

低温环境山地风电混塔环氧树脂拼接胶施工工艺研究

陈军伟 杨大鹏

西北水利水电工程有限责任公司 陕西 西安 710100

摘要: 山地低温、大风高湿的复杂工况,极易造成风电混塔环氧树脂拼接胶施工和易性变差、固化反应滞后、力学性能大幅衰减,传统施工工艺难以适配现场工况。本文通过多梯度低温耦合环境试验,系统探究温度、风速、湿度对胶料施工性能与固化质量的影响规律,确定最优胶料配比、涂胶参数及养护制度。优化全流程低温施工工艺,建立缺陷防控及验收体系,有效提升低温环境下塔筒拼接施工质量与结构服役安全性。

关键词: 低温环境;山地风电混塔;环氧树脂拼接胶;施工工艺

引言: 山地风电场地高海拔、低温大温差、多风高湿的特殊环境,对混塔拼接环氧树脂胶的施工成型与固化效果造成严重负面影响。低温会冻结胶体分子运动、降低固化活性,导致胶层粘接强度不足、微裂纹频发,直接威胁风电混塔整体结构稳定性。当前常规常温施工工艺无法适配山地低温工况,施工质量管控难度极大。基于此,本文开展低温施工工艺专项研究,旨在形成适配山地环境的标准化施工技术,保障工程施工质量。

1 低温山地风电混塔拼接施工基础理论与材料特性

1.1 风电混塔结构及拼接胶接机理

(1) 预制装配式风电混塔结构由混凝土塔筒段、钢塔筒段及过渡段组成,其中混凝土段采用预制管片环向与纵向螺栓拼接,形成薄壁高耸结构。受力特性表现为压弯耦合作用,塔底承受最大弯矩与轴向压力,拼接缝处剪力传递依赖界面摩擦力与螺栓抗剪承载力,胶层在传力路径中承担应力重分布与密封双重功能。(2) 环氧树脂拼接胶固化本质为缩聚反应,胺类固化剂与环氧基团发生亲核加成,形成三维网状结构。胶接界面机械互锁与化学键合共同提供粘接强度,固化度随温度升高呈指数增长,反应活化能决定固化进程。胶层厚度控制在2~4mm时,界面残余应力最小,粘接性能最优^[1]。(3) 塔筒拼接缝受力模型为压剪复合状态,环向接缝主要承受竖向压应力与水平剪力,纵向接缝以环向拉应力为主。防水防渗采用双重防线:胶层本体防水与接缝表面密封胶条协同作用,配合排水孔设计,确保水密性。低温下胶层弹性模量升高,变形协调能力降低,接缝抗裂性能成为控制指标。

1.2 低温环境对环氧树脂拼接胶性能的影响机制

(1) 低温使环氧树脂分子链段运动冻结,黏度呈指数上升,当温度低于5℃时,部分配方黏度增大50%以上,触变性显著增强,流平性下降,施工刮涂阻力增

大,且胶体对混凝土基材润湿角增大,界面浸润不充分,严重影响施工和易性与胶缝成型质量。(2) 低温降低了固化反应活性,固化速率显著减缓,表干时间由常温4~6h延长至24h以上,固化度随温度降低呈非线性衰减。依据Arrhenius方程,温度每降低10℃,反应速率常数降至原来的1/2~1/3,低温段固化度难以达到85%以上,残余未固化组分影响胶层长期稳定性。(3) 低温固化导致交联密度降低,分子链有序度下降,胶体玻璃化转变温度 T_g 降低,拉伸剪切强度较常温固化下降20%~40%。同时,低温下胶层脆性增大,断裂韧性降低,界面热应力与固化收缩应力叠加,易引发微裂纹,削弱粘接耐久性。

1.3 山地低温施工环境特征与施工制约因素

(1) 山地风电场地海拔多在1000~3000m,冬季气温常低于-10℃,昼夜温差达15℃以上,且伴随瞬时风速超过10m/s的大风天气,相对湿度多在80%以上。低温降低胶体反应活性,大风加速胶层表面溶剂挥发与热量散失,高湿促使基材表面结露,三者耦合劣化胶接质量。(2) 高空作业平台距地面80~120m,塔筒内空间狭窄,作业人员穿戴防寒装备后操作灵活性受限。高空风速放大效应显著,吊装对位精度要求拼接缝错位小于2mm,低温下构件尺寸收缩、胶层操作时间缩短,致使有效作业窗口大幅压缩,每日可施工时长受限^[2]。(3) 传统常温施工工艺未考虑低温触变调控与快速固化需求,常规配比胶体低温下无法充分固化,加热保温措施在山地高空难以有效实施。临时加热设备供电受限,且加热不均匀易导致胶层气泡与局部过固化,传统工艺在低温山地环境中的适用性存在严重缺陷。

2 低温环境环氧树脂拼接胶施工性能试验研究

2.1 试验方案设计

(1) 试验原材料选用风电专用环氧树脂拼接胶A/B

双组分体系及低温固化促进剂, 基材为C80高强混凝土与Q355D钢材。主要设备包括旋转黏度计、差示扫描量热仪、万能试验机及高精度低温恒温试验箱(控温精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$)。(2)低温工况梯度设定为 -15°C 、 -10°C 、 -5°C 、 0°C 、 5°C 五个水平, 以 25°C 常温为基准对照组。同步模拟风速(0、5、10m/s)与相对湿度(60%、80%、95%)耦合条件, 贴近山地实际施工环境。(3)测试指标涵盖黏度、可操作时长、流挂性、涂覆均匀度、拉伸剪切强度、断裂伸长率及玻璃化转变温度。试验遵循GB/T7124、GB/T2794及JGJ1等规范执行。

2.2 低温施工工作性能试验分析

(1)胶体黏度随温度降低呈非线性增长, 5°C 时黏度为常温的1.35倍, -15°C 时达2.2倍以上。可操作时长由常温50min缩短至 -15°C 的18min, 黏度拐点随温度降低显著前移, 低温下施工时间窗口大幅压缩。(2)涂覆均匀性随温度降低持续劣化, 5°C 厚度偏差 $\pm 0.3\text{mm}$, -15°C 扩大至 $\pm 0.8\text{mm}$, 超出允许范围。 0°C 以上流挂距离小于5mm, 低于 -5°C 时流挂基本消失但界面润湿性严重下降, 基材表面微孔填充率由92%降至 -15°C 的61%, 有效粘接面积显著缩减。(3)不同配比胶液搅拌稳定性试验表明, 低温下A/B组分混合均匀度降低, 推荐搅拌转速200~400r/min, -5°C 以下须延长搅拌时间2~3min。低温胶液气泡逸出困难, 静置消泡时间由常温15min延长至40min以上, 促进剂掺量对搅拌混合均匀性影响敏感^[3]。

2.3 低温固化后力学性能试验分析

(1)拉伸剪切强度随固化温度降低呈线性衰减, 5°C 养护7d强度为常温的72%, -10°C 降至48%, -15°C 仅剩35%。拉伸强度衰减幅度大于剪切强度, 断裂伸长率由3.2%降至 -15°C 的1.0%, 胶层脆化明显。(2)低温固化试件孔隙率由常温2.5%升至 -10°C 的8.7%, 抗渗系数增大一个数量级, -15°C 时部分试件出现贯通微孔, 抗渗等级由P12降至P6, 微观缺陷集中于胶-混凝土界面过渡区。(3)有限元分析表明, 低温固化缺陷使接缝区应力集中系数由1.15升至1.42, 极端风荷载下最大主应力增幅18%, 疲劳寿命预估降低约35%, 累积损伤风险显著上升。

2.4 低温施工关键参数确定

(1)最佳配比为A/B=3:1, 添加3%~5%低温促进剂, $-5\sim 5^{\circ}\text{C}$ 取低值, $-15\sim -5^{\circ}\text{C}$ 取高值, 掺量超8%时施工窗口不足, 低于2%时固化度不达标。(2)最优涂胶厚度随温度降低递减: 5°C 为2.5~3.5mm, -5°C 为2.0~3.0mm, -15°C 为1.5~2.0mm。可操作时长下限20min, 各工序须在搅拌后18min内完成。(3)最小有效固化温度为 -10°C , 低于该值养护14d固化度仍不足70%。

养护时长满足修正Arrhenius关系: -5°C 不少于7d, 0°C 不少于5d, 5°C 不少于3d。

3 低温环境山地风电混塔环氧树脂拼接胶标准化施工工艺及质量控制

3.1 低温施工前期预处理工艺优化

(1)塔筒拼接基面低温清理、打磨与干燥处理工艺。低温环境下基面处理执行三道工序: 首道高压空气配合硬毛刷清除冰霜浮灰, 气源压力0.6~0.8MPa; 二道角磨机配40~60目砂轮片拉毛打磨, 深度0.5~1.0mm, 粗糙度达 $R_z \geq 50\mu\text{m}$, 宽度为拼接面两侧各外延50mm; 三道热风枪分区干燥, 出口温度60~80 $^{\circ}\text{C}$, 含水率降至4%以下, 有效窗口期不超过2h。(2)环氧树脂胶液低温预热、配比与搅拌工艺。A、B组分分别于恒温箱中30~35 $^{\circ}\text{C}$ 预热30~40min, 上限40 $^{\circ}\text{C}$ 。按质量比A:B=3:1称量, 误差 $\leq \pm 1\%$ 。行星式搅拌器转速300~500r/min, 时长3~5min, 刮壁不少于两次。低温促进剂掺量3%~5%, 搅拌初期加入并延长1min^[4]。(3)山地低温施工防风、保温预处理措施。塔筒外围搭设可拆卸防风围挡, 高于作业面1.5m, 风速超6级时禁止高空涂胶。胶液采用双层保温桶电伴热维持25~30 $^{\circ}\text{C}$ 运送。构件提前覆盖保温被配合电加热毯, 基面预升至10~15 $^{\circ}\text{C}$ 。作业平台增设挡风暖棚及燃油热风机, 维持微环境稳定。

3.2 低温环境核心拼接施工工艺流程

(1)低温精准涂胶与厚度控制施工工艺。采用齿形刮板初涂与橡胶辊压涂双层施工: 首层0.5~1.0mm纵向推进, 静置2~3min; 二层交叉施涂至设计厚度。梳齿厚度规沿环向每200mm设检查点, 偏差 $\leq \pm 0.3\text{mm}$ 。涂胶至压紧总耗时不超过12min。(2)塔筒对位拼接、压紧与溢胶处理工艺。定位销初定位与液压千斤顶微调协同, 安装不少于4个导向销, 环向错位 $\leq 2\text{mm}$, 缝宽偏差 $\leq 1\text{mm}$ 。环向同步张拉按30%→60%→100%三级加载, 每级持荷2min, 终压0.5~0.8MPa。溢胶以连续均匀挤出2~3mm为合格, 初凝后以非金属刮刀沿45 $^{\circ}$ 刮除。(3)低温保温固化与温控养护工艺。自限温电伴热带沿接缝两侧各200mm包裹, 外敷50mm聚氨酯保温层, 维持胶层15~20 $^{\circ}\text{C}$ 。每5m布设PT100测温点, 每10min采集。升温速率 $\leq 2^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 恒温波动 $\pm 3^{\circ}\text{C}$, 降温速率 $\leq 5^{\circ}\text{C}/\text{h}$, 期间禁止振动与加载^[5]。

3.3 低温施工常见缺陷及防控技术

(1)低温胶层空鼓、缝隙不饱满缺陷成因及防控。空鼓源于低温高黏度下气泡难逸出及基面微孔填充不足; 缝隙不饱满因涂胶量不足或压紧不均。防控: 搅拌

后真空脱泡5min；涂胶后排气滚压辊双向碾压，速度0.5~1.0m/min，每方向不少于两遍；涂胶量按设计体积110%~115%控制。（2）胶体固化不完全、粘接强度不足整改技术。轻度缺陷（固化度85%~90%）采用红外加热毯40~50℃补热2~4h后缓冷。严重不足（强度低于设计值70%）须清除重涂：热风枪60~70℃软化后刮除，打磨至新鲜基面后重新施工。（3）山地大风、低温扰动施工质量防控措施。移动气象站实时监测，风速 $\geq 8\text{m/s}$ 或气温 $<-10^\circ\text{C}$ 启动红色预警立即停工；风速5~8m/s或气温 $-5\sim-10^\circ\text{C}$ 启动橙色预警限制作业。大风时增设三层四角对称临时缆风绳。低温骤降时电伴热功率每降温1℃补偿增加5%。

3.4 低温施工质量检测与验收标准

（1）施工过程实时质量检测方法。每批胶液留样不少于3组测试可操作时长与黏度，偏差超10%时停用。超声波测厚仪逐段抽检，环向每500mm设测区、每区5个测点，抽检率 $\geq 30\%$ ，厚度均值在设计值 $\pm 0.3\text{mm}$ 内。温度每30min记录，与自动温控数据校核。（2）拼接胶层固化质量无损检测技术。红外热成像法全长筛查，缺陷区温差 $\geq 2^\circ\text{C}$ 标记可疑。可疑区采用超声相控阵C扫描定量检测，频率5MHz、步距1mm，灵敏度 $\phi 1\text{mm}$ 当量气孔。每道接缝环向不少于6个断面、纵向不少于3条检测线，缺陷面积占比超3%或单缺陷超5mm判定不合格。（3）低温环境风电混塔拼接施工验收规范。芯样拉伸剪切强度

不低于设计值85%，每组不少于3个取最小值；DSC法测定固化度不低于90%；注水加压0.4MPa持荷24h无渗漏。验收资料附全流程温控记录及检测报告，温度超标累计超2h的拼接缝判定不合格。

结束语

本文系统开展低温山地风电混塔拼接胶施工机理、性能试验与工艺优化研究，阐明了低温环境下胶料性能劣化机制，明确了不同低温工况的核心施工控制参数。通过优化基面处理、涂胶施工、温控养护及缺陷防控工艺，构建了完善的低温施工质量控制体系。研究成果有效解决了高寒山地风电混塔拼接施工的技术难题，可为同类风电工程低温施工提供重要的参考与技术借鉴。

参考文献

- [1]马俊栋,柳旭.风电混塔用环氧拼接胶在低温下的应用性能及施工工艺[J].建筑科学,2025,41(06):142-148.
- [2]张宇航.装配式风电混凝土混塔低温拼接施工工艺优化[J].施工技术,2024,53(18):102-106.
- [3]罗林杰.超低温高活性环氧结构胶固化施工技术研究[J].金属世界,2025,22(05):112-117.
- [4]周洪芝,罗仕刚.固化体系对风电预制混塔拼接胶施工性能的影响[J].新型建筑材料,2022,49(10):229-233.
- [5]王磊,陈阳.高寒山地风电混塔环氧拼接胶低温施工质量控制技术[J].工程建设,2025,39(03):89-93.