

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.08.011

基于改进粒子群PID的CFRP感应加热升温调控

闫珊¹, 付天宇¹, 古云飞¹, 杨宁²

(1.常州信息职业技术学院智能装备学院,江苏常州 213164; 2.山西大同大学计算机与网络工程学院,山西大同 037009)

摘要: 碳纤维复合材料(CFRP)在日常生活中的应用日益广泛,传统的固化成型方式,升温速率较慢、能量损耗较高、污染严重,因此采用了基于电磁感应加热方式对CFRP进行加热升温。但CFRP因其复合结构和感应加热升温特性,热量由纤维组织中产生逐渐向外扩散,导致了其加热过程中温度场变化存在一定的滞后性。以CFRP等效电磁热特性建立了CFRP有限元微观模型,系统分析了平纹编织结构的CFRP在加热过程中的升温机理、温度场分布状态及表面温度的滞后性的变化规律。同时,建立了宏观层合模型模拟计算了CFRP层间热传导过程以及层间温度传导的滞后性,揭示了CFRP平板在感应加热作用下热量的产生及热量在纤维和树脂之间的传导规律,验证了CFRP在感应加热过程中温度变化的滞后性。因此提出了基于改进惯性权重参数的粒子群PID控制方式,该方式降低了材料加热过程中温度超调量,提高了加热过程中的抗干扰能力,并通过实验验证了该算法对不同加热温度及不同厚度的CFRP平板在感应加热过程中温度控制的效果较好。

关键词: 碳纤维;复合材料;温度控制;温度场;感应加热

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)08-0072-09

Temperature control of CFRP induction heating based on improved particle swarm PID

YAN Shan¹, FU Tianyu¹, GU Yunfei¹, YANG Ning²

(1. Intelligent Equipment Institute, Changzhou College of Information Technology, Changzhou 213164, China;

2. School of Computer and Network Engineering, Shanxi Datong University, Datong 037009, China)

Abstract : The application of carbon fiber composite materials (CFRP) in daily life is becoming increasingly widespread. The traditional curing and molding method has a slow heating rate, high energy loss, and serious pollution. Therefore, electromagnetic induction heating method to heat CFRP was used. However, due to its composite structure and induction heating characteristics, CFRP generates heat from the fiber texture and gradually diffuses outward, resulting in a certain lag in the temperature field changes during its heating process. A finite element micro model of CFRP based on its equivalent electromagnetic thermal characteristics was established, the heating mechanism, temperature field distribution, and hysteresis of surface temperature of CFRP with plain weave structure during the heating process were systematically analyzed. At the same time, a macroscopic laminated model was established to simulate and calculate the interlayer heat conduction process and the hysteresis of interlayer temperature conduction in CFRP, revealing the heat generation of CFRP plates under induction heating and the heat conduction law between fibers and resins, and verifying the hysteresis of temperature changes in CFRP during induction heating. Therefore, a particle swarm PID control method based on improved inertia weight parameters was proposed, which reduced temperature overshoot during material heating process, improved anti-interference ability during heating process, and through experiments that the algorithm has good temperature control effect on CFRP flat plates with different heating temperatures and thicknesses during induction heating process was verified.

Keywords : carbon fiber ; composite material ; temperature control ; temperature field ; induction heating

由于碳纤维复合材料(CFRP)自身优良的物理领域的需求逐渐扩大,对CFRP的固化成型要求也不断提高^[3-4]。传统的CFRP固化成型方式主要通过

基金项目: 国家自然科学基金项目(52303031),校级重点实验室项目(KYPT202203Z)

通信作者: 付天宇,博士,讲师,研究方向为热固和热塑性碳纤维复合材料成型及材料表面修复

收稿日期: 2024-06-05

引用格式: 闫珊,付天宇,古云飞,等.基于改进粒子群PID的CFRP感应加热升温调控[J].工程塑料应用,2024,52(8):72-80.

YAN Shan, FU Tianyu, GU Yunfei, et al. Temperature control research based on the lag effect of CFRP induction heating[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(8): 72-80.

空气热对流、热辐射、热接触的方式使热量从表面逐渐传导至内部导致能源的浪费较为明显,学者们正在探索一种清洁高效的能源电磁感应作为CFRP固化加热方式^[5-8]。然而,CFRP自身属性的各向异性、混合及层合结构,同时在加热过程中多场耦合的共同作用下,影响其加热效果^[9],因此提高CFRP加热过程中的温度控制精度,是将感应加热技术与CFRP固化成型相结合的前提条件。

对于感应加热过程中的温度控制和CFRP在感应加热作用下的温度场调控研究,学者们对控制方法和温度场变化规律进行了大量研究^[10-12],例如Fu等^[13]提出了一种有限元细观模型,实现了在感应加热过程中纤维织构与树脂基体温度场变化规律的独立分析。Lundström等^[14]提出了一种结合电热特性的数值分析方法,实现了不同纤维含量和铺层厚度的CFRP平板的温度场计算。Du等^[15]基于模糊PID温度控制策略实现料筒的感应加热温度控制,其控制效果较传统效果更好。Chowdhury等^[16]提出了一种模糊自整定PID控制器,提高了预热回收系统稳态和瞬态热工况下的设定点跟踪和扰动抑制能力。尽管学者们对感应加热过程中温度控制策略有了相应的研究成果,然而在CFRP感应加热领域尚未找到相关研究。

由于CFRP中的纤维织构包裹在树脂基体内部且复合材料又为层合结构,以及在感应加热过程中材料中所产生的热量在层与层之间的传导,使得材料内部与表面之间存在一定的温度差,而温度控制系统本身又存在滞后性,导致了CFRP感应加热过程中升温控制难度的提升。因此,为了表征CFRP在感应加热过程中温度场分布状态,更加直观反映出材料内部温度的变化规律,采用了有限元宏观模型相结合的方式温度场变化分析,并提出了改进粒子群PID控制算法,实现在感应加热过程中参数的自适应调控。

首先,根据CFRP的等效电磁热特性,建立电-磁-热耦合的CFRP感应加热的多物理场有限元细观分析模型,将纤维织构和树脂基体独立表征几何体,其中纤维织构通过树脂基体进行包裹,可反映出在加热过程中温度从纤维织构传导至树脂表面的情况,而后通过有限元宏观模型建立多层CFRP结构模拟计算感应加热过程中,材料层间的热量传

导情况,获得材料内部与表面温度场的变化规律。最后建立了基于惯性权重参数的改进粒子群PID(PSO-PID)控制策略,降低材料在感应加热作用下降温的超调量,提高升温过程控制的精确性。

1 CFRP感应加热模型建立

1.1 CFRP感应加热理论模型

在感应加热过程中CFRP预浸布铺层结构所产生的热量主要依靠其内部产生的涡旋电流沿闭合回路流动所产生的焦耳热,其涡旋电流闭合回路如图1所示,可以看出在CFRP感应加热过程中其内部热源的组成有电阻加热、电容加热以及阻容加热,而学者们在先前的研究中发现了材料内部的焦耳热产生主要是由纤维束之间的接触电阻与纤维轴向自身电阻所产生的电阻加热构成,因此笔者在模型建立时未考虑材料的电容加热特点。

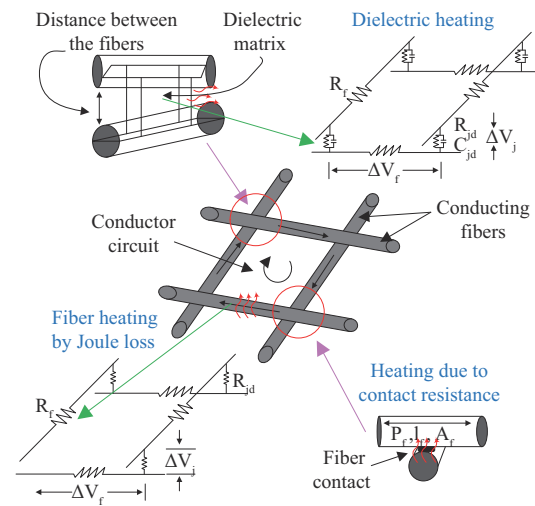


图1 CFRP感应加热纤维间电路传导原理图

Fig. 1 Circuit conduction schematic diagram between CFRP induction heating fibers

碳纤维磁场通量密度 B 由公式(1)确定:

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (1)$$

式中: μ_0 和 μ_r 分别为真空和相对磁导率, H 为磁场强度矢量。

磁矢量势 A (Wb/m)通过公式(2)确定:

$$B = \nabla \times A \quad (2)$$

交变磁场在碳纤维织构中产生感应电场 E (V/m),以频率的形式可以表达为公式(3):

$$E = -j\omega A \quad (3)$$

式中: $j = \sqrt{-1}$,是虚数单位; $\omega = 2\pi f$ ($\frac{\text{rad}}{\text{s}}$),为角频率; f 为磁场频率。

纤维织构中总电流 J_t 由传导电流 $J_i = \sigma E$ 和位移电流 $J_d = j\omega D$ 之和组成。

纤维织构中的涡旋电流与其自身电阻所产生的焦耳热作为 CFRP 的加热热源,其中热源 $Q_{th,i}$ (W/m^3) 可以表示为公式(4)。

$$Q_{th,i} = J_t \cdot E \quad (4)$$

纤维束中的热量转移到了周围纤维束、树脂及环境空气中,通过傅里叶热传导定律表示为公式(5)。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q \quad (5)$$

式中: ρ 为密度, kg/m^3 ; C_p 为比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; k 为导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; Q 为发热量, W/m^3 。

1.2 仪器及设备

碳纤维复合材料是由碳纤维织构和树脂基体组成,为了表征碳纤维复合材料各组分以及各组分之间在电磁感应作用下所产生的物理场变化状态,以平纹编织结构为例进行研究,基于电-磁-热耦合的 CFRP 感应加热多物理场理论,建立了一种纤维织构与树脂基体独立表示的有限元细观分析模型,图 2a 所示为 CFRP 平纹编织织构,图 2b 为复合材料的树脂基体,纤维织构、树脂基体以及感应加热线圈组合成图 2c 中的 CFRP 感应加热有限元分析模型。可以看出此时碳纤维织构被树脂基体包裹在其内部,感应加热线圈放在 CFRP 平板上侧,而为了更好的测量加热过程中温度数值的变化,减少磁场对传感器的影响,通常将红外温度传感器放置在平板的另一侧。同时,为体现材料磁热属性的各向异性,在加热过程中温度场的变化,采用了螺线圈结构进行加热。

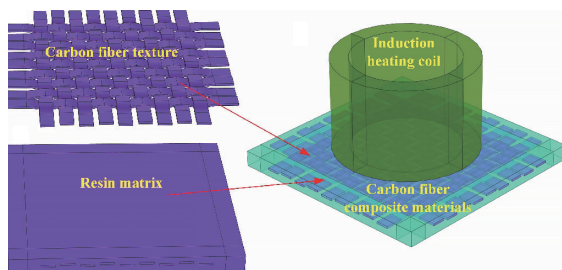


图2 平纹编织CFRP平板几何模型

Fig. 2 Geometric model of plain weave CFRP flat plate

模型中 CFRP 平板尺寸 $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$, 厚度 5 mm , 线圈尺寸为 $\Phi 30 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$, 频率为 16 kHz , 电流为 13 A , 设置外部环境温度为恒温条件下

20°C 。表 1 为碳纤维和树脂的参数。

表1 仿真模型参数

Tab. 1 Simulation model parameters		
Item	Carbon fibre	Resin
Thermal conductivity coefficient/ [$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$]	30	0.2
Heat capacity/[$\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$]	1 000	1 000
Density/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 500	1 200
Conductivity/($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$)	6.4×10^4	1×10^{-2}
Relative dielectric constant	—	3.2
Relative magnetic permeability	1	1

2 CFRP 感应加热过程温度场变化分析

图 3 为 CFRP 在感应加热初始阶段材料内部的纤维织构以及树脂基体表面的温度场分布变化规律。由图 3 可以看出,在加热过程中纤维织构作为加热热源其温度变化响应速度极为明显,在加热仅 1 s 时,在线圈所对应的纤维织构中区域有较为明显的环形温度场上升,其温度上升了 5.2°C 左右,也说明了感应加热 CFRP 有较快的响应速度及较高的加热效率,然而热量从纤维织构中传导至材料表面需要通过树脂基体作为传导媒介,而树脂基体的热传导系数较低,因此导致了此时的 CFRP 表面温度仅为 20.4°C ,可以看出在加热过程中材料表面的温度相对于纤维织构而言存在一定的滞后性,因此在采用感应加热方式对 CFRP 升温固化的过程中,需要考虑材料温度升温的滞后性问题,以提高升温过程中控制的准确性。

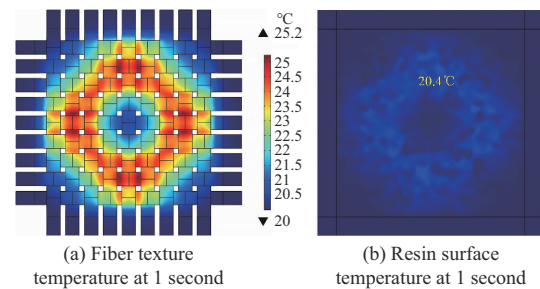


图3 纤维织构及树脂基体表面的温度场分布

Fig. 3 Temperature field distribution of fiber texture and resin matrix surface

图 4 为 CFRP 平板感应加热至稳态过程中,材料表面温度场从 5 s 开始加热至 30 s 之间的分布变化规律。从图 4 可以看出,材料在感应加热过程中其温度场从内部纤维织构逐渐向着材料表面传导使得材料表面温度场逐渐上升。同时温度场主要集中在在线圈所对应的外圆区域进行分布,表面温度场逐渐向中心区域及四周扩散,中心区域温度场升温

更加迅速,且温度场在加热过程中始终呈现十字形分布状态,因此在进行感应加热温度控制时,红外温度传感器所采集的温度数值变化点设置在线圈外圆所对应的材料表面。

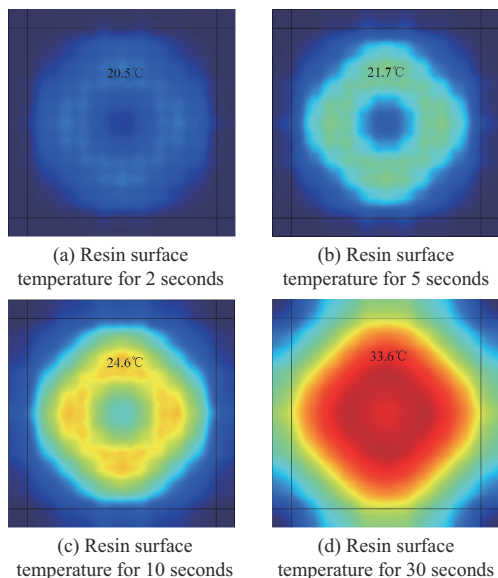


图4 材料表面加热过程中温度场变化规律

Fig. 4 Temperature field variation during material surface heating process

图5为感应加热初始阶段碳纤维的升温速率变化与材料表面的温度变化曲线图,此时温度采集点设置在线圈外圆所对应的纤维织构和树脂基体表面,从图5加热0~35 s过程中升温速率变化情况可以看出,在加热初始阶段材料内部碳纤维织构温度场响应迅速,升温上升速率较快,而材料表面热量需要从内部传导,导致材料表面温度初始阶段响应速度较慢,尤其在加热前2 s过程中,材料表面温度上升缓慢且温度数值变化极小,纤维与树脂表面温度差距逐渐增加。当加热到第8 s时纤维织构与材料表面的温度差达到最大,此时温度差为5.4 °C,同时从图5可以看出,随着加热的持续进行,温度数值的差距逐渐缩小,在加热至50 s时纤维与材料表面温差仅为3.6 °C,说明了此时树脂基体的升温速率逐渐加快。

图6为加热100~150 s过程中纤维织构的升温速率变化与材料表面的温度变化曲线图,从图6可以看出,此时纤维与材料表面温度数值之差缓慢增加,在加热100 s时纤维织构中温度数值55.7 °C,材料表面温度数值52.2 °C,相差3.5 °C,而加热至150 s时纤维织构与树脂基体温度差达到了3.7 °C,可以看出此时纤维与材料表面温度数值差距逐渐增加。

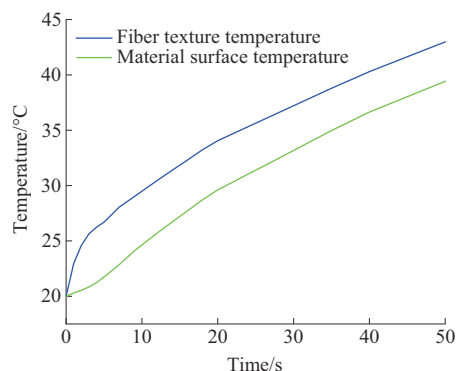


图5 纤维织构和材料表面温度上升曲线

Fig. 5 Rise curve of fiber texture and material surface temperature

通过对CFRP感应加热过程中纤维织构和材料表面的温度场数值分析,可以看出两者之间温度数值存在一定差异,同时温度数值的差异是在逐渐变化的,因此如何准确地控制材料升温过程,是感应加热技术在CFRP领域应用的关键。

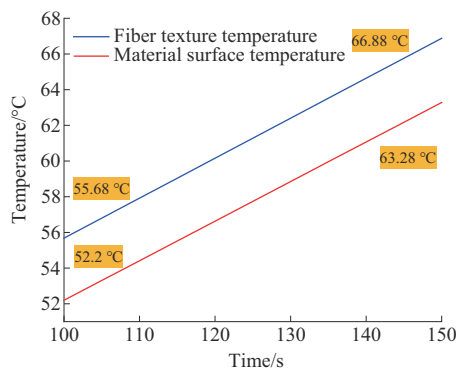


图6 100~150 s纤维织构与材料表面的升温变化曲线

Fig. 6 Temperature rise curve of 100~150 s fiber texture and material surface

图7为CFRP加热至15 min后材料温度场基本达到稳态其内部纤维织构与树脂基体的表面温度场分布状态,图7a为加热稳态后的纤维织构温度场情况,此时温度场最高数值达到161 °C,而树脂基体表面最高温度数值仅为156 °C,可以看出尽管材料

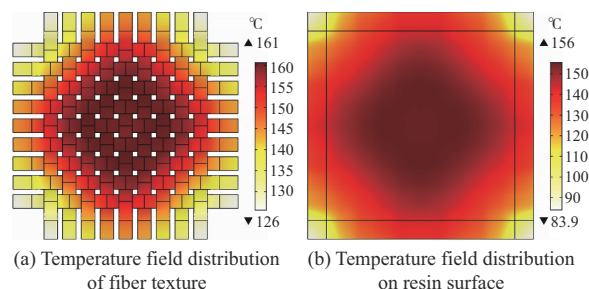


图7 加热至15 min后纤维织构与树脂基体的表面温度场

Fig. 7 Surface temperature field of fiber texture and resin matrix after heating to 15 minutes

加热至 15 min 后树脂基体表面的温度数值仍然低于纤维织构中的温度数值,此时纤维与树脂表面存在 5℃左右的偏差,也说明了材料从加热 100 s 后纤维与材料表面的温度差持续扩大。

图 8 为平纹编织 CFRP 感应加热温度场有限元宏观模型,图中所示为 CFRP 预浸布铺设的多层结构,材料单层厚度 1.5 mm,预浸布之间存在一定的树脂薄膜,其薄膜厚度设置为 0.15 mm,在有限元软件中设置材料层间接触采用等效薄膜电阻形式,仿真中初始环境温度为 20℃。

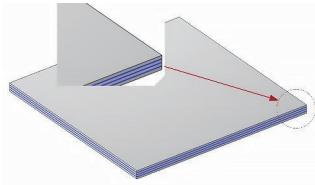


图 8 平纹编织 CFRP 宏观模型

Fig. 8 Macro model of plain weave CFRP

宏观情况下的 CFRP 比热容是由树脂和纤维按比例混合后获得,所使用的 CFRP 预浸布的纤维体积分数为 60%,其材料整体的比热容计算公式见公式(6)。

$$C_c = \frac{V_f \rho_f C_f + V_r \rho_r C_r}{\rho_c} \quad (6)$$

式中: ρ_f , V_f , C_f 分别为纤维密度、纤维体积分及纤维热容; ρ_r , V_r , C_r 为树脂密度、树脂体积分及树脂热容; ρ_c 为 CFRP 密度、 C_c 为 CFRP 比热容。

同时基于稳态 CFRP 法对碳纤维复合材料的热导率进行测量计算,计算公式如公式(7)所示。

$$\lambda_x = -\frac{q_x}{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)} \quad (7)$$

式中: q_x 为 x 方向上的热流密度, W/m^2 ; $\frac{\partial T}{\partial x}$ 为 x 方向上的温度梯度, K/m 。

本模型中的平纹编织 CFRP 电导率及其他参数由生产厂家获取,图 9 为 CFRP 宏观模型感应加热至 10 s 时的温度场分布规律,图 9a 为 CFRP 平板贴近感应加热线圈一侧,此时最高温度达到 31.2℃,图 9b 为 CFRP 平板远离线圈一侧,此时最高温度为 26.8℃。从图 9a 和图 9b 可以看出,材料两侧温度场分布情况基本相同,但其数值大小具有明显的变化,说明材料从接近线圈一侧到远离线圈一侧温度数值逐渐下降,证明热量在层间传导过程中存在一定的滞后性。图 10 为 CFRP 平板在加热至稳态后材料上、下表面温度场分布情况,从图中可以看出,当

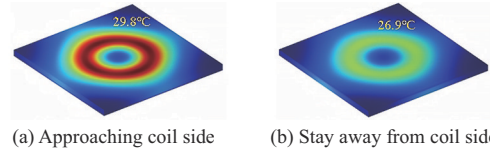
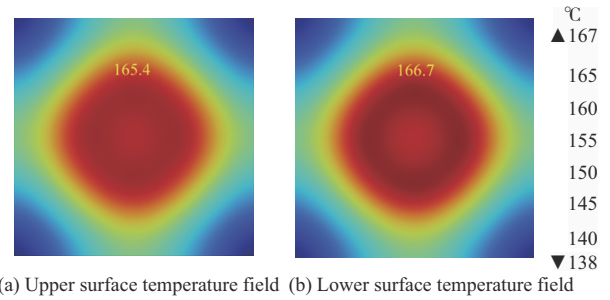


图 9 CFRP 宏观模型感应加热至 10 s 时的温度场分布规律

Fig. 9 Temperature field distribution pattern of CFRP macroscopic model under induction heating up to 10 s



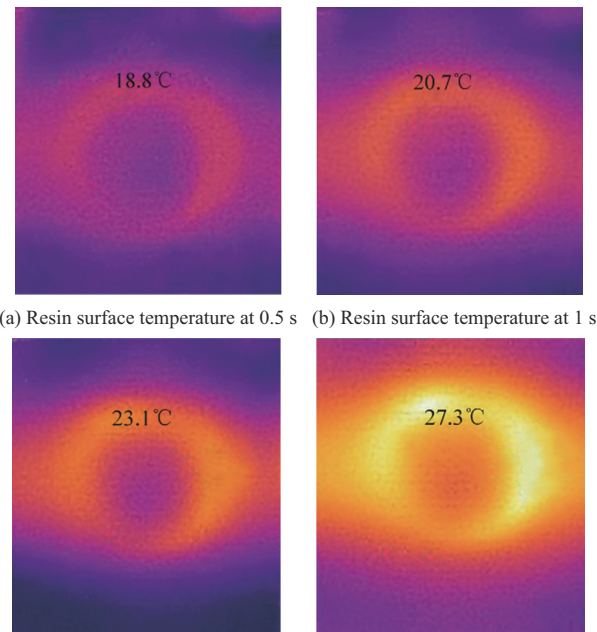
(a) Upper surface temperature field (b) Lower surface temperature field

图 10 加热至稳态后上下表面的温度场

Fig. 10 Temperature field of upper and lower surfaces after heating to steady state

达到稳态后,CFRP 平板上、下表面温差减少至 1℃左右,说明了在材料升温至相对稳定后,上表面温度场数值基本接近。因此在材料升温过程中需要考虑到材料内部温度传导时间,在升温过程中存在一定的温度惯性上升趋势。

图 11 为平纹编织 CFRP 感应加热实验过程中的温度场分布图像,图中所示为感应加热实验过程中



(a) Resin surface temperature at 0.5 s (b) Resin surface temperature at 1 s

(c) Resin surface temperature at 4 s (d) Resin surface temperature at 7 s

图 11 感应加热实验过程中的温度场分布图像

Fig. 11 Temperature field distribution image during induction heating experiment

7 s内材料表面温度场变化规律,与模拟计算情况基本相符。而实验中材料表面温度场变化与模拟计算结果在时间节点上略有不同,这是由于模拟计算过程中为了体现出CFRP在感应加热时材料表面温度的滞后性,所设置的树脂层较厚延缓了温度传导时间,而模拟结果与实验过程中表面温度场变化效果基本一致,说明本文中的仿真可以有效且规律地对碳纤维复合材料在感应加热过程中温度场变化进行研究。

图12为铺设4层结构的平纹编织CFRP平板,以及测量层间温度变化规律的电阻式温度传感器及其设备。此时感应加热线圈在CFRP下方,为了减少磁场对温度传感器的影响,将线圈与CFRP平板之间距离减少并将传感器设置在远离线圈外圆10 mm处,将两传感器分别布置在材料的上下两侧并连接到温度采集装置上。



图12 CFRP感应加热层间温度场测量

Fig. 12 Measurement of interlayer temperature field in CFRP induction heating

图13为经平滑处理后的CFRP感应加热过程中材料上、下表面温度变化曲线,可以看出CFRP平板的上、下表面升温速率存在一定差异,在加热至200 s时,温度差相差约4.2 °C,也可以看出当材料达到一定厚度后,层与层之间的热传导对材料的温度场有一定的影响,同时也证明了上文中有限元模型分析的准确性。

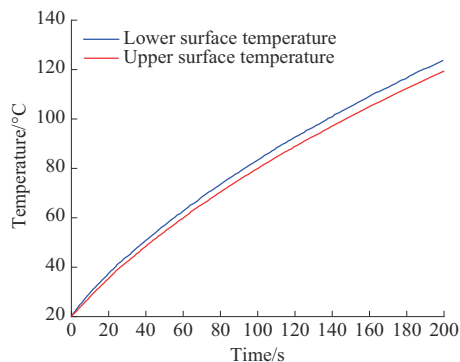


图13 温度传感器所采集到的材料层间和表面的温度曲线

Fig. 13 Temperature curves of interlayer and surface materials collected by temperature sensors

3 CFRP 感应加热温度控制研究

3.1 温度控制理论模型分析

在感应加热过程中,由于碳纤维复合材料中树脂基体与纤维织构的混合方式及碳纤维复合材料的层间热传导过程,导致了红外传感器所采集到的温度数值与材料实际内部温度数值之间存在一定差异,同时温度控制系统自身的滞后性,增加了CFRP在升温过程中温度控制的难度。

因此,以粒子群优化算法对PID控制器进行改进,完成控制参数的优化选取。如图14所示为感应加热CFRP温度控制原理图,其中粒子群优化算法对PID控制器中 K_p, K_i, K_d 三个参数进行优化选择。

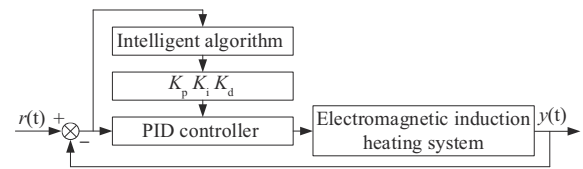


图14 粒子群优化算法对PID控制原理图

Fig. 14 Schematic diagram of particle swarm optimization algorithm for PID control

首先,初始化粒子群的随机位置 x_i 和速度 v_i 。给定粒子数 $N=100$ 和迭代次数 $M=100$,为了增加模拟计算时的收敛性及收敛速度,设置惯性因子 $\omega \in [0.4, 0.9]$ 并在范围上线性变化,自适应学习因子 $c_1, c_2 \in [0, 3]$,变异概率 $p_m \in [0.001, 0.4]$ 。针对 K_p, K_i, K_d 三个变量进行搜索寻优,因此空间维数为3,群的维数为 100×3 。改进粒子群PID控制算法流程如图15所示。

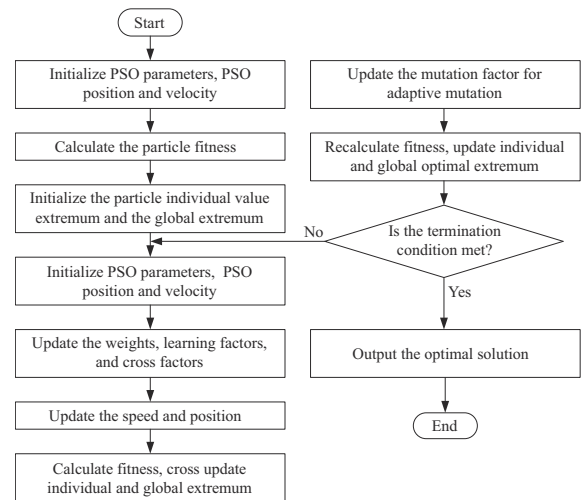


图15 改进粒子群PID控制算法流程图

Fig. 15 Flow chart of improved particle swarm PID control algorithm

3.2 感应加热温度控制模拟

根据先验知识,CFRP感应加热系统数学模型

是带有滞后环节的一阶惯性系统,见公式(8)。

$$G(s) = \frac{K_1}{1 + T_1 s} e^{-\tau_1 s} \quad (8)$$

式中: K_1 为惯性增益; T_1 为惯性时间常数; τ_1 为滞后时间; $G(s)$ 为系统的传递函数; s 为复频率变量。

本实验是在根据开环感应加热实验采集数据,加热时间共计2 000 s,共采集4 000个数据点,通过遗传算法拟合参数辨识,最后得到本系统传递函数 $G(s)$ 公式见式(9)。

$$G(s) = \frac{195.78}{1 + 211.48s} e^{-11.82s} \quad (9)$$

由于在感应加热过程中其温度场均匀性由热传导和线圈尺寸结构进行提升,因此仅需控制材料表面温度最高点。以感应加热实际环境建立MATLAB/Simulink仿真模型,对PID控制及PSO-PID控制两种算法在感应加热CFRP中升温控制效果进行了适用性和控制的准确性的对比分析,感应加热温度控制仿真Simulink模型如图16所示。

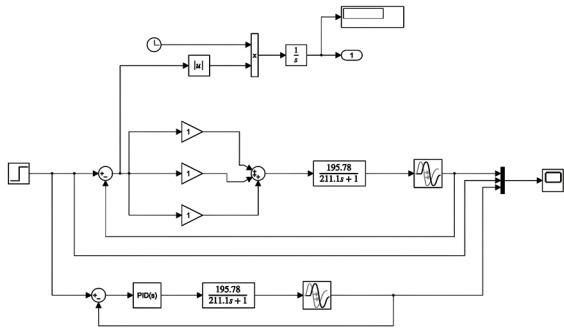


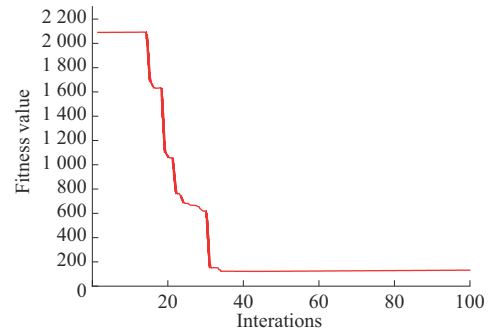
图16 感应加热温度控制Simulink仿真图

Fig. 16 Simulink simulation diagram of induction heating temperature control

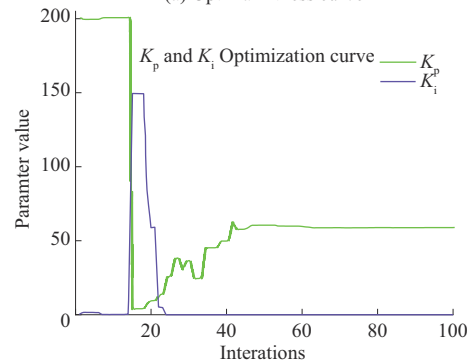
图17所示为通过所搭建的粒子群优化方法PID仿真模型所获适应度和各参数变化曲线,其中比例、积分和微分系数随着迭代次数的增加,参考值逐渐减小且趋于稳定,证明该算法具有较好的自适应和抗干扰能力。

图18a为两种算法控制的温度上升曲线比较,两条温度数曲线最后均达到了稳定状态,然而传统PID控制系统存在明显的超调量,响应速度慢等问题,而改进的PSO-PID的控制系统中温度曲线的超调量明显降低,控制精度有明显的上升。图18b为两种算法在脉冲干扰作用下的温度曲线的变化规律,可以看出PSO-PID控制系统在干扰作用下的温度曲线波动较小,恢复到稳定状态的速度较快,并通过图18c的正弦信号震荡可以看出,此时正弦干

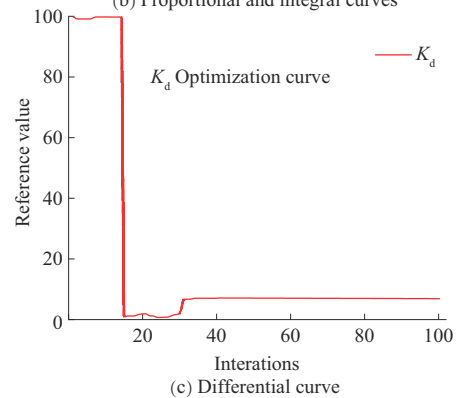
扰信号施加峰值在30左右,而经过PSO-PID算法稳定后曲线波动幅度控制在25以内,说明了该算法具有较好抗干扰的性能。



(a) Optimal fitness curve



(b) Proportional and integral curves



(c) Differential curve

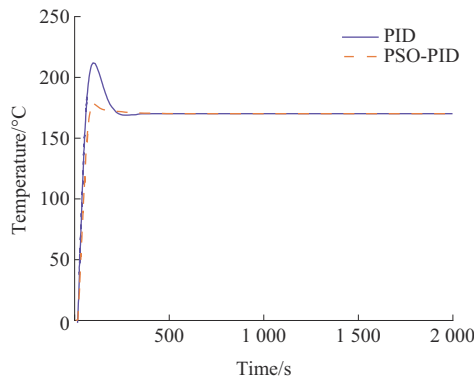
图17 比例、积分和微分系数变化曲线

Fig. 17 Change curve of proportional, integral, and differential coefficients

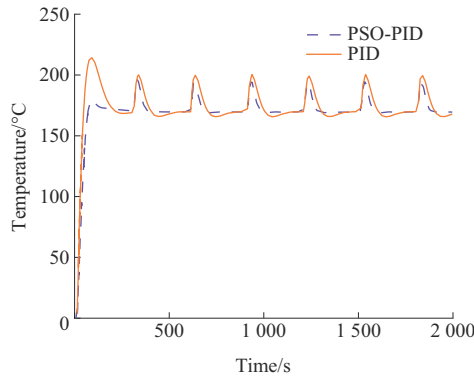
3.3 CFRP感应加热温度控制实验

图19为8 mm厚度平纹编织CFRP平板,在感应加热作用升温到不同数值下的实验升温曲线,图中所采用的加热控制方式为PSO-PID控制算法。从图19可以看出,在实验过程中材料表面温度的超调量较小,并且当温度达到目标数值后温度曲线的稳定性较高,说明改进PSO-PID算法在控制感应加热CFRP升温过程中的效果较好。

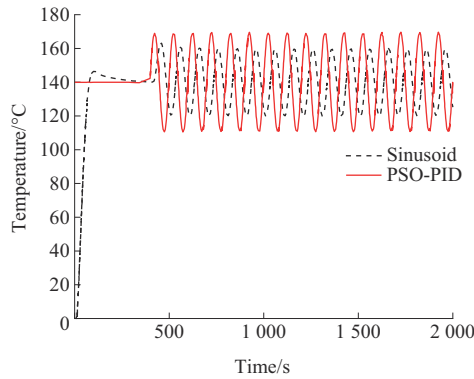
图20为不同厚度的CFRP在感应加热至170℃下的升温速率情况,图20a为用感应加热试验平台,



(a) Comparison of heating process



(b) Pulse interference comparison



(c) PSO-PID sinusoidal oscillation interference

图 18 CFRP 感应加热系统控制的两种算法比较

Fig. 18 Comparison of two algorithms for control of CFRP induction heating system

图 20b 为三种厚度 CFRP 材料同时加热至 170 °C 的升温变化过程,可以看出材料的厚度不同对升温速率的影响较为明显。材料在升温至 80 °C 的过程中厚度的变化对升温速率的影响较小,当温度超过 80 °C,厚 5 mm 和 8 mm 平板的升温速率明显下降。同时该控制方式,基本保持了不同厚度的 CFRP 平板加热的稳定性,基本满足了 CFRP 平板在感应加热过程中的温度控制精度。

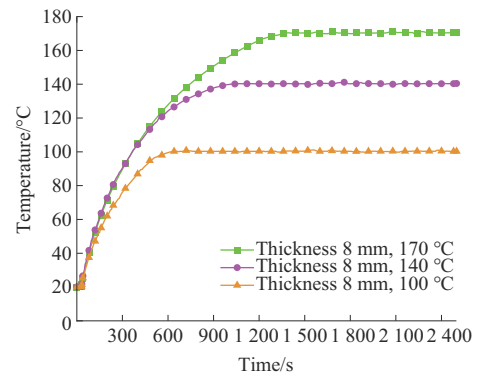
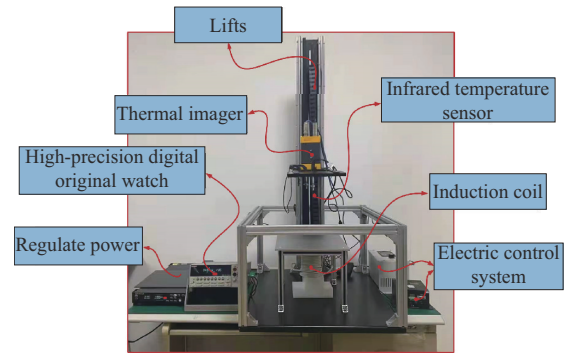
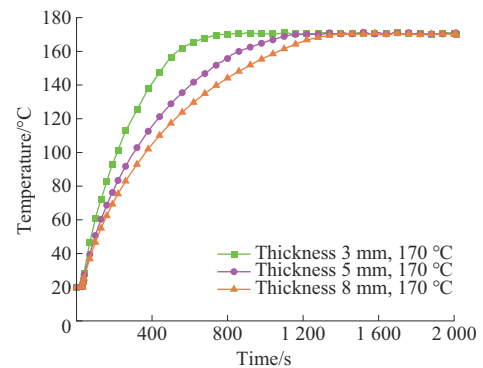


图 19 CFRP 感应加热不同温度下升温过程曲线

Fig. 19 Heating process curve of CFRP induction heating at different temperatures



(a) Heating test bench



(b) Temperature rise curve

图 20 感应加热试验平台及 CFRP 材料不同厚度时的升温变化

Fig. 20 Induction heating test platform and temperature rise variation of CFRP materials with different thicknesses

4 结论

(1)根据 CFRP 平板内部的结构及材料自身的等效电-磁-热特性,建立了单层平纹编织 CFRP 平板的感应加热有限元细观分析模型,获得了在感应加热过程中 CFRP 内部纤维织构与材料表面的温度场变化情况,解释了纤维织构中所产生的热量传导至材料表面的过程,证明了 CFRP 在加热过程中材料表面温度场变化存在一定的滞后性。

(2)建立多层平纹编织的 CFRP 感应加热宏观模

型,计算了材料层与层之间的温度传导过程,揭示了温度在层间传导过程中的损失和滞后性,并通过实验验证了CFRP在感应加热过程中材料存在一定的升温滞后现象,也证明了本研究有限元模型建立和分析的准确性,并为温度控制过程提供相应的理论依据。

(3)采用粒子群优化算法的温度控制方法,可以看出改进PSO-PID控制较传统PID控制方式的稳定性、精确性以及抗阻尼性更加明显,在加热过程中材料表面的温度超调量较小。证明了所建立的改进PSO-PID控制方式可以提升CFRP加热过程中升温过程的调控效果。

参考文献

- [1] 贾振元,付饶,王福吉.碳纤维复合材料构件加工技术进展[J].机械工程学报,2023,59(19): 348-374.
JIA Zhenyuan, FU Rao, WANG Fuji. Research advance review of machining technology for carbon fiber reinforced polymer composite components[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59 (19): 348-374.
- [2] SCHIELER O, BEIER U, MITSCHANG P. Control of the through-thickness temperature distribution in carbon composite aerospace parts during induction welding[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2018, 31(12): 1 587-1 608.
- [3] 陈思魁,郭荣辉.碳纤维增强树脂基复合材料的应用及展望[J].纺织科学与工程学报,2023,40(4):102-107, 122.
CHEN Sikui, GUO Ronghui. Applications and prospects of carbon fiber reinforced resin matrix composites[journal of textile science & engineering[J]. Journal of Textile Science & Engineering, 2023, 40 (4):102-107, 122.
- [4] 杨广林,张启青,史宾,等.碳纤维复合材料在汽车上的应用及成型工艺进展[J].塑料工业,2023,51(11):27-33.
YANG Guanglin, ZHANG Qiqing, SHI Bin, et al. Application and molding procedure progress of carbon fiber reinforced polymer materials in automotive parts[J]. China Plastics Industry, 2023, 51 (11):27-33.
- [5] LUNDSTRÖM F, FROGNER K, ANDERSSON M. Numerical modelling of CFRP induction heating using temperature-dependent material properties[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 220. DOI:10.1016/j.compositesb.2021.108982.
- [6] DAS T K, GHOSH P, DAS N C. Preparation, development, outcomes, and application versatility of carbon fiber-based polymer composites: a review[J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2019, 2: 214-233.
- [7] LIU Z, CHENG K, PENG K. Exploring the deformation potential of composite materials processed by incremental sheet forming: A review[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 118(7): 2 099-2 137.
- [8] WANG Y, HU X, JIANG M, et al. Temperature field characterization and optimization of temperature field distribution in pipe lining process based on electromagnetic induction heating system[J]. 2021, 28. DOI:10.1016/j.csite.2021.101609.
- [9] FU T Y, XU J Z, ZHAO H. Analysis of induction heating temperature field of plain weave CFRP based on finite element meso model [J]. Applied Composite Materials, 2021, 28: 149-163.
- [10] 黄曼,王婕,周伟,等.单向CFRP表面缺陷的涡流检测与有限元仿真研究[J].电子测量技术,2023,46(19): 182-187.
HUANG Man, WANG Jie, ZHOU Wei, et al. Eddy current detection and finite element simulation study of surface defects in unidirectional CFRP[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(19): 182-187.
- [11] NING F, CONG W, QIU J, et al. Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling[J]. Composites Part B Engineering. 2015, 80: 369-378.
- [12] TZENG J T, HSIEH K T. Electromagnetic analysis of composite structures subjected to transient magnetic fields[J]. Journal of Composite Materials, 2019, 54(6): 745-752.
- [13] FU T Y, ZHAO H, XU J Z. Multi-physical field state characterization of CFRP tube based on heating mode of built-in induction coil [J]. Journal of Materials Science, 2023, 58: 3 187-3 207.
- [14] LUNDSTRÖM F, FROGNER K, ANDERSSON M. A numerical model to analyse the temperature distribution in cross-ply CFRP during induction heating[J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 202. DOI:10.1016/j.compositesb.2020.108419.
- [15] DU J, LUO Y. Design and simulation of fuzzy-PID controller based on mixed injection molding machine[C]//2010 2nd International Workshop on Intelligent Systems and Applications. IEEE, 2010: 1-3.
- [16] CHOWDHURY J I, THORNHILL D, SOULATIANTORK P, et al. Control of supercritical organic Rankine cycle based waste heat recovery system using conventional and fuzzy self-tuned PID controllers[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2019, 17(11): 2 969-2 981.
- [15] ZHAI G X, XIANG H X, NI M D, et al. Effect of winding speed on the structure and mechanical properties of high-strength polyamide 6 fibers[C]. Proceedings of the Physics and Techniques of Ceramic and Polymeric Materials. Berlin: Springer , 2019: 57-66.
- [16] NASR A, SVOBODA P. Influence of fusion temperature on nonisothermal crystallization kinetics of polyamide 6[J]. Polymers, 2023, 15(8). DOI:10.3390/polym15081952.
- [17] PAWAR T J, CONTRERAS L D, OLIVARES R J L, et al. Surface modification of titanium dioxide[J]. Journal of Materials Science, 2023, 58(16): 6 887-6 930.
- [18] 高可正,胡蝶,丁筠,等.挤出机螺杆结构对PET纤维母粒分散性能的影响[J].工程塑料应用,2019,47(5): 100-104.
GAO Kezheng, HU Die, DING Yun, et al. Effect of extruder screw structure on PET fiber masterbatch mixing performance[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(5): 100-104.

(上接第51页)