, 形状均为直径 5 mm、长度 10 mm 的圆柱体。用一对电磁感应线圈测量金属子弹的速度, 当子弹到达炮管出口时, 安装在炮口位置的两个电感线圈会受金属子弹影响, 磁场发生变化从而产生两次脉冲信号, 通过数据采集装置得到两者的时间差, 计算得到子弹移动速度。利用 Phantom V711 摄像机的高速成像技术实现了水射流形状的可视化, 图像分辨率为 128×128, 拍摄间隔为 4.75 μs; 根据标定样张的像素点和实际距离的关系即可推算出射流直径和射流速度。

在单射流冲击试验中, 射流喷出后在空气中传播的过程中, 形态和速度是不断变化的, 需要找到一个合适的位置安装试样, 因此需要研究射流形态随位移的变化规律。图 3(a) 是在水射流速度为 325 m/s 时连续拍摄的图像, 发现射流刚从喷口喷出时呈圆柱形(如图 3(a) 中的图片①); 随着冲击载荷对腔体的加载, 一定体积的水以更高的速度喷出, 在空气中运动并逐渐形成一团“蘑菇头”形状的水雾(如图 3(a) 中的图片③); 随着射流继续运动, 最前端的小水滴受到空气阻力作用减速向外分散, 而紧随其后的小水滴从喷口加速飞出, 形成新的射流头部, 从而宏观上呈现出一个稳定速度的中心“水团”, 周围环绕一圈减速的“水雾”(如图 3(a) 中的图片④~⑤)。此时的中心“水团”呈现像水滴一样规则的球形前

缘, 根据前人的研究, 可以认为这一阶段的水射流模拟的是相同直径的水滴<sup>[5]</sup>, 可用于材料单滴雨蚀试验, 不需考虑周围减速“水雾”带的影响。最终其光滑规则的前缘会因为 Taylor 不稳定现象而迅速扩散 (如图 3(a) 中的图片⑥), 在这之后的水射流实质上已变成空气中离散的小水滴, 不能再进行雨蚀试验。

图 3(b) 中给出了射流直径和射流速度随喷射方向的位移 (以喷口为原点) 增加的变化规律, 可以看到射流喷出后速度和直径先呈逐步增长趋势, 但增速逐渐放缓, 直到距喷口 10 mm 左右时速度和直径均呈现稳定状态 (见图中蓝色阴影区域), 随后又由于气液界面的不稳定而导致射流内的微小水滴迅速扩散, 宏观呈现射流速度和直径的迅速上升。因此, 雨蚀试验中试样的最佳安装位置是距离喷口 10 mm 处。这一结论经过了不同射流速度和直径试验结果的验证, 并与文献 [21-22] 的结果相吻合。

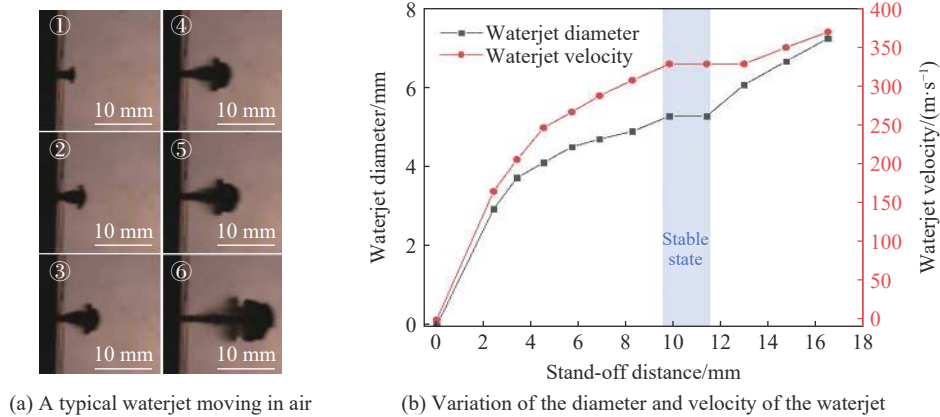


图 3 射流形态随位移的变化规律

Fig. 3 Variation of the waterjet with stand-off distance

该装置的水射流试验结果如图 4 所示, 图例中的 “ $d_c 0.8\text{-Al}$ ” 表示铝弹冲击喷口直径为 0.8 mm 的腔体产生的水射流; “ $d_c 1.2\text{-Pb}$ ” 表示铅弹冲击喷口直径为 1.2 mm 的腔体产生的水射流。以下是本研究中使用的单射流发生装置的一些结论: (1) 该设备可产生速度 200~600 m/s、直径 4~7 mm 的稳定水射流, 射流形态可重复性良好, 其中速度低于 400 m/s 的水射流需发射铝弹产生, 超过 400 m/s 的水射流通过发射铅弹产生; (2) 铝弹产生的射流速度与子弹速度之比约为 2~3, 铅弹产生的射流速度与子弹速度之比为 3~5, 如图 4(a) 所示, 通过选择子弹的材质和速度可以实现不同的射流速度, 而喷嘴直径对射流速度影响不大; (3) 在相同射流速度下, 射流直径随喷嘴直径的增大而增大, 图 4(b) 也表明, 在研究范围内, 射流速度对射流直径的影响不大, 即可以认为不同射流直径只需通过加装不同直径的喷嘴来实现; 喷嘴直径 0.8、1.2、1.6 mm 对应的平均射流直径分别为 4.5、5.5、6.5 mm。

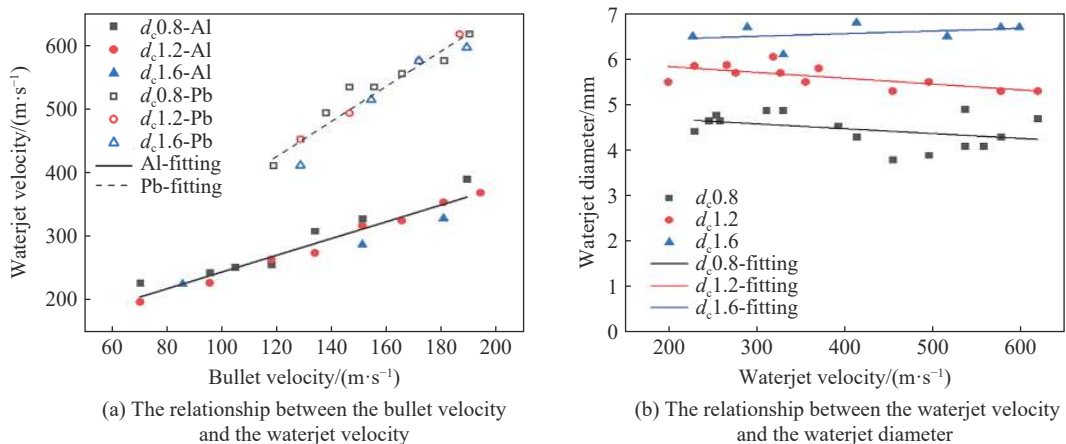


图 4 单射流发生装置的水射流测试结果

Fig. 4 Waterjet testing results of the single impact waterjet apparatus

### 3 碳纤维树脂基复合材料高速水射流冲击试验

采用的碳纤维/环氧树脂基复合材料由 T700/7901 单向布预浸料采用热压罐成型工艺制造而成, 材料参数见表 1。试样共 8 层, 铺层顺序为  $[0, 90]_{2s}$ , 试样长和宽均为 28 mm, 实际平均厚度为 1.1 mm。试验中, 试样被夹持在背面开孔为长宽均 16 mm 的刚性夹具上, 被冲击表面与射流方向垂直。

表 1 T700/7901 单向板力学参数

Table 1 Mechanical properties of T700/7901 unidirectional laminates

纤维体积分数 $\phi/\%$	$E_{11}/\text{GPa}$	$E_{22}/\text{GPa}$	$G_{12}/\text{GPa}$	$\nu_{12}$	$X_T/\text{MPa}$	$X_C/\text{MPa}$	$Y_T/\text{MPa}$	$Y_C/\text{MPa}$	$S_{12}/\text{MPa}$
66	115	9	3.3	0.33	2300	1050	42	143	116

#### 3.1 冲击后试样的典型损伤模式观察与表征

图 5 所示为速度为 557 m/s、直径为 6.3 mm 的单次水射流冲击后的试件表面图像。显微镜结果显示, 损伤区域由一个几乎圆形的未受损中心区域(图 5(b)中的①, 直径约 1.8 mm)和一个褪色的“失效环”组成, 其中有树脂脱落(②)、基体开裂(③)和少部分的纤维断裂(④)。环状区域内的“褪色”是由表面层树脂去除导致的纤维裸露、亚表面散射造成的。这一环形损伤在纵向上的尺寸比横向大, 具有各向异性。值得注意的是, 表面损伤的最外缘直径(3.63 mm)小于冲击射流直径, 即变形具有典型的局部性。分别沿纤维方向和垂直纤维方向测量环形损伤的表面轮廓, 如图 6 所示, 纵向轮廓呈一“U”型凹坑, 宽度约 4.2 mm, 深度约 25  $\mu\text{m}$ ; 而横向轮廓呈一“V”型凹陷, 深度可达 65  $\mu\text{m}$ , 这是由于③处发生了基体开裂。结合图 5(b)可以发现, 整个环形损伤是包含于凹坑内的, “U”型凹坑的底部对应于①处中心无损伤区, 凹坑侧壁的明显起伏对应②处的树脂侵蚀区。

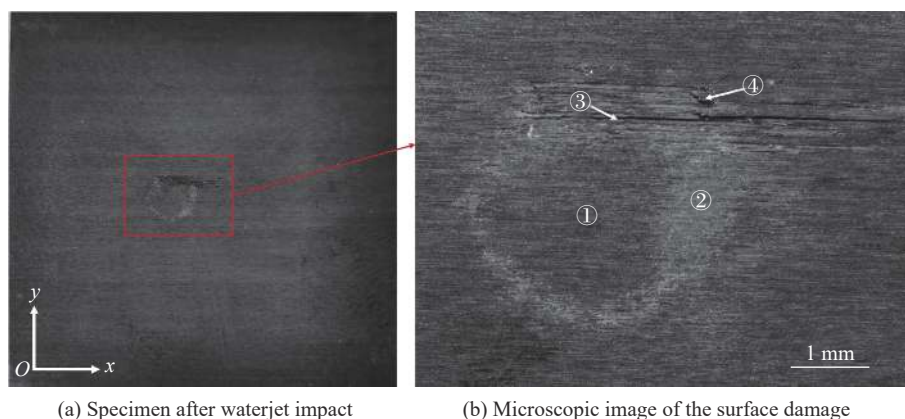


图 5 水射流单次冲击后复合材料试件表面典型损伤的显微镜观察结果

Fig. 5 Microscopic results of the typical surface damage of CFRP specimen caused by single waterjet impact

图 7 所示为试样的 C 扫描结果, 不同颜色代表的是反射信号能达到的不同深度, 即分层深度。可以明显地观察到, 在撞击中心附近存在一个纺锤形分层区域, 其纵向长度为 13.67 mm, 横向长度为 9.73 mm, 同样呈现明显的各向异性, 且越靠近底面的分层范围越大。对比图 5 可以发现, 分层损伤范围可以数倍于表面损伤尺寸, 因此对于复合材料层合板的高速雨蚀损伤来说, 直接通过表面环状损伤来量化其雨蚀损伤程度是不够准确的。为了对试样内部损伤进行更直观的观察, 将试样沿表面环形的轴线切开, 并用细砂纸打磨后, 在光学显微镜下观察切面, 如图 8 所示。可以发现内部损伤主要由基体开裂和层间分层组成, 且从冲击表面到底面, 损伤范围逐渐扩大, 呈一“金字塔”型; 局部放大后看到, 层内基体开裂通常会呈现贯穿整层的宏观裂纹, 连接着相邻两层的分层损伤, 且越靠近底面, 裂纹长度和宽度都越大。

图 9 中给出了高速水射流冲击后复合材料试样的典型损伤形貌示意图, 对表面和内部损伤的尺寸进行了标注, 其中表面损伤尺寸  $D_2$  表示中心无损伤区的最小直径,  $D_1$  表示表面损伤的最外缘直径; 内部

损伤尺寸  $L_x$  表示分层区域的纵向长度,  $L_y$  表示分层区域的横向长度,  $S_{xy}$  表示分层区域的面积。表 2 中列出了不同射流速度和直径的试验结果, 并将在下文中做详细分析。

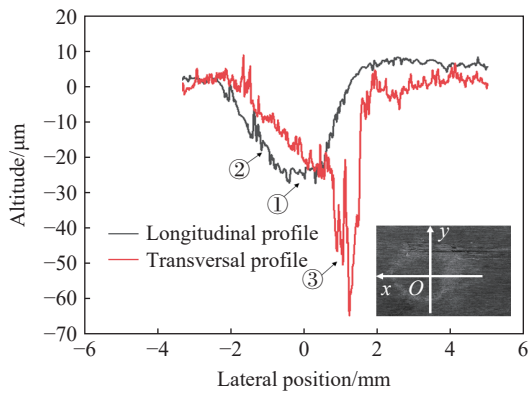


图 6 环形损伤区域的表面轮廓

Fig. 6 Surface profiles of the annular damage area

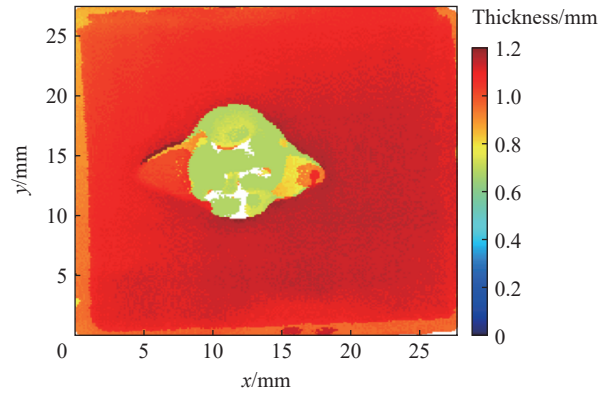


图 7 水射流冲击后试样 C 扫描结果

Fig. 7 C-scanning result of the specimen after waterjet impact

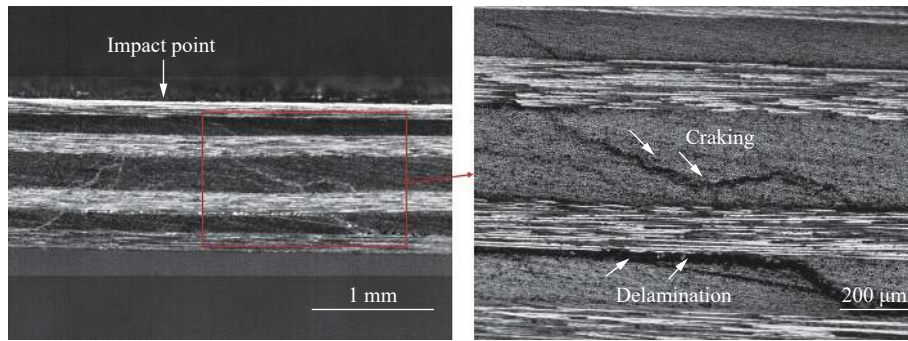


图 8 垂直于表面的横剖面显微结果

Fig. 8 Microscopic results of the cross section perpendicular to the surface

表 2 不同速度和直径的水射流冲击复合材料试样的损伤结果

Table 2 Damage results of CFRP samples impacted by waterjets with different velocities and diameters

序号	射流速度 $v/(m \cdot s^{-1})$	射流直径 $d/mm$	$D_2/mm$	$D_1/mm$	$L_x/mm$	$L_y/mm$	$S_{xy}/mm^2$
1	300	5.7	0	0	0	0	0
2	343	4.9	0	0	0	0	0
3	343	5.7	0.74	2.07	2.004	2.406	3.139
4	386	5.7	0.89	2.25	4.431	3.302	10.138
5	407	4.9	0.75	2.26	1.886	2.484	3.398
6	407	5.7	1.18	2.9	5.303	4.699	17.049
7	428	4.9	0.96	2.39	4.636	2.897	7.776
8	428	5.7	1.41	3.02	7.103	5.222	25.113
9	428	6.7	1.50	3.27	9.154	6.147	31.531
10	471	4.9	1.05	2.49	4.454	4.301	15.379
11	514	6.7	1.59	3.54	11.935	7.246	45.216
12	557	4.9	1.51	2.76	12.024	8.049	45.173
13	557	5.7	1.80	3.63	12.579	9.732	75.772
14	557	6.3	1.90	3.77	13.673	10.963	88.678

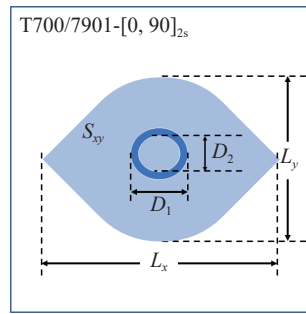


图 9 高速水射流冲击复合材料试样的典型损伤形貌示意图

Fig. 9 Schematic diagram of typical damage modes of CFRP samples impacted by high-speed waterjets

### 3.2 不同射流速度的试验结果

图 10 所示为射流直径 5.7 mm 下不同射流速度的试验结果, 可以看到当速度为 343 m/s 时, 表面几乎看不到损伤, 内部仅在冲击中心约 2 mm 范围内发现少量分层损伤; 当速度增加至 407 m/s 时, 表面出现了以树脂去除为主的典型环状损伤, 内部分层区域也扩大, 呈椭圆形; 当速度达到 557 m/s 时, 表面环状损伤更加严重, 环状宽度增加, 不仅树脂去除范围扩大, 还出现了沿纤维方向的基体开裂, 内部分层损伤区域进一步增大, 并呈现类似纺锤形的形状。

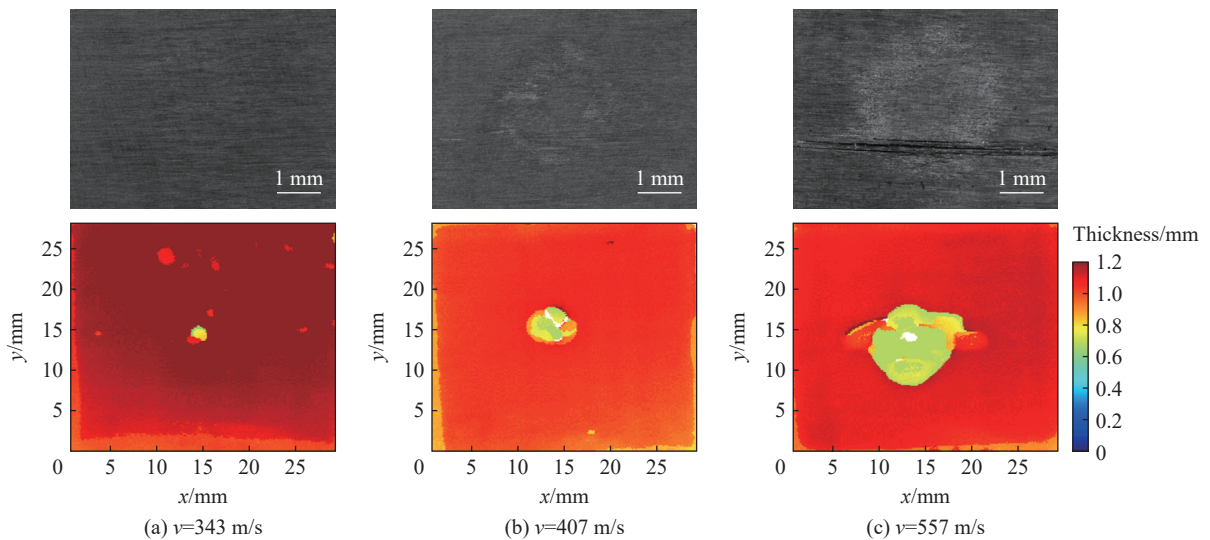


图 10 直径 5.7 mm 的不同速度的射流冲击复合材料试样的显微和 C 扫结果

Fig. 10 Microscopic and C-scan results of CFRP samples impacted by waterjets with the same diameter of 5.7 mm at different jet velocities

图 11 中给出了两种射流直径(4.9、5.7 mm)下损伤量化参数  $D_2$ 、 $D_1$ 、 $L_x$ 、 $L_y$ 、 $S_{xy}$  随射流速度的变化规律, 可以发现 5 个参数均随射流速度的增加呈上升趋势, 即射流速度越高损伤越严重。图 11(a) 所示为表面损伤尺寸统计图, 相同射流直径下表面环形的内径  $D_2$  和外径  $D_1$  均随射流速度的增加而向外扩展, 环状宽度增加, 环状损伤面积也随之增加; 射流直径越大, 环形损伤向外扩展的范围越大; 另外在小于 600 m/s 的速度范围内, 表面损伤尺寸始终小于相应的射流直径。图 11(b) 所示为内部分层损伤尺寸统计图, 从图中可以看出, 分层损伤面积  $S_{xy}$  随射流速度增加而单调增加, 但增长速度先慢后快, 有一个拐点(射流直径 4.9 mm 对应拐点速度约 410 m/s, 射流直径 5.7 mm 对应拐点速度约 380 m/s), 经分析后发现拐点前损伤较小, 往往在冲击中心呈一小圆点, 纵横尺寸的各向异性不明显; 拐点后分层损伤开始呈现典型的纺锤形, 损伤尺寸呈现明显的各向异性, 即纵向尺寸  $L_x$  始终大于横向尺寸  $L_y$ 。另外, 对于两种射流直径 4.9、5.7 mm, 当射流速度分别为 340、300 m/s 时, 试样表面和内部均观察不到损伤, 可以认为达到了



试样单次水射流冲击的损伤门槛速度, 即当射流速度小于这一门槛速度时, 单次冲击不会对该复合材料试样造成任何损伤。

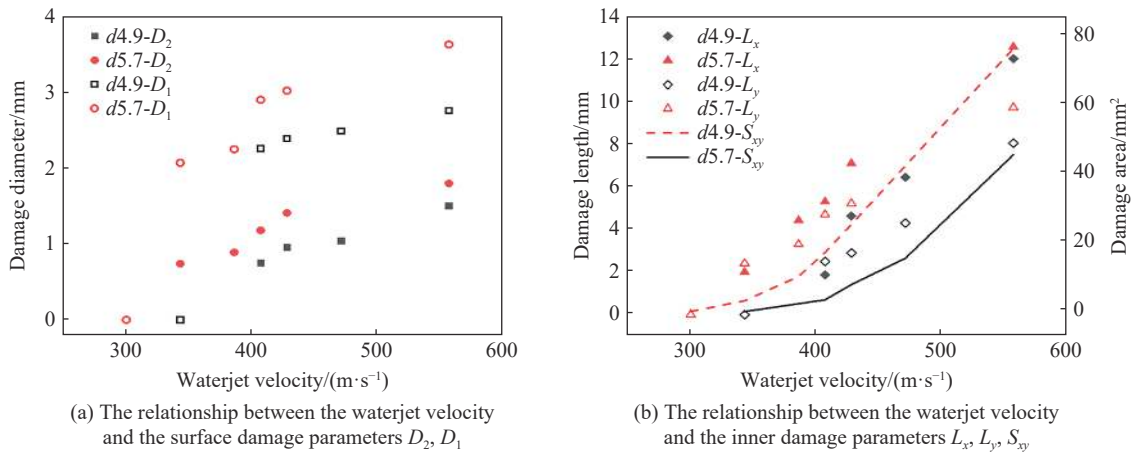


图 11 两种射流直径(4.9、5.7 mm)下损伤量化参数随射流速度的变化规律

Fig. 11 Variation of damage quantification parameters with waterjet velocity under two jet diameters (4.9, 5.7 mm)

### 3.3 不同射流直径的试验结果

图 12 所示为射流速度为 557 m/s 时不同射流直径的试验结果, 可以看到随着射流直径的增加, 环形损伤的尺寸不断向外扩展, 环内树脂去除面积增加, 并逐渐开始出现沿纤维方向的基体开裂(从 (a) 到 (b))且裂纹尺寸和数量也在增加(从 (b) 到 (c)); 内部分层损伤一直呈现典型的纺锤形, 但射流直径的增加使得分层损伤面积随之扩展。

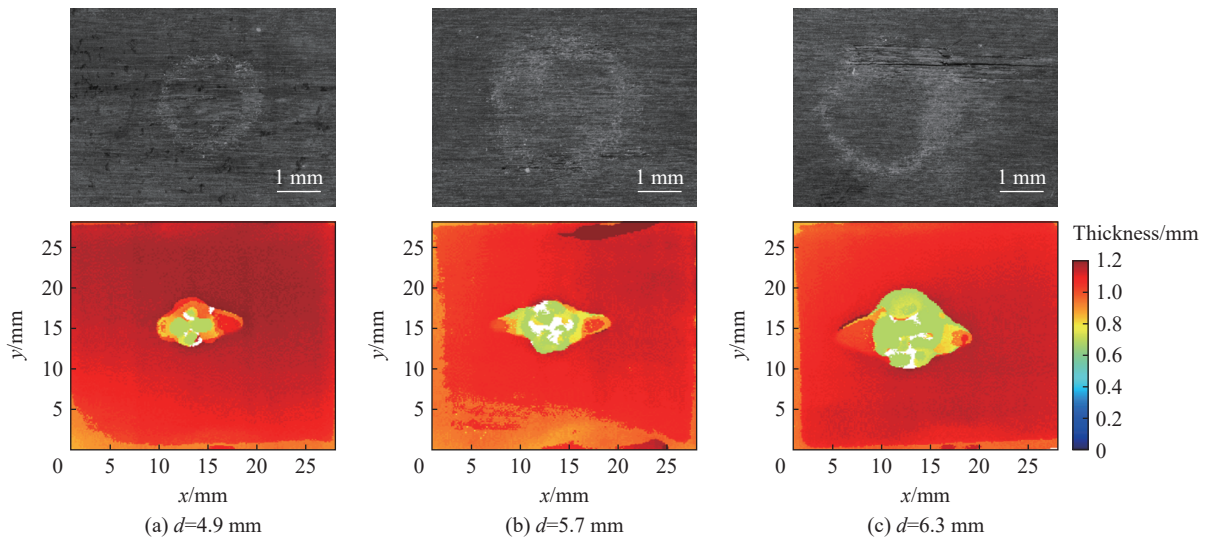


图 12 速度 557 m/s 时不同直径射流冲击复合材料试样的显微和 C 扫结果

Fig. 12 Microscopic and C-scan results of CFRP samples impacted by waterjets with different jet diameters at the same velocity of 557 m/s

图 13 中给出了两种射流速度(428、557 m/s)下损伤量化参数  $D_2, D_1, L_x, L_y$  随射流直径的变化规律, 可以发现 4 个参数均随射流速度的增加而呈上升趋势, 即射流直径越大损伤越严重。图 13(a) 所示为表面损伤尺寸统计图, 发现环状损伤的内径  $D_2$  和外径  $D_1$  均随射流直径的增加而向外扩展, 环状损伤面积也随之增加; 射流速度越高, 环形损伤向外扩展的范围越大。图 13(b) 所示为内部分层损伤尺寸统

计图, 发现分层损伤的纵横尺寸  $L_x$  和  $L_y$  均随射流直径的增加而增加, 故分层损伤面积也随之增加, 且  $L_x$  始终大于  $L_y$ 。

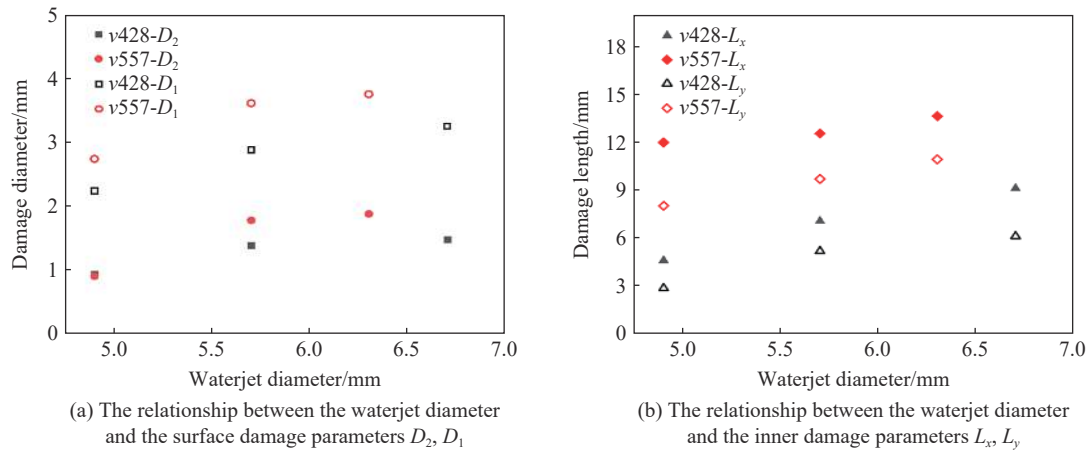


图 13 两种射流速度(428、557 m/s)下损伤量化参数随射流直径的变化规律

Fig. 13 Variation of damage quantification parameters with waterjet diameter at two jet velocities (428, 557 m/s)

### 3.4 复合材料高速水滴冲击损伤机理分析与损伤预测

交叉铺层的碳纤维树脂基复合材料薄板单次水射流冲击的典型损伤形貌有以下特征: (1) 冲击表面凹陷, 中心几乎完好无损伤, 周围呈一环状损伤带, 环内有树脂去除、基体开裂、少量纤维断裂等特征; (2) 内部分层损伤主要发生在靠近试样背面的层间区域, 整体形状呈典型的纺锤形; (3) 表面和内部的损伤尺寸均呈现典型的各向异性, 纵向尺寸大于横向尺寸; (4) 表面损伤的最外缘尺寸小于射流直径。

基于第 1 节对于液固冲击过程的理论分析, 认为造成以上典型损伤特征的原因有: (1) 冲击表面凹陷是由于水锤压力的作用。将表 1 的参数代入式 (2)~(3), 对图 5 所示工况中试样所承受的水锤压力进行估算, 得到这一压力值为 862 MPa, 已经远超过基体方向的压缩强度, 虽然水锤压力的持续时间只有  $1 \mu\text{s}$  左右, 但已有研究表明这一压力脉冲足以使材料发生永久变形<sup>[15, 22]</sup>; (2) 环状损伤带内的树脂去除主要是由高速径向流的剪切作用造成的, 主要会针对撞击区域附近的表面初始缺陷加以侵蚀, 光滑的表面相对不受影响; (3) 环状损伤带内的基体开裂、纤维断裂等可能是由水锤压力在接触半径边界处产生的卸载拉伸波造成的, 这一损伤机理由 Bourne 等<sup>[23-24]</sup> 发现, 可以解释大多数材料在高速水射流冲击后产生表面环状损伤的原因; (4) 层间的分层损伤是由应力波相互作用引起的, 一方面是因为水锤压力产生的压缩波在底面反射为拉伸波对层间的拉伸作用, 另一方面是由边界条件引入的弯曲剪应力导致的分层, 在一定程度上是可以由试样的形状和边界条件所控制的; 层内的基体开裂可能是由剪切波和卸载拉伸波的相互作用引起的; (5) 损伤尺寸的各向异性是由试样纵向和横向力学性能的各向异性导致的。

最后探究表面环状中心无损伤区尺寸  $D_2$  和水锤压力接触边界直径  $D_R$  的关系。由式 (4) 可知, 接触半径  $R$  可由射流速度  $v$  和射流直径  $d$  计算得到, 则接触边界直径  $D_R$  的计算公式为:

$$D_R = 2R = \frac{vd}{c_0 + kv} \quad (8)$$

式中:  $c_0 = 1500 \text{ m/s}$ ,  $k = 2$ 。将上式无量纲化处理后得到:

$$\frac{D_R}{d} = \frac{v/c_0}{1 + kv/c_0} \quad (9)$$

将表 2 中的工况代入式 (9), 并与试验所得  $D_2$  的无量纲值做对比, 得到图 14 中的曲线, 其中横坐标为射流速度  $v$  与水声速  $c_0$  的比值, 纵坐标为  $D_2$  或  $D_R$  与射流直径  $d$  的比值。对比发现试验值  $D_2$  的变化趋势与理论值  $D_R$  有一定的差距, 因为只要  $v > 0$ , 理论值  $D_R$  一定大于 0, 而试验中  $v$  只有大于损伤门槛速度  $v_{cr}$ , 表面才有可见损伤,  $D_2$  才大于 0, 因此直接用式 (8) 预测中心无损伤区尺寸  $D_2$  是不合理的。下面对

式 (9) 进行修正, 加入损伤门槛速度的影响, 本文中使用的修正公式如下:

$$\frac{D_2}{d} = \frac{m \left( \ln \frac{v}{c_0} - \ln \frac{v_{cr}}{c_0} \right)}{1 + k \frac{v}{c_0}} = \frac{v}{c_0} \times \frac{m \left( \ln \frac{v}{c_0} - \ln \frac{v_{cr}}{c_0} \right)}{\frac{v}{c_0}} = \frac{D_R}{d} \times Q(m, v, v_{cr}) \quad (10)$$

式中:  $m$  为待定参数。由 3.2 节试验结果可知, 射流直径 4.9、5.7 mm 对应的损伤门槛速度  $v_{cr}$  分别为 343、300 m/s, 用 Levenberg-Marquardt 优化算法对图 14 中两种射流直径对应的试验点  $D_2$  进行如式 (10) 的非线性拟合, 得到参数  $m$  的最优解为 1.168( $d4.9$ )和 0.978( $d5.7$ ); 并将拟合好的两条曲线画在图 14 上, 可以看到与理论曲线  $D_R$  相比, 拟合曲线可以更好地预测表面中心无损区尺寸  $D_2$ , 也更能体现表面损伤的真实特性, 即射流速度小于  $v_{cr}$  无可见损伤, 大于  $v_{cr}$  开始出现表面环状损伤。将式 (10) 做相应等式变换, 发现中心无损区尺寸  $D_2$  可由接触边界直径  $D_R$  乘以一个无量纲的“损伤函数” $Q$  得到, 其中的参数  $m$  和  $v_{cr}$  由材料性质决定, 但也跟射流直径相关, 这无疑给  $D_2$  的预测带来了困难。如何将损伤函数  $Q$  与射流直径解耦, 如何建立更准确更普适且参数易获得的损伤函数表达式, 是下一步需要研究的工作。

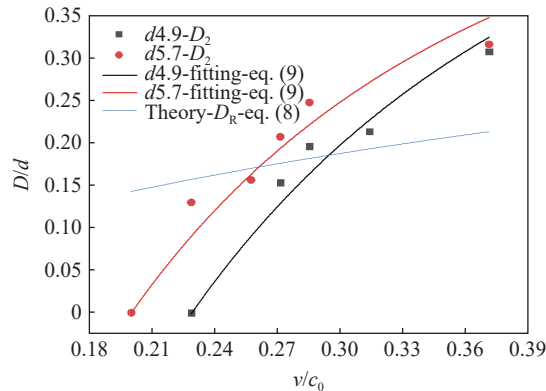


图 14 表面环状中心无损伤尺寸试验值的非线性拟合结果

Fig. 14 Nonlinear fitting results of the experimental values of the surface central undamaged region

## 4 结 论

基于一级轻气炮搭建了一种单射流冲击试验平台用于材料雨蚀试验, 其发生原理是用高压气体发射金属子弹撞击橡胶封底的储水腔体, 冲击动能驱动液体从细小的喷嘴处喷射, 形成高速水射流; 该设备可产生速度 200~600 m/s、直径 4~7 mm、头部呈光滑圆弧形的稳定水射流。雨蚀试验中试样的最佳安装位置是距离喷口 10 mm 处。

采用该试验平台对一种典型的碳纤维树脂基复合材料层合板进行了不同射流速度和直径的单射流冲击试验, 试验结果表明, 复合材料薄板单次水射流冲击的典型损伤有以下规律。

(1) 冲击表面由于水锤压力的作用而凹陷, 中心几乎完好无损伤; 接触边界处的卸载拉伸波导致中心区周围产生一环状损伤带; 环内有树脂去除、基体开裂、少量纤维断裂等损伤形式, 其中树脂去除是由高速侧向射流的剪切作用造成的。

(2) 内部损伤主要由基体开裂和层间分层组成, 且由于应力波的传播和相互作用, 从冲击表面到底面, 损伤范围逐渐扩大, 垂直表面观察层内损伤呈现“金字塔”形, 平行表面观察层间分层呈“纺锤”形。

(3) 由于复合材料试样纵向和横向力学性能的各向异性, 表面和内部的损伤尺寸也呈现典型的各向异性, 纵向尺寸大于横向尺寸。

(4) 表面环状损伤和内部损伤均随射流速度和直径的增加而向外扩展, 环状损伤面积和内部分层面积也随之增加。

(5) 表面环状中心无损伤区尺寸可由水锤压力接触边界直径乘以一个无量纲的损伤函数来预测。

感谢博士研究生党浩源, 硕士研究生赵先航、李建、江斌、赵仁喜对本文实验工作的帮助。

## 参考文献:

- [1] 石毓铎, 胡晓兰, 梁国正, 等. 飞行器天线罩的雨蚀及防护 [J]. *化工新型材料*, 2001, 29(1): 6–10. DOI: 10.3969/j.issn.1006-3536.2001.01.002.  
SHI Y T, HU X L, LIANG G Z, et al. A review of rain erosion and protection of radomes [J]. *New Chemical Materials*, 2001, 29(1): 6–10. DOI: 10.3969/j.issn.1006-3536.2001.01.002.
- [2] ENGEL O G. Waterdrop collision with solid surface [J]. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 1955, 54(5): 281–298. DOI: 10.6028/jres.054.033.
- [3] BOWDEN F P, BRUNTON J H. The deformation of solids by liquid impact at supersonic speeds [J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1961, 263(1315): 433–450. DOI: 10.1098/rspa.1961.0172.
- [4] ADLER W F. Rain impact retrospective and vision for the future [J]. *Wear*, 1999, 233–235: 25–38. DOI: 10.1016/S0043-1648(99)00191-X.
- [5] FIELD J E. ELSI conference: invited lecture: liquid impact: theory, experiment, applications [J]. *Wear*, 1999, 233/234/235: 1–12. DOI: 10.1016/S0043-1648(99)00189-1.
- [6] 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. DOI: 10.1016/j.wear.2011.02.023.
- [7] 施红辉, FIELD J E. 高速液体撞击下固体材料内的应力波传播 [J]. *中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学*, 2004, 34(5): 577–590. DOI: 10.3969/j.issn.1674-7275.2004.05.010.  
SHI H H, FIELD J E. Stress wave propagation in solid material under high velocity liquid impingement [J]. *Scientific Sinica G: Physica Mechanica & Astronomica*, 2004, 34(5): 577–590. DOI: 10.3969/j.issn.1674-7275.2004.05.010.
- [8] 毛靖儒, 施红辉, 俞茂铮, 等. 液滴撞击固体表面时的流体动力特性实验研究 [J]. *力学与实践*, 1995, 17(3): 52–54. DOI: 10.6052/1000-0992-1995-071.  
MAO J R, SHI H H, YU M Z, et al. Experimental study on hydrodynamic characteristics of droplets impinging on solid surfaces [J]. *Mechanics in Engineering*, 1995, 17(3): 52–54. DOI: 10.6052/1000-0992-1995-071.
- [9] 孙弼, 鄢宇鹏, 张荻, 等. 液滴与可变形固面撞击的二维非线性激波模型 [J]. *应用力学学报*, 1996, 13(3): 33–38.  
SUN B, YAN Y P, ZHANG D, et al. A two dimensional nonlinear shock model for the collision between a liquid drop and elastic plane [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 1996, 13(3): 33–38.
- [10] 张荻, 谢永慧, 周屈兰. 液滴与弹性固体表面撞击过程的研究 [J]. *机械工程学报*, 2003, 39(6): 75–78, 85. DOI: 10.3321/j.issn:0577-6686.2003.06.017.  
ZHANG D, XIE Y H, ZHOU Q L. Study on the impact between liquid drop and elastic solid [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2003, 39(6): 75–78, 85. DOI: 10.3321/j.issn:0577-6686.2003.06.017.
- [11] 张荻, 谢永慧. 动叶水蚀疲劳寿命分析模型的研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(10): 189–192. DOI: 10.3321/j.issn:0258-8013.2004.10.036.  
ZHANG D, XIE Y H. Numerical model for blade fatigue life of liquid corrosion in steam turbine [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(10): 189–192. DOI: 10.3321/j.issn:0258-8013.2004.10.036.
- [12] 王泽江, 陈旭明, 黄谦. 飞行器光学窗/罩材料雨滴侵蚀试验 [C] // 第六届全国实验流体力学学术会议论文集. 太原: 中国力学学会, 中国空气动力学学会, 2004: 190–194.
- [13] 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: 109–122. DOI: 10.1016/j.wear.2016.04.008.
- [14] LUISET B, SANCHETTE F, BILLARD A, et al. Mechanisms of stainless steels erosion by water droplets [J]. *Wear*, 2013, 303(1–2): 459–464. DOI: 10.1016/j.wear.2013.03.045.
- [15] BRUNTON J H. A discussion on deformation of solids by the impact of liquids, and its relation to rain damage in aircraft and missiles, to blade erosion in steam turbines, and to cavitation erosion—High speed liquid impact [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1966, 260(1110): 79–85. DOI: 10.1098/rsta.1966.0031.

- [16] BOURNE N K. On impacting liquid jets and drops onto polymethylmethacrylate targets [J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2005, 461(2056): 1129–1145. DOI: 10.1098/rspa.2004.1440.
- [17] COOK S S. Erosion by water-hammer [J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1928, 119(783): 481–488. DOI: 10.1098/rspa.1928.0107.
- [18] SPRINGER G S, YANG C I. Model for the rain erosion of fiber reinforced composites [J]. *AIAA Journal*, 1975, 13(7): 877–883. DOI: 10.2514/3.60463.
- [19] ENGEL O G. Damage produced by high-speed liquid-drop impacts [J]. *Journal of Applied Physics*, 1973, 44(2): 692–704. DOI: 10.1063/1.1662246.
- [20] 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. DOI: 10.1115/1.3605114.
- [21] SEWARD C R, PICKLES C S J, FIELD J E. Single- and multiple-impact jet apparatus and results [C] // *Proceedings Volume 1326, Window and Dome Technologies and Materials II*. San Diego: SPIE, 1990: 280–290. DOI: 10.1117/12.22507.
- [22] 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: 507–517. DOI: 10.1016/j.wear.2018.12.030.
- [23] BOWDEN F P, FIELD J E. The brittle fracture of solids by liquid impact, by solid impact, and by shock [J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 1964, 282(1390): 331–352. DOI: 10.1098/rspa.1964.0236.
- [24] BOURNE N K, OBARA T, FIELD J E. High-speed photography and stress gauge studies of jet impact upon surfaces [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 1997, 355(1724): 607–623. DOI: 10.1098/rsta.1997.0028.

(责任编辑 曾月蓉)