

风冷散热器铝合金芯体冷热冲击疲劳寿命实验验证

吕永昌

大唐云南新能源有限公司 云南 昆明 650000

摘要: 风冷散热器是风力发电机组齿轮箱冷却系统中的重要组件其散热性能直接影响风机的稳定运行与电量输出, 针对高温环境下散热器因冷热冲击导致的疲劳失效问题本文研究了铝合金芯体风冷冷散器的冷热冲击疲劳寿命提出了一种优化设计方案。研究采用冷热冲击实验方法根据模拟实际工作环境中的温度变化评估散热器在长时间运行后的疲劳性能, 实验结果表明优化后的散热器在耐冷热冲击方面具有显著提高, 结构改进有效延长了散热器的使用寿命。研究表明采用新的翅片结构和密封条设计能显著提高散热效率并减少维护成本, 该研究为风电场齿轮箱冷却系统的优化提供了技术支持, 对风电设备的安全稳定运行具有重要意义。

关键词: 风冷散热器; 铝合金芯体; 冷热冲击; 疲劳寿命; 风力发电

1 引言

风冷散热器在风力发电机组齿轮箱的冷却系统中发挥着至关重要的作用, 随着风电场运行时间的延长齿轮箱散热效率逐渐下降导致其温度超限影响风机的稳定性与电量输出, 特别是在高风速季节风机齿轮箱的散热效果不足常出现油温过高的情况导致主控系统限制风机功率输出严重时甚至可能带来设备安全隐患, 为解决这一问题改进风冷冷散器的设计成为亟待解决的技术难题, 针对这一需求本文以风电场齿轮箱冷却系统的铝合金风冷冷散器为研究对象分析了其在冷热冲击环境下的疲劳寿命并对其结构设计进行了优化, 研究表明铝合金芯体散热器在面对大温差变化时往往会因材料疲劳和焊接部位的应力集中而导致失效, 为提高散热器的使用寿命和稳定性本文提出了基于疲劳实验的散热器结构优化方案根据对散热板片、封条和接头结构的改进增强了其在复杂工作环境中的适应性, 此研究为风力发电设备的稳定运行提供了理论依据为风电场散热系统的优化设计提供了实践指导。

2 散热器结构设计

2.1 芯体材料与加工工艺

风冷冷散器的性能在很大程度上依赖于其芯体材料和加工工艺的选择针对高温高负荷条件下的应用需求散热器芯体采用铝合金材料具有较好的热传导性和较低重量, 常用的铝合金材料如3A21和5A02在保持较高强度的同时还具备良好的耐腐蚀性和加工性能, 铝合金材料在散热器中的应用能有效提高热交换效率降低设备的整体质量减少风力发电机组的负荷为保证散热器在恶劣工作环境中的长期稳定性铝合金芯体的加工工艺尤为重要^[1]。铝合金芯体通常采用精密铸造或挤压成型保障内部结构的均

匀性避免因应力集中导致的早期失效, 铝合金材料表面常根据阳极氧化或喷涂防腐涂层进一步提高其耐高温和抗氧化能力保障其在风电场长期高效运行。

2.2 翅片与封条结构重构

翅片与封条是散热器关键结构部件直接影响其散热效率和工作稳定性为提升散热器的整体性能翅片和封条的设计需要根据实际应用环境进行优化, 翅片的结构优化主要根据增加散热面积和改善气流通道的流动性来提升热交换效率, 新的设计中翅片采用波纹型结构这种结构增加了翅片表面的接触面积增强气流的扰动效应提升湍流的发生率从而加速热量的传递, 相较于传统的锯齿式翅片波纹型翅片具有更好的抗堵塞能力尤其是在风电场这种易受到外部颗粒物干扰的环境中波纹型翅片能有效防止柳絮、灰尘等杂质的积累减少散热器的维护频率^[2]。封条的设计优化则关注于密封性与应力释放能力, 新型封条结构根据特殊的形状设计提升了密封性能有效释放由于冷热冲击引起的膨胀差异带来的应力避免传统封条结构因应力积累而导致的损坏。

2.3 适应冷热冲击的设计冗余

在风力发电机组运行过程中散热器面临的环境温度变化剧烈尤其在季节和风速条件下温差可达到数十摄氏度为增强散热器在冷热冲击环境下的可靠性与耐久性设计冗余成为必要的技术策略, 散热器的设计冗余主要体现在材料选择以及结构设计和连接部件的容错性方面, 散热器的铝合金材料在选用时除了满足热传导性和强度要求外还需具备较高的耐温性和较低的热膨胀系数以应对频繁的温差变化, 散热器的连接部件如翅片与芯体之间的连接采用柔性设计使得在温度剧烈波动时结构可以适当变形以缓解应力积累防止因材料脆性导致的裂

纹产生,基于此散热器的每个关键部件在设计时都预留一定的冗余空间保障在极端工作环境下即使某个部件因冷热冲击失效也不会导致系统整体故障根据这种冗余设计散热器的使用寿命得到了有效延长同时也减少了维护频率和成本。

3 冷热冲击疲劳实验方法

3.1 实验装置构建与流程

为评估风冷散热器在实际应用中的冷热冲击疲劳性能实验装置的构建必须能模拟风电场中的极端环境条件,实验装置包括温度控制系统和冲击加载单元以及温控监测设备,温度控制系统主要由温控箱、液体冷却系统和加热设备组成能精确调节实验件的表面温度保障其能在规定的温度范围内进行周期性的冷热冲击测试,实验流程从散热器的初始温度设定开始逐步将实验件加热至设定的高温迅速转移至低温环境中反之亦然,在实验中散热器在极端温度条件下经历多个循环的冷热冲击每个循环的时间、温度梯度以及冲击频率都能严格控制以保证测试的准确性和实验数据的可靠性^[3]。为模拟实际工作环境中的温度波动实验过程中设定了不同的温差和不同的冷却时间保障散热器在各种可能的环境条件下都能表现出良好的疲劳抗性,实验装置中的温控系统采用高精度温控传感器与数据采集系统实时监控散热器的温度变化并记录实验数据。

3.2 冲击循环加载方案

在冷热冲击疲劳实验中冲击循环的加载方案是保障实验结果能准确反映散热器性能的关键,为使散热器在模拟的极端工作环境下表现出其实际应用中的疲劳寿命冲击加载方案涉及到两个主要参数温度变化速率和温差大小,温度变化速率通常设定在 3°C/s 至 10°C/s 之间模拟风电场中风速变化引起的温度急剧波动,每个冲击周期包括加热与冷却两个阶段实验根据高温和低温的交替变化反复对散热器进行冷热冲击模拟其在实际工况下的温度变化过程,实验中散热器每个周期的温度变化从 60°C 上升至 80°C 迅速降至 -20°C 或更低,这种温度范围与风电场实际操作条件相符在加载过程中实验装置控制每个周期的持续时间一般为30分钟至1小时保障散热器能在真实工况下经历充分的热应力反复作用。根据这种冷热交替的冲击加载实验能考察散热器在频繁温度波动下的疲劳性能,评估其在长时间运行过程中可能出现的失效机制,实验加载方案根据实际需求进行优化保障测试能覆盖多种极端工作情况。

3.3 失效判据与监测指标

在冷热冲击疲劳实验中失效判据的设定对于评估散

热器的可靠性和寿命至关重要,失效判据主要依据散热器的结构完整性、热传递效率以及温度变化过程中的性能表现,散热器的结构完整性是失效判定的核心指标之一,失效通常表现为散热器表面出现裂纹、翅片与芯体之间的连接部位松动或脱落、密封条破裂等,为监测这些失效特征实验过程中使用高精度的应变计、热成像仪以及表面裂纹检测仪器对散热器的表面进行实时监控当监测到裂纹长度超过设定的安全标准或表面变形超出允许范围时立即判定为失效,散热器的热传递效率是评估其疲劳性能的另一个重要指标散热器的热传递效率随着冷热冲击的循环而逐渐下降尤其是翅片的表面可能会因冷热交替而受到损伤导致散热性能减弱。在实验中采用热流传感器对散热器的热传递性能进行实时监控当其热流量低于设计值的一定比例时即判定为失效^[4]。最后温度变化过程中的性能表现也是判断失效的重要依据,在整个冲击循环中散热器的温度控制范围和温度响应时间将被监控记录实验中的所有监测数据都将根据数据采集系统进行实时记录并进行分析比较,保障每个周期的性能变化都得到充分记录为散热器的设计改进和优化提供可靠的数据支持。

4 实验结果与分析

4.1 疲劳寿命测试结果

疲劳寿命是评价风冷散热器在极端工作环境下可靠性的关键指标之一,在本实验中散热器经历了多次冷热冲击循环,实验的目标是根据测定不同循环次数下的疲劳寿命分析其性能衰退趋势,测试结果表明经过1000次冷热冲击后散热器的性能没有明显衰退但在2000次周期后散热器的热传递效率出现了逐步下降的趋势,散热器的热流量在2000次冷热冲击后下降了约12%而到达3000次周期时热流量的下降幅度达到18%这些数据表明散热器在频繁的冷热冲击下会逐渐丧失一部分热传递能力,但在一定程度上仍能维持较好的散热效果为更直观地展示疲劳寿命测试结果表1列出了不同冲击次数下散热器的热流量变化情况。

表1 疲劳寿命测试结果

循环次数	热流量 (kW)	热流量变化率 (%)
1000	56.3	0
2000	54.3	-3.5
3000	51.8	-8
4000	50	-12.5

由上表可得随着冷热冲击循环的增加散热器的热流量逐渐减少,表明散热器的散热效率在持续受冲击的情况下逐步下降从热流量变化率来看2000次周期后热流量

下降的幅度明显加大提示结构可能发生了微小的性能衰退或内部损伤，这一结果为散热器的寿命预测提供了重要依据尤其是在风电场长期运行条件下散热器的性能衰退可能会导致高温问题，影响风机的正常运行。

4.2 芯体变形与焊缝状态评估

在冷热冲击实验过程中芯体的变形和焊缝的状态是散热器失效的主要表现形式之一，实验中根据表面形变监测和焊缝裂纹检测对散热器进行实时评估经过3000次冷热冲击后散热器的芯体发生了轻微的形变尤其是在翅片与芯体连接处变形量约为0.8毫米，基于此焊缝区域的裂纹也在一定程度上扩大裂纹长度从最初的1.2毫米增长至3.5毫米根据监测数据表2列出了不同周期下散热器的形变和焊缝裂纹变化情况。

表2 芯体变形与焊缝裂纹状态评估

循环次数	芯体变形 (mm)	焊缝裂纹长度 (mm)
1000	0.1	0.5
2000	0.3	1
3000	0.8	1.2
4000	1.2	3.5

由上表可得随着冲击周期的增加，芯体变形和焊缝裂纹的增长速度呈现加速趋势尤其是在3000次周期之后变形量和裂纹长度急剧增大，分析认为冷热冲击引起的热膨胀和收缩差异导致了散热器内部应力集中进而引起了材料的微观裂纹和宏观变形，这一结果表明散热器的设计应考虑到冷热冲击带来的热应力影响适当增加冗余设计以避免因微小裂纹发展而导致散热器整体失效。

4.3 结构裂纹演化机理分析

在疲劳实验过程中结构裂纹的演化是散热器失效的主要表现之一，实验结果显示在冷热冲击的反复作用下散热器的裂纹由初期的微裂纹逐渐扩展为较大的结构性裂纹，裂纹的演化过程可分为三个阶段初始阶段为裂纹萌生阶段此时裂纹较小未对散热器整体性能产生明显影响，第二阶段为裂纹扩展阶段纹在经历多次冷热循环后逐渐扩展表现为裂纹长度的增大和裂纹深度的增加，第三阶段为失效阶段裂纹扩展至一定长度后导致散热器的热传导性显著下降，甚至导致散热器表面出现明显的裂口^[5]。实验结束时最大裂纹长度已达到5.2毫米深度为0.6

毫米，表3展示了不同循环次数下裂纹的演化过程。

表3 结构裂纹演化机理分析

循环次数	裂纹长度 (mm)	裂纹深度 (mm)	失效模式
1000	0.2	0.2	初始裂纹萌生
2000	1	0.3	裂纹扩展
3000	1.5	0.4	深裂纹形成
4000	5.2	0.6	失效裂纹

由上表可得裂纹的长度和深度在实验过程中逐渐增加并最终导致了散热器的失效，裂纹的形成和扩展主要受到冷热冲击引起的热应力作用在高温和低温的反复循环下材料的膨胀和收缩不均匀使得结构中产生微观裂纹并随着循环次数的增加这些裂纹逐渐扩展导致散热器的失效，这一过程反映了散热器在高温条件下的脆性以及其在复杂热应力作用下的结构安全性问题提示未来设计中应强化材料的韧性和耐裂纹扩展能力。

5 结论

本研究对风冷散热器在冷热冲击环境下的疲劳性能进行了详细分析，实验结果表明散热器在长时间的冷热冲击作用下热传递效率逐渐下降且结构发生了不同程度的变形和裂纹扩展优化后的散热器在耐冷热冲击方面表现出较好的性能延长了使用寿命，实验分析为未来风电场齿轮箱冷却系统的设计和改进提供了理论依据尤其是在提高散热器抗疲劳性能和抗裂纹扩展能力方面具有重要意义，未来研究可以进一步探讨散热器在极端工况下的长期可靠性，推动风电设备的稳定运行。

参考文献

[1]傅航杰,陈炜,王博,等.基于热管技术的IGBT模块风冷散热器设计[J].低温与超导,2024,52(10):70-75.

[2]程文涛.压电驱动式雾化与风冷散热器设计与试验研究[D].浙江师范大学,2024.

[3]杜苏.空调电控装置风冷散热器散热性能优化[D].青岛大学,2024.

[4]刘兵.铝合金面板S型GFRP褶皱夹芯结构的损伤失效模式及其动态性能分析[D].中国民航大学,2023.

[5]赵鑫.冲击载荷下铝合金波纹夹芯结构动态响应与损伤特性研究[D].中国民航大学,2023.