

引用格式:秦志鹏,魏高升,崔柳,等.基于微波加热的风力机叶片除冰性能数值模拟研究[J].电力科学与技术学报,2024,39(1):57-64.

Citation: QIN Zhipeng, WEI Gaosheng, CUI Liu, et al. Numerical investigation of de-icing performance of wind turbine blades based on microwave heating technology[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(1): 57-64.

基于微波加热的风力机叶片除冰性能数值模拟研究

秦志鹏, 魏高升, 崔柳, 杜小泽

(华北电力大学电站能量传递转化与系统教育部重点实验室, 北京 102206)

摘要:针对在冬季霜冻或雾凇等极端天气下,风力机叶片出现结冰影响风电机组出力,甚至导致冰块堆积脱落等问题,提出一种基于微波加热的风力机叶片除冰方法。通过在叶片复合材料中加入炭黑及碳纤维以改善叶片的微波加热性能。结合 COMSOL 和 MATLAB 语言开展联合仿真,对叶片中填充介质的参数进行优化设计,进而针对优化后的叶片复合材料开展微波加热除冰模拟,得到微波加热功率和环境温度对除冰时间的影响规律。最后,通过研究结果表明,最佳炭黑填充浓度为 3.98%,在此参数下,复合材料内的碳纤维形成了上下密集、中间稀疏的三明治结构,从而可有效提高复合材料的微波吸收率;随着微波功率的增加和环境温度的升高,除冰时间明显缩短,且微波功率对除冰时间的影响较环境温度更显著。

关键词:风力机叶片;微波特性;结构优化;微波加热;数值模拟;除冰

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.01.005 中图分类号:TK124 文章编号:1673-9140(2024)01-0057-08

Numerical investigation of de-icing performance of wind turbine blades based on microwave heating technology

QIN Zhipeng, WEI Gaosheng, CUI Liu, DU Xiaoze

(China Key Laboratory of Power Station Energy Transfer Conversion and Systems, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Wind turbine blades are susceptible to icing caused by frost or rime and other extreme weather conditions in winter, which directly affects the wind turbine output, even leads to safety problems such as ice accumulation and subsequent shedding. Therefore, it is necessary to investigate the anti/deicing technologies for wind turbine blades. In this paper, a deicing method for wind turbine blades based on microwave heating is proposed. To improve the microwave heating performance of the blade, carbon black and carbon fiber are incorporated into the blade composite. The study employs a combination of COMSOL and MATLAB to optimize the parameters of the filling medium within the blade. Subsequently, simulations are conducted to analyze the microwave heating and deicing performance of the optimized blade composite, examining the influences of microwave heating power and ambient temperature on deicing time. The results indicate that the optimum carbon black filling concentration is 3.98%. Under this condition, the carbon fibers within the composite form a sandwich structure-denser at the top and bottom and sparser in the middle, which effectively improves the microwave absorption rate of the composite. Furthermore, it is observed that increasing microwave power and ambient temperature significantly reduce the deicing time, with microwave power exerting a more pronounced effect compared to ambient temperature.

Key words: wind turbine blade; microwave properties; structure optimization; microwave heating; numerical simulation; deicing

频繁出现的极端天气,如冬季某些地区的霜冻和雾凇,会导致风机叶片结冰。研究表明^[1-5],结冰会导致风力发电机组的功率损失和出现安全问题。

文献[6]对叶片进行了结冰实验,文献[7]研究了大气结冰(风力机)和飞行中结冰(飞机)的异同,研究表明当明冰或雾凇冰积聚在叶片上时,升力减少,

收稿日期:2023-04-12;修回日期:2023-06-07

基金项目:国家自然科学基金(52176069)

通信作者:魏高升(1975—),男,博士,教授,主要从事传热传质与强化传热等研究;E-mail:gaoshengw@ncepu.edu.cn

阻力增加,导致负扭矩和风力机停转。因此,开展风力机叶片防/除冰的研究十分必要。

面对不同类型的结冰,可以采用不同防/除冰方法和策略。3种主要的热力防/除冰系统是微波除冰、电热元件除冰^[8-9]和热空气除冰^[10-13]。与其他2种防/除冰系统相比,微波除冰系统具有功耗低、热分布均匀等优点。微波加热的原理主要是依靠介电损耗,材料中的电磁波被吸收并转化为热能。介电常数是描述材料微波特性的重要参数之一,它是一个描述材料对电场响应的物理量。介电损耗正切角是一个描述材料中微波损耗的物理量,该值越大,材料在微波频率下的能量损失就越大。

微波加热除冰技术的研究目前主要集中在道路除冰领域^[14-17]。由于用于道路的混凝土和沥青材料与用于风力机叶片的纤维增强复合材料在结构和材料上存在明显差异,不同的微波发射方向对纤维增强复合材料的微波特性研究非常重要。科研人员对纤维增强复合材料的微波特性进行了大量研究^[18-20],并通过改变复合材料参数实现特定的微波特性^[21-22];此外,通过在复合材料中添加金属和各种形式的碳纳米填料(如炭黑、碳纳米纤维、碳纳米管、石墨、石墨烯等)^[14-15,23],能够显著提高材料的微波加热性能。

现代风力机叶片通常由多层纤维增强复合材料层组成。然而,目前针对风力机叶片复合材料微波加热除冰的研究还很少。本文提出一种微波加热材料优化设计的方法,用于风力机叶片的除冰。微波由磁控管产生,并通过安装叶片内部前腹板处的波导进行传输,在叶片需要加热的部位通过端口发出微波。由于碳纤维和炭黑材料具有较高的微波损耗正切角,因此用长碳纤维来代替风力机叶片复合材料中的部分玻璃纤维。炭黑粉末用于填充树脂基材料,可有效改善风力发电机叶片的微波吸收特性。本文采用COMSOL软件结合粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法对碳纤维和炭黑的参数进行了进一步优化,并对优化后的叶片复合材料进行了微波加热防/除冰特性模拟分析。

1 理论模型

1.1 物理模型

计算模型区域如图1所示。它包括复合材料层、冰层、空气层和完美匹配层(perfectly matched layer, PML),完美匹配层是一个边界条件,可以完

美地吸收所有入射电磁波。单个复合材料层的厚度为0.2 mm,为了简化模型的尺寸,截取叶片小部分材料进行模拟,模型的长度和宽度都设置为1 mm。复合材料中纤维材料体积分数为50%,纤维单向,均匀排列。纤维排列方向为最常用的0°/90°交叉排列,共10层。设置入射端口为横向电波(transverse electric wave, TE),是一种电场方向垂直于波的传播方向而没有磁场分量的电磁波。微波频率设定为10.7 GHz,波矢量沿Z轴方向,电场偏振方向沿Y轴。复合材料的上表面是1 cm厚的冰层。将模型四周设置成周期性边界条件,复合材料的下表面和冰层的上表面被设置为热绝缘的边界条件以简化研究。模型中涉及的材料参数见表1^[24-25]。

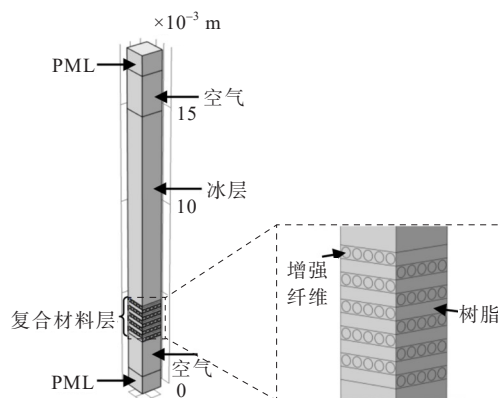


图1 计算域示意图

Figure 1 Schematic of computational domain

表1 相关材料的物性参数(微波频率:10.7 GHz)

Table 1 Physical parameters of relevant materials (microwave frequency: 10.7 GHz)

材料	介电常数 ϵ	材料密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	导热率 $k/$ $(\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}))$	比热容 $c_p/$ $(\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K}))$
碳纤维	轴向:12.311.8— $i*30.331.4$	1 770	50	712
	径向:23.7— $i*12.7$			
玻璃纤维	3.7	2 400	0.85	790
树脂	1	1 130	0.18	550
炭黑	$41-i*87.8$	1 800	0.28	850
水	$80-i*20.4$	1 000	0.58	4 200
冰	$3.2-i*0.0032$	920	2.20	2 100

1.2 数学模型

微波是频率在300 MHz和300 GHz之间的电磁波。本文采用麦克斯韦方程组建立计算模型的电磁场方程。麦克斯韦方程组的表达式如下:

$$\begin{cases} \nabla \cdot E = -\frac{\partial(\mu H)}{\partial t} \\ \nabla \cdot H = J_f + \frac{\partial(\epsilon E)}{\partial t} \\ \nabla \cdot (\epsilon E) = \rho_f \\ \nabla \cdot (\mu H) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, E 为电场; t 为时间; H 为磁场强度; J_f 为自由电流密度; ρ_f 为自由电荷密度; ϵ 为介质的介电常数; μ 为介质的磁导率。

在微波加热模拟中, 热源项通常与电磁场的功率密度有关^[26], 为实现电磁场和温度场的耦合, 式(1)常表示为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q' \quad (2)$$

$$Q' = \frac{1}{2} \omega \epsilon_0 \epsilon'' |E|^2 \quad (3)$$

式中, ρ 为材料密度, kg/m^3 ; c 为材料的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T 为温度, K ; t 为时间, s ; k 为材料的热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; Q' 为热源项, J ; ω 为微波入射的角频率, rad/s ; ϵ_0 为真空的介电常数, 取值 $8.854\ 187\ 817 \times 10^{-12} \text{ F}/\text{m}$; E 为电场强度, V/m 。

由于冰、水对微波能量吸收率具有明显差异, 在微波加热初始阶段, 热量从叶片向冰层传导, 冰层融化成水后, 微波对叶片及水层进行体积加热, 同时叶片与水层间进行热交换。

对于均匀分散的复合材料, 如含有炭黑的树脂基体, 为了平衡计算精度和速度, 通常使用麦克斯韦·加特尼(Maxwell-Garnett)有效介质理论来计算介电常数。其表达式如下:

$$\epsilon_c = \epsilon_i \frac{[L_0 + f(1 - 1 - L_0)] \epsilon_m + (1 - L_0)(1 - f) \epsilon_i}{L_0(1 - f) \epsilon_m + (fL_0 + 1 - L_0) \epsilon_i} \quad (4)$$

式中, ϵ_c 为复合材料的介电常数; ϵ_i 为基体的介电常数; L_0 为填充颗粒的去极化系数, 对于炭黑颗粒取 0.333; f 是填充颗粒的填充率; ϵ_m 是填充颗粒的介电常数。

复合材料的微波反射、传输和吸收系数是由 S 参数^[27] 计算出来的, S_{11} 为回波损耗特性, 其值越小表示传递过程反射越小, S_{21} 为正向穿透特性, 其值越大表示传递过程损失越小:

$$S_{11} = 10 \lg \Gamma \quad (5)$$

$$S_{21} = 10 \lg T \quad (6)$$

$$A = 1 - \Gamma - T \quad (7)$$

式(5)~(7)中, Γ 为反射系数; T 为传输系数; A 为吸收系数。

1.3 优化算法

为了获得叶片复合材料的最佳微波吸收率, 需要利用优化算法对纤维排列和炭黑填充比例进行优化。由于 PSO 算法具有全局搜索能力强、算法实现容易、适应性强、参数调整简单等优点, 本文将采用 PSO 算法和 COMSOL 进行联合优化仿真。在优化过程中, 每个指标的性能往往是相互制约的。在追求高吸收率的性能时, 通常会增加反射率, 所以需要在这 2 个指标之间寻求一个最佳的设计目标。因此, 目标函数构建为

$$F(x) = g_1(x) - g_2(x) = 0.8A(x) - 0.2\Gamma(x) \quad (8)$$

式中, x 为材料参数; $g_1(x)$ 为吸收率函数; $g_2(x)$ 为反射率函数。

对于复合材料的结构优化, 其中炭黑填充参数的选择是一个连续优化问题, 可以采用上述步骤进行。而碳纤维和玻璃纤维的排列优化是一个离散的优化问题, 可以通过二值化转化为连续问题, 然后用二进制粒子群优化(binary particle swarm optimizers, BPSO)算法来解决^[28]。BPSO 算法的基本思想是将搜索空间离散为 2 个状态, 即 0 和 1, 并将粒子的位置和速度都表示为二进制字符串。如图 2 所示, 0 代表玻璃纤维, 1 代表碳纤维, 叶片复合材料在 90° 方向有 25 束增强纤维, 其结构排列形成 5×5 的 01 矩阵。同样, 在 0° 方向有 25 束增强纤维。

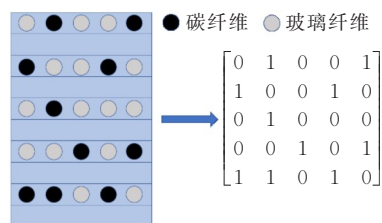


图2 纤维排列的二值化示意图

Figure 2 Binary representation of fiber arrangement

本文通过 COMSOL 软件和 MATLAB 联合仿真实现优化过程。首先, 在 COMSOL 模型中设置全局参数 f 为炭黑填充率, 根据炭黑填充率用有效介质理论计算炭黑和树脂混合基体的介电常数(式(4))。在材料模块中设置 50 束纤维材料切换功能, 实现材料切换。将模型保存为 MATLAB 可调用的 M 文件, 完成模型设置。然后, 运行 LiveLink for MATLAB 接口程序, 建立 COMSOL 模型和

MATLAB代码之间的连接。使用MATLAB在程序中打开COMSOL模型,设置炭黑填充率 f 以及模型纤维参数 x , x 是材料实例编号的 5×10 矩阵。调用COMSOL求解器来计算该模型。在获得 S 参数后,通过式(5)~(7)计算吸收率和反射率,以计算出粒子的适应度,然后依次更新粒子位置。算法结束时的最优粒子对应最佳目标函数下的复合材料结构。根据经验,PSO算法的种群规模为100,迭代次数为50。

1.4 模型验证

分别设置120 000、270 000和350 000个四面体的3组网格,并对网格无关性进行验证,确定270 000个四面体的网格大小足以满足计算的精度要求。为了验证计算结果的准确性,将模拟结果与文献[16]所作实验结果进行对比,仿真参数如改性混凝土块尺寸、微波加热功率、辐射高度等与实验保持一致,如图3所示。可以看出,含5%碳纤维的改性混凝土块在1.7~2.6 GHz不同微波频率下,参数 S_{11} 的实验值与模拟值的变化趋势一致,都是随着微波频率的升高而下降。模拟值和实验值之间的误差很小,在不同的微波频率下,误差都小于10%,这是可以接受的。

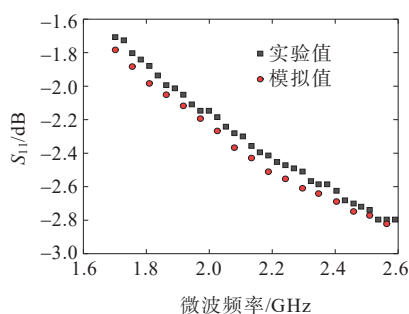


图3 模型有效性验证

Figure 3 Model validation

2 结果与讨论

2.1 复合材料叶片微波特性

2.1.1 碳纤维参数对叶片材料微波特性的影响

由于碳纤维的介电常数是各向异性的,通常碳纤维轴向的介电常数和电导率比径向的大得多。为了研究电场偏振方向对碳纤维增强复合材料微波性能的影响,规定平行于碳纤维排列方向的电场偏振方向为 0° ,如图4(a)所示,随着电场偏振角的增大,复合材料的 S_{11} 减小, S_{21} 增大。当微波电场偏振方向与碳纤维方向平行时,碳纤维中的自由电子

可以沿纤维方向自由移动,碳纤维在与其方向平行的电场偏振作用下可以沿纤维方向自由移动,它们在电磁场作用下不会来回振动,表现出较好的导电性,从而提高微波反射率,降低透过率。而当微波电场极化方向垂直于碳纤维方向时,垂直于纤维方向的电子运动受到限制,会导致表面的自由电子在电磁场作用下来回振动,在纤维径向的导电性较低,微波反射率相对较低,透过率较高。

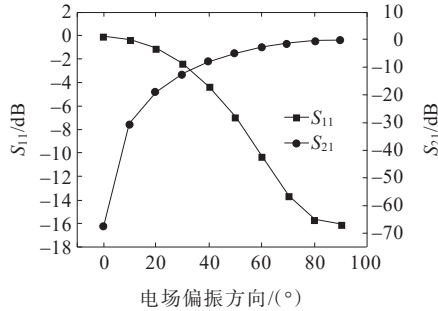
如图4(b)所示,随着碳纤维掺杂比的增加,复合材料的 S_{11} 上升, S_{21} 下降。碳纤维的导电性高于复合材料中的其他材料,因此碳纤维与基体材料之间的界面对微波的反射有很大影响。随着碳纤维掺杂比的增加,复合材料中导电材料的含量增加,导致碳纤维与基体材料之间的反射增强,微波反射率增加。在复合材料中,碳纤维增加了对微波能量的反射和吸收。因此,随着碳纤维掺杂比的增加,微波透射率下降。

为了研究不同碳纤维层交叉角对碳纤维增强复合材料 S 参数的影响,将第1层(底层)碳纤维轴向设置为垂直于电场极化方向,将第2层(顶层)碳纤维轴向按不同角度旋转。如图4(c)所示,随着碳纤维层交叉角度的增大,复合材料的 S_{11} 增大, S_{21} 减小。复合材料的微波反射率随双层碳纤维角度的增大而增大,是由于第2层碳纤维的方向与微波电场的偏振方向趋于平行,在电磁场中会表现出较好的导电性,从而增大微波反射率,降低微波透过率。其原因与电场偏振方向对微波特性的影响是一样的。

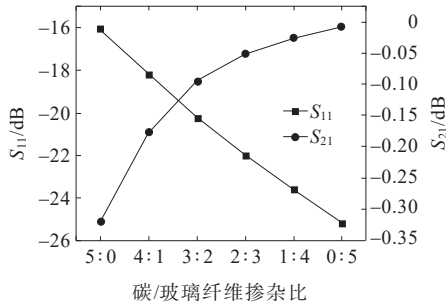
2.1.2 炭黑参数对叶片材料微波特性的影响

炭黑是一种优良的介电损耗材料,其作为填料加入树脂基体中,可以提高材料的导电性,增强复合材料对微波能量的吸收。为了研究炭黑填充浓度对复合材料微波性能的影响,设定材料厚度2 mm,炭黑填充浓度1%~10%,共10组工况,通过模拟得到各填充浓度下复合材料的 S 参数。如图5(a)所示,随着炭黑填充浓度的增加,复合材料的 S_{11} 上升, S_{21} 下降。由于炭黑具有良好的导电性和较高的介电常数,增加炭黑的填充浓度会提高复合材料的介电常数,从而逐渐提高其在微波频段的反射率。同时,炭黑的填充浓度越高,复合材料的微波传输部分越少,所以透射率下降。透射率的降低主要是由于复合材料中的炭黑颗粒吸收了微波能量并将其转化为热量,从而降低了复合材料的透射率。

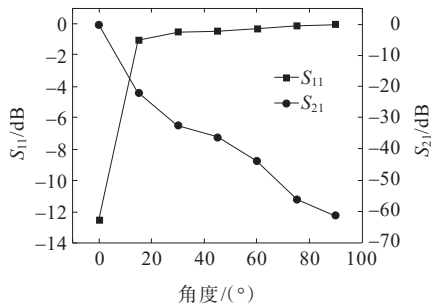
根据微波传输线理论,多层吸波材料的介电常数梯度的排列会对材料的微波性能产生影响,为了研究炭黑填充浓度梯度对复合材料微波性能的影响,设定复合材料的厚度为 2 mm,炭黑填充的平均浓度为 0.55%,材料中炭黑的上下浓度之差为 -9%~9% 共 5 组条件。如图 5(b)所示,随着炭黑填充物上下浓度差的增加,复合材料的 S_{11} 下降, S_{21} 上升。通常情况下,从微波入射方向看炭黑填充物的浓度由小变大时,微波可以首先通过炭黑填充物浓度较低的树脂基体传播,降低微波入射复合材料的反射率。然而,由于复合材料的厚度很薄,只有 2 mm,而且上下炭黑填料的浓度差相对较小,在本研究中,炭黑浓度梯度对复合材料的微波性能的影响非常小。



(a) 单层复合材料在不同微波电场偏振方向下的 S 参数



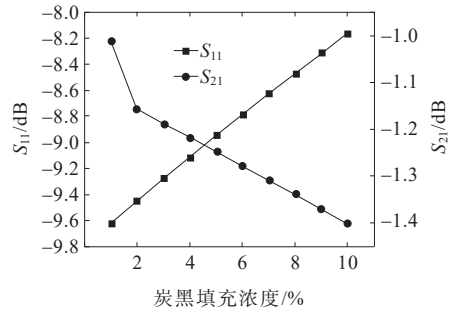
(b) 单层复合材料在不同碳/玻璃纤维掺杂比下的 S 参数



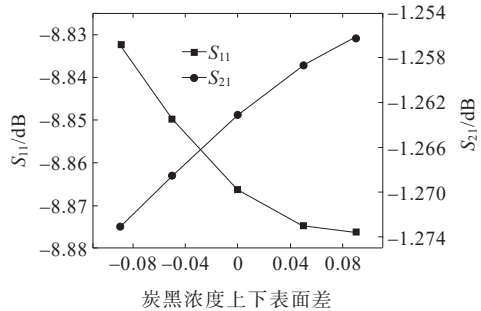
(c) 双层复合材料在不同碳纤维夹角下的 S 参数

图 4 不同碳纤维参数对 S 参数的影响

Figure 4 Effects of different carbon fiber parameters on S-parameters



(a) 炭黑填充浓度对复合材料 S 参数的影响



(b) 炭黑填充浓度梯度对复合材料 S 参数的影响

图 5 不同炭黑参数对 S 参数的影响

Figure 5 Effects of different carbon black parameters on S-parameters

2.2 优化后的复合结构叶片及性能

设定 100 个粒子进行搜索,经过 50 次迭代,得到叶片复合材料的适应度函数曲线如图 6 所示,可以看出,复合材料的微波吸收率在 34 次迭代后趋于稳定,最终优化函数对应的微波吸收率值为 0.20,反射率为 0.12,透射率为 0.68。适应度函数对应的炭黑填充率为 0.039 8,纤维 0°方向的排列方式如下:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

90°方向的排列方式如下:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

0°方向的增强纤维均为玻璃纤维,而 90°方向的碳纤维在顶部和底部密集,中间稀疏。碳纤维在 0°和 90°方向没有交叉,有利于降低复合材料的微波反射率,而且电场偏振方向与碳纤维径向一致,有利于提高微波吸收率。

图7给出了优化后模型的电场强度分布。可以看出,由于顶部和底部的碳纤维分布密集,顶部和底部的电场强度比中间高,说明这种夹层布置更有助于提高微波吸收率。碳纤维的填充将导致电磁波的反射和吸收增强,当碳纤维分布密集时,电磁波的传播受到很大限制,反射率增加,电磁波在复合材料的上下两层之间反复反射和散射,形成夹层结构,从而提高微波吸收率。

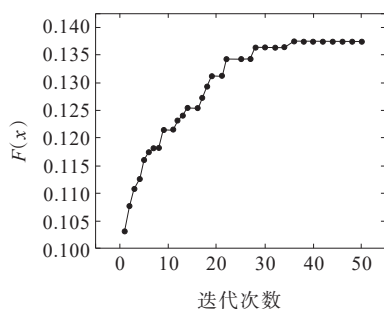


图6 复合材料参数的迭代优化

Figure 6 Iterative optimization of composite material parameters

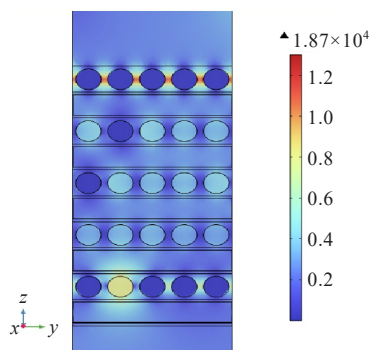


图7 复合材料内部截面的电场强度分布

Figure 7 Electric field intensity distribution in the internal section of the composite

2.3 叶片微波加热除冰热特性

为研究不同微波加热功率、环境温度及冰层对微波除冰特性的影响,经本文数值模型计算后,不同工况下复合材料表面温度曲线数据如图8所示。

在微波加热功率为 7 kW/m^2 , 冰层为 1 cm 的情况下,研究了冰层对复合材料温升率的影响,并与无冰层的温度变化进行了比较,结果如图8所示。可以看出,没有冰层的复合材料表面的温度随着加热而线性上升,而有冰层的表面温度则以阶梯式的方式上升,大致可以分为3个阶段:第1阶段,表面温度线性上升,部分微波能量被复合层吸收,剩余的大部分微波能量直接通过冰层散射到外部环境。

材料的温度在微波加热下上升,吸收的热量通过热传导逐渐转移到冰层,缓慢加热冰层。在这一阶段,冰层仍在 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下,冰对微波的吸收率极低,因此,冰层只能通过热传导的方式进行加热,其温度上升速率较低。在第2阶段,由于冰在 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 下的融化,复合表面的平均温度保持稳定。冰层需要吸收很多热量来融化,它吸收的热量首先用于打破冰的结晶结构,使其从固体变为液体,而不是温度上升。在第3阶段,表面温度线性上升,但温度上升速率显然比第1阶段大。在这个阶段,冰的复合表层已经融化成水,由于水的损耗正切角较大,是微波的良好吸收体,微波通过复合材料可以被水吸收,直接加热水层从而使表面温度迅速上升。在这个过程中,复合材料和水都吸收微波能量,然后转化为热能,这比第1阶段的微波能量更有效,因此,它明显提高了复合材料的温度上升速率。这一结果也与文献[29]中的实验温升曲线趋势一致。

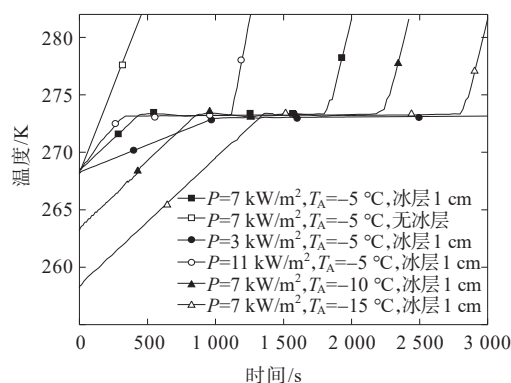


图8 不同条件下复合材料表面的平均温度曲线

Figure 8 Average temperature curves of the composite surface under different conditions

如图8所示,在环境温度为 $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ 、冰层为 1 cm 的情况下,还研究了微波功率对复合材料温度变化的影响。结果表明,微波功率对复合材料表面的平均温度有明显的影。随着微波功率的增加,冰的加热时间和融化时间都大大缩短,正如预期的那样,更多的热量被复合材料所吸收。

图8还给出了环境温度对除冰时间的影响,在微波加热功率为 7 kW/m^2 , 冰层为 1 cm , 环境温度分别为 -5 、 -10 、 $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,3条复合材料表面温度变化曲线沿时间轴呈向下平移趋势。在第1阶段,不同环境温度下的平均表面温度随时间线性上升,其斜率均保持一致。第1阶段的3条复合表面温度

直线的截距是相应的初始环境温度。平均复合表面温度达到冰水融化温度 0°C 的时间受到初始环境温度的影响。在第2阶段,不同的环境温度对复合材料表面温度保持在 0°C 的持续时间没有明显影响。在第3阶段,不同的环境温度对复合材料表面的平均温度变化曲线的斜率也没有明显的影响。环境温度对复合材料平均表面温度的影响主要体现在微波加热复合材料至冰层融点的第1阶段。环境温度越低,冰层加热需要的时间就越长。

3 结语

本文采用数值模拟结合PSO算法,对掺杂碳纤维和炭黑增强的叶片材料的微波加热性能进行了优化,同时对优化后的复合材料的微波加热和除冰过程进行了模拟。与炭黑填充参数相比,碳纤维排列参数对复合材料的微波性能影响更大。优化后的炭黑填充浓度为3.98%,复合材料内碳纤维的排列应形成上下密集、中间稀疏的夹层结构,这样可以增加微波在复合材料内的反射效应,提高微波吸收率。通过研究发现,叶片表面的温度变化呈现出3个明显的阶段。微波加热在防冰模式下具有更高的加热效率,微波功率的增加可以大大减少除冰时间,而环境温度主要影响冰的加热时间,对冰的融化速率影响很小。

参考文献:

- [1] 郑祚芳,范水勇,高华.风向偏差角对风机功率预测的影响[J].电网与清洁能源,2022,38(5):104-108+119.
ZHENG Zuofang, FAN Shuiyong, GAO Hua. The influence of wind direction deviation angle on wind power prediction[J]. Power System and Clean Energy, 2022,38(5):104-108+119.
- [2] 王聪,黄洁亭,张勇,等.风电机组叶片结冰研究现状与进展[J].电力建设,2014,35(2):70-75.
WANG Cong, HUANG Jieting, ZHANG Yong, et al. Status and advance in research on blade icing of wind turbines[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(2): 70-75.
- [3] 吕安强,魏伦.基于光纤传感技术的风机叶片故障检测技术研究进展[J].高压电器,2022,58(7):83-92.
LÜ Anqiang, WEI Lun. Research progress on fault detection technology of wind turbine blade based on fiber optic sensor[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(7): 83-92.
- [4] YIRTICI O, CENGİZ K, OZGEN S, et al. Aerodynamic validation studies on the performance analysis of iced wind turbine blades[J]. Computers & Fluids, 2019, 192: 104271.
- [5] GAO L Y, TAO T, LIU Y Q, et al. A field study of ice accretion and its effects on the power production of utility-scale wind turbines[J]. Renewable Energy, 2021, 167:917-928.
- [6] JASINSKI W, NOE S, SELIG M, et al. Wind turbine performance under icing conditions[C]//35th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, USA Reston, 1997.
- [7] MYONG R S. Atmospheric icing effects on aerodynamics of wind turbine blade[C]//ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, San Diego, California, 2013.
- [8] 马辉,张大林,孟繁鑫,等.复合材料部件电加热防冰性能试验[J].航空学报,2013,34(8):1846-1853.
MA Hui, ZHANG Dalin, MENG Fanxin, et al. Experiment of electro-thermal anti-icing on a composite assembly[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(8): 1846-1853.
- [9] 于周,舒立春,胡琴,等.风机叶片气动脉冲除冰结构脱冰计算模型及试验验证[J].电工技术学报,2023,38(13):3630-3639.
YU Zhou, SHU Lichun, HU Qin, et al. De-icing calculation model of pneumatic impulse de-icing structure for wind turbine blades and experiment verification[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(13): 3630-3639.
- [10] LUO Y S, LIU J, CHEN Q, et al. Research control strategy of hot air blower de-icing system for MW wind turbine blade[C]//Proceedings of the 2016 4th International Conference on Renewable Energy and Environmental Technology (ICREET 2016), Shenzhen, China, 2017.
- [11] XIE T, DONG J K, CHEN H W, et al. Experimental investigation of deicing characteristics using hot air as heat source[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 107: 681-688.
- [12] DOMINGOS R, PAPADAKIS M, ZAMORA A. Computational methodology for bleed air ice protection system parametric analysis[C]//Proceedings of the AIAA Atmospheric and Space Environments Conference, Toronto, Ontario, Canada, 2010.
- [13] BATTISTI L, BAGGIO P, FEDRIZZI R. Warm-air intermittent de-icing system for wind turbines[J]. Wind Engineering, 2006, 30(5): 361-374.
- [14] DING L T, WANG X C, CUI X Z, et al. Development and performance research of new sensitive materials for microwave deicing pavement at different frequencies[J].

- Cold Regions Science and Technology,2021,181:103176.
- [15] HUANG H, XU J Y, YAO A, et al. Study on microwave deicing of carbon-fiber-modified concrete under multi-factor coupling effect[J]. Applied Sciences, 2022, 12(11): 5551.
- [16] LU S, XU J Y, BAI E L, et al. Investigating microwave deicing efficiency in concrete pavement[J]. RSC Advances, 2017, 7(15): 9152-9159.
- [17] WANG C, YANG B, TAN G F, et al. Numerical analysis on thermal characteristics and ice melting efficiency for microwave deicing vehicle[J]. Modern Physics Letters B, 2016, 30(13): 1650203.
- [18] 万晓霞, 宋宇华, 李永波, 等. 夹杂长碳纤维束电路模拟结构复合材料吸波性能[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(5): 120-124.
WAN Xiaoxia, SONG Yuhua, LI Yongbo, et al. Absorption performance of analog structural composites with long carbon fiber beam circuits[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(5): 120-124.
- [19] ARTNER G, GENTNER P K, NICOLICS J, et al. Carbon fiber reinforced polymer with shredded fibers: quasi-isotropic material properties and antenna performance[J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2017, 2017: 6152651.
- [20] 汪龙. 环氧基吸波涂层的结构设计及吸波性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
WANG Long. Research on the structural design and the absorbing performance of epoxy resin on microwave absorption plates[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- [21] DE ROSA I M, MANCINELLI R, SARASINI F, et al. Electromagnetic design and realization of innovative fiber-reinforced broad-band absorbing screens[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2009, 51(3): 700-707.
- [22] NEO C P, VARADAN V K. Optimization of carbon fiber composite for microwave absorber[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2004, 46(1): 102-106.
- [23] PROCIAK A, STERZYNSKI T, MICHALOWSKI S, et al. Microwave enhanced foaming of carbon black filled polypropylene[J]. Cellular Polymers, 2011, 30(4): 201-214.
- [24] HONG W, XIAO P, LI Z, et al. Microwave radial dielectric properties of carbon fiber bundle: modeling, validation and application[J]. Carbon, 2014, 79: 538-543.
- [25] HONG W, XIAO P, LUO H, et al. Microwave axial dielectric properties of carbon fiber[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 14927.
- [26] TAMANG S, ARAVINDAN S. 3D numerical modelling of microwave heating of SiC susceptor[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 162: 114250.
- [27] QIN F X, PENG H X, CHEN Z, et al. Optimization of microwire/glass-fibre reinforced polymer composites for wind turbine application[J]. Applied Physics A, 2013, 113(3): 537-542.
- [28] PEGADO R, ÑAUPARI Z, MOLINA Y, et al. Radial distribution network reconfiguration for power losses reduction based on improved selective BPSO[J]. Electric Power Systems Research, 2019, 169: 206-213.
- [29] CHEN H W, XU J Y, WU Y Q, et al. Study on the thermodynamic properties of concrete surface during microwave deicing of airport pavement[J]. Materials, 2020, 13(16): 3557.