

文章编号:1001-5078(2026)02-0202-09

· 激光应用技术 ·

激光参数对复合绝缘子芯棒表面影响研究

黄秉钰^{1,2},方春华^{1,2},蔡勇³,袁田³,许文荣⁴,赵彦华⁴,苏首铝⁴,张晋^{1,2},刘叶颀^{1,2}

(1. 三峡大学 电气与新能源学院,湖北 宜昌 443002;2. 湖北省输电线路工程技术研究中心,湖北 宜昌 443002;

3. 中国电力科学研究院有限公司,湖北 武汉 430074;4. 长园高能电气股份有限公司,广东 东莞 523128)

摘要:在复合绝缘子芯棒的激光表面处理过程中,不当的激光参数组合会引发能量积累时间过长,导致处理过程中表面出现碳化等不可逆损伤。为实现表面形貌可控改性并规避热损伤风险,本研究以玻璃纤维/环氧树脂拉挤芯棒为对象,构建三维有限元模型,仿真分析激光多参数耦合对表面温度场的影响规律,确定温度安全阈值;进一步通过试验结合二次响应曲面法(RSM),系统研究阈值范围内参数耦合效应对表面形貌的影响机制,实验结果表明:仿真温度场与实测结果相近,验证了模型可靠性;在有效阈值内功率与扫描速度($p < 0.0001$)对 R_a 的主效应显著,贡献率分别为27.3%与51.0%;二者交互作用显著($p = 0.0018$,贡献率11.8%);速度二次项($p = 0.0193$)表明 R_a 随速度呈非线性变化,临界值65 mm/s后变化趋缓;频率影响不显著($p > 0.05$)。

关键词:复合绝缘子芯棒;激光表面处理;响应曲面法;表面形貌影响机制

中图分类号:TN249;O437 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2026.02.008

Investigation of laser parameter effects on the surface morphology of composite insulator core rods

HUANG Bing-yu^{1,2}, FANG Chun-hua^{1,2}, CAI Yong³, YUAN Tian³, XU Wen-rong⁴,

ZHAO Yan-hua⁴, SU Shou-lv⁴, ZHANG Jin^{1,2}, LIU Ye-qi^{1,2}

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Power Transmission Line, Yichang 443002, China;

3. Wuhan Branch, China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China;

4. CYG Insulator Co., Ltd., Dongguan 523128, China)

Abstract: During the laser surface treatment of composite insulator cores, inappropriate laser parameter combinations can lead to excessive energy accumulation time, resulting in irreversible surface damage such as on the treated surface. To achieve controllable surface morphology modification and avoid thermal damage risks, a three-dimensional finite element model is constructed using glass fiber/epoxy resin pultruded rods as the object. The influence law of multi-parameter coupling of the laser on the surface temperature field is simulated and analyzed, and the temperature safety threshold is determined. Furthermore, the coupling effects of parameters within the threshold range on surface

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 51807110)资助。

作者简介:黄秉钰(2000-),男,硕士研究生,研究方向为电力设备与激光应用技术。E-mail:tiancaigougou357@163.com

通讯作者:方春华(1980-),男,博士,教授,研究方向为高电压绝缘与在线监测技术。E-mail:fang107531@163.com

收稿日期:2025-04-24

morphology are systematically investigated through experiments combined with the Response Surface Methodology (RSM). Results show that the simulated temperature fields are found to be similar to the measured results, validating the reliability of the model. Within effective thresholds, power and scanning speed ($p < 0.0001$) significantly affect R_a with contribution rates of 27.3% and 51.0%, respectively. And their interaction shows significance ($p = 0.0018$, contribution rate 11.8%). The speed quadratic term ($p = 0.0193$) indicates R_a changes nonlinearly with speed, which gradually stabilized after the critical value of 65 mm/s. The effect of frequency shows insignificant effects ($p > 0.05$).

Keywords: composite insulator core rod; laser surface treatment; response surface methodology; surface topography regulation

1 引言

复合绝缘子作为高压输电线路的核心组件,其机械支撑强度与电气绝缘特性直接决定了电网的长期运行安全。其中,芯棒作为复合绝缘子的关键承载部件,其界面性能是决定绝缘子耐候性和抗老化能力的关键因素^[1-2]。而芯棒表面处理工艺是通过影响界面微观形貌与化学活性,显著增强机械嵌合效应与化学键合强度,是提升复合绝缘子服役寿命的核心工艺环节。因此,开发可控的无接触式表面处理复合绝缘子芯棒的技术已成为提升复合绝缘子服役寿命的关键。

传统表面处理方法如机械打磨、喷砂及化学蚀刻虽能通过增加表面粗糙度改善粘接性能,却存在不可忽视的缺陷:机械砂轮打磨和喷砂工艺会引入机械残余应力,可能导致芯棒纤维断裂、基体损伤,极端情况下可能出现应力集中导致界面分层,从而造成绝缘击穿等事故。化学蚀刻通过化学溶液腐蚀表面,容易导致表面形貌失控,可能出现化学物质残留,极端条件下可能引发材料脆化,断裂。近年来,激光、等离子表面处理技术凭借非接触、高精度及环保优势,为复合材料表面改性提供了创新解决方案,并且在航空航天复合材料领域取得显著进展^[3]。例如:朱传敏、吕珊珊^[4]等学者的研究表明,激光处理铝合金表面后,表面形成了大量微孔,并且氧元素的质量显著增加,从而有效改善了材料的表面性能。吴瑶、孔海娟^[5]等研究者与 Chengcheng Sun、Junying Min、C. Leone 和 S. Genna^[6-7]等人也发现,激光处理碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)时,能够改善表面,从而增强了材料的粘接性能。

现有研究多聚焦金属或 CFRP 材料,而针对复合绝缘子芯棒的激光-材料相互作用机理研究仍存

在以下空白:针对拉挤型复合绝缘子芯棒的激光表面处理技术体系尚未完善;多物理场耦合作用下温度场演变的仿真模型缺失,导致树脂基体热解与增强相损伤的临界判据难以量化;基于单因素实验或线性回归模型,难以揭示功率、速度、频率等参数的非线性交互作用对表面形貌的影响规律。针对上述问题,本研究建立了三维瞬态仿真模型,系统解析激光参数对温度梯度分布的影响规律和表面处理安全阈值,通过正交试验设计与响应曲面法,探究激光参数交互作用对表面粗糙度(R_a)的影响机制。为复合绝缘子激光表面处理提供了工艺优化窗口与理论判据,对推动复合绝缘子表面处理技术进步具有重要意义。

2 激光表面处理芯棒机理仿真研究

2.1 三维瞬态热传导有限元建模

复合绝缘子芯棒的激光表面处理过程通过高精度聚焦系统将激光能量集中作用于芯棒表面,使局部区域形成高能量密度,迅速引发表面温度的急剧升高。材料表层吸收激光能量后温度迅速上升,进而引发气化现象。气化产物继续吸收能量,导致温度进一步升高,最终形成蒸汽-等离子体。在此过程中,等离子体产生的强烈外向热喷射作用能够加速材料的去除。由于脉冲激光作用时间极短且能量高度集中,能量的传递主要局限于材料表面,进而提升了加工的精度和效率^[8-10]。

激光精准烧蚀可去除外层树脂并暴露内部纤维,避免因纵深热传导引发芯棒结构损伤,其机制依赖于功率、扫描速度及频率可对温度场分布与材料去除行为的调控。通过改变功率与速度协同作用可匹配树脂分解、表面烧蚀的阈值,实现表面粗糙度可控调节并减少强度衰减。实验前需开展参数化温度场仿真,预测最高温度以规避表面过热损伤,并为优

化提供理论依据。

考虑到激光照射与其传播方向垂直的平面上时,其能量分布与该平面上的场振幅平方成正比的关系,高斯光源在平面上的能量分布可以描述为式(1)~(2):

$$I(x, y, z) = C_0 \psi(x, y, z)^2 = \frac{C_0}{R^2(z)} \exp\left(-2 \frac{x^2 + y^2}{R^2(z)}\right) \quad (1)$$

$$R^2(z) = R_0^2 \sqrt{1 + \left(\frac{z\lambda}{\pi R_0^2}\right)^2} \quad (2)$$

式中, $I(x, y, z)$ 表示空间位置 (x, y, z) 处的光强; C_0 为常数因子; $R(z)$ 为传播轴直线上 z 点出的光斑半径; λ 为波长。

在激光表面处理复合绝缘子芯棒的过程中,激光照射一定区域的温度会升高,其传热方程^[11-13]可以表示为式:

$$\begin{cases} \rho c \frac{\partial T(x, y, z; t)}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \\ Q(x, y, z; t) - Q_{\text{LOSS}} \\ -k \frac{\partial T(x, y, z; t)}{\partial t} = \varepsilon I \end{cases} \quad (3)$$

式中, ρ 为绝缘子用瓷密度; k 为热导率; c 为比热容; ε 为复合绝缘子芯棒表面对激光的吸收系数; $Q(x, y, z; t)$ 为激光热源; Q_{LOSS} 为材料损失热量。

考虑到激光表面处理复合绝缘子过程的对流和热辐射其传热模型可以描述为式:

$$-k \frac{dT}{dn} = h(T_0 - T) + \sigma_c k_b (T_4 - T_4^0) \quad (4)$$

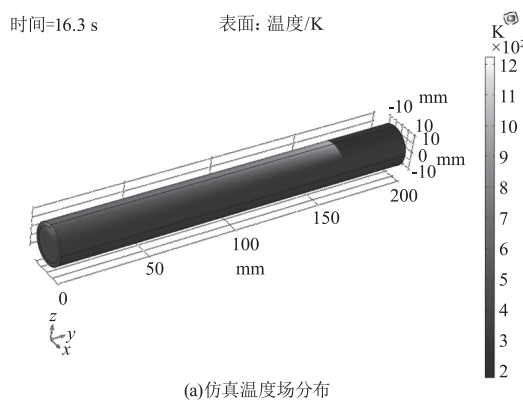
式中, h 为对流换热系数; σ_c 为 Stefan-Boltzmann 常数; k_b 为材料发射率; T_0 为参考温度, 取 293 K。

2.2 模型准确性验证

在激光辐照过程中,复合绝缘子芯棒表面因能量沉积引发热累积效应,导致局部烧蚀现象。图 1(a) 为 $P = 100 \text{ W}$, $v = 10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $f = 125 \text{ kHz}$ 参数组合下的表面温度场分布仿真结果,仿真结果表明,温度场沿芯棒轴向呈现梯度递减特征,峰值温度集中于激光光斑作用区域,并随径向距离增大而逐渐降低,符合高斯分布的特征。激光能量密度梯度集中于辐照区域表层,这为后续正交试验中激光功率、扫描速度及频率的参数匹配提供了理论依据。

为验证仿真可靠性,采用红外热像仪对实际处

理过程的表面温度场进行同步监测。图 1 复合绝缘子芯棒表面温度场的实验与仿真对比分析为芯棒处理过程红外测温结果,根据对比显示,实验与仿真的温度场分布趋势高度一致,峰值温度及热扩散轮廓的误差均低于 5%,证实了有限元模型在预测激光-材料热相互作用中的有效性。



(a) 仿真温度场分布



(b) 红外测温实验结果

图 1 复合绝缘子芯棒表面温度场的实验与仿真对比分析
Fig. 1 Experimental and simulation comparative analysis of the surface temperature field of composite insulator core rod

2.3 不同激光参数下表面温度分布

本研究基于 COMSOL 多物理场耦合仿真平台,通过多参数协同耦合数值模拟揭示了激光频率、扫描速度及功率对复合绝缘子芯棒表面处理热力学响应的影响规律。

图 2(a)~(c) 揭示了不同激光参数对温度分布的影响规律:(a) 当功率从 40 W 增至 110 W 时,表面温度由 350 K 跃升至 1300 K (+271%),表明功率是影响表面温度的重要参数,但 6~8 mm 深度温度稳定在 300~400 K,表明激光表面处理过程中能量能有效聚焦于表面;(b) 扫描速度由 70 mm·s⁻¹ 降至 5 mm·s⁻¹ 时,表面温度从 413.7 K 非线性激增至 1821.9 K (+340%),表明低扫速会触发热累积指数增长;

(c) 频率由 25 kHz 增至 200 kHz 时, 表面温度仅从 809.6 K 微升至 847.5 K (+12%), 高频工况下单位时间能量累积使温度额外增长 3% ~ 5%。

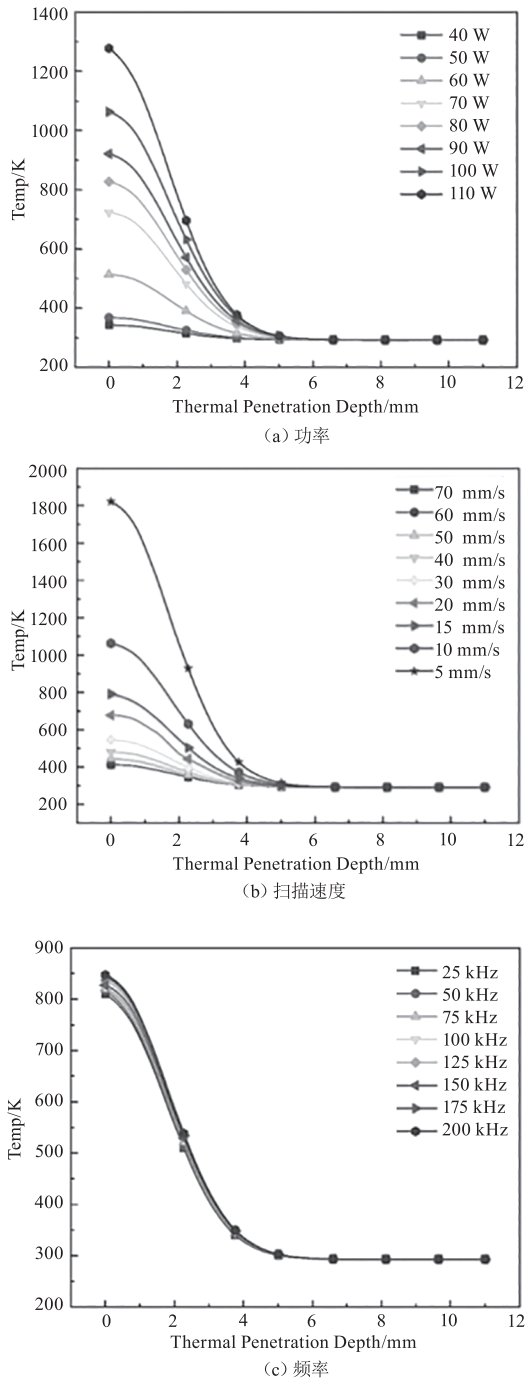


图2 不同激光参数下纵深 Z 方向温度分布

Fig. 2 Temperature distribution in the longitudinal Z direction under different laser parameters

数值模拟结果表明, 频率变化未达显著影响效果, 功率超 110 W 时 0 ~ 1 mm 深度温度梯度突破 1200 K (碳化临界阈值), 速度 < 5 mm · s⁻¹ 时温度超 1800 K (超 1200 K 安全阈值)。

3 激光参数优化实验设计与方法

3.1 实验材料与设备

实验材料为电气绝缘用玻璃纤维增强挤拉型材料, 在实验中的尺寸为直径 Φ20 mm 长 200 mm, 在表面处理芯棒之前, 对表面进行清洗。表 1 为玻璃纤维增强环氧树脂型复合绝缘子芯棒的材料参数。

表 1 玻璃纤维增强环氧树脂复合绝缘子芯棒的材料参数

Tab. 1 Material parameters of glass fiber reinforced epoxy resin composite insulator core rod

Material type	Glass fiber epoxy resin
Densities/(g · cm ⁻³)	2.1
Specific heat capacity/(J · kg ⁻¹ · K ⁻¹)	1330
Thermal conductivity/(W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	0.35
Initial Surface Roughness(<i>R</i> _{a0})/μm	0.35 ± 0.08

本实验采用模块化激光表面处理系统(系统结构如图 3 所示), 其核心由 CL-H-100W 型脉冲光纤激光器(波长 1064 nm, 最大功率 100 W)、高速振镜系统及线性位移平台(行程 150 mm)构成, 线性位移平台的扫描速度可调范围为 1 ~ 70 mm · s⁻¹, 步进分辨率 0.1 mm · s⁻¹。激光器输出光束经扩束准直后入射至振镜, 通过平场透镜实现精确聚焦。温度监测采用手持便携式红外热像仪(测温范围 240 ~ 1800 K, 热灵敏度 0.03 °C), 该单元与加工光路呈 45° 夹角布置以避免激光干扰, 并采集温度场数据。表面形貌分析依托金相显微镜和 TR200 便携接触式高精度轮廓仪, 分别观测微观形貌特征及表面算数平均 *R*_a 值量化具体参数对表面光洁度和形貌的影响。

3.2 激光参数设置

基于预实验与文献分析, 复合绝缘子芯棒激光表面处理过程中, 当表面峰值温度超过 1200 K 时, 将引发碳化层形成及不可逆界面损伤。通过仿真研究发现, 功率与扫描速度对表面温度场分布影响显著, 并且当功率 > 100 W 或扫描速度 < 10 mm · s⁻¹ 时, 会引发表面温度峰值超限 (*T* ≥ 1200 K)。本试验通过正交试验研究激光组合参数对芯棒表面形貌的影响规律, 其参数组合如表 2 所示, 并且通过仿真计算结果证实, 选定参数组表面温度场始终低于损伤阈值 (*T* < 1200 K), 试验测温结果证明仿真结果真实有效, 保障了试验样品的结构完整性。

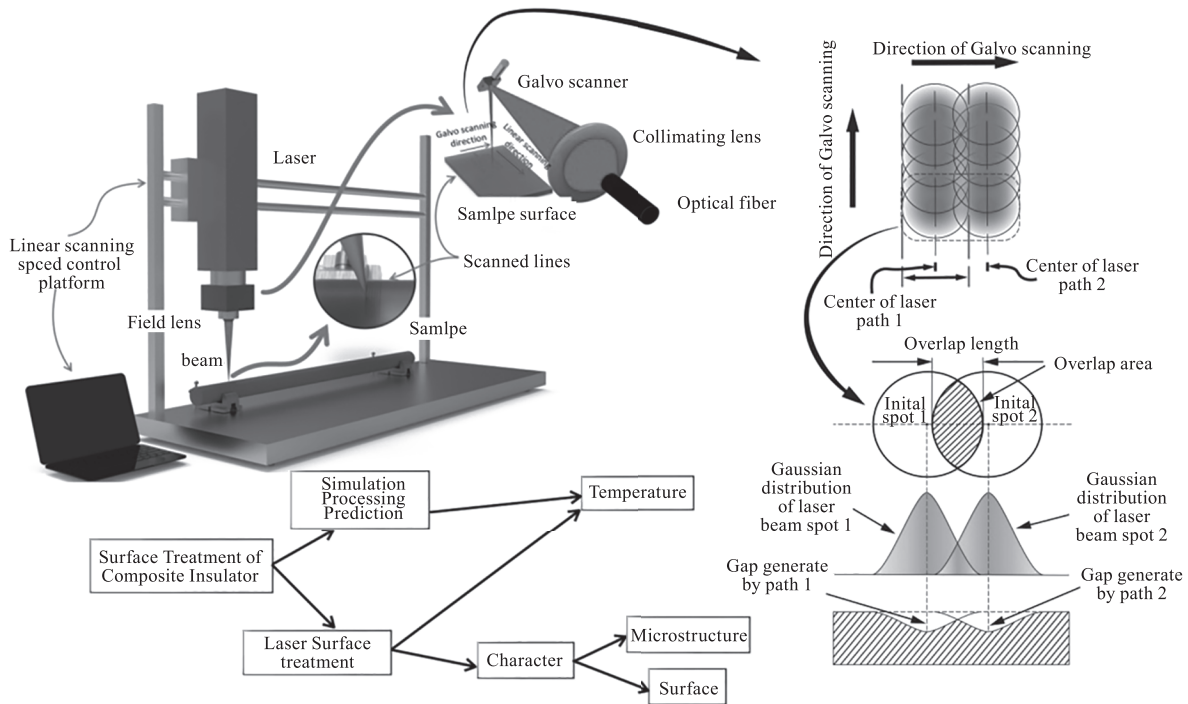


图 3 激光表面处理复合绝缘子芯棒扫描策略系统结构

Fig. 3 Laser surface treatment composite insulator core rod scanning strategy system structure

4 表面形貌影响机制与优化分析

按照表 2 参数对激光表面处理复合绝缘子芯棒的最高温度进行计算,芯棒表面处理仿真峰值温度计算结果证明正交表中激光参数均不会导致芯棒表面出现永久性损伤,试验峰值温度测量结果以及表面粗糙度测量结果如表 3 所示。

表 2 激光表面处理的参数设置

Tab. 2 Laser surface treatment parameter setting

Factor	Level		
Power P/W	50	75	100
Scanning speed $v/(mm \cdot s^{-1})$	10	40	70
Frequency f/kHz	50	125	100

表 3 正交试验及仿真计算结果表

Tab. 3 Orthogonal experiment and simulation calculation results table

Std	Run	A Power P/W	B Scanning speed $v/(mm \cdot s^{-1})$	C Frequency f/kHz	Simulation Temp/K	Actual Temp/K	Roughness $R_a/\mu m$
11	1	75	10	200	807.3	805.6	5.127
3	2	50	70	125	294.1	288.3	0.382
13	3	75	40	125	423.9	412.7	1.873
14	4	75	40	125	412.3	401.5	1.915
10	5	75	70	50	321.8	315.4	0.553
2	6	100	10	125	1098.2	1083.5	6.723
5	7	50	40	50	334.3	327.8	0.437
6	8	100	40	50	413.0	403.1	2.689
7	9	50	40	200	350.6	340.8	0.291
8	10	100	40	200	761.0	743.2	3.215
4	11	100	70	125	357.9	340.5	0.714
15	12	75	40	125	437.3	422.3	1.721
9	13	75	10	50	538.5	530.8	3.845
16	14	75	40	125	426.5	411.5	2.012
12	15	75	70	200	312.9	305.6	0.468
17	16	75	40	125	436.5	419.5	0.468
1	17	50	10	125	413.1	393.4	1.326

4.1 激光参数的交互效应分析

本研究综合激光参数影响规律与方差分析结果,系统揭示了激光加工表面粗糙度的形成机制与控制策略,设计响应面法(RSM)的二次多项式回归数学模型,对正交试验结果进行方差分析,得到二次多项式回归模型为:

$$Ra = -4.2667611 + 0.1290743P + 0.0155689v -$$

$$0.004065f - 0.0016883Pv - 0.0001519vf - 0.0000896Pf + 0.00012144P^2 + 0.00084928v^2 + 0.000021495f^2$$

回归模型方差分析结果见表4。响应曲面分析与表的ANOVA结果共同表明,表面形貌变化受功率-速度协同效应的非线性影响,其作用机理可通过热输入累积效应、热分解和烧蚀行为的耦合作用进行解释。

表4 表面粗糙度回归模型方差分析

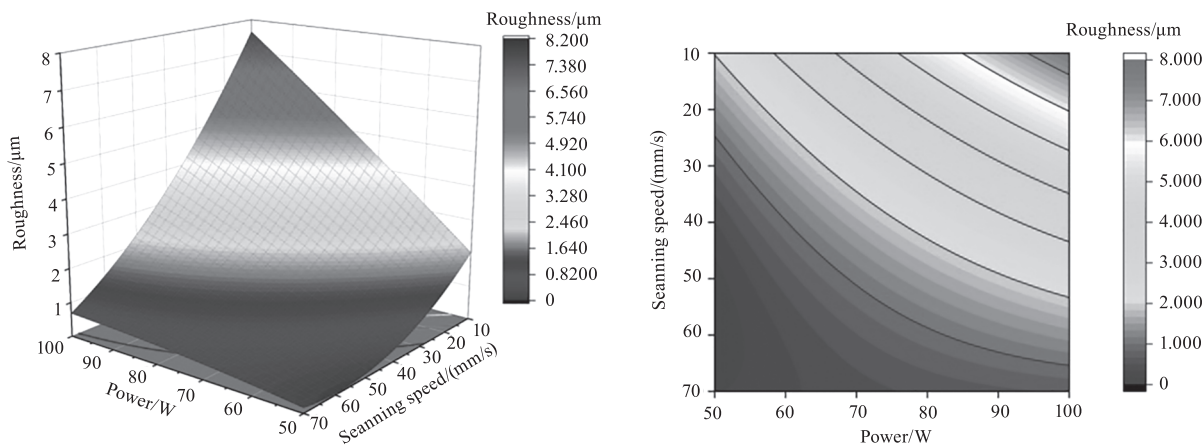
Tab.4 Regression model variance analysis of surface roughness

Source	Sum of Squares	df	Mean Squares	FP-value	P-value	Significance
Model	52.53	9	5.84	21.67	0.0003	significant
A - P	14.86	1	14.86	55.18	0.0001	/
B - v	27.77	1	27.77	103.07	<0.0001	/
C - f	0.3109	1	0.3109	1.15	0.3183	/
AB	6.41	1	6.41	23.81	0.0018	/
AC	0.1129	1	0.1129	0.4191	0.5380	/
BC	0.4672	1	0.4672	1.73	0.2293	/
A ²	0.0243	1	0.0243	0.0900	0.7728	/
B ²	2.46	1	2.46	9.13	0.0193	/
C ²	0.0780	1	0.0780	0.2895	0.6072	/
Residual	1.89	7	0.2694	/	/	/
Lackoffit	0.2462	3	0.0821	0.2002	0.8913	not significant
Pure Error	1.64	4	0.4099	/	/	/
Cor total	54.42	16	/	/	/	/
R ²	0.963	/	/	/	/	/
Adj - R ²	0.921	/	/	/	/	/

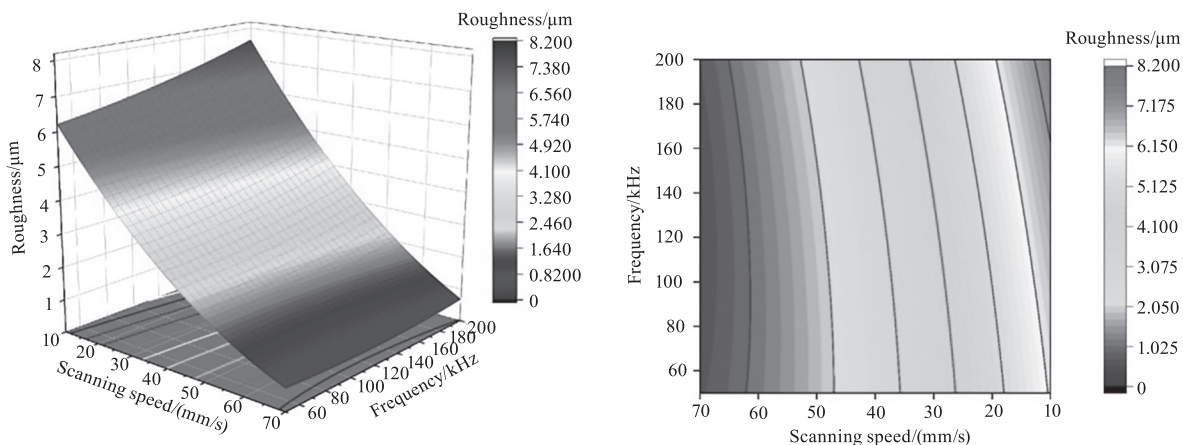
由图4可知功率与扫描速度交互作用对表面粗糙度(R_a)具有显著影响(AB项p=0.0018),当功率从70W增至100W时,速度对R_a的影响梯度由0.18 μm/(mm·s⁻¹)升至0.42 μm/(mm·s⁻¹),调节效率增强2.3倍;AB交互项贡献15.7%平方和(占总变异7.9%),速度二次项(B²项p=0.0193)表明工艺窗口存在临界转变特性,当速度超过v_c=65 mm·s⁻¹时R_a进入饱和区(速度每增10 mm·s⁻¹仅引起0.21 μm变化,p=0.38),与高速扫描下树脂热分解阈值未达导致的表面均匀化机制相关。扫描速度对表面粗糙度(R_a)具有主导效应(F=103.07,p<0.0001),方差贡献率51%,速度从20 mm·s⁻¹增至65 mm·s⁻¹时R_a由6.2 μm降至3.5 μm;功率主效应极显著(F=55.18,p<

0.0001),贡献率27.3%,功率40W增至100W时R_a由2.8 μm升至5.6 μm。频率参数在20~180 kHz范围内主效应(F=1.15,p=0.3183)、与速度交互作用(BC项p=0.2293)及与功率交互作用(AC项p=0.5380)和二次项(C²项p=0.6072)均未达显著性,印证其对表面形貌影响的次要性。

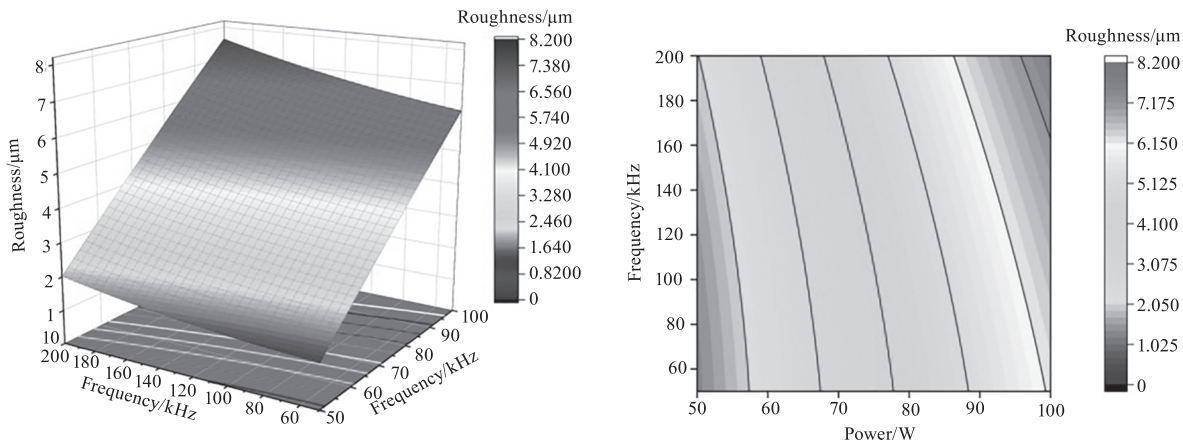
去除二次多项式回归模型中非显著项得到简化模型R_a = -4.2668 + 0.1291P - 0.0156v - 0.0017Pv - 0.00085v²,简化模型的预测结果与实验数据高度吻合(R_{adj}²=0.921)。如表5所示,优化方案在验证实验中表现出良好的一致性:高粗糙度组实测R_a = 7.92 μm(预测值8.15 μm,偏差2.8%),低粗糙度组实测R_a = 2.67 μm(预测值2.83 μm,偏差5.7%)。



(a) 激光功率 (W) 与扫描速度 (mm/s) 交互效应



(a) 频率 (kHz) 与扫描速度 (mm/s) 交互效应



(c) 频率 (kHz) 与功率 (W) 交互效应

图 4 表面粗糙度 (μm) 响应曲面与等高线分析

Fig. 4 Surface roughness (μm) response surface and contour analysis

表 5 回归模型优化方案的验证结果

Tab. 5 Verification results of process optimization scheme

Objective	Parameter Combination	Predicted $R_a/\mu\text{m}$	Measured $R_a/\mu\text{m}$	Relative Error/%
High roughness	$P = 98 \text{ W } v = 12 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$	8.151 ± 0.321	7.918 ± 0.282	-2.8
Low roughness	$P = 62 \text{ W } v = 55 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$	2.831 ± 0.272	2.659 ± 0.232	-5.7

4.2 表面形貌分析

图5为激光参数对复合绝缘子芯棒表面形貌影响的宏观观测结果,其中(a)~(h)对应激光功率(50~100 W), (e)~(h)对应扫描速度(10~70 mm/s)对表面形貌影响。表面形貌随激光参数变化呈现显著梯度演变:伴随功率由50 W提升至100 W,表面粗糙度(R_a)由0.437 μm 跃升至7.918 μm ,树脂去除显著提升。

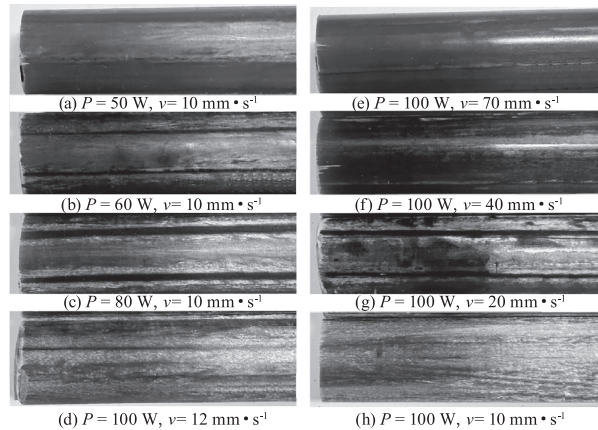


图5 激光参数对表面形貌影响

Fig. 5 The influence of laser parameters on surface morphology

图6的金相显微观察分析表明,结果表明激光功率是影响复合绝缘子芯棒表面烧蚀形貌的关键参数。50 W功率时表层烧蚀形貌并不明显,粗糙度未发生显著改变,这是由于能量输入不足导致树脂热解温度阈值未达到;当功率提升至100 W时,表面温度达827.6 K(参数组c),烧蚀形貌由离散态转变为连续结构,玻璃纤维暴露面积显著增加,标志着材料去除机制从热解主导模式向热烧蚀模式转变。

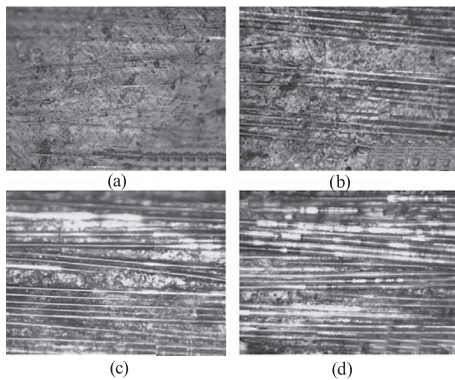


图6 激光功率对芯棒表面微观形貌影响

Fig. 6 The influence of laser power on the micro-morphology of the core rod surface

如图7的结果表明扫描速度是影响激光烧蚀形貌特征的关键激光参数。降低扫描速度显著延长了激光

能量在材料表面的作用时间,当速度从70 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 降至10 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,芯棒粗糙度显著增加,并伴随玻璃纤维暴露。此现象源于表面温度随速度降低呈指数增长,由396.9 K升至1098.2 K,树脂去除提升,表面粗糙水平提升。

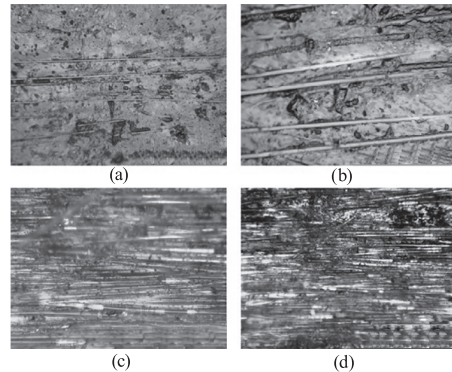


图7 扫描速度对芯棒表面微观形貌的影响

Fig. 7 Effect of scanning speed on the micro-morphology of the core rod surface

5 结论

本研究通过仿真建模分析了激光参数对复合绝缘子芯棒表面温度的影响规律,采用单正交试验和曲面响应分析方法计算相关激光参数下芯棒表面处理的最高温度,并研究了激光参数对芯棒表面形貌的影响及其显著性。主要结论如下:

(1)通过仿真计算和实验测温分析了不同激光参数对芯棒表面最高温度的影响。结果表明,各组激光参数下的仿真温度均未超过芯棒表面的碳化阈值,且实验测温结果与仿真温度高度吻合。这验证了仿真模型的准确性,并表明所选激光参数能够有效控制加工过程中的温度,避免材料表面的碳化现象,从而确保芯棒结构的完整性。

(2)激光参数中,激光功率的增加显著提升了芯棒表面粗糙度总体水平,特别是在低扫描速度条件下,功率对粗糙度的影响更为显著。而扫描速度对粗糙度的影响呈现非线性特征,低扫描速度下粗糙度迅速增加,高扫描速度下变化趋于平缓。激光频率对粗糙度的影响较小且变化均匀,且其与其他参数的交互作用不显著。

(3)复合绝缘子芯棒表面形貌主要受到激光功率和扫描速度影响,是表面粗糙度差异的主要原因。随着激光功率的提高,激光能量显著增强,芯棒外圈树脂层从热解机制转化为烧蚀机制并且效果显著增强,导致玻璃纤维大量暴露,也是导致表面粗糙度总

水平显著提高的重要原因。较低的扫描速度会导致凹槽间距减小,增加激光烧蚀路径的重叠区域,并且显著增加激光热能积累的时间,从而影响芯棒表面的整体形貌。

相较于传统的机械打磨和化学蚀刻工艺,激光处理在玻璃纤维增强复合绝缘子表面加工中展现出优势:避免残余机械应力、化学残留问题,并能通过精准调控激光参数优化表面粗糙度控制。但该技术仍存在局限性:激光表面处理会引入残余热应力,并且峰值温度过高、热能积累时间过长会导致基体损伤表面产生碳化反应,为满足工业生产适配性需求,激光表面处理仍存在设备成本高昂,工艺参数依赖材料物化特性专项优化等实践瓶颈,还需通过更多针对性研究实现突破。

参考文献:

- [1] Hua K. Study on influencing factors and development process of composite insulator core rod and sheath interface defects[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
华奎. 复合绝缘子芯棒和护套界面缺陷的影响因素及其发展过程研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [2] Liu X W, Li R F, Li X J, et al. Influence of composite insulator core with interface micro-crack on field strength and potential distribution[J]. Power & Energy, 2019, 40(5): 504 - 509. (in Chinese)
刘雪薇, 李如锋, 李学军, 等. 复合绝缘子芯棒界面微裂纹对场强电位分布性影响[J]. 电力与能源, 2019, 40(5): 504 - 509.
- [3] Min J Y, Wan H L, Carlson B E, et al. Application of laser ablation in adhesive bonding of metallic materials: a review[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 128: 106188.
- [4] Zhu C M, Lyu S S, Mei Y, et al. Effects of laser ablation on corrosion resistance of adhesive-bonded aluminum joint[J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(23): 2893 - 2897. (in Chinese)
朱传敏, 吕珊珊, 梅雨, 等. 激光烧蚀铝合金表面对其胶接接头耐腐蚀性能的影响[J]. 中国机械工程, 2017, 28(23): 2893 - 2897.
- [5] Wu Y, Kong H J, Ding X M, et al. Effect of laser treatment on properties of CFRP/aluminum adhesive[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2018, (4): 56 - 61. (in Chinese)
吴瑶, 孔海娟, 丁小马, 等. 激光处理对 CFRP 与铝胶接性能的研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2018, (4): 56 - 61.
- [6] Sun C C, Min J Y, Lin J P, et al. The effect of laser ablation treatment on the chemistry, morphology and bonding strength of CFRP joints[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2018, 84: 325 - 334.
- [7] Leone C, Genna S. Effects of surface laser treatment on direct co-bonding strength of CFRP laminates[J]. Composite Structures, 2018, 194: 240 - 251.
- [8] Yang X R, Jiang L, Li M. Experimental and simulated study on continuous laser ablation of glass fiber epoxy resin plate[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2023, 148: 107088.
- [9] Xie Y L, Yang B B, Lu L S, et al. Shear strength of bonded joints of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates enhanced by a two-step laser surface treatment[J]. Composite Structures, 2020, 232: 111559.
- [10] Liu M Q, Chen Y W, Zhang Y, et al. Weldability improvement of immiscible polycarbonate/GFRP by femtosecond laser surface treatment[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2023, 318: 118033.
- [11] Fang C H, Sun W, Fang Y, et al. Temperature characteristic of insulator wet cleaned by pulse laser[J]. Insulating Materials, 2020, 53(11): 96 - 102. (in Chinese)
方春华, 孙维, 方雨, 等. 脉冲激光湿式清洗瓷绝缘子温度特性研究[J]. 绝缘材料, 2020, 53(11): 96 - 102.
- [12] Ming X Z, Li W, Yang X D, et al. Research on femtosecond laser ablation model and morphology characteristics of face gear[J]. Laser & Infrared, 2025, 55(3): 374 - 381. (in Chinese)
明兴祖, 李湾, 杨向东, 等. 飞秒激光烧蚀模型与面齿轮形貌特征研究[J]. 激光与红外, 2025, 55(3): 374 - 381.
- [13] Yuan M X, Sun Y Q, Guo Y B. Research on surface microgrooves and wettability of titanium alloy processed by picosecond laser[J]. Laser & Infrared, 2025, 55(1): 33 - 39. (in Chinese)
袁美霞, 孙永强, 郭玉冰. 皮秒激光加工钛合金表面微槽及润湿性研究[J]. 激光与红外, 2025, 55(1): 33 - 39.