

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20220505001

冲蚀角对碳纤维增强树脂复合材料 (CFRP) 蒙皮涂层去除及重涂附着力的影响*

赵洋洋 卢文壮 吴泊鋆 孙玉利 左敦稳
(南京航空航天大学机电学院 南京 210016)

摘要: 为解决飞机 CFRP 蒙皮涂层高效去除问题,改善重涂涂层附着力,采用塑性磨料射流加工方法对 CFRP 蒙皮损伤涂层去除,通过分析单颗磨料的速度和冲击力,研究不同冲蚀角度下磨料对涂层的冲蚀行为,探究塑性磨料射流冲蚀角对表面形貌、去除机制、材料去除率、接触角与表面自由能及重涂涂层的附着力方面的影响。结果表明:塑性磨料对涂层的冲蚀机理为塑性变形去除,在 $30^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 冲蚀角下,磨料对涂层的冲蚀模式为滑擦、耕犁和切削。随着冲蚀角的增加,颗粒的切向分力减小,法向分力增加,法向冲蚀的冲蚀模式为剪切和挤压变形去除材料去除率递减。在所选冲蚀角范围内,当冲蚀角为 30° 时,聚氨酯涂层材料去除率最大。随着冲蚀角的改变,表面粗糙度、润湿性和表面自由能发生变化,当冲蚀角为 70° 时,重涂后的涂层附着力较好,较初始涂层附着力提高 28% 左右。研究成果可为飞机 CFRP 蒙皮涂层的高效去除及附着力的改善提供参考。

关键词: 射流加工; 冲蚀角; 塑性磨料; 碳纤维增强树脂复合材料 (CFRP); 涂层

中图分类号: TP69

Effects of Erosion Angle on CFRP Skin Coating Removal and Adhesion of Recoating

ZHAO Yangyang LU Wenzhuang WU Bojun SUN Yuli ZUO Dunwen
(College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing 210016, China)

Abstract: Carbon-fiber reinforced polymer (CFRP) composites are used as skin materials for fourth- and fifth-generation fighter jets owing to their superior properties such as high specific stiffness and strength, and light weight. To ensure the reliable performance and extend the service life of aircraft skin, protective coatings must be coated onto their surfaces. Advanced jet-fighter skin coatings are exceptionally susceptible to delamination, blistering, and spalling because of the extreme environment of supersonic flight. These not only reduce the service life of the aircraft skin but also undermine the jet's ability for covert attacks. When this happens, the damaged coating should be removed and replaced in a timely manner to ensure the security and reliability of the aircraft skin. To address the problem of the efficient and nondestructive removal of polyurethane organic coatings from aircraft CFRP skin surfaces while improving the adhesion of repainted coatings, thermosetting plastic particles with medium hardness and angular shapes were selected as abrasives to remove damaged coatings from the CFRP skin to ensure their service life. To illustrate the coating removal mechanism by plastic abrasives, an interaction model between the particles and coating material was established based on the Hertz contact theory to quantitatively analyze the normal and tangential contact forces of a single abrasive on the workpiece. The particle velocity model was established to study the abrasive erosion behavior of coatings under different erosion angles, and investigate the effects of the

* 国家自然科学基金 (U20A20293, 52075254) 和天津市紧固连接技术企业重点实验室 (TKLF2022-01-B-04) 资助项目。

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (U20A20293, 52075254) and Tianjin Key Laboratory of Fastening and Connection Technology Enterprises (TKLF2022-01-B-04).

20220505 收到初稿, 20220913 收到修改稿

plastic abrasive jet erosion angles on the erosion surface morphology, material removal mechanism, material removal rate, surface water contact angle and surface free energy, and the adhesion of repainted coatings. The results show that the erosion mechanism of plastic abrasives on the coating is plastic deformation removal. The erosion modes of abrasives on the coating are slip rubbing, plowing, and cutting at angles of 30° – 50° . At erosion angles of 50° – 70° , the erosion mode of the abrasive on the coating is a mixture of cutting and squeezing. At an angle of 90° , the erosion mode is shear and squeeze deformation removal. The cutting path of a single abrasive became shorter with the increase in the erosion angle, and the material removal rate decreased. Within the selected erosion angle range, the removal rate of the coating reached a maximum at 30° . The surface roughness and free energy increased and then decreased with the increase in erosion angle, and reached a maximum and minimum at 70° and 90° , respectively. The opposite is true for the surface water contact angle (wettability), reaching a maximum and minimum at 90° and 70° , respectively. The adhesion of the repainted coating improved at an erosion angle of 70° . The adhesion improved by approximately 28% compared with that of the initial coating of 3.21 MPa. This paper provides an alternative to chemical stripping or hand sanding for the efficient and frequent removal of aircraft CFRP skin coatings, while improving the adhesion, reducing costs, and protecting the environment.

Keywords: abrasive jet machining; erosion angle; plastic abrasives; carbon-fiber reinforced polymer (CFRP); coating

0 前言

由于空气高速摩擦、大气腐蚀、温度骤变、雨淋盐雾、沙砾、化学腐蚀和设计缺陷(例如弹射式火焰燃烧)等原因,对飞机碳纤维增强树脂基复合材料(Carbon fiber reinforced polymer, CFRP)蒙皮涂层必须定期维护,并对损伤区进行去除和重新涂覆^[1-3]。通常,国内外最常用的脱漆技术包括化学脱漆、机械抛光、高强度光脉冲激光烧蚀^[4]、低温消褪技术或热修复去除技术等。但是针对 CFRP 蒙皮损伤涂层去除常用的脱漆技术存在局限性,如化学脱漆因导致聚合物基体软化及对环境的污染被逐渐取代,仅采用激光技术无法实现树脂基复合材料表面环氧类保护涂层的有效去除^[5-6]。手工打磨是目前航空公司接受的最快和最经济的方法^[7],但手工打磨不仅去除效率低无法满足批量生产任务,而且容易对 CFRP 基材造成无法逆转的损伤^[7]。因此,亟需开发一种高效且对基材无损伤的涂层去除方法代替手工打磨。

针对以上问题,本文开展使用塑性磨料射流加工(Plastic abrasive jet machining, PAJM)方法对飞机 CFRP 蒙皮表面涂层的高效去除研究。与传统射流加工不同,本文选用中等硬度的塑性磨料,精确控制气体压力,可实现缓解传统磨料对工件高冲击应力^[8]。分析磨料在喷嘴出口处的速度和磨料对涂层的去除方式,研究了冲蚀表面的形貌对表面自由能的影响,以及冲蚀角对重新涂覆涂层附着力的影响。研究结果为塑性磨料射流对飞机 CFRP 蒙皮涂

层去除及附着力的改善提供参考。

1 材料与方法

试验材料选用 T700-12K CFRP 层合板为基材,对整板切割尺寸为 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 的试样进行附着力测试试验,对尺寸为 $80\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 试样进行材料去除率冲蚀试验,冲蚀时间为 10 s。

试验中采用双组分聚氨酯飞机 CFRP 蒙皮底漆和面漆。按照 GJB 4439—2002 标准对 CFRP 层合板表面手工打磨预处理和涂装。干膜涂层厚度为 $100 \pm 5\text{ }\mu\text{m}$ (其中底漆 $35 \pm 5\text{ }\mu\text{m}$,面漆 $55 \pm 5\text{ }\mu\text{m}$)。附着力测试在 $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ 室温、50%相对湿度环境下固氏 7 d 后进行。

冲蚀试验在 JCK 9060-A 干式喷砂机上进行。使用直径为 8 mm 的拉瓦尔喷嘴,考虑加工效率,磨料粒径选用 $600 \sim 850\text{ }\mu\text{m}$ 的中等硬度塑性磨料,气体压力为 0.4 MPa,喷嘴出口处平均磨料初始速度由 CCD 高速摄像机测速约为 197.63 m/s ,磨料质量流量为 26.02 g/s ,使用精度为 1 mm/s 的移动装置保证工件与喷嘴的相对速度为 8 mm/s ,喷嘴到样品的距离为 20 mm。分别选取 30° 、 50° 、 70° 、 90° 为冲蚀入射角进行试验,每组试验进行 3 次。试验前后,试样用精密电子分析天平(FA 2204N)进行称重。根据加工前后质量,计算每组试验样品的材料去除率。为减少试验误差,每个试样测量 3 次后取平均值。JMS-6360 型扫描电镜用来观察表面的冲蚀形貌。

2 结果与讨论

2.1 冲蚀形貌

塑性磨料冲蚀前后的涂层表面 SEM 图如图 1 所示, 图 1a 展示了未加工的涂层表面。从图 1b 中可以看出, 当冲蚀角为 30° 时, 磨料对工件的耕犁

和切削清晰可见, 在表面发现少量未分离的碎屑分布。图内双向箭头显示了单颗磨料的切削路径, 此时的切削路径较长。因为磨料滑擦、耕犁和切削导致涂层去除, 所以 30° 冲蚀角的材料去除率较高。因此, 冲蚀角度为 30° 时的材料去除为磨料对涂层的滑擦、耕犁和切削。

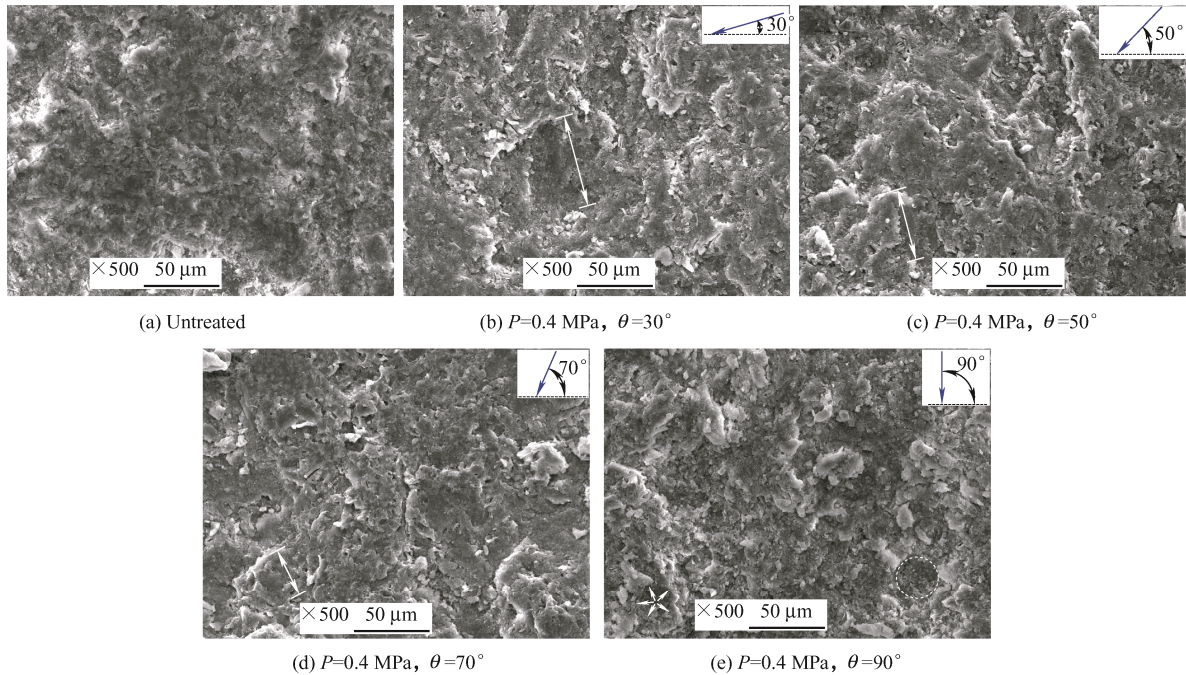


图 1 塑性磨料冲蚀前后的涂层表面 SEM 图

Fig. 1 SEM images of the coating surface before and after plastic abrasive erosion

当冲蚀角为 50° 时, 单颗磨料与工件表面的切削路径变短, 图 1c 中双向箭头显示了减短的切削路径。与 30° 冲蚀角相比, 磨料对表面的法向压应力增加, 切向应力减小。这表明在该角度下, 切向方向磨料对涂层的切削减弱, 法向的冲击挤压增强。冲蚀形貌反映了磨料切削和微挤压共同作用引起的材料表面塑性变形。因此, 冲蚀角度为 50° 时的材料去除为磨料对涂层的切削。

当冲蚀角为 70° 时, 单颗磨料与工件表面的切削路径更短, 图 1d 中双向箭头显示了更短的切削路径。与 50° 冲蚀角相比, 磨料对工件表面的法向压应力再次增加, 切向应力再减小。这表明在该角度下, 切向方向的切削更加减弱, 法向冲击挤压更加增强。冲蚀形貌反映了磨料冲击挤压与微切削共同作用引起的材料表面塑性变形。因此, 冲蚀角度为 70° 时的材料去除为磨料对涂层的挤压和微切削。

当冲蚀角为 90° 时 (如图 1e 所示), 明显的耕犁和切削路径不再明显, 在高倍扫描电镜下观察到近似圆形的冲击坑。冲蚀形貌反映了磨料法向挤压导致材

料塑性流动, 从而产生凹坑。在凹坑周围可以观察到因塑性流动留下的涂层片层。这些片层在磨料的冲击下, 逐渐断裂和脱落。因此, 冲蚀角度为 90° 时的材料去除为磨料对涂层的剪切和挤压变形去除。

表面形貌表明, 磨料射流中塑性颗粒对聚氨酯涂层的冲蚀, 不论是小角度冲蚀还是法向冲蚀, 材料以塑性变形去除为主^[9]。对于塑性大、延展性好的聚氨酯涂层, 以 $30^\circ \sim 70^\circ$ 冲蚀时的材料去除率大于法向冲蚀。冲蚀表面的表面粗糙度是影响涂层附着力最重要的因素之一, 较大的表面粗糙度意味着涂层和基材在界面处较大的接触面积和更强的机械互锁, 从而提高附着力; 另一方面, 环氧树脂具有羟基和羧基等极性官能团, 涂层中的极性官能团与环氧树脂中的极性官能团产生化学结合从而形成良好的结合力。

2.2 冲蚀角对材料去除的影响

在磨料射流加工中, 磨料的速度和对工件表面的冲击力分为法向和切向分量, 如图 2 所示。根据赫兹接触理论^[10], 单颗磨料对涂层的冲击力 F 为:

$$F = \frac{4}{3} \left(\frac{5}{4} \pi \rho_p \right)^{\frac{3}{5}} \left(\frac{d_p}{2} \right)^2 \left(\frac{1-v_p^2}{E_p} + \frac{1-v_c^2}{E_c} \right)^{\frac{2}{5}} V_p^{\frac{6}{5}} \quad (1)$$

式中, ρ_p , d_p , v_p 和 E_p 分别是磨料颗粒的密度、等效直径、泊松比和弹性模量, v_c 和 E_c 是涂层的泊松比和弹性模量, V_p 是单颗磨料的速度。当磨料以 θ 角度冲蚀时, 单颗磨料的法向和切向冲击力分别为:

$$F_n = \frac{4}{3} \left(\frac{5}{4} \pi \rho_p \right)^{\frac{3}{5}} \left(\frac{d_p}{2} \right)^2 \left(\frac{1-v_p^2}{E_p} + \frac{1-v_c^2}{E_c} \right)^{\frac{2}{5}} V_p^{\frac{6}{5}} \sin \theta \quad (2)$$

$$F_t = \frac{4}{3} \left(\frac{5}{4} \pi \rho_p \right)^{\frac{3}{5}} \left(\frac{d_p}{2} \right)^2 \left(\frac{1-v_p^2}{E_p} + \frac{1-v_c^2}{E_c} \right)^{\frac{2}{5}} V_p^{\frac{6}{5}} \cos \theta \quad (3)$$

式中, θ 是入射方向与工件表面的夹角。

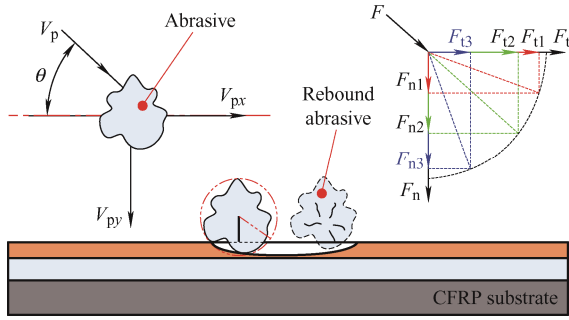


图 2 磨料与工件相互作用示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the interaction between abrasive and workpiece

不同冲蚀角度磨料冲蚀示意图如图 3 所示。在 $30^\circ \sim 50^\circ$ 冲蚀角度, 磨料对涂层的冲蚀主要由切向冲击造成的滑擦、耕犁和切削。磨料切向力较大, 前一次磨料切削产生的涂层片层被后续磨料持续冲击, 较大的塑性流动使得片层断裂和脱离。尖角磨料对涂层造成浅层的切削, 较圆滑的磨料对涂层滑擦、耕犁和切削形成涂层片层。因此, 在 $30^\circ \sim 50^\circ$ 冲蚀角度的材料去除方式是耕犁和切削。冲蚀角度增加到 $50^\circ \sim 70^\circ$ 时, 磨料对涂层材料的去除主要由法向冲击力的增加而产生的冲蚀凹坑、挤压和微切削。此时, 磨料的耕犁和切削不再明显, 微切削和片层堆积混合成为材料塑性变形的形式 (如图 1c 所示)。这些堆积的片层极易被后续的磨料冲断, 或被挤压进入工件, 剪切和挤压变形共同作用, 导致材料塑性流动而去除。此时材料的去除方式是挤压和微切削。在 90° 冲蚀角度的冲蚀中, 磨料对涂层的材料去除是法向冲击力引起的剪切和挤压变形。冲蚀坑边缘形成涂层片层, 而这些涂层片层被后续的磨料再次挤压到工件表面。这些被挤压的片层被多次撞击, 从而导致挤压变形去除。法向

冲蚀去除率较低, 需要更多次的冲击才能去除材料。

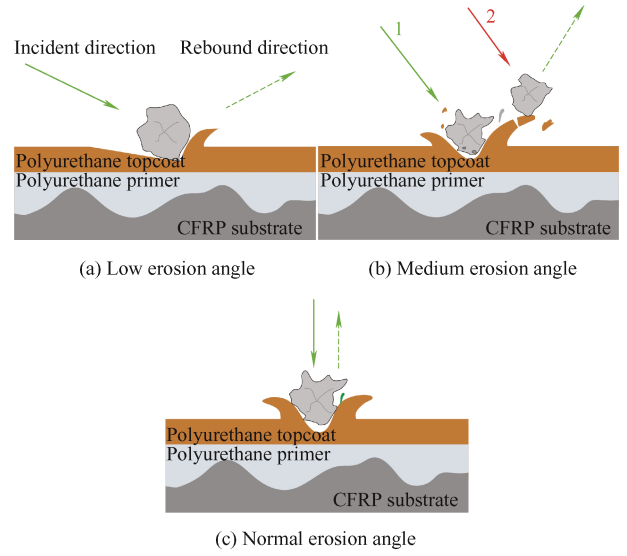


图 3 不同冲蚀角度磨料冲蚀示意图

Fig. 3 Schematic diagram of abrasive erosion at different erosion angles

从图 2 中还可以看出, 冲蚀角的增加改变了 F_n / F_t 的大小, F_n / F_t 决定了磨料的切削合力方向。 $30^\circ \sim 50^\circ$ 角度冲蚀时, 磨料切削合力方向与工件表面夹角很小 (如图 2 中颗粒入射方向与水平面的夹角 θ), 表面涂层在切向方向发生塑性流动。而在 70° 冲蚀角磨料切削合力方向与工件表面夹角较大, 表面涂层在法向方向受到剪切和挤压。因此, F_n / F_t 的改变不仅影响表面形貌, 而且还影响材料的去除方式。

在磨料射流加工中, 喷嘴中高速流动的气体由虹吸作用带动磨料运动, 由压缩空气加速, 并由喷嘴高速喷射。由式 (1) 可知, 单颗磨料对涂层的冲击力随着磨料颗粒速度的改变而改变。因此, 必须获得单颗磨料的速度来分析冲击力。图 4 为磨料喷射示意图。假设压缩气体在喷嘴中等熵流动, 并且没有热变化或摩擦行为, 即喷嘴内和喷嘴外的空气速度相同。喷嘴中的纯空气速度 V_A 为^[11]:

$$V_A = \left\{ \frac{2\kappa \cdot r_c \cdot T}{\kappa - 1} \left[1 - \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式中, κ 为空气绝热指数, r_c 为特定气体常数, T 为空气绝对温度, P 为气压, P_0 为标准大气压。根据牛顿第二运动定律, 喷嘴中磨料颗粒运动主要受到拖曳力 F_D 的影响, F_D 为^[12]:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D A_p \rho_A (V_A - V_{p0})^2 \quad (5)$$

式中, C_D 是空气阻力系数, A_p 是磨料颗粒的横截面积, ρ_A 是压缩空气密度, V_{p0} 是初始磨料速度。喷嘴出口处磨料速度 V_p 为:

$$V_p = \left(\frac{3C_D \rho_A L_N}{2d_p \rho_p} \right)^{\frac{1}{2}} V_A \quad (6)$$

式中, L_N 是喷嘴的长度, V_p 是磨料颗粒离开喷嘴出口后的速度。

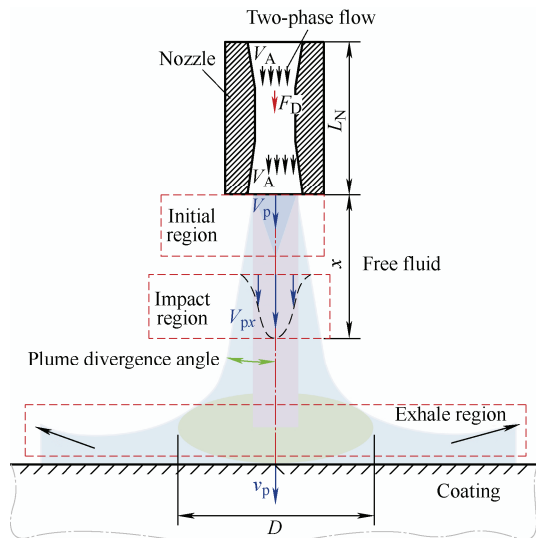


图4 磨料喷射示意图

Fig. 4 Schematic diagram of abrasive jetting

受到外界空气的影响, 射流与空气进行能量交换, 射流在喷嘴外划分为初始区域和主要区域 (如图4所示)。RAJARATNAM 等^[13]对射流的初始区域进行了研究, 确定初始区域的长度约为喷嘴直径 d_N 的 6.2 倍, 喷嘴外初始区域和主要区域距喷嘴出口轴向距离 x 处的中心线磨料速度 V_{px} 为:

$$V_{px} = \begin{cases} \left[V_p^2 + \frac{3C_D \rho_A x}{2d_p \rho_p} (V_A - V_p)^2 \right]^{1/2}, & x \leq 6.2d_N \\ \left[V_p^2 + \frac{3C_D \rho_A x}{2d_p \rho_p} \left(V_A \frac{6.2d_N}{x} - V_p \right)^2 \right]^{1/2}, & x > 6.2d_N \end{cases} \quad (7)$$

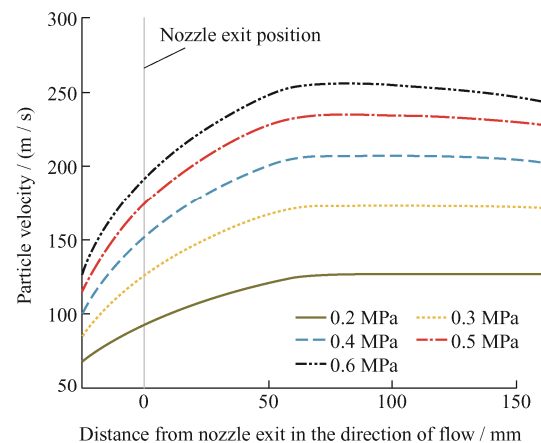
利用 MATLAB 软件求解单颗磨料速度和冲击力, 计算中所用的参数见表1。图5a为磨料速度随着喷嘴下游间隔距离的变化图。结果表明, 磨料速度随着气体压力的增加而增加。在给定的气体压力下, 喷嘴出口处的磨料速度持续增加到喷嘴下游约 50 mm 后, 速度逐渐衰减, 这是因为纯空气速度与喷嘴出口处的磨料速度不一致。在射流的主要区, 磨料速度与空气速度趋于一致; 空气速度衰减时磨料具有惯性而继续加速; 此后磨料速度逐渐衰减^[14]。图5b表明磨料的法向冲击力随着冲蚀角的增

加而增加, 而切向力随着冲蚀角的增加而减小。

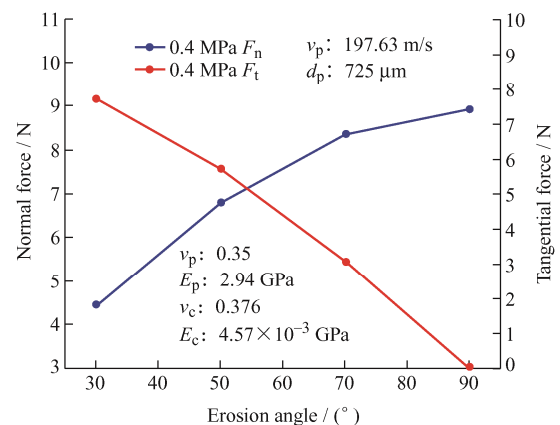
表1 数学模型中的参数

Table 1 Parameters in mathematical model

Parameter	Value
Air pressure P / MPa	0.4
Standard atmospheric pressure P_0 / Mpa	0.1
Absolute temperature T / K	293
Inner diameter of nozzle d_N / m	0.008
length of nozzle L_N / m	0.035
Erosion angle θ / (°)	0–90
Air Density ρ_A / (kg / m ³)	4.806
Air resistance coefficient C_D	0.5
Specific gas constant r_c / (J • (kg • K))	278
Abrasives Diameter / μ m	725
Abrasives density ρ_p / (kg / m ³)	1 500
Abrasives elastic modulus E_p / GPa	2.94
Poisson ratio ν_p	0.35
Coatings density ρ_c / (kg / m ³)	~1 400
Coatings elastic modulus E_c / MPa	457
Coatings poisson ratio ν_c	0.376



(a) Particle velocity V_{px} at the nozzle outlet



(b) Calculation results of impact force

图5 磨料速度与冲击力

Fig. 5 Abrasive velocity and impact force

2.3 材料去除率

图 6 所示为塑性磨料射流在 30°、50°、70°和 90°不同冲蚀角下射流冲蚀涂层材料去除率 (Material removal rate, MRR) 曲线。冲蚀时间为 10 s, 用材料去除率对时间的积分可求得涂层的质量损失。由式 (2) 和 (3) 及图 5b 可知, 随着冲蚀角的增加, 单颗磨料法向冲击力增加, 切向冲击力减小。30°冲蚀角材料去除率较高的主要原因是磨料颗粒在切向力作用下的切削去除, 50°冲蚀角随着切削路径的减小 (如图 1b 所示) 导致材料去除率降低, 法向剪切和挤压变形导致材料去除率较低。由于最大材料去除发生在 30°冲蚀角, 塑性磨料冲蚀聚氨酯涂层表现出塑性冲蚀行为。

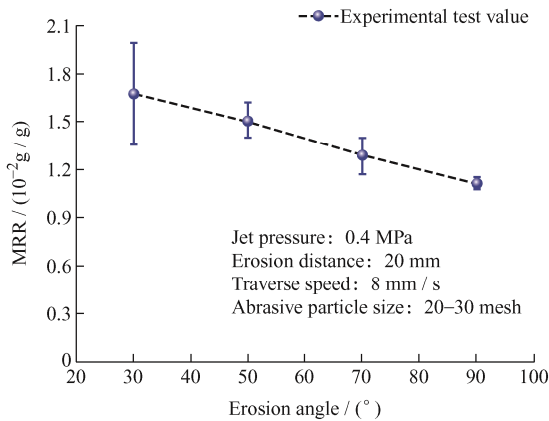


图 6 不同冲蚀角度的材料去除率

Fig. 6 Material removal rate at different erosion angles

改变磨料硬度和粒径会影响材料去除率。较大硬度的磨料自身变形小, 与工件接触过程中传递更多的能量, 使工件发生弹性变形、塑性变形, 从而导致去除率更大^[15]; 在相同气体压力下, 较大粒径的塑性磨料具有较大的动能, 磨料单次冲击对材料的切削更多, 材料去除率相应增大。

表 2 列出了不同冲蚀角度的塑性磨料射流加工与维修作业中手工打磨的效率对比。从表中可以看出, 塑性磨料射流加工方法的涂层去除效率是手工打磨的 3 倍之多。

表 2 塑性磨料射流加工与手工打磨效率对比

Table 2 Efficiency comparison of PAJM and HS

Technique	Effective removal rate / (10 ⁻³ m ² / min)
PAJM	2.8–20.4
Hand sanding (HS)	0.16–6.50

2.4 冲蚀表面润湿角与表面自由能

冲蚀后样品底漆表面粗糙度直接影响液固润湿

性。当真实接触角小于 90°时, 工件表面粗糙度越大, 表面自由能越大, 润湿性越好^[16]。工件表面和固体基质之间的润湿性可以用接触角表示, 反映了工件冲蚀形貌属性 (如表面粗糙度) 对表面自由能的影响。液滴接触角采用 JC2000DM 接触角测量仪 (北京中仪科信科技有限公司生产) 测量, 试验采用蒸馏水 (4 μL 液滴) 作为测量液滴, 然后由软件计算表面能。润湿性和表面自由能的测量结果如图 7 所示。从图中可以看出, 接触角越小反映冲蚀表面的润湿性越好, 从而表面自由能较大。随着冲蚀角度的增加, 接触角逐渐减小, 表明冲蚀角可以有效改变表面形貌。但法向冲蚀时, 获得了较高的接触角。综上所述, 在试验选取的冲蚀角中, 法向冲蚀的表面自由能最差, 冲蚀角为 70°时最好。

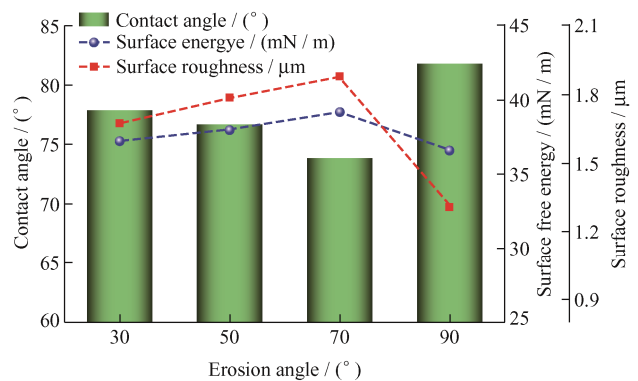


图 7 冲蚀角对粗糙度、接触角与表面自由能的影响

Fig. 7 Effect of erosion angle on roughness, contact angle and surface free energy

2.5 重涂涂层附着力

相同的聚氨酯底漆和面漆涂料对冲蚀加工的试样表面再次喷涂。采用拉拔测试方法 (GB/T 5210—2006) 测试涂层与基材界面处的附着力 (或结合强度), 用数显 PosiTest AT-A 拉拔附着力测试仪 (DeFelsko Corporation, Ogdensburg, USA)。每组试验进行 3 次测试, 测量值取平均值。附着力测试拉断形式包括涂层断裂 (层内)、粘连断裂 (层间) 和胶水失效 (涂层/胶水)。在所有测试组中, 涂层的拉断形式为底漆涂层断裂 (层内)。附着力测试结果表明, 涂层与 CFRP 基材界面处的附着力在至少 3.41 MPa 以上, 底漆和基材黏牢固, 没有出现层间断裂。

图 8 展示了不同冲蚀角冲蚀后表面重涂涂层的附着力测试结果。冲蚀前试样表面涂层附着力为 3.21 MPa。测试结果表明, 冲蚀角为 30°、50°、70°的冲蚀表面重涂涂层的附着力均大于初始表面的附着力, 而法向冲蚀表面的重涂涂层的附着力不及初始表面的附着力。在所研究的参数范围内, 70°冲蚀

角冲蚀后的表面重涂涂层附着力最好, 相比初始表面的附着力提高 6% 左右。

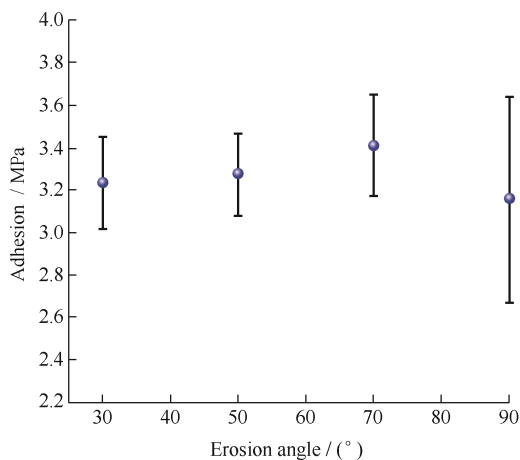


图 8 重涂覆涂层附着力测试结果

Fig. 8 Adhesion test results of recoated coatings

3 结论

提出塑性磨料射流加工方法去除飞机 CFRP 蒙皮损伤涂层, 研究不同冲蚀角度下的涂层去除方式, 以及冲蚀角对重涂涂层附着力的影响, 得到如下结论:

(1) 采用塑性磨料对聚氨酯涂层的冲蚀机制是磨料的滑擦、微切削和塑性变形去除, 低冲蚀角可有效提高材料去除率。

(2) 塑性磨料射流冲蚀前后试样表面的附着力由 2.8 MPa 提升到 3.6 MPa, 提升 28% 左右, 是一种改善 CFRP 蒙皮表面聚氨酯涂层附着力的有效方法。

(3) 塑性磨料射流加工方法替代手工打磨实现批量化处理, 并且效率高, 是飞机 CFRP 蒙皮涂层大规模维护和维修的理想方法。

参 考 文 献

- [1] BOUSSER E, MARTINU L, KLEMBERG-SAPIEH J E. Solid particle erosion mechanisms of protective coatings for aerospace applications[J]. Surface and Coatings Technology, 2014, 257: 165-181.
- [2] MONETTE D L. 10-Coating removal techniques in the aerospace industry[M]. Cambridge: Corrosion Control in the Aerospace Industry, 2009.
- [3] 周志祥, 肖旭贤, 孙超远, 等. 改性聚苯胺在防腐涂层中的研究进展[J]. 中国表面工程, 2022, 35(1): 86-96. ZHOU Zhixiang, XIAO Xuxian, SUN Chaoyuan, et al. Research progress of modified polyaniline in anticorrosive coatings[J]. China Surface Engineering, 2022, 35(1): 86-96. (in Chinese)
- [4] 巴德玛, 熊玉成, 李长青, 等. 碳纤维复合材料损伤高频脉冲激光去除技术[J]. 中国表面工程, 2019, 32(6): 122-131. BA Dema, XIONG Yucheng, LI Changqing, et al. High frequency pulse laser removal technology for damaged part of carbon fiber reinforced plastics[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(6): 122-131. (in Chinese)
- [5] 贾宝申, 唐洪平, 苏春洲, 等. 脉冲激光去除树脂基复合材料表面涂层[J]. 中国激光, 2019, 46(12): 133-140. JIA Baoshen, TANG Hongping, SU Chunzhou, et al. Removal of surface coating of resin matrix composites by pulsed laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12): 133-140. (in Chinese)
- [6] LI Xiaoying, WANG Haoyu, YU Wenjun. Laser paint stripping strategy in engineering application: A systematic review[J]. Optik, 2021, 241: 167036.
- [7] PAULI R, OWENS C. Use of plastic media blast (PMB) on composite surfaces[J]. SAE International, 1991, 100: 51-70.
- [8] ZHU Yansong, LU Wenzhuang, ZUO Dunwen, et al. Development of abrasive jet polishing by using amino thermosetting plastic abrasive for aluminum alloy[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 43: 218-228.
- [9] 耿明睿, 陈皎, 杨竹芳, 等. TC4 钛合金表面冲蚀损伤机理的砂尘粒径依赖效应[J]. 中国表面工程, 2018, 31(3): 17-26. GENG Mingrui, CHEN Jiao, YANG Zhufang, et al. Dependent effects of particle size on erosion wear mechanism of TC4 titanium alloy[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(3): 17-26. (in Chinese)
- [10] HERTZ H. Über die berührung fester elastischer körper (on the contact of elastic solids)[J]. Journal für die reine und angewandte Mathematik, 1882, 92: 156-171.
- [11] WANG Zhao, LI Haonan, YU Tianbiao, et al. On the predictive modelling of machined surface topography in abrasive air jet polishing of quartz glass[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 152: 1-8.
- [12] ZHANG Guiguan, SUN Yuli, GAO Hang, et al. A theoretical and experimental investigation of particle embedding and erosion behaviour of PDMS in micro-abrasive air-jet machining[J]. Wear, 2021, 486-487: 204118.
- [13] RAJARATNAM N, ALBERS C. Water distribution in very high velocity water jets in Air[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 124(6): 647-650.
- [14] CHEN Changjiang, LIU Yong, TANG Jiren, et al. Effect of nozzle pressure ratios on the flow and distribution of

abrasive particles in abrasive air jet machining[J]. Powder Technology, 2022, 397: 117114.

- [15] ARABNEJAD H, SHIRAZI S A, MCLAURY B S. The effect of erodent particle hardness on the erosion of stainless steel[J]. Wear, 2015, 332-333: 1098-1103.

- [16] 邹慧, 孙铭阳, 王璐璐, 等. 基于刮磨温度的封严涂层刮磨形貌和黏附形态分析[J]. 中国表面工程, 2022, 35(1): 155-161.

ZOU Hui, SUN Mingyang, WANG Lulu, et al. Scraping morphology and adhesion morphology analysis of

Sealing Coating Based on Scraping Temperature[J]. China Surface Engineering, 2022, 35(1): 155-161. (in Chinese)

作者简介: 赵洋洋, 男, 1991 年出生, 博士研究生。主要研究方向为先进加工技术。

E-mail: yy_zhao@nuaa.edu.cn

卢文壮 (通信作者), 男, 1972 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为智能制造及制造自动化、超硬材料及工具、现代表面技术。

E-mail: meewzlu@nuaa.edu.cn