

引用格式: 牟凌佳, 徐天宇, 李梦娇, 等. 高性能树脂基复合材料耐砂蚀性能研究进展[J]. 航空材料学报, 2026, 46(10): 31-44.
MI Lingjia, XU Tianyu, LI Mengjiao, et al. Research progress on sand erosion resistance of high-performance composites[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2026, 46(10): 31-44.

高性能树脂基复合材料耐砂蚀性能研究进展

牟凌佳¹, 徐天宇², 李梦娇¹, 彭 勃³, 张代军³, 范金娟³,
刘 刚^{1,4*}, 姚佳楠¹, 陈春海^{1*}

(1. 东华大学 材料科学与工程学院 先进纤维材料全国重点实验室 先进低维材料中心, 上海 201620; 2. 中国直升机设计研究所, 江西 景德镇 333001; 3. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095; 4. 北京化工大学 先进技术与装备研究院, 北京 100029)

摘要: 高性能树脂基复合材料在直升机领域的应用面临严峻的砂蚀问题, 直接影响结构完整性与服役寿命, 已成为制约其工程推广的关键瓶颈之一。本文系统梳理了树脂基复合材料砂蚀损伤领域的研究进展, 首先阐述冲蚀的基本概念及相关理论, 明确砂蚀损伤的物理本质与主要失效模式; 接着, 从材料组成与结构、界面结合强度等内部因素, 砂粒特性与冲蚀条件等外部因素, 以及温度、湿度等环境因素三个方面, 综述影响耐砂蚀性能的关键参数及其作用机制, 并对比分析不同试验方法与工况条件下的研究结果差异。在此基础上, 总结现有砂蚀试验标准与装置的发展概况, 评估各类研究手段的适用性与局限性。最后, 基于当前研究不足, 提出应围绕多因素耦合作用机制、损伤演化规律与寿命预测模型构建以及新型耐砂蚀材料设计等方向开展深入研究, 为高性能树脂基复合材料在直升机结构中的可靠应用提供理论支撑和技术参考。

关键词: 热固性复合材料; 热塑性复合材料; 直升机; 砂蚀; 冲蚀

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2025.000107

CSTR: 32420.14.j.issn.1005-5053.2025.000107

中图分类号: V258; TB332

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2026)10-0031-14

Research progress on sand erosion resistance of high-performance composites

MI Lingjia¹, XU Tianyu², LI Mengjiao¹, PENG Bo³, ZHANG Daijun³, FAN Jinjuan³,
LIU Gang^{1,4*}, YAO Jianan¹, CHEN Chunhai^{1*}

(1. Center for Advanced Low-dimension Materials, State Key Laboratory of Advanced Fiber Materials, College of Materials Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. China Helicopter Research and Development Institute, Jingdezhen 333001, Jiangxi, China; 3. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 4. Institute of Advanced Technology and Equipment, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: The application of high-performance resin matrix composites in helicopter structures is critically challenged by solid particle erosion (sand erosion), which undermines structural integrity and limits service longevity. This paper systematically reviews recent advances in sand erosion damage of resin matrix composites. The fundamental concepts and theories of erosion are first introduced, clarifying the physical nature and primary failure modes. Key factors governing erosion resistance are then synthesized from three aspects: intrinsic parameters (material formulation, microstructure, and interfacial adhesion), extrinsic parameters (particle kinematics and impingement conditions), and environmental parameters (temperature and humidity). Experimental discrepancies arising from different testing protocols are critically compared. Current erosion testing standards and apparatus are also assessed for their applicability and limitations. Finally, in view of existing research gaps, future efforts are recommended to focus on multi-factor coupling mechanisms, damage evolution kinetics and life prediction modeling, and the design of novel erosion-resistant materials. This review aims to provide a theoretical foundation and technical reference for the reliable application of high-

performance resin matrix composites in helicopter structural components.

Key words: thermosetting composite materials; thermoplastic composite materials; helicopter; sand erosion; erosion

直升机是一种多用途的航空飞行器,在军事、民用和特殊任务中扮演着不可或缺的角色。凭借其独特的飞行性能和卓越的机动性,直升机能够高效地执行空中突击、武装侦察、物资运输以及救灾救生等多样化任务^[1-3]。作为现代军事和民用领域的重要交通工具,直升机结构材料的选择直接关系到飞行性能和安全性。

树脂基复合材料因其优异的性能,逐渐成为传统金属材料非常有吸引力的替代品^[4-6]。树脂基复合材料具有高比强度、比模量等优点,这意味着在相同强度和刚度要求下,复合材料结构可以因质量更轻而显著提高直升机的燃油效率和航程^[7]。以 NH90 直升机为例,其机身骨架、主要承力件以及包覆结构全部采用树脂基复合材料,其复合材料用量约占结构总质量的 95%^[8]。通常情况,复合材料常用的树脂基体主要分为热固性和热塑性两大类。其中,聚芳醚酮(polyaryletherketone, PAEK)及聚醚醚酮(polyetheretherketone, PEEK)基、聚苯硫醚(polyphenylene sulfide, PPS)基等高性能热塑性复合材料较热固性复合材料具有更高的韧性和抗冲击性、更低的吸湿率、更好的可二次成型和可回收等特性^[9],近年来在直升机领域的应用越来越多。特别是在直升机旋翼系统与机体结构方面,高性能热塑性复合材料旋翼桨叶展现出突出优势。其不仅具备优异的耐疲劳性能,还拥有刚度可灵活剪裁的特性,为实现更先进的翼型设计与气动布局优化创造了有利条件,可有效提升直升机的飞行效率与操控稳定性^[6-7]。热塑性复合材料桨叶成功克服传统金属桨叶重、易腐蚀、疲劳寿命短的问题。通过精准的铺层设计,其可实现直升机材料力学性能的优化——将质量降低 30%~40% 的同时提升抗疲劳性能与气动效率,即使在约 220 m/s 高速带来的复杂载荷下,构件仍可稳定承受载荷,降低飞行振动与噪声水平。此外,如 Bell407 直升机采用高性能热塑性复合材料尾梁实现了结构成本降低。空客直升机公司在 H-160 型直升机上采用碳纤维增强 PEEK 复合材料替代传统的钛合金设计制备桨毂中央件,在降低制造成本和减轻结构质量的同时显著提高了结构的损伤容限,降低了结构疲劳裂纹的扩展速率^[10]。其他直升机,如 CH-53K 重型直升机等,也采用了热

塑性复合材料^[11]。由此可见,高性能热塑性复合材料近几年在直升机结构材料的应用中越来越具有优势。

直升机在低空低速飞行、悬停或是起降时,其机体及结构件等极易受到扬尘的侵蚀作用,这种侵蚀作用对旋翼桨叶的损耗尤为显著^[4]。特别在沙漠、戈壁、高原和干旱地区等高浓度沙尘环境中,直升机结构部件会频繁遭受砂粒冲击。砂粒与直升机表面的碰撞可能引发涂层剥落、表面损伤以及结构部件疲劳裂纹的扩展等问题,导致直升机结构受损,引发安全隐患,严重威胁直升机的正常运行和任务执行^[12-15]。因此,耐沙尘等固体颗粒冲刷侵蚀防护逐渐成为直升机设计中研究的重点问题之一,深入优化直升机结构部件中使用材料的耐砂蚀性能,对于提高直升机的可靠性和安全性具有至关重要的意义^[16-20]。基于这一重要性和紧迫性,本文系统梳理了高性能树脂基复合材料耐砂蚀性能的应用研究进展,探讨其损伤机理、影响因素以及潜在的改进策略,旨在为未来相关研究和实际应用提供有益参考。

1 砂蚀损伤机理研究进展

1.1 砂蚀基本概念

砂蚀(sand erosion)是指固体颗粒(如砂粒、灰尘、磨料等)在气流或水流的携带下,以一定的速率和角度撞击材料表面,导致材料表面发生磨损、破坏或物质损失的动态过程^[21]。砂蚀是一种典型的冲蚀磨损现象,广泛存在于自然环境和工业工程领域中,对材料的性能和使用寿命产生显著影响。砂蚀的关键在于固体颗粒与材料表面的相互作用。这种相互作用通常涉及以下几个要素:一是固体颗粒,通常是砂粒、灰尘、磨料等,其特性(如硬度、形状、粒径等)对侵蚀效果有重要影响;二是载体介质,通常是气流或水流,它为固体颗粒提供了运动动力,决定了颗粒的冲击速率和方向;三是材料,被冲击材料表面的力学性能(如硬度、韧性、弹性模量等)和微观结构决定了其抗砂蚀能力;四是冲击过程,固体颗粒以不同的速率和角度撞击材料表面,导致材料表面的磨损或破坏^[22-27],冲击过程中侵蚀速率 E 和冲击速率 v 之间的关系可以简单地

描述如下(其中 n 是一个需要通过试验确定的参数)^[28-31]:

$$E \propto v^n \quad (1)$$

式中, n 是与试验关联的系数。

基于上述砂蚀基本概念以及影响因素,在直升机设计应用阶段需要充分考虑固体颗粒和材料表面的相互作用,优化部件的结构和材料,以提高其抗冲击性能。

1.2 冲蚀理论的发展

冲蚀理论的研究起源可以追溯到 20 世纪中叶,随着材料科学和工程应用的不断发展,冲蚀理论逐步完善^[32-34]。经过几十年的研究,塑性材料的冲蚀理论、脆性材料的冲蚀理论、二次冲蚀理论以及绝热剪切与变形局部化磨损理论等相继提出并发展起来^[35]。这些理论从不同角度解释了固体颗粒冲蚀的机制,为理解和预测材料在冲蚀环境中的性能提供了理论基础^[36](图 1)。

1.2.1 微切削理论

1958 年 Finnie^[34] 提出微切削理论,这一理论认为在低冲击角(通常小于 30°)时,颗粒以切削的

方式作用于材料表面。颗粒的边缘或尖端切入材料表面,造成材料表面被切削,形成沟槽或凹坑。微切削理论为低冲击角下的冲蚀机制提供了重要的理论支持,适用范围主要是低冲击角和硬度较高的颗粒。

1.2.2 塑性材料的冲蚀理论

塑性材料的冲蚀理论^[37-38]主要研究颗粒冲击后材料的变形和磨损过程。颗粒冲击材料表面时,材料会发生塑性变形,颗粒的能量转化为材料的变形能。在低冲击角度下,颗粒主要通过切削作用造成材料磨损,而在高冲击角度(接近 90°)下,颗粒主要通过挤压变形作用造成材料磨损。这一理论强调了颗粒冲击角度对冲蚀机制的影响,解释了不同冲击角度下材料磨损的差异。

1.2.3 脆性材料的冲蚀理论

脆性材料的冲蚀理论^[39]主要关注脆性材料在颗粒冲击下的破坏机制。一般脆性材料在颗粒冲击下容易发生裂纹扩展和断裂,这一理论重点分析颗粒冲击能量与材料断裂强度之间的关系。Tilly^[40]提出的二次冲蚀理论是脆性材料冲蚀理论的重要补充,二次冲蚀理论认为颗粒在冲击脆性材料表面

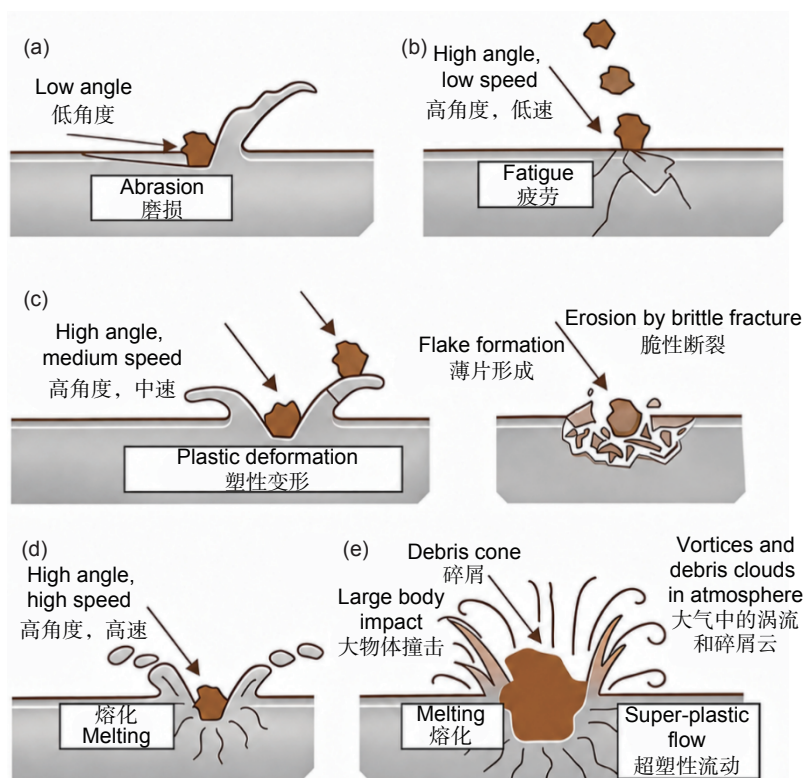


图 1 固体颗粒的冲蚀机制 (a)低冲击角下的磨损;(b)高冲击角、低速冲击时的表面疲劳;(c)高冲击角、中速冲击时的塑性变形或脆性断裂;(d)高冲击速率下的表面熔化;(e)继发效应导致宏观侵蚀

Fig. 1 Erosion mechanisms of solid particle (a) wear at low impact angle; (b) surface fatigue during high impact angle, low speed impact; (c) plastic deformation or brittle fracture during high impact angle, medium speed impact; (d) surface melting at high impact speed; (e) macroscopic erosion under secondary effects

后,在造成冲击点损伤的同时,还可能在冲击点周围引发二次裂纹扩展,加剧材料的破坏。

1.2.4 绝热剪切与变形局部化磨损理论

1979年 Hutchings^[41] 提出绝热剪切与变形局部化磨损理论,主要研究材料在高能量冲击下的变形和磨损。认为在高能量冲击下材料表面会发生绝热剪切,局部区域的温度会急剧升高,导致材料塑性变形和磨损。

近年来,冲蚀模型研究也得到充分发展。Oka等^[42]建立了一种冲蚀速率经验模型,该模型综合考虑颗粒的形状和粒径、颗粒的冲击角度和冲击速率以及材料表面硬度等多种因素的相互耦合作用。Zhang等^[43]以固体颗粒形状以及冲击角度作为变量研究获得 E/CRC 模型,可用于模拟气固或液固两相流造成的冲蚀磨损。研究者们通过试验和模拟手段对复合材料的冲蚀过程有了更深的认识。Wang等^[31]发现,在高速砂尘冲击下,碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced polymer/composite, CFRP)存在着多种损伤模式,包括磨粒磨损、疲劳磨损和其他形式的损伤,首先是树脂层磨损、剥离,接着出现纤维断裂、分层和界面脱粘等复杂破坏,是多种冲蚀机制混合作用的结果。损伤机理研究一直在不断发展,目前主要集中在砂粒硬度、入射角度、速率等对材料表面冲击的影响规律以及微观结构变化等方面。研究方法主要以试验模拟和数值模拟相结合,为材料设计及防护提供了理论支持,但对复杂工况下的损伤机制仍需进一步探讨。

2 试验技术研究进展

2.1 砂蚀试验标准

2.1.1 国外砂蚀试验评价标准

MIL-STD-810G-2008 是美国军方制定的一项广泛使用的环境试验标准,涵盖多种环境条件下的测试方法和要求。其中,关于固体颗粒冲蚀的部分主要用于评价试验对象在干燥的吹砂、吹尘或降尘条件下的适应能力^[44]。MIL-STD-3033-2010 是专门针对美军飞机发动机叶片常用材料的耐砂蚀性能测试而制定的标准^[45]。它适用于多种材料,包括合成橡胶、强化塑胶和复合材料、金属、陶瓷及涂层等,可以准确评估不同材料在固体颗粒冲蚀环境下的耐久性,为直升机旋翼桨叶等关键部件的材料选择和防护设计提供依据。ASTM G76-18 是美国材料与试验协会制定的一项标准试验方法,适用于样块、样件或者带涂层样块的固体颗粒冲击试验^[46]。

2.1.2 国内砂蚀试验评价标准

GJB 150.12A—2009 是中国军用装备实验室环境试验方法中关于砂尘试验的标准^[47]。该标准适用于评价可能暴露于干燥的吹砂、吹尘或降尘条件下的机械装置的耐久性和可靠性。标准详细规定了试验条件(如风速、颗粒浓度、颗粒粒径分布等)、试验设备要求(如风洞、颗粒供给系统等)以及试验过程中的监测和记录方法。该标准的制定和实施,为我国军用装备的环境适应性评估提供了重要的技术支持和保障。表1列出了国内外标准的试验参数对比。

表1 固体颗粒冲蚀试验标准参数对比^[44-47]
Table 1 Comparison of standard parameters of solid particle erosion test^[44-47]

Standard number	Solid particle	Erosion parameters (diameter, velocity, flow rate)
MIL-STD-810G-2018	Blow dust: porcelain clay, silicon powder, quartz sand Blow sand: quartz sand Fall dust: quartz sand, silicon powder	Blow dust: <149 μm , 1.5-8.9 m/s, (10.6 $\pm$ 0.7) g/m ³ Blow sand: 150-850 μm , 18-29 m/s, (2.2 $\pm$ 0.5) g/m ³ Fall dust: <105 μm , <0.2 m/s, (1.1 $\pm$ 0.3) g/m ³
MIL-STD-3033-2010	Quartz sand	240-550 μm , (222 $\pm$ 10) m/s, 30-50 g/m ³
ASTM G76-18	Al ₂ O ₃	50 μm , (30 $\pm$ 2) m/s, (2.0 $\pm$ 0.5) g/m ³
GJB 150.12A—2009	Blow dust: porcelain clay, quartz sand, silicon powder Blow sand: silicon powder Fall dust: quartz sand, silicon powder	Blow dust: <149 μm , 1.5-8.9 m/s, (10.6 $\pm$ 0.7) g/m ³ Blow sand: 150-850 μm , 18-29 m/s, (2.2 $\pm$ 0.5) g/m ³ Fall dust: <105 μm , <0.2 m/s, (1.1 $\pm$ 0.3) g/m ³

2.2 砂蚀试验材料

2.2.1 圆形砂

圆形砂的颗粒形状较为规则,呈球形或近球形。在砂蚀过程中,圆形砂粒主要通过滚动和挤压的方式与材料表面相互作用,这种作用机制导致材

料表面发生塑性变形或磨损。圆形砂常用于研究材料在低冲击角度下的塑性变形机制。

2.2.2 尖锐砂

尖锐砂的颗粒形状不规则,具有锋利的边缘和尖锐的角。尖锐砂粒在砂蚀过程中主要通过切削

形式与材料表面相互作用。切削作用会使砂粒更有效地切入材料表面,导致严重的磨损和切削损伤。尖锐砂常用于研究材料在高冲击角度下的切削机制。常用的耐砂蚀试验用砂见表 2^[21, 48]。

表 2 耐砂蚀试验用砂^[21, 48]
Table 2 Sand used in erosion resistance tests^[21, 48]

Sand type	Description of purpose
Angular Al ₂ O ₃ particles, 50 μm	Suitable for studying erosion performance of materials under high-hardness particle impact, particularly for testing cutting resistance and surface hardness
“Foundry” sand, size distribution 177-250 μm	Suitable for erosion wear testing under simulated foundry sand conditions
“Golf course” sand, size distribution 177-250 μm	Suitable for erosion wear testing under simulated golf course sand conditions
Afghanistan theater sand simulant, size distribution 45-250 μm (<100 μm accounts for about 75%)	Suitable for erosion wear testing under simulated Afghan battlefield sand/dust environments
Ottawa quartz sand, 20-30 mesh	Suitable for standard erosion testing, offering good particle size uniformity and test repeatability

2.3 砂蚀试验装置

在材料砂蚀性能研究中,装置的选择对试验结果的准确性和可靠性至关重要。目前,常用的砂蚀试验装置可按颗粒加速方式分为三类:重力落砂型、离心加速型和气动加速型(鼓风式)。不同的试验装置能够模拟不同的砂蚀环境和条件,从而满足对材料各方面耐砂蚀性能的评价^[49-50](图 2)。

2.3.1 落砂试验装置

落砂试验装置是一种简单而有效的砂蚀试验设备,该装置的核心机制是借助重力作用使特定的磨料从设定的高度自由落下,对试样的表面进行冲刷^[23]。该装置的优势在于成本低廉、易于搭建,适用于对材料耐砂蚀性能进行快速初步筛选。然而,其局限性也十分明显:颗粒冲击速率受下落高度限制,难以达到较高速率,且砂粒落点分散,冲击角度和流量控制精度较差,与真实航空服役环境(高速、

高浓度颗粒冲击)差距较大。

2.3.2 离心机加速试验装置

离心机加速试验装置利用离心力的作用来加速颗粒物,通过高速旋转的圆盘将固体颗粒物加速并喷射到样品表面^[23, 51]。该装置可在较小空间内实现较高的颗粒速率,适用于需要中等冲击速率的冲蚀试验。其优点是设备结构相对紧凑,可同时处理多个试样,测试效率较高。但不足之处在于:颗粒速率和冲击角度受离心盘转速及叶片几何形状影响,调控灵活性有限;且颗粒在加速过程中可能发生二次破碎或团聚,影响试验结果的稳定性和可重复性。

2.3.3 鼓风式试验装置

目前该装置在固体颗粒砂蚀装置中较为常用,其基本原理是利用加压空气加速粒子并通过喷嘴将粒子喷射到样品表面^[23, 52]。该装置的最大优势在于冲击速率可调范围宽(通过调节气压,速率可

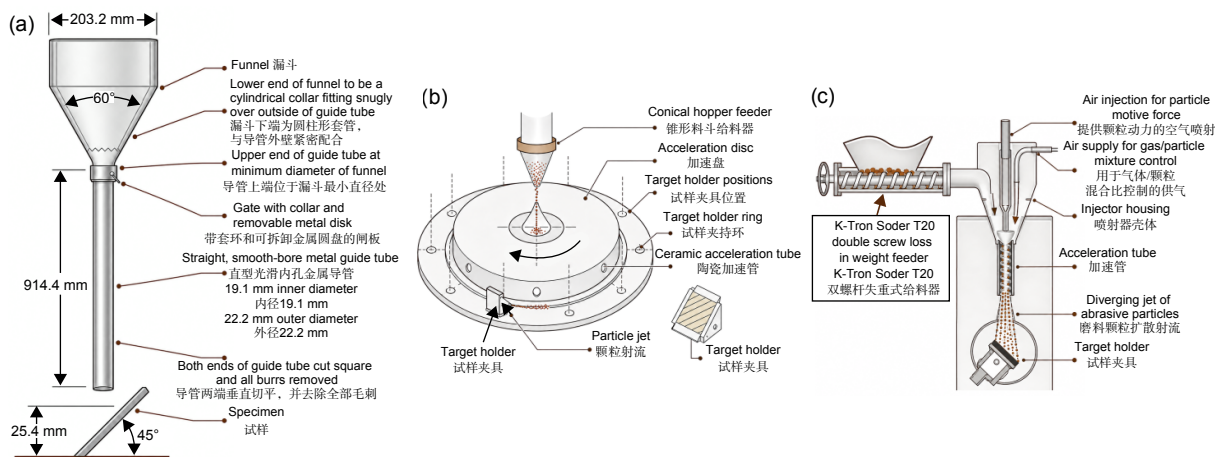


图 2 三种主要的固体颗粒冲蚀设备 (a)落砂试验装置^[49]; (b)离心机加速试验装置^[50]; (c)鼓风式试验装置^[50]

Fig. 2 Three main types of solid particle erosion testers (a) falling sand abrasion tester^[49]; (b) centrifugal-accelerator^[50]; (c) gas-blast tester^[50]

实现从数米每秒到数百米每秒的变化),冲击角度易于控制(通过调整试样夹具角度),且颗粒浓度和流量可控性较强,能够较好地模拟直升机旋翼桨叶、发动机叶片等部件在高速砂尘环境中的实际服役工况。其局限性主要体现在:设备成本较高,对气源和管路密封性要求严格;长时间试验中喷嘴易磨损,需定期校准以确保试验条件的稳定性。

上述三种装置代表了砂蚀试验从简单重力加速到高压气动加速的不同技术层次,其选用需综合考虑研究目标与试验条件。具体而言,评判标准可从三个维度展开:一是工况模拟真实性——装置能否在冲击速率、冲蚀角度、颗粒浓度及环境温度等关键参数上逼近目标服役环境;二是参数控制精度——装置对速率、角度、流量等变量的调节范围与稳定性;三是试验成本与效率——涵盖设备购置与维护费用、单次试验耗时、试样通量等。落砂装置在前述三个维度上整体偏弱,离心装置居中,鼓风式装置在模拟真实性和控制精度上优势显著。

为了更真实地模拟实际工况,近年来研究人员对冲蚀测试方法持续改进与创新。Wang等^[31]开发了一种利用旋转臂试验装置的高速砂尘冲蚀测试技术,该技术能够有效模拟航空发动机叶片在高速飞行时遭受砂粒冲蚀的工况。杨晓光等^[53]借助自行研制的喷射式冲蚀试验设备,将蒸馏水与石英砂按质量分数4%进行混合制成冲蚀浆料,对聚醚醚酮/泡沫镍双连续相复合材料在不同冲击角度下的耐浆料冲蚀特性进行研究。这些研究成果为材料的耐砂蚀设计与性能评估提供了有力依据。对于复杂工况的研究需求,可以结合多种试验装置进行对比试验,以获得更全面的试验结果^[54]。

3 多因素协同作用下的砂蚀特性研究

3.1 内部因素

3.1.1 材料的组成与结构

复合材料的基体材料种类和性能对其耐砂蚀性能有重要影响。由于冲蚀粒子的冲击首先冲刷树脂基体,因此树脂材料的耐冲蚀特性是影响聚合物基复合材料冲蚀阻抗的主要因素^[54]。热塑性复合材料的显著优势在于其优异的韧性、损伤容限以及良好的抗冲击能力,这些特性使其能够有效弥补热固性树脂基复合材料在层间韧性不足以及易发生冲击分层方面的不足^[55]。研究者们指出,与传统连续碳纤维增强热固性复合材料相比,连续碳纤维增强高性能热塑性复合材料在抗冲击性能和耐腐

蚀性能方面表现出显著的优越性^[56]。如PEEK等热塑性树脂因具有较高的强度和韧性,能够在一定程度上抵抗砂粒的冲击^[57]。沈真等^[54]综述了树脂基体对冲蚀性能的影响,指出在所对比的树脂体系中,热塑性树脂的耐冲蚀性能普遍优于热固性树脂。具体而言,复合材料中所用树脂按冲蚀阻抗从高到低依次为:聚酰胺(polyamide, PA)>聚醚醚酮(polyetheretherketone, PEEK)>聚苯硫醚(polyphenylene sulfide, PPS)>环氧树脂(epoxy resin)>双马来酰亚胺(bismaleimide, BMI)>聚酰亚胺(polyimide, PI);其中,热塑性树脂(如PA、PEEK、PPS)表现出半韧性冲蚀特征,而热固性树脂(如Epoxy、BMI、PI)则呈现脆性冲蚀行为,这被认为是导致二者冲蚀阻抗差异的主要原因。此外,增强相的类型、含量和分布对材料的耐砂蚀性能影响显著^[58]。如碳纤维增强复合材料在砂蚀试验中的损伤过程包括树脂冲蚀、纤维断裂和纤维-基体界面分层三个阶段,由于碳纤维能够有效分散应力,使得材料的整体强度和抗冲击性能得到提高^[59]。Padhan等^[60]对通过混合技术制造的PEEK双向增强复合材料展开研究,通过掺入Zylon纤维(聚对苯撑苯并二噁唑纤维,PBO)使复合材料的缺口悬臂梁冲击强度急剧提高(6900%),研究认为由于添加PBO使复合材料发生了结构变化,从而获得更好的能量吸收能力和抗冲击强度。

3.1.2 界面结合强度

复合材料中的基体和增强相之间的界面结合强度是影响耐砂蚀性能的关键因素之一^[39,61]。界面结合强度高,砂粒冲击时增强相能够更好地与基体协同抵抗外力,减少基体磨损。Srivastava等^[62]在玻璃纤维增强聚合物基体复合材料(glass fiber reinforced polymer matrix composite, GFRP)中添加粉煤灰填料,结果表明粉煤灰填料限制了纤维-基体的脱粘,可以抵抗裂纹扩展的形成。唐鸣津等^[63]通过在碳纤维表面涂覆聚醚酰亚胺(polyetherimide, PEI)和聚酰胺-胺(poly(amidoamine), PAMAM)等改性剂,制备的PEI-CF/PEEK及PAMAM-CF/PEEK两种PEEK基复合材料,可以显著提升纤维与基体之间的界面结合强度,改善复合材料的耐磨性能。

3.1.3 材料的微观结构

树脂基复合材料的微观结构,如纤维的取向、基体的结晶度等也会影响其耐砂蚀性能。Bagci^[64]对单向/多向碳纤维/玻璃纤维增强环氧树脂复合材料固体颗粒侵蚀的影响展开研究(图3),认为在纤维取向上,45°纤维取向的复合材料的抗砂蚀性能优

于 0° 纤维取向的复合材料, 这是由于当磨粒颗粒冲击磨损掉表层的基体后会直接冲击在纤维上, 0° 纤维取向材料在这种冲击力作用下, 纤维会形成较大的弯曲力矩。相比之下, 45° 纤维取向的材料, 冲击力被分解为法线和切线分量两部分, 从而降低了直接作用于纤维的正向力, 使得弯曲力矩较小。因此, 45° 纤维取向的材料具有更高的抗冲蚀性能。

雷雁洲等^[65]认为, 碳纤维/聚乳酸复合材料的结晶性能会因碳纤维含量的增加而发生改变。当碳纤维质量分数为 3% 时, 复合材料的结晶温度和结晶度分别达到 112.5°C 和 30.7%, 此时复合材料展现出最优的力学性能, 拉伸强度和冲击强度分别为 103.7 MPa 和 8.90 kJ/m^2 。结晶度的变化对复合材料的硬度和韧性产生影响, 进而影响其耐砂蚀性能。

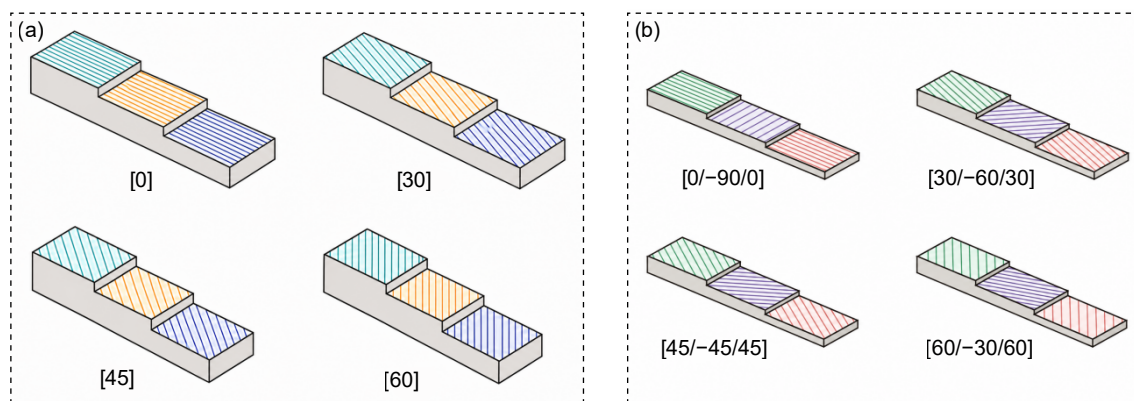


图 3 试样的纤维取向^[64] (a) 单向; (b) 多向

Fig. 3 Fiber orientations of specimen^[64] (a) unidirectional; (b) multidirectional

3.1.4 材料涂层技术

国内外研究人员采取了多种方式对直升机桨叶进行耐砂蚀防护, 如在桨叶前缘胶接不锈钢、钛合金、镍合金等金属包片, 或喷涂聚氨酯、聚碳酸酯等非金属防护涂层, 以及直接在桨叶表面施加防护涂层^[21]。Drensky 等^[59]认为抗冲蚀涂层效果显著, 通过对美国宇航局格伦研究中心和劳斯莱斯公司开发的抗冲蚀涂层 SANPRES 和 SANRES 进行研究, 并在 AE3007 发动机旁通叶片上进行了测试, 取得较好效果。目前, 国内已采用前缘包铁(材料通常为不锈钢或钛合金)及聚氨酯保护胶带等作为直升机旋翼桨叶的防护材料, 前缘包铁主要是金属基材和防腐涂层, 靠物理抵御与防腐蚀保护桨叶, 聚氨酯保护胶带主要是利用多层复合膜柔性缓冲耐磨防护。相关研究显示, 二者分别提升抗冲击

寿命、抗砂蚀性能, 适配桨叶工况^[21]。Wei 等^[66]使用等离子增强磁控溅射技术(plasma-enhanced magnetron sputtering, PEMS)在 Ti-6Al-4V 基体表面沉积氮化物(ZrN、CrN 和 TiN)和碳氮化物(ZrSiCN 和 TiSiCN)涂层, 认为 TiSiCN 具有最佳的耐冲蚀性, 比基体提高近 25 倍, 比其他氮化物高 5~10 倍。Özen 等^[67]对混合复合护盾直升机旋翼叶片抗固体颗粒侵蚀性能进行研究, 模拟和探讨了直升机旋翼叶片应重点关注的侵蚀防护区域, 如图 4 所示。

3.2 外部因素

3.2.1 砂粒的特性

砂粒的粒径越大, 其冲击能量越大, 对树脂基复合材料的冲蚀越严重^[58]。Panakarajupally 等^[68]在固定冲蚀速率条件下, 研究三种不同粒径颗粒的

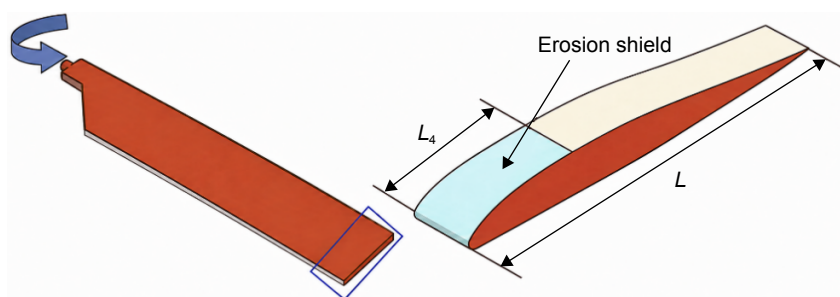


图 4 为直升机旋翼叶片设计的抗冲蚀防护盾的几何形状^[67]

Fig. 4 Geometric shape of the anti-corrosion shield designed for helicopter rotor blades^[67]

侵蚀情况,得出侵蚀速率随粒径的增加而增加的结论(图5)。同时,砂粒硬度(H_p)与被冲蚀材料的表面硬度(H_t)相对值(H_p/H_t)也会显著影响冲蚀损伤模式。当冲蚀粒子硬度大于或接近被冲蚀材料表面硬度,即 $H_p/H_t \geq 1$ 时,材料的破坏机制主要为粒子对表面的切削、犁沟,以及导致薄片脱落形式的损伤,这会加速材料的流失^[69]。此外,砂粒的形状也会影响材料的性能,不规则形状的砂粒在冲击过程中更容易产生应力集中。有研究表明,圆形砂在较大入射角侵蚀最大,尖锐性砂在较小入射角度侵蚀最大^[21]。

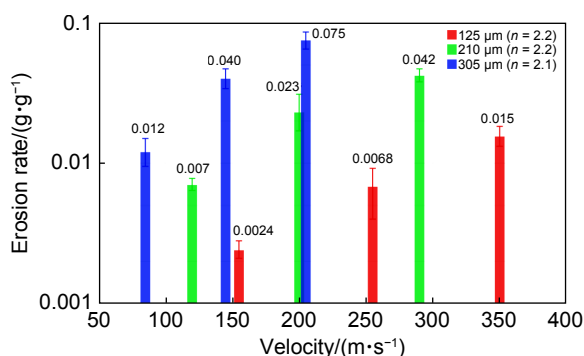


图5 室温和正冲击条件下不同粒径颗粒的侵蚀率随速度的变化^[68](根据文献^[68]数据绘制)

Fig. 5 Erosion rate as a function of particle velocity for different particle sizes under room temperature and normal impact conditions^[68] (plotted using data reported in Ref.^[68])

3.2.2 冲蚀条件

冲蚀条件一般包括冲蚀角度、冲蚀速率以及冲蚀时间等。在低角度冲蚀下,材料主要的破坏形式为微切削和犁削,而在高角度冲蚀下,材料的主要破坏形式为疲劳破坏^[70]。Amaro^[71]认为撞击角度对侵蚀区域的质量损失和深度有显著影响。当撞击角度为90°时,质量损失和侵蚀深度达到最大值,这是因为在90°撞击时,粒子与目标之间的能量传递最为充分,从而产生了更多的微裂纹。此时,粒子的动能损失也最大,侵蚀效果最为显著。Arena^[72]对聚氨酯涂层固体颗粒冲蚀效果展开研究,结果显示不同角度冲蚀下聚氨酯耐砂蚀表面形态不同。低角度冲击下,聚氨酯表面出现皱褶和材料堆积,表面粗糙度增加,高角度冲击下,聚氨酯薄膜表面出现小裂纹,导致小片聚氨酯脱落。王尚等^[73]围绕碳纤维单层编织复合材料结构展开了研究,结果表明当冲蚀角度为30°时,单层编织结构的保留情况最佳;在冲蚀角度为60°和90°时,核心冲蚀区域的单层编织结构遭到破坏,并由此引发突出块状部分的出现,反映出在大角度冲蚀时,以冲击破碎为

主的损伤机制对材料结构的破坏更为严重。

冲蚀速率影响方面,有研究表明,砂粒的冲击速率与冲蚀磨损率之间存在幂函数关系,随着砂粒冲击速率的增加,材料的冲蚀磨损率提高^[74]。当冲蚀速率较高或侵蚀时间较长时,材料表面可能出现穿孔,这些穿孔会在孔洞周围引发应力集中,导致脆性断裂^[31]。Panakarajupally等^[68]研究了陶瓷基复合材料在各种速率、粒径和撞击角下的固体颗粒侵蚀行为,认为冲蚀速率和颗粒尺寸的增大加剧了质量损失率。Wang等^[31]采用四种不同的冲蚀速率(100、125、150 m/s和200 m/s)对碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)进行砂蚀试验,研究发现随着冲蚀速率增加,材料的拉伸强度和弹性模量均显著降低。在最高冲蚀速率(200 m/s)条件下,拉伸强度下降约64.7%,弹性模量降低约46.2%。值得注意的是,该试验所采用的200 m/s冲击速率在直升机桨叶实际工作速率范围内,进一步印证了研究结果在工程实践中的价值。研究证实,高速粒子的动能更大,会引发更高的质量侵蚀率。从图6和图7可以明显看出在较低的冲蚀速率下,主要是基体材料的局部去除和少量纤维束的断裂丢失,而随着冲蚀速率的提高,大量的基体材料从复合材料表面脱落,纤维阵列暴露于砂粒作用下,进而造成大量纤维束损伤,导致更严重的侵蚀^[32, 58, 75-76]。

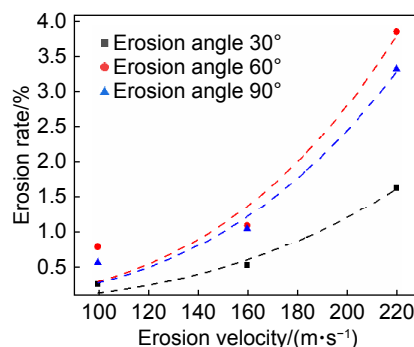


图6 冲蚀率随冲蚀速率的变化曲线^[58](已获得授权)
Fig. 6 Variation curve of erosion rate with erosion velocity^[58] (reproduced with permission)

研究表明,冲蚀时间越长,材料表面受到的冲蚀累积效应越明显,表现为更大的质量损失和更严重的表面形貌损伤。王志杰等^[76]研究了冲蚀时间对材料表面损伤演化的影响,发现随着冲蚀时间延长,材料表面磨损和剥落逐渐加剧,表面凹坑尺寸不断增大,在约14 h后损伤尺寸趋于稳定。Yang等^[77]对涡轮轴发动机压气机叶片冲蚀特性展开研究,研究表明随着冲蚀时间的增加,叶片的冲蚀区

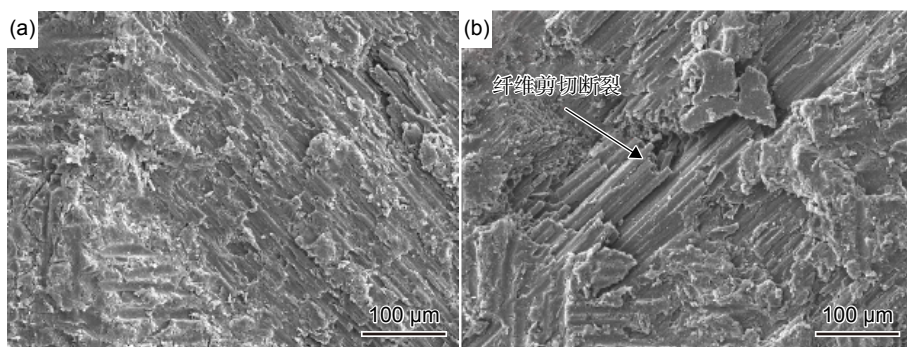


图 7 不同冲蚀速率复合材料微观损伤形貌对比^[58] (a) $V=100$ m/s; (b) $V=220$ m/s

Fig. 7 Comparison of microscopic damage morphologies of composites with different erosion rates^[58]
(a) $V=100$ m/s; (b) $V=220$ m/s

域和冲蚀率呈现非线性增长。

在冲蚀损伤位置方面, Yao 等^[78]对小型无人直升机旋翼叶片的固体粒子冲蚀展开研究, 结果表明, 小型无人直升机旋翼叶片尖端和前缘冲蚀严重, 后缘几乎不受冲蚀。随着转速增加, 单位时间颗粒撞击数 (droplets per minute, DPM) 冲蚀率降低, 但严重冲蚀区域增加。粒子质量流量增加, 叶片的 DPM 冲蚀率显著增加。

3.3 环境因素

3.3.1 温度

在高温环境下, 材料的力学性能会降低, 导致其耐砂蚀能力减弱。研究表明, 随着温度的不断升高, 复合材料的冲击损伤行为会发生变化, 特别是在接近玻璃化转变温度时, 变化表现得更为明显^[79]。Dubary 等^[80]针对高性能热塑性复合材料高温冲击行为进行研究, 并分析二维机织碳纤维/玻璃纤维/聚醚醚酮复合材料在 20 °C 和 150 °C 两种温度条件下的冲击损伤容限变化情况, 认为在冲击能量较低的情况下, 温度对复合材料的内部和外部损伤有较大影响。具体表现为: 随着温度的升高, 材料表面的凹痕深度增大, 而分层面积则减小, 如图 8 所示。Sorrentino 等^[79]对 20、60 °C 和 100 °C 下复合材料的冲击力学响应和损伤模式进行测试, 结果表明在几种增强纤维中, 碳纤维/聚萘二甲酸乙二醇酯复合材料的抗冲击能力相对较弱。然而, 这种材料的最大抗冲击力却会随着温度的升高而增大。这一现象的主要原因在于热塑性树脂基体以及纤维与基体界面强度在温度变化下的耦合作用效应。

3.3.2 湿度

高湿度环境会加速热塑性复合材料的降解和老化, 降低其耐砂蚀性能。如碳纤维增强聚碳酸酯 (carbon fiber reinforced polycarbonate, CF/PC) 复合材料在热水老化作用下, 聚碳酸酯化学基团的端基

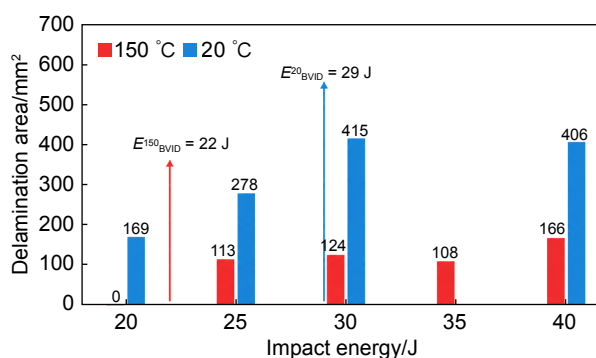


图 8 不同温度和不同冲击能量条件下碳纤维/玻璃纤维/聚醚醚酮复合材料分层面积^[80] (根据文献^[80]数据绘制)

Fig. 8 Delamination area of CF/GF/PEEK composites at different temperature and impact energy levels^[80] (plotted using data reported in Ref.[80])

容易降解, 导致基体塑化, 宏观上表现为 CF/PC 复合材料的耐砂蚀性能下降^[81]。

结合试验数据和理论研究, 研究人员提出了多种预测模型以评估复合材料在不同冲蚀环境下的性能演变。如 Wang 等^[31]结合砂粒碰撞理论与试验结果, 建立了预测不同冲击速率和试验时间下的 CFRP 剩余拉伸强度的解析模型。文献^[66, 81-83]均指出, 目前大多数冲蚀试验仍局限于实验室级别, 在真实服役工况 (如高速、高温、高应力及复杂结构等耦合条件) 下的研究尚不充分。因此, 迫切需要开展高性能树脂基复合材料直升机特定结构的耐砂蚀探索性研究。

4 结论与展望

当前, 关于直升机用高性能树脂基复合材料的冲蚀损伤及防护的研究已经取得了一定的成果, 但仍然面临着诸多挑战。直升机所处的复杂多变的飞行环境, 特别是沙尘环境, 对复合材料的抗侵蚀

性能提出了更高要求。目前,树脂基复合材料已成为直升机旋翼桨叶、机体结构等关键部位的重要选材方向,但面向复杂服役环境的高效防护技术和低成本制造工艺仍有待进一步突破。

在未来的研究中,应当重点关注以下几个方面:

(1)对砂蚀损伤机理的进一步研究:在实际应用中,材料通常会暴露在多种因素相互作用的复杂侵蚀环境中,需要更全面系统地掌握高性能树脂基复合材料在不同条件下的耐砂蚀性能,并进一步剖析这些复杂因素耦合作用下的侵蚀机制,为后续研究开发提供科学依据。

(2)高性能树脂基复合材料及其防护体系的开发:一方面,提升复合材料基体本身的抗砂蚀性能;另一方面,开发与之匹配的防护涂层或包片材料。同时,需兼顾材料加工工艺的可操作性、经济性以及与现有直升机结构的匹配性,为直升机的可靠服役提供材料基础。

(3)评价技术的标准化:当前国内针对直升机耐砂蚀试验的系统性研究仍相对匮乏。MIL-STD-810G-2008、ASTM G76-18等现有试验标准主要针对设备在地面停放或实验室条件下的吹砂/吹尘环境,而直升机在飞行状态下(高速气流裹挟砂粒冲击桨叶前缘)的耐砂蚀能力测评,尚无专用标准可以准确适用^[21]。因此,亟须建立一套专门面向直升机飞行工况的耐砂蚀评价标准体系,以实现不同研究结果之间的有效比较。此外,可借助在役监测技术,实时跟踪复合材料在实际使用过程中的冲蚀损伤演化情况,为材料的维护保养和寿命预测提供可靠依据。

(4)环境适应性研究:深入探究高性能树脂基复合材料在极端环境条件下的内部性能演变,如高温、高压、高湿度以及高盐度等多种极端环境因素的影响,评估复合材料在这些复杂条件下的耐久性,提高直升机实际应用中的可靠性和稳定性。

参考文献:

- [1] 杨婧. 世界军用直升机装备及产业发展现状与趋势分析[J]. *直升机技术*, 2019(1): 63-67, 72.
Yang J. Analysis on development status and trend of military helicopter industry[J]. *Helicopter Technique*, 2019(1): 63-67, 72.
- [2] 直升机:不可替代的“空中多面手”[N]. *中国航空报*, 2025-10-17.
Helicopters: the irreplaceable “air multi-role player”[N]. *China Aviation News*, 2025-10-17.
- [3] 李晨. 技术创新、人工智能与大国军事竞争[J]. *国家安*
- 全研究, 2025(1): 46-64.
- Li C. Technological innovation, artificial intelligence, and major-country military competition[J]. *China Security Studies*, 2025(1): 46-64.
- [4] 于飞. 砂尘高速冲蚀条件下碳纤维复合材料损伤机理研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2022.
Yu F. Research on damage mechanism of carbon fiber composites under high speed erosion of sand[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2022.
- [5] Pawar M J, Patnaik A, Nagar R, et al. Experimental and numerical investigation on erosive wear performance of hybrid polymer composites[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 44: 4775-4783.
- [6] Tarodiya R, Levy A. Erosion of polymers and polymer composites surfaces by particles[J]. *Advanced Powder Technology*, 2021, 32(8): 3149-3159.
- [7] 湛广昌, 姚佳楠, 张金栋, 等. 高性能热塑性复合材料在直升机结构上的应用与展望[J]. *航空材料学报*, 2019, 39(5): 24-33.
Chen G C, Yao J N, Zhang J D, et al. Application and prospect of high-performance thermoplastic composites in helicopter structure[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2019, 39(5): 24-33.
- [8] Liu H B, Liu J, Ding Y Z, et al. The behaviour of thermoplastic and thermoset carbon fibre composites subjected to low-velocity and high-velocity impact[J]. *Journal of Materials Science*, 2020, 55(33): 15741-15768.
- [9] 王德龙. 复合材料在直升机上的应用[J]. *中国高新区*, 2017(10): 38-41.
Wang D L. Application of PMI foam on composite blade of helicopter[J]. *Science & Technology Industry Parks*, 2017(10): 38-41.
- [10] 湛广昌, 吴明忠, 陈普会. 高性能复合材料在直升机结构上的应用展望[J]. *航空制造技术*, 2019, 62(12): 83-90.
Chen G C, Wu M Z, Chen P H. Application predication of higher-performance composites in rotorcraft structures[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2019, 62(12): 83-90.
- [11] 武珈羽, 杨金水, 陈丁丁, 等. 航空复合材料螺旋桨叶片制造工艺研究进展[J]. *航空材料学报*, 2024, 44(2): 104-116.
Wu J Y, Yang J S, Chen D D, et al. Research progress in manufacturing technology of aviation composite propeller blade[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2024, 44(2): 104-116.
- [12] Pool K V, Dharan C K H, Finnie I. Erosive wear of composite materials[J]. *Wear*, 1986, 107(1): 1-12.
- [13] Kulkarni S M, Kishore. Influence of matrix modification

- on the solid particle erosion of glass/epoxy composites[J]. *Polymers and Polymer Composites*, 2001, 9(1): 25-30.
- [14] Aglan H A, Chenock T A. Erosion damage features of polyimide thermoset composites[J]. *SAMPE Quarterly*, 1993, 24(2): 41-47.
- [15] Albery W. Rotary wing(RW) mishaps in DVE-latest statistics: STO-EN-HFM-265-01[R]. Brussels: NATO Science and Technology Organization, 2017.
- [16] Tewari U S, Harsha A P, Häger A M, et al. Solid particle erosion of unidirectional carbon fibre reinforced polyetheretherketone composites[J]. *Wear*, 2002, 252(11/12): 992-1000.
- [17] Patnaik A, Satapathy A, Chand N, et al. Solid particle erosion wear characteristics of fiber and particulate filled polymer composites: a review[J]. *Wear*, 2010, 268(1/2): 249-263.
- [18] Arani N H, Rabba W, Papini M. Solid particle erosion of epoxy matrix composites reinforced by Al_2O_3 spheres[J]. *Tribology International*, 2019, 136: 432-445.
- [19] 叶雨玫. 可重复使用航天器结构演化的动态贝叶斯网络建模与状态评估[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- Ye Y M. Dynamic Bayesian network modeling and state evaluation of structural evolution of reusable spacecraft[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [20] 程健男, 徐福泉, 张体磊. 树脂基复合材料在直升机的应用及其制造技术[J]. *航空科学技术*, 2021, 32(1): 109-114.
- Cheng J N, Xu F Q, Zhang T L. Application and manufacturing technology of composites in helicopter[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2021, 32(1): 109-114.
- [21] 龚倩, 范金娟, 黄遥, 等. 直升机旋翼桨叶防护材料耐砂蚀评价技术研究进展[J]. *高科技纤维与应用*, 2020, 45(6): 33-38.
- Gong Q, Fan J J, Huang Y, et al. Research progress of sand erosion resistance evaluation technology for protective materials of helicopter rotor blades[J]. *Hi-Tech Fiber and Application*, 2020, 45(6): 33-38.
- [22] 张帅军. 形态-材料耦合仿生抗冲蚀功能表面的制备与性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- Zhang S J. Preparation and properties research of morphology-material coupled bionic anti-erosion functional surface[D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [23] 孙炜, 范金娟. 聚氨酯涂层固体颗粒冲蚀研究进展[J]. *装备环境工程*, 2020, 17(12): 67-75.
- Sun W, Fan J J. Research progress on the solid particle erosion of polyurethane coatings[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2020, 17(12): 67-75.
- [24] 李青, 陈艳. 金属陶瓷涂层耐蚀性能及影响因素的研究[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2000, 20(3): 167-176.
- Li Q, Chen Y. Study on corrosion resistance and affecting factors of metal ceramic coating[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2000, 20(3): 167-176.
- [25] 曹学文, 李星标, 樊茵, 等. 固体颗粒冲蚀理论与试验研究进展[J]. *油气储运*, 2019, 38(3): 251-257.
- Cao X W, Li X B, Fan Y, et al. Progress of theory and test studies on the erosion of solid particles[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2019, 38(3): 251-257.
- [26] Bousser E, Martinu L, Klemberg-Sapieha J E. Solid particle erosion mechanisms of protective coatings for aerospace applications[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2014, 257: 165-181.
- [27] Slikkerveer P J, van Dongen M H A, Touwslager F J. Erosion of elastomeric protective coatings[J]. *Wear*, 1999, 236(1/2): 189-198.
- [28] Sharma A, Choudhary M, Agarwal P, et al. Review on erosion wear characteristic of natural fiber reinforced polymer composite[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 44: 4795-4800.
- [29] Ahmedizat R S, Al-Zubaidi B A, Al-Tabbakh A A, et al. Comparative study of erosion wear of glass fiber/epoxy composite reinforced with Al_2O_3 nano and micro particles[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 20: 420-427.
- [30] Bhargav M, Babu V S. Experimental investigation of fiber orientation effect on mechanical and erosive wear performance of TiO_2 filled woven jute fiber based epoxy composites[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 44: 2617-2622.
- [31] Wang S R, Li J K, Cao J C, et al. Damage mechanism and residual tensile strength of CFRP laminates subjected to high-velocity sand erosion[J]. *Composites Part B*, 2025, 300: 112459.
- [32] Kaundal R. Role of process variables on the solid particle erosion of polymer composites: a critical review[J]. *Silicon*, 2014, 6(1): 5-20.
- [33] Finnie I. The mechanism of erosion of ductile metals [C]// *ASME, 3rd US Nat Congress of Applied Mechanics*, 1958: 527-532.
- [34] Finnie I. Erosion of surfaces by solid particles[J]. *Wear*, 1960, 3(2): 87-103.
- [35] 范青, 练章华, 邓玮, 等. 三高气井管柱损伤研究现状[J]. *重庆科技学院学报(自然科学版)*, 2010, 12(2): 63-67.
- Fan Q, Lian Z H, Deng W, et al. Three high gas wells column injury status research and development[J]. *Journal of Chongqing University of Science and Technology*

- (Natural Sciences Edition), 2010, 12(2): 63-67.
- [36] Stachowiak G W, Batchelor A W. Engineering tribology[M]. Amsterdam: Elsevier, 1993.
- [37] 何光宇, 李应红, 王健, 等. 基于等离子体的抗冲蚀涂层技术及其在直升机发动机领域的应用[J]. 高电压技术, 2014, 40(7): 2133-2139.
- He G Y, Li Y H, Wang J, et al. Anti-erosion coating technique based on plasma and its application in helicopter aero-engines[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(7): 2133-2139.
- [38] 罗鑫. 电液比例方向阀阀芯冲蚀磨损研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- Luo X. Research on erosion wear of the spool in electro-hydraulic proportional directional valve[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [39] 任文豪, 阿斯哈, 周长东, 等. 风沙侵蚀下 GFRP 布剩余力学性能数值模拟分析[J/OL]. 工程力学, 2025. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2024.11.0836.
- Ren W H, Ash, Zhou C H, et al. Numerical simulation analysis of the residual mechanical properties of GFRP fabric under wind and sand erosion[J/OL]. Engineering Mechanics, 2025. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2024.11.0836.
- [40] Tilly G P. A two stage mechanism of ductile erosion[J]. Wear, 1973, 23(1): 87-96.
- [41] Hutchings I M. Mechanisms of the erosion of metals by solid particles[C]//Adler W F, ed. Erosion: Prevention and Useful Applications. ASTM STP 664. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1979: 59-76.
- [42] Oka Y I, Okamura K, Yoshida T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact[J]. Wear, 2005, 259(1/2/3/4/5/6): 95-101.
- [43] Zhang Y, Reuterfors E P, McLaury B S, et al. Comparison of computed and measured particle velocities and erosion in water and air flows[J]. Wear, 2007, 263(1/2/3/4/5/6): 330-338.
- [44] MIL-STD-810G-2008 Environmental engineering considerations and laboratory tests[S].
- [45] MIL-STD-3033-2010 Particle/sand erosion testing of rotor blade protective materials[S].
- [46] ASTM G76-18 Standard test method for conducting erosion tests by solid particle impingement using gas jets[S].
- [47] GJB 150. 12A—2009 军用装备实验室环境试验方法第12部分: 砂尘试验[S].
- [48] Sigamani N S. Characterization of polyurethane at multiple scales for erosion mechanisms under sand particle impact[D]. College Station: Texas A&M University, 2010.
- [49] ASTM D968-93(2001) Standard test methods for abrasion resistance of organic coatings by falling abrasive[S].
- [50] Deng T, Bingley M S, Bradley M S A, et al. A comparison of the gas-blast and centrifugal-accelerator erosion testers: the influence of particle dynamics[J]. Wear, 2008, 265(7/8): 945-955.
- [51] 骆晨, 李海扬, 崔永静, 等. 试验室砂尘颗粒冲蚀-腐蚀交替试验技术研究进展[J]. 科技导报, 2022, 40(5): 78-87.
- Luo C, Li H Y, Cui Y J, et al. Research progress on sand particle erosion-a corrosion alternative laboratory test method[J]. Science & Technology Review, 2022, 40(5): 78-87.
- [52] 吴璟, 付宇彤, 李迈润, 等. CFRP-橡胶叠层复合材料吸能设计与低速冲击性能优化[J]. 复合材料学报, 2026, 43(2): 749-758.
- Wu J, Fu Y T, Li M R, et al. Energy-absorbing design and low-velocity impact performance optimization of CFRP-rubber laminated composites[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2026, 43(2): 749-758.
- [53] 杨晓光, 姜胜利, 张雪, 等. 攻角对聚醚醚酮/泡沫镍双连续复合材料料浆冲蚀行为的影响[J]. 摩擦学学报, 2019, 39(6): 766-776.
- Yang X G, Jiang S L, Zhang X, et al. The influence of impact angle on erosion behavior of PEEK/Ni foam co-continuous composite[J]. Tribology, 2019, 39(6): 766-776.
- [54] 沈真, 杨胜春, 克莱瑞珂. 复合材料砂蚀研究综述[J]. 航空材料学报, 1999, 19(2): 54-62.
- Shen Z, Yang S C, Ke L. Review on sand erosion of composites[J]. Journal of Aeronautical Materials, 1999, 19(2): 54-62.
- [55] 谢为. 热塑性复合材料增材制造工艺与装备研究进展[J]. 航空材料学报, 2023, 43(3): 1-11.
- Xie W. Research progress of additive manufacturing process and equipment for thermoplastic composites[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2023, 43(3): 1-11.
- [56] 肇研, 孙铭辰, 张思益, 等. 连续碳纤维增强高性能热塑性复合材料的研究进展[J]. 复合材料学报, 2022, 39(9): 4274-4285.
- Zhao Y, Sun M C, Zhang S Y, et al. Advance in continuous carbon fiber reinforced high performance thermoplastic composites[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2022, 39(9): 4274-4285.
- [57] 樊洁, 王俊涛, 冯冰, 等. 连续纤维增强复合材料增材制造在航空复合材料及构件研制中的应用与展望[J]. 航空制造技术, 2025, 68(7): 64-82.
- Fan J, Wang J T, Feng B, et al. Application and prospects of additive manufacturing technology of continuous-fiber reinforced composites in development of aviation composites and components[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(7): 64-82.

- [58] 刘璐璐, 于飞, 赵振华, 等. CCF300/QY9511 层合板高速砂粒连续冲蚀特性试验[J]. 航空动力学报, 2024, 39(5): 169-180.
- Liu L L, Yu F, Zhao Z H, et al. Experiment on high-speed sand continuous erosion characteristics of CCF300/QY9511 composite laminates[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(5): 169-180.
- [59] Drensky G, Hamed A, Tabakoff W, et al. Experimental investigation of polymer matrix reinforced composite erosion characteristics[J]. Wear, 2011, 270(3/4): 146-151.
- [60] Padhan M, Marathe U, Bijwe J. Exceptional performance of bi-directionally reinforced composite of PEEK manufactured by commingling technique using poly(p-phenylene-benzobisoxazole) (PBO) fibers[J]. Composites Science and Technology, 2022, 218: 109125.
- [61] Barkoula N M, Karger-Kocsis J. Effects of fibre content and relative fibre-orientation on the solid particle erosion of GF/PP composites[J]. Wear, 2002, 252(1/2): 80-87.
- [62] Srivastava V K, Pawar A G. Solid particle erosion of glass fibre reinforced flyash filled epoxy resin composites[J]. Composites Science and Technology, 2006, 66(15): 3021-3028.
- [63] 唐鸣津, 王艺璇, 杨晓莹, 等. 增强体表面改性对碳纤维/聚醚醚酮复合材料摩擦磨损性能的影响[J]. 高分子学报, 2025, 56(4): 653-667.
- Tang M J, Wang Y X, Yang X X, et al. Effect of interface modification on mechanical properties and friction and wear properties of carbon fiber/polyetheretherketone composites[J]. Acta Polymerica Sinica, 2025, 56(4): 653-667.
- [64] Bağcı M. Influence of fiber orientation on solid particle erosion of uni/multidirectional carbon fiber/glass fiber reinforced epoxy composites[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2017, 231(5): 594-603.
- [65] 雷雁洲, 王少伟, 吕秦牛, 等. 碳纤维/聚乳酸复合材料的结晶性能和流变特性[J]. 复合材料学报, 2018, 35(6): 1402-1406.
- Lei Y Z, Wang S W, Lv Q N, et al. Crystallization and rheological properties of carbon fiber/poly(lactic acid) composites[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2018, 35(6): 1402-1406.
- [66] Wei R H, Langa E, Rincon C, et al. Deposition of thick nitrides and carbonitrides for sand erosion protection[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 201(7): 4453-4459.
- [67] Özen İ, Gedikli H, Öztürk B. Improvement of solid particle erosion resistance of helicopter rotor blade with hybrid composite shield[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 121: 105175.
- [68] Panakarajupally R P, Mirza F, El Rassi J, et al. Solid particle erosion behavior of melt-infiltrated SiC/SiC ceramic matrix composites (CMCs) in a simulated turbine engine environment[J]. Composites Part B, 2021, 216: 108860.
- [69] 詹华, 李振东, 汪瑞军, 等. 硬质涂层抗喷砂型冲蚀磨损研究现状[J]. 热喷涂技术, 2021, 13(4): 1-6.
- Zhan H, Li Z D, Wang R J, et al. Research status of hard coatings against sand blasting erosion wear[J]. Thermal Spray Technology, 2021, 13(4): 1-6.
- [70] 郭华锋, 赵恩兰, 杨海峰, 等. TC4 钛合金表面固体粒子冲蚀损伤行为及机理研究[J]. 表面技术, 2024, 53(13): 128-138.
- Guo H F, Zhao E L, Yang H F, et al. Solid particles erosion damage behaviour and mechanism of TC4 titanium alloy surface[J]. Surface Technology, 2024, 53(13): 128-138.
- [71] Amaro A M, Loureiro A J R, Neto M A, et al. Residual impact strength of glass/epoxy composite laminates after solid particle erosion[J]. Composite Structures, 2020, 238: 112026.
- [72] Arena G, Friedrich K, Acierno D, et al. Solid particle erosion and viscoelastic properties of thermoplastic polyurethanes[J]. Express Polymer Letters, 2015, 9(3): 166-176.
- [73] 王尚. 碳纤维复合材料平板高速冲蚀试验研究[J]. 科技创新导报, 2020, 17(16): 106-110.
- Wang S. Experimental study on high-speed erosion of carbon fiber composite plate[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2020, 17(16): 106-110.
- [74] 李超, 宾光富, 李坚, 等. 砂粒粒径对航空涡轴发动机压气机叶片冲蚀磨损的影响研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(19): 180-190.
- Li C, Bin G F, Li J, et al. Influence of sand particle size on the erosive wear of compressor blade in an aero-turboshaft engine[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(19): 180-190.
- [75] Miyazaki N, Hamao T. Solid particle erosion of thermoplastic resins reinforced by short fibers[J]. Journal of Composite Materials, 1994, 28(9): 871-883.
- [76] 王志杰, 姚军, 熊家志, 等. Q345 钢两相流冲蚀试验研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(4): 891-899.
- Wang Z J, Yao J, Xiong J Z, et al. Experimental research on erosion of Q345 steel under two-phase flow condition[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(4): 891-899.
- [77] Yang P P, Li C, Bin G F, et al. Effect of particle impact on spatial and temporal erosion characteristics of turboshaft engine compressor[J]. Wear, 2024, 558/559: 205578.
- [78] Yao Y M, Bai X P, Liu H Y, et al. Solid particle erosion

- area of rotor blades: application on small-size unmanned helicopters[J]. *Symmetry*, 2021, 13(2): 178.
- [79] Sorrentino L, de Vasconcellos D S, D'Auria M, et al. Effect of temperature on static and low velocity impact properties of thermoplastic composites[J]. *Composites Part B*, 2017, 113: 100-110.
- [80] Dubary N, Taconet G, Bouvet C, et al. Influence of temperature on the impact behavior and damage tolerance of hybrid woven-ply thermoplastic laminates for aeronautical applications[J]. *Composite Structures*, 2017, 168: 663-674.
- [81] Fang M, Zhang N, Huang M, et al. Effects of hydrothermal aging of carbon fiber reinforced polycarbonate composites on mechanical performance and sand erosion resistance[J]. *Polymers*, 2020, 12(11): 2453.
- [82] Zheng L F, Fan J J, Gong Q, et al. Sand erosion resistance and failure mechanism of polyurethane film on helicopter rotor blades[J]. *Polymers*, 2023, 15(22): 4386.
- [83] 王玥. CF/PPS 复合材料高温压缩性能和冲击损伤模式分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- Wang Y. Analysis of the high-temperature compression properties and impact damage modes of CF/PPS composite materials[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.

收稿日期: 2025-06-17; 录用日期: 2025-10-10

基金项目: 基础科研计划实验室稳定支持专题项目 (JCKYS2024213002)

通讯作者: 刘刚(1978—), 男, 博士, 研究员, 研究方向为高性能复合材料, 联系地址: 上海市松江区人民北路 2999 号复合材料协同创新大楼 A316(201620), E-mail: liugang@iccas.ac.cn; 陈春海(1969—), 男, 博士, 教授, 研究方向为特种高分子及其复合材料, 联系地址: 上海市松江区人民北路 2999 号复合材料协同创新大楼 A316(201620), E-mail: cch@dhu.edu.cn

(本文责编: 王俊丽)