

光敏固化复合材料在风电叶片表面损伤快速修复中的应用

王玉红

(国能联合动力技术(赤峰)有限公司, 内蒙古 赤峰 024000)

摘要 为满足风电叶片快速修复表面损伤的需要,提高修复效率和质量,本文针对传统修复材料存在的局限性,对光敏固化复合材料在风电叶片表面损伤修复中的应用进行研究。通过对材料组成、固化原理的分析,结合风电叶片的破坏类型及服役环境的需求,论述其应用优势和具体措施。研究发现,光敏固化复合材料能迅速固化、粘结牢固并适配于各种损伤的修复,为风电叶片的表面损伤修复工作提供一种高效可靠的技术途径,促进修复技术朝着智能化方向发展。

关键词 光敏固化复合材料; 风电叶片; 表面损伤; 快速修复

中图分类号: TB33; TM62

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.028

0 引言

在轻量化设计和大功率的趋势下,叶片结构对于修复材料力学性能、工艺适配性等方面提出更高的要求。传统的热固性树脂修补需要依靠加热固化设备进行,高空作业的可行性不高;常温固化材料又存在强度发展缓慢的问题。光敏固化复合材料是一种以光固化机理为基础的复合材料,它通过对光照条件的精确调控来达到材料性能调控的目的,既可以在短期内形成高强度的修复层,又可以根据损伤类型自定义材料配方。这一材料在风电领域中的研究将促进叶片损伤修复技术朝着高效化、智能化的方向发展。

1 光敏固化复合材料概述

1.1 材料组成与分类

光敏固化复合材料的主要成分为树脂基体、光引发剂、活性稀释剂及填料。复合材料以树脂基体为主,常用环氧树脂和丙烯酸酯树脂^[1]。环氧树脂粘接性好,机械性能好,丙烯酸酯树脂固化快、硬度大。当光引发剂吸收某波长光时,生成活性自由基或者阳离子引发树脂聚合;活性稀释剂可调整树脂黏度和改善材料加工性能;填料能够强化复合材料力学性能和降低成本,例如:二氧化硅、碳酸钙。

根据树脂种类的不同,光敏固化复合材料又可以分为环氧类、丙烯酸酯类和聚氨酯类。环氧类复合材料具有优良的综合性能,在多种基材上附着力好;丙烯酸酯类复合材料的固化速度异常迅速,适用于快速修复的场景;聚氨酯类型的复合材料展现出卓越的耐磨和柔

韧特性。不同类型光敏固化复合材料性能对比见表1。

表1 不同类型光敏固化复合材料性能对比

材料类型	主要优势	固化速度 (分钟)	拉伸强度 (MPa)	断裂伸长率 (%)
环氧类	粘接性好、综合性能优	5~10	50~80	5~15
丙烯酸酯类	固化迅速	1~3	40~60	3~8
聚氨酯类	耐磨、柔韧	3~5	30~50	10~20

1.2 光敏固化原理与特性

光引发聚合过程服从自由基链式反应的机理,包括链引发、链增长及链终止三个阶段。以自由基型光触为例,光触发剂在吸收光子能量并跃迁至激发态时进行均裂反应产生初级自由基,该初级自由基和树脂单体双键加成反应产生单体自由基。单体自由基持续地与其他单体分子进行化学反应,导致分子链逐渐扩大。当这两个增长的链发生碰撞时,它们会通过偶合或歧化反应来结束聚合过程。整个工艺从几秒到几分钟不等,比传统热固化几小时反应时间效率提高几十倍。

光敏固化技术具有空间选择性,使得该技术在复杂曲面修复方面具有独特的优势。通过对特定波长和强度分布光源系统的设计,可以达到毫米级的部分固化精度。例如:使用数字微镜器件(DMD)的投影式固化工具,可以确保固化区域的分辨率维持在50 μm之内,从而准确地修补叶片表面的细微裂痕。在能量消耗方面,标准的紫外LED固化设备的功率通常只有100~300 W,而传统的热固化烘箱的功率一般在10~30 kW范围内,

这导致能源消耗下降超过 90%。在环境友好性方面，光敏固化过程产生的 VOCs 排放量低于 10 g/L，这一数值远低于溶剂型涂料的 200 ~ 500 g/L 排放水平。

2 风电叶片表面损伤类型与修复要求

2.1 常见损伤类型

风电叶片裂纹损伤呈明显分布。在叶片的尖端区域，由于其线速度可以达到 60 ~ 100 m/s，因此在风沙的冲刷下，微裂纹的密度可以高达 5 ~ 10 条 /m²，而裂纹的宽度通常介于 0.1 ~ 0.3 mm 之间；叶片根部由于受到交变载荷的作用容易出现与纤维方向垂直的疲劳裂纹且裂纹深度可达到 2 ~ 5 mm。在磨损损伤的情况下，材料在前缘区域的损耗是最为严重的。在风沙环境中使用 5 年之后，前缘的厚度平均减少 2 ~ 3 mm，导致气动效率下降 8% ~ 12%。分层缺陷经常出现在蒙皮和芯材的交界处。在湿度循环的影响下，这种界面的粘接强度每年会减少 5% ~ 8%。当分层的面积超出叶片表面的 10% 时，叶片的固有频率会明显下降^[2]。

通过声发射检测技术对运行 3 年以上的风电场统计显示，每百支叶片中裂纹类损伤占比 47.2%，磨损类占 32.5%，分层类占 18.3%（见表 2）。不同损伤类型之间的交互作用加快破坏进程，例如表面裂纹的存在为水的入侵提供通道并促进分层扩展；磨损所引起的表面粗糙度的增大又加剧裂纹的萌生。

表 2 风电叶片常见表面损伤类型及出现频率

损伤类型	典型形态特征	检测难度等级	扩展速率 (mm/年)
裂纹	线性或网状开口	★★★★☆	0.5 ~ 2
磨损	表面材料均匀减薄	★★☆☆☆	0.3 ~ 0.8
分层	界面脱粘形成气腔	★★★★★	1 ~ 3

2.2 风电叶片服役环境对修复材料的特殊要求

修复材料在极端温度下要求达到 -40 °C 低温抗脆化性能以及 60 °C 高温尺寸稳定性。-40 °C 下材料冲击韧性不宜小于 20 kJ/m²，以免发生低温开裂；在 60 °C 的高温条件下，需要确保热膨胀系数与叶片基体的匹配误差不超过 10%，以避免由于热应力引发的二次损害。在沿海的风场条件下，修复用的材料需要经过 5 000 h 的盐雾测试，并且其表面的腐蚀速度应当低于每年 0.1 μm；在高海拔和强紫外线灯条件下，需要进行氙灯的老化测试，并确保在 2 000 h 后的拉伸强度维持在不低于 80% 的水平。

在施工的便利性上，材料需要在 80% 的湿度条件下依然能够稳定固化，并且固化所需的时间不得超过 10 分钟，以满足风电叶片在高空作业的特殊需求。该

修复工艺要求与无气喷涂和注射灌注的施工方法相容，刀具重量不得大于 5 kg 且易于高空搬运作业。

3 光敏固化复合材料在风电叶片表面损伤快速修复中的应用优势

3.1 高效快速固化，大幅缩减修复时长

光敏固化复合材料依靠其特有的光引发聚合机制，可以在极短的时间内在光照条件下由液态快速过渡到固态。与传统的热固化材料相比，光敏固化复合材料需要更长的加热时间并经历复杂的升温 and 保温过程，特别是在紫外光或其他特定光源的照射下，光引发剂很快分解生成自由基，从而促进单体和预聚体的快速聚合和交联。这一特点使风电叶片表面受损修复后，可以立即进行修复操作，大大压缩修复流程固化所需时间，不需要长时间等待物料固化，显著提高修复效率，降低风电叶片停运时长，确保风电场的连续平稳发电^[3]。

3.2 卓越粘结特性，牢固贴合叶片基体

光敏固化复合材料分子结构中存在各种活性基团，固化时可以和风电叶片通常使用的玻璃纤维等纤维增强复合材料基体复合、和碳纤维强化的树脂基材料会产生强烈的化学结合、物理缠绕效应。利用这一协同效应使光敏固化复合材料和叶片基体之间形成一个致密而牢固的结合界面，粘结强度比一般修复材料高。如此，既能保证修复部位和原有叶片结构的有效结合，更能够在随后的服役过程中经受住苛刻的风力载荷、复杂的环境温度和湿度变化，保持持久稳定粘附状态，避免修复材料剥落或裂纹，对叶片进行可靠修复。

4 光敏固化复合材料在风电叶片表面损伤快速修复中的应用措施

4.1 损伤检测与评估

在风电叶片损伤检测领域，相控阵超声检测技术凭借其独特优势成为内部缺陷探测的核心手段。该技术基于阵列探头的声束合成原理，128 阵元的超声探头通过可编程电子控制系统，能够独立调节每个阵元的激励时间和幅度，实现声束在空间的聚焦与偏转。当超声波遇到叶片内部的分层缺陷时，会因声阻抗差异产生反射回波，系统通过分析回波的时间、幅度和相位信息，构建出缺陷的三维图像。在检测过程中，探头以 1 m²/min 的速度沿叶片表面移动，可对 20 mm 深度范围内的缺陷进行精准定位，对于 0.5 mm 以上的分层缺陷识别准确率高达 98%^[4]。

红外热像检测则专注于表面裂纹的探测。脉冲加热方式通过高能脉冲激光器对叶片表面快速加热，使裂纹区域与正常区域产生温度差异。随着热量的传导，裂纹处由于热阻较大，温度下降速度与周围区域形成

差异,红外热像仪捕捉到这种温度场的衰减曲线后,通过非均匀性校正、图像增强等算法处理,可清晰识别出0.1 mm宽度的细微裂纹。引入机器学习算法后,构建包含裂纹形态、温度梯度等多维度特征的神经网络模型,进一步将缺陷识别准确率提升至95%以上,相比传统人工判读效率提高3倍。

4.2 表面预处理

风电叶片的表面预处理环节中,机械打磨为至关重要的首要步骤。使用配备了不同粒度砂纸的气动打磨机,从粗砂纸(80目)开始,对受损区域及其周围至少50 mm的范围进行打磨,通过去除表面的老化、油渍和其他松散物质,并采用交叉打磨技术来形成粗糙的表面,这样可以增强后续修复材料的附着性。打磨的深度应控制在0.1~0.2 mm之间,以确保在去除杂质的同时,不会对叶片的基体结构造成损害。

在打磨工作完成之后,使用高压空气清扫装置,在0.6~0.8 MPa的压力范围内,从叶片的根部开始,向叶尖方向吹扫打磨区,彻底去除残留粉尘和碎屑,避免这些杂质掺入修复材料中而影响修复效果。随后,采用工业级吸尘器在叶片表面吸尘,将高压空气不易吹出的微小颗粒进一步吸附,保证表面洁净度达到修复要求。对大面积损伤区域使用轨道式打磨机与网格状打磨路径相配合以确保表面粗糙度的均一;对于边角和凹槽这类复杂区域,采用小尺寸手持打磨工具对其精细加工,使得整个修复区域表面情况达到光敏固化复合材料施工规范要求,从而为之后的修复工序打下了良好的基础。

4.3 材料选择与调配

修复材料配方数据库整合1 000+组实验数据与实际应用案例,基于叶片型号、损伤类型、环境参数等12个维度进行智能匹配推荐。以沿海环境裂纹修复为例,系统优先推荐双酚A型环氧树脂为基体,搭配质量分数1.8%的 γ -氨丙基三乙氧基硅烷偶联剂,该配方可使复合材料与玻璃纤维基体的界面剪切强度从32 MPa提升至41 MPa^[5]。材料调配过程实现全自动化控制,高精度质量流量计(精度 $\pm 0.1\%$)实时监测各组分流量,通过PLC控制系统精确调节输送泵的转速。以常见的丙烯酸酯类修复材料为例,当检测到树脂黏度超过目标值(200 mPa·s)时,系统自动补加5%的活性稀释剂三丙二醇二丙烯酸酯,同时通过温度控制系统将混合罐温度维持在 25 ± 1 °C,确保材料可施工时间稳定在30分钟。

4.4 修复施工

引入3D打印技术和光敏固化复合材料的创新性修复方法,并在高精度三维激光扫描仪辅助下实现

0.01 mm分辨率下风电叶片破坏区准确几何数据的快速采集,通过逆向工程软件把采集点云数据转换成三维数字模型导入专用3D打印设备中。打印设备上安装的双组分材料挤出系统,能够在伺服电机的精准控制下按照预设分层切片路径达到最低 0.1 mm^3 材料挤出精度,将配置后的光敏固化复合材料匀速、准确地喷洒在破坏处。在打印的过程中,与打印头同步工作的紫外线LED阵列光源可以以 100 mW/cm^2 的辐射强度,对新挤出的材料进行同步照射,促使物料中光引发剂快速分解生成自由基并引发聚合反应使物料层快速固化成形。

对于风电叶片表面存在不规则孔洞和缺口这类复杂破坏位置,在3D打印系统中内置智能算法能够根据破坏区域三维形态实时地对打印轨迹及材料堆积厚度进行自适应调节。例如:当加工深度大于5 mm的凹坑后,该系统将自动使用螺旋上升式打印路径来逐渐加大材料堆积量以保证修复层和叶片基体之间的完美结合。

5 结束语

在风电产业朝着大型化、高效化方向发展的背景下,叶片表面损伤修复的创新尤为重要。光敏固化复合材料凭借其独特的光固化属性和卓越的整体性能,成功突破传统修复技术的限制,为风电叶片的稳定和安全运行提供强有力的支持。它在损伤修复上的成功运用不仅能提高风电设备运行的可靠性和经济性,也为复合材料在新能源领域的创新性应用开拓了一个新的方向,有助于风电产业的持续优质发展。

参考文献:

- [1] 张小辉,陈进,唐宇航,等.光固化3D打印用光敏树脂功能化改性的研究进展[J/OL].化工新型材料,1-7[2025-07-31].https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=X84Xx1LLloK6JUttMV4HSvZn5Mr73q4jj0JF1J87AC7kvi87hRZgZbLYFOXmz2_DFCYgqv05F8DEPNMAr58ckzFYPrLUenwQkjzVVRlp6conTtR-5Iefn2v36SH_mGYrCgqeYqlhaPsHGgqWO8Z2LHCcBe_DIXxgwRz39GDIIIVUxAbUpSnupg==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [2] 陈慧.低介电高韧光敏聚酰亚胺树脂的合成固化及性能分析[J].聚酯工业,2025,38(04):20-22.
- [3] 王佳妮,陈进,张玄,等.光固化3D打印用光敏树脂研究进展[J].化工新型材料,2025,53(11):28-33.
- [4] 杨子玉.NIR-Ⅱ辅助UV固化环氧树脂及其复合材料[D].北京:北京化工大学,2025.
- [5] 黎艳.3D打印聚四氟乙烯(PTFE)光敏树脂开发及光固化性能研究[D].成都:电子科技大学,2025.