

热塑性复合材料缠绕温度场的有限元仿真

吴瑶平, 文立伟, 於仁明

(南京航空航天大学材料科学与技术学院, 南京 210016)

[摘要] 热塑性复合材料缠绕成型过程中经历的温度历程影响成型构件的机械性能, 因此需对热塑性复合材料缠绕成型过程中的温度场分布进行深入研究。建立了热塑性缠绕的热传导数学模型, 采用基于 ANSYS 的有限元模型对热传递过程进行仿真, 得出了构件内部温度场分布云图, 进而分析了缠绕过程中铺层温度的变化情况。构建了缠绕过程中铺层温度场测量系统, 验证了有限元仿真的正确性。

关键词: 热塑性缠绕; 温度场; 有限元; ANSYS; 热传导

Finite Element Simulation of Temperature Field in Thermoplastic Composites Winding

WU Yaoping, WEN Liwei, YU Renming

(College of Material Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] The mechanical properties of thermoplastic composites depends on the thermal history during processing. So it is important to determine the temperature distribution in the composite during the thermoplastic filament winding process. A mathematical model about thermal conduction in the thermoplastic filament winding process was established. The finite element analysis software ANSYS was used to simulate the thermal conduction. Temperature distribution plots are gotten. Furthermore, the change status of layers is analyzed. The measurement system of the layers temperature field during the winding process was established, and the correctness of the finite element simulation is verified.

Keywords: Thermoplastic filament winding; Temperature field; Finite element; ANSYS; Thermal conduction

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2018.18.082

热塑性预浸料缠绕过程中, 预浸料按照指定的方向缠绕并固结于模具表面实现一次成型, 因此, 又称为原位固结成型。这种成型方式具有全自动化和显著缩短加工时间的特点。原位固结过程中, 热源的加热作用使得预浸料和铺层的黏合点附近形成熔区。由于需要在短时间内将预浸料的温度加热至高于树脂的熔点, 因此需要选择高强度加热装置作为热源。但是, 温度过高会导致树脂分解降低制件性能, 而且铺层的温度历程决定构件最后的微观结构和机械性能; 因此, 原位固结成型需要选择合适的热源并合理分布热源进行加热防止树脂发生热分解, 同时, 还需要了解铺层和模具之间的热传导。

本文旨在建立一个热传导模型用来预测热塑性预浸料缠绕成型过程中构件内部的温度分布。基于有限元的热传导模型已经被用来预测热塑性平板构件原位

固结过程中的温度分布^[1-5], 本文使用相似的方法提出一个缠绕成型的热传导模型, 两者的不同之处在于模型及求解过程的不同; 然后使用 ANSYS 对整个缠绕过程进行建模及仿真, 最后进行缠绕试验采集铺层温度场数据, 验证有限元仿真的正确性。

1 缠绕成型过程中温度场数学模型

热塑性复合材料缠绕成型过程中, 高强度的激光热源直接辐射在预浸料和复合材料基底上, 在两者的黏合点附近形成熔区, 然后在压辊的作用下预浸料和复合材料基底熔合在一起, 实现热塑性复合材料缠绕原位固结成型, 如图 1 所示。激光均匀地辐照着芯模周向的复合材料基底和预浸料的宽度方向, 因此本文将复合材料基底和预浸料的热传导问题简化为二维热传递模型, 建立模型的热传递方程为:

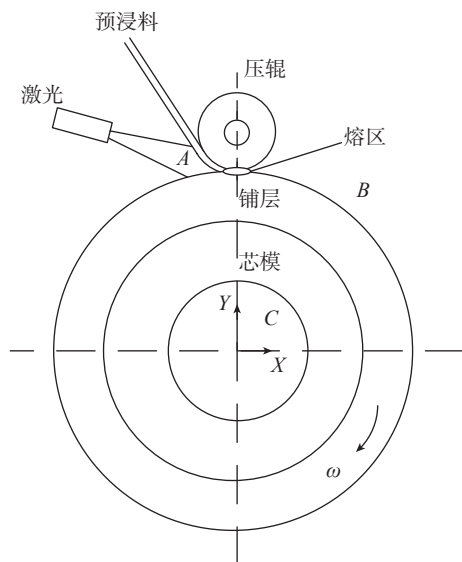


图1 热塑性复合材料缠绕成型示意图

Fig.1 Schematic illustration of the thermoplastic composite material winding

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial \tau} = K_{11} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_{22} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + r \quad (1)$$

式中, ρ 表示预浸料的密度, C 表示预浸料的比热容, T 表示温度, τ 表示时间, k_{11} 表示预浸料沿着 X 方向的导热系数, k_{22} 表示预浸料沿着 Y 方向的导热系数, r 表示单位体积产热量(即内热源)。由于内热源和激光提供的外部热源相比过小且对温度分布影响极小,因此将内热源忽略。

1.1 假设和简化

(1) 考虑到加热源的加热范围(A 区)要比预浸料的宽度大,将热塑性复合材料缠绕热分析视为平面问题进行处理。因此只做二维传热分析,不考虑宽度方向的热传递。

(2) 造成未加热区域(B 区)热量流失的自然对流和辐射是恒定的,但对流传热系数远大于辐射传热系数,这里为了方便求解,在分析求解中忽略辐射传热。

(3) 模具内侧(C 区)未受到热载荷,始终为自然对流。

热塑性复合材料缠绕热分析简化为二维传热分析,将模具转动热源不动的加热情况转化为热源绕着贴在模具表面的复合材料基底进行匀速转动,同时由于热源为均匀分布的激光,因此热源的加载方式为循环施加热流密度于复合材料基底。热塑性复合材料缠绕时,将室温设定为预浸料和模具的初始温度;在缠绕过程中,不处于热载荷作用范围的复合材料基底与空气之间处于对流换热状态。

1.2 热载荷的确定

热塑性复合材料缠绕成型的热源为 ZKXS-1008 型

光纤耦合全固态激光器产生的激光。该热源为一个长 20mm、宽 6mm 的均匀分布矩形光斑。设铺层表面受到辐射的激光功率为 P ,则光斑功率密度 I 为:

$$I = \frac{P}{A} \quad (2)$$

式中, A 为光斑面积。

缠绕过程中铺层对激光的吸收系数为 $\alpha^{[6]}$,则热流密度 q 为:

$$q = \frac{\alpha P}{A} \quad (3)$$

未受到激光加热的铺层与空气之间为对流换热,对流传热系数 h 取值范围为 $1 \sim 60 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})^{[7]}$,本文选取 $30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

2 基于 ANSYS 缠绕过程的有限元建模与求解

2.1 有限元控制方程

在有限元分析过程中,根据能量守恒原理,将温度场导热微分方程转化为等效的瞬态传热有限元控制方程^[8]:

$$[C] \left\{ \dot{T} \right\} + [K] \{T\} = \{Q\} \quad (4)$$

式中, $[C]$ 是考虑系统内能变化的比热矩阵; $\left\{ \dot{T} \right\}$ 是节点温度对时间的导数; $[K]$ 代表热传导矩阵,包含对流系数及导热系数; $\{T\}$ 为节点温度向量; $\{Q\}$ 为节点热流率向量。

2.2 输入参数的确定

使用的预浸料是碳纤维增强聚醚醚酮复合材料。由于聚醚醚酮树脂是一种材料性能非线性的材料,温度变化会影响聚醚醚酮的热导率、比热容、密度^[9]。因此,碳纤维增强聚醚醚酮复合材料也是非线性材料,其各项参数与温度的关系如图 2 所示。

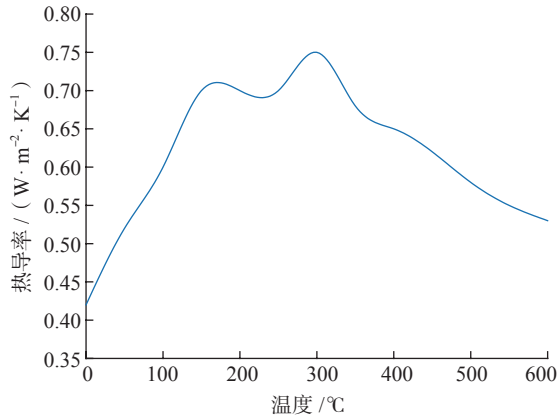
热塑性预浸料的基体是聚醚醚酮树脂,其为半结晶聚合物,在缠绕过程中,预浸料和复合材料基底吸收激光能量导致树脂基体熔融,树脂基体从固态变为熔融态是相变过程,在相变过程中,聚醚醚酮树脂吸收外界热量用来完成相变,因此认为树脂基体吸收的热量转化为相变的能量,而树脂基体的温度基本不发生变化,将此过程中树脂吸收的外界热量称潜热^[10]。对热塑性缠绕温度场进行仿真分析时,为了减小缠绕过程温度场的仿真误差,将树脂基体的潜热效考虑在内。采用的方式为在有限元分析过程中,将潜热转化为树脂基体焓的方式。这是由于树脂基体的焓随温度变化而变化,因此将潜热的变化以焓的变化来代替。树脂相变过程中会同时存在两种相,固相和液相,一般认为同时存在固相和液相时,温度基本保持不变。假设树脂的固态温度为 T_s ,液态温度为 T_L ,则焓的计算公式为^[11]:

$$H = \int \rho \cdot c_p dT + \rho \cdot L_f \quad (5)$$

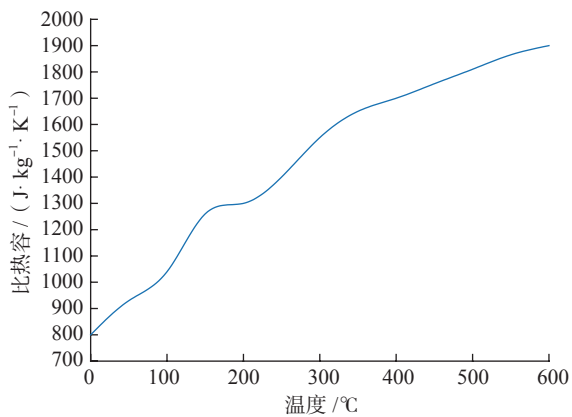
式中, ρ 为材料的密度, c_p 为材料的比热容, L_f 为潜热。

由式(5)计算出碳纤维增强聚醚醚酮复合材料的焓变曲线如图3所示。

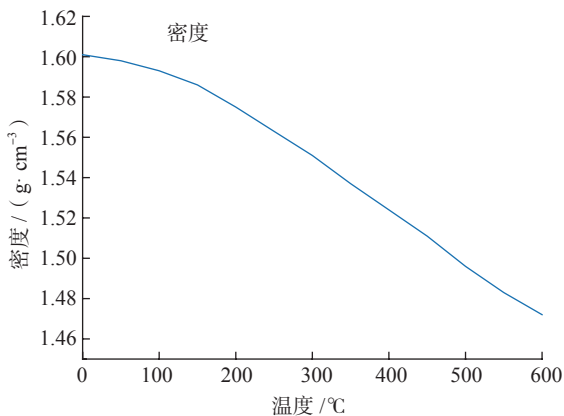
模具材料为铝合金,通过查找资料获得铝合金的物理性能^[12],其密度为 2770kg/m^3 ,比热容为 $875\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,



(a) 热导率随温度变化曲线



(b) 比热容随温度变化曲线



(c) 密度随温度变化曲线

图2 碳纤维增强聚醚醚酮复合材料热性能参数随温度的变化

Fig.2 Thermal property variations of carbon reinforced poly ether ether ketone composites with temperature

热传导系数为 $237\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;通过式(3)获得激光加热的热流密度为 $1325181\text{W}/\text{m}^2$ 。

2.3 缠绕过程的有限元建模

预浸料单层厚度为 0.15mm ,模具最大半径为 75mm ,模具厚度为 10mm ,在 ANSYS 中创建图4所示的进行8次缠绕的有限元模型,对热塑性复合材料基底进行等距网格划分,划分层数为8层,将每一层划分为一个单元。表1为有限元模型尺寸及边界条件。

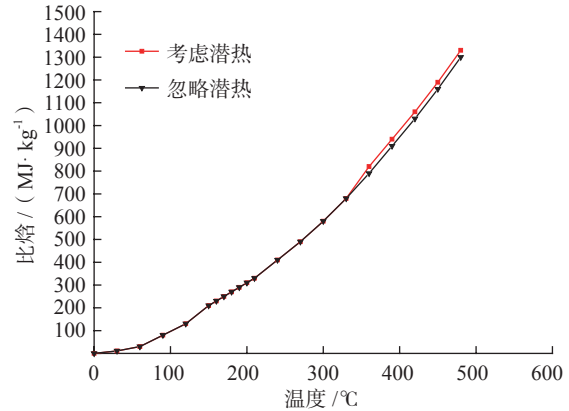


图3 碳纤维增强聚醚醚酮复合材料比焓随温度的变化

Fig.3 Specific enthalpy change of carbon fiber reinforced poly ether ether ketone composites with temperature

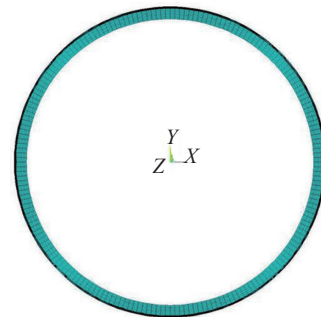


图4 温度场有限元分析模型网格划分

Fig.4 Temperature field finite element analysis model meshing

表1 有限元模型尺寸及边界条件

Table 1 Size of the finite element model and boundary conditions

参数	数值
激光功率 P/W	170
铺层单层厚度 d/m	0.00015
铺层总数 N	8
模具内径 x_1/m	0.65
模具外径 x_2/m	0.75
模具热传导系数 $h_1/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1})$	400
缠绕速度 $/(m \cdot \text{min}^{-1})$	3.768
激光加热长度 l/m	0.02
环境温度 $T_\infty/\text{°C}$	25
自然对流换热系数 $/(W \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1})$	30

在对有限元模型进行网格划分时,本试验选用 PLANE55 单元作为网格划分的单元类型,该单元有 4 个节点,每个节点只有一个自由度。

前处理模块的操作顺序是先建模型,然后划分网格,接着加载求解,所以模型一旦建立之后在加载求解的过程中是无法进行修改的。为了模拟复合材料基底在缠绕过程中连续不断堆叠的过程,需要进行一些转换,使得在求解的时候有限元模型中复合材料基底部分的单元能够选择性地处于激活或者处于未激活状态,实现复合材料基底在厚度方向上不断发生变化,而 PLANE55 单元刚好具备生死单元功能,这也是选择 PLANE55 单元进行热塑性缠绕温度场瞬态热分析的重要原因。ANSYS 杀死单元的实现是通过选取所需要“杀死”的单元,将它们的刚度矩阵统统乘以一个很小的值,这个值默认为 10^{-6} ,使得其单元属性发生变化,从原有的值变为 0;求解模块是在完成模型划分网格的基础上进行的,所以无法生成新的单元,因此单元的“出生”指的是将前面“杀死”的单元重新激活,达到“添加”单元的作用。在求解之前应该将所有铺层单元全部“杀死”,在稍后的求解过程中根据需求一步步将单元激活,激活的单元获得其原有的单元属性,比如质量、刚度和载荷等。

2.4 缠绕过程温度场求解

热塑性复合材料缠绕过程中,复合材料基底与热源处于不断的变化之中,复合材料基底和预浸料绕着芯模在热源作用下逐步完成原位固结成型。复合材料基底经历了与预浸料的熔合,冷却固化,热源的变化表现为辐射区域的改变,即热载荷作用的单元处于变化之中。为了方便模拟仿真,本文假设热源施加的热载荷沿着复合材料基底环向以一定速度均匀转动,转动热载荷的施加使用循环加载(DO 循环)的方式实现。复合材料基底的变化采用上述平面单元的生死单元功能进行模拟。热塑性复合材料缠绕温度场求解流程如图 5 所示。

对建立的模型进行网格划分并检查网格划分质量之后,接下来进入求解模块。首先,对模型的所有节点施加 25°C 的初始温度约束,同时对模具内径施加自然对流边界条件以及将复合材料基底单元全部杀死。然后进入添加热载荷求解阶段,按照图 5 所示步骤,在每一载荷步内,将当前载荷步的复合材料基底单元激活,热载荷添加在激活的基底单元节点上,同时将上一载荷步激活单元的热载荷删除,改为自然对流边界条件,从而实现复合材料基底随时间不断堆叠以及激光辐射热载荷环向转动。

2.5 缠绕过程的有限元模拟结果分析

图 6 为缠绕完成后铺层和模具的温度场分布云图。

激光辐照铺层和预浸料表面,在铺层和预浸料黏合点形成高温区,温度由外向里扩散并逐渐减小,呈同心圆分布。缠绕过程中铺层最高温度达到 498.42°C ,没有超过树脂基体的热分解温度^[13],因此不会产生显著的热失重。

在图 4 所示的有限元模型复合材料基底中,从每一层选取一个节点,选取的节点编号依次为 2811~2817,707。节点的边界条件随时间处于变化之中,在热源转动至节点上方时,节点单元被激活,节点此时处于热流密度边界条件;在下一载荷步热源转动至其他单元,此

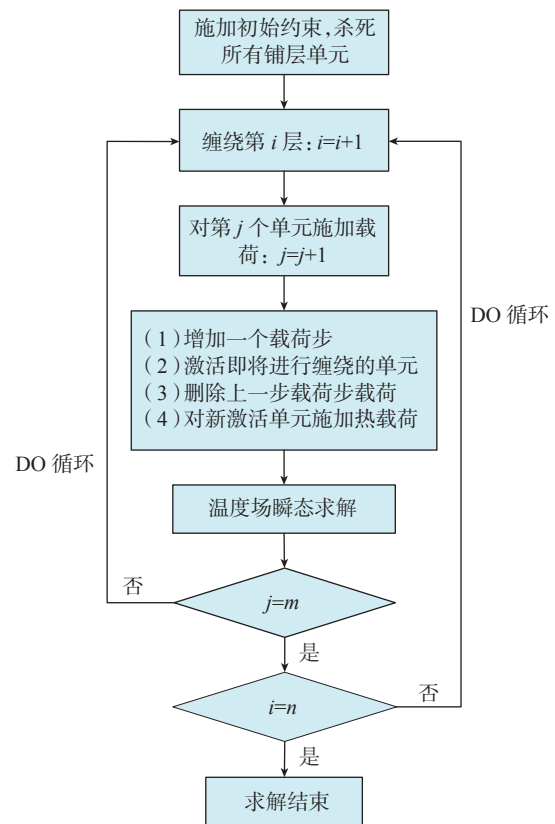


图5 温度场求解流程图

Fig.5 Temperature field solution flow chart

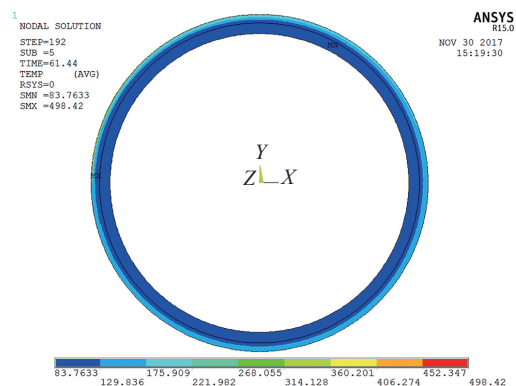
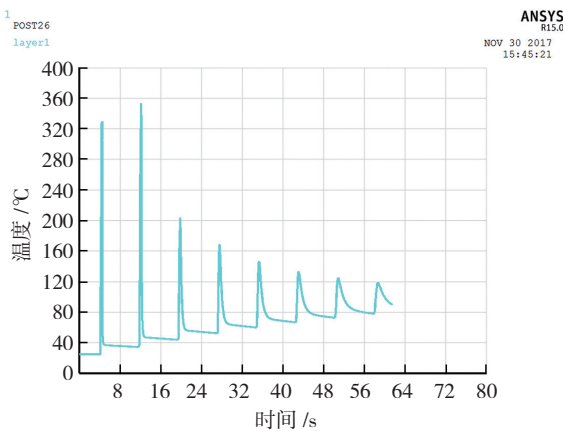


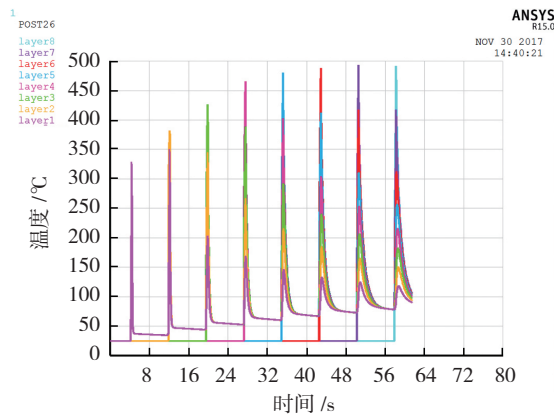
图6 铺层和模具温度场分布云图

Fig.6 Layers and mold temperature distribution of clouds

时节点的边界条件从热流密度变为自然对流。求解结束后通过时间历程后处理器查看选取的节点温度随时间变化过程来反应节点所处缠绕铺层的温度历程。图7为当激光输出功率为170W,缠绕速度为3.768m/min时,选取的节点温度变化过程,其中图7(a)为缠绕过程中第1层中选取节点2811的温度历程,可以看出,缠绕过程中节点温度出现8次波峰,每个波峰表示当前层节点2811的最高温度值。缠绕第1层时,由于激光能量集中,节点2811的温度迅速达到树脂熔点;缠绕第2层时,激光辐射区域为基底(第1层)和预浸料的黏合点周围,此时第1层的波峰与第2层的波峰相差不大,如图7(b)所示,这是由于基底吸收激光辐射的能量,同时模具在第1层缠绕时吸收基底能量使得其自身的温度上升,因此缠绕第2层时模具吸收的能量减少,使得节点2811在第2层缠绕时的波峰比第1层时还要高。在后续缠绕过程中,由于第1层不直接受到激光辐射,其热量来源依靠基底层与层之间的热量传递,所以由图7(a)可以看出节点2811的第3~8个波峰是逐渐降低的。



(a) 8层缠绕完成后第1层预浸料温度随时间变化曲线



(b) 缠绕过程中所有铺层温度随时间变化曲线

图7 激光功率170W、缠绕速度3.768m/min铺层温度随时间变化曲线

Fig.7 Laser power 170W, winding speed 3.768m/min ply temperature curve over time

缠绕过程中,未能散发出去的热量存储在铺层中,使得整个铺层的温度慢慢升高,如图7(b)所示。

3 试验验证与分析

为了验证采用有限元分析得到的缠绕过程中铺层温度场分布的准确性,设计搭建了一个在线温度测量系统用来实时测量缠绕过程中复合材料铺层温度。这个系统主要由热电偶、S7-300PLC、西门子触摸屏Smart700构成,通过热电偶实现对复合材料铺层温度的实时测量,然后将温度信号传输给西门子S7-300PLC,由西门子S7-300PLC处理输入的传感器信号,转换后的结果传入西门子触摸屏,在触摸屏上显示出当前温度测量值并将其存储,触摸屏的人机交互界面采用Wincc flexible软件进行编辑。图8所示为设计的温度测量系统原理图。

热电偶的植入方式为在缠绕开始之前,在模具的底部固定一个热电偶A,为了防止植入热电偶导致局部的复合材料铺层厚度不同于其他处,新植入的热电偶

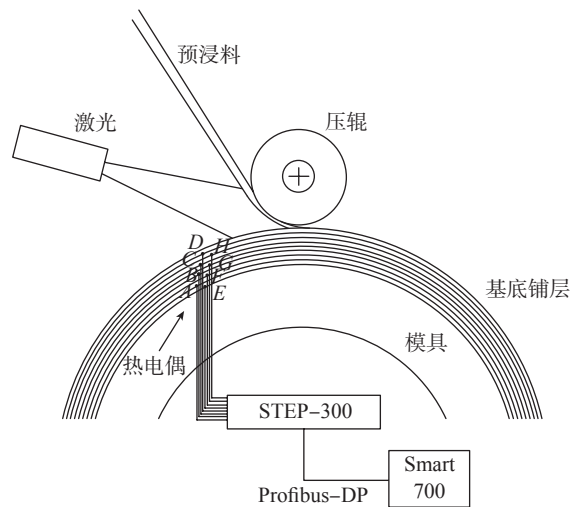


图8 温度测量系统原理图

Fig.8 Temperature measurement system schematic

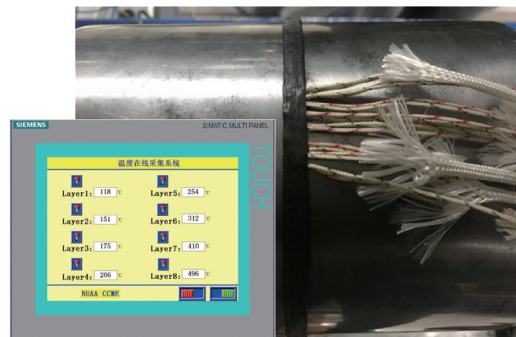


图9 温度采集系统实物图

Fig.9 Temperature acquisition system diagram

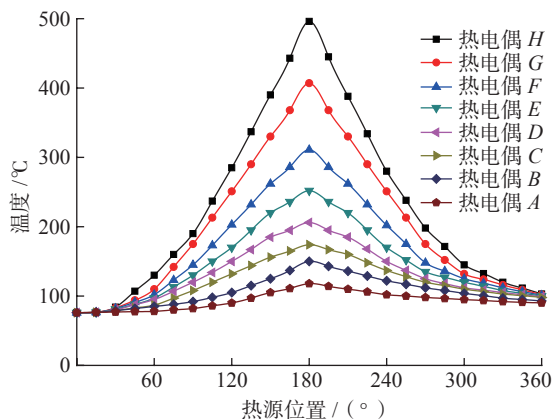


图10 热电偶测量缠绕第8层时复合材料铺层温度场变化
Fig.10 Thermocouple measurement of the eighth layer winding composite material temperature field changes

和前一个热电偶错开一定距离,整个缠绕过程中一共植入8只热电偶。缠绕结束时热电偶植入情况如图9所示。

图10所示为当激光输出功率为170W,缠绕速度为3.768m/min进行缠绕试验,缠绕第8层热塑性复合材料时,热电偶测量的铺层温度场变化情况。将图10和图7(b)进行比较,发现热电偶测得的铺层温度场数据与仿真得到的结果相差不大,仿真得到的温度值高于测量值。两者之间的差距是两个方面的原因,其一为有限元仿真时对预浸料和铺层黏合点区域施加的是简化后的边界条件,不能完全反映真实缠绕情况;其二为热电偶灵敏度及精度不够高,测量结果存在滞后和不够精确。

4 结论

本文在传热学原理及缠绕原理的基础上,建立了缠绕过程的热传导数学模型,并运用有限元模拟技术对传热过程进行仿真,获得了构件内部温度场的分布,仿真结果表明激光功率170W、缠绕速度3.768m/min时,铺层底层与预浸料黏合点的温度满足高于树脂熔点且低于树脂出现显著热失重的温度的要求。然后设计搭建了缠绕过程中铺层温度场测量系统,实时测量铺层的温度并进行存储。将试验测量值和仿真得到的数据比较,发现两者相差不大,验证了本文有限元仿真的准确性。仿真分析对缠绕过程温度场的有效预测,对碳纤维增强聚醚醚酮复合材料缠绕成型具有指导意义。

参考文献

- [1] MANTELL S C, WANG Q, SPRINGER G S. Processing thermoplastic composites in a press and by tape laying experimental results[J]. Journal of Composite Materials, 1992, 26(16): 2378-2401.
- [2] PITCHUMANI R, RANGANATHAN S, DON R C, et al.

Analysis of transport phenomena governing interfacial bonding and void dynamics during thermoplastic tow-placement[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 1996, 39(9): 1883-1897.

[3] STOKES-GRIFFIN C M, MATUSZYK T I, COMPSTON P, et al. Modelling the automated tape placement of thermoplastic composites with in-situ consolidation[M]// Sustainable Automotive Technologies 2012. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2012.

[4] SONMEZ F O, HAHN H T. Modeling of heat transfer and crystallization in thermoplastic composite tape placement process[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 1997, 10(3): 198-240.

[5] 李志猛, 杨涛, 杜宇, 等. 热塑性预浸丝铺放过程中温度场数学模型及其仿真[J]. 宇航材料工艺, 2012, 42(3): 20-23.

LI Zhimeng, YANG Tao, DU Yu, et al. Modeling and simulation of heat transfer in thermoplastic composite tow-placement process[J]. Aerospace Materials & Technology, 2012, 42(3): 20-23.

[6] SCHAEFER P M, GIERSZEWSKI D, KOLLMANNBERGER A, et al. Analysis and improved process response prediction of laser-assisted automated tape placement with PA-6/carbon tapes using design of experiments and numerical simulations[J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 2017, 96: 137-146.

[7] 郝海生, 黄勇, 虞永恒. 基于ADAMS/CAR的汽车前悬架仿真分析[J]. 北京汽车, 2009(4): 5-7.

HAO Haisheng, HUANG Yong, TUO Yongheng. Vehicle front suspension simulation analysis based on ADAMS[J]. Beijing Automotive Engineering, 2009(4): 5-7.

[8] SHIH P J. On-line consolidation of thermoplastic composites[D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997.

[9] MAURER D, MITSCHANG P. Laser-powered tape placement process-simulation and optimization[J]. Advanced Manufacturing Polymer & Composites Science, 2014, 4(3): 2055035915Y.000.

[10] 田爱国, 郭强. 聚醚醚酮及其复合材料的特性与应用研究进展[J]. 工程塑料应用, 2002, 30(2): 47-49.

TIAN Aiguo, GUO Qiang. Progress in the characteristics and application research of polyetheretherketone and its composites[J]. Engineering Plastics Application, 2002, 30(2): 47-49.

[11] YARDIMCI M A, PISTOR C M, GÜÇERİ S I. Process planning for online consolidation in tape winding of noncircular thermoplastic composites[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2000, 2(2): 88-99.

[12] 曾证明. 机械工程材料手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.

ZENG Zhengming. Mechanical engineering materials manual[M]. Beijing: China Machine Press, 2009.

[13] 姚凤英, 王维. 聚醚醚酮(PEEK)及其碳纤维复合材料的热分解动力学研究[J]. 塑料, 1989(3): 40-44.

YAO Fengying, WANG Wei. Dynamics study of heat decomposition of PEEK and carbon fiber composite[J]. Plastics, 1989(3): 40-44.

通讯作者: 文立伟, 博士, 副教授, 研究方向为复合材料数字化制造技术、自动铺放技术、数控技术, E-mail: wenliwei@nuaa.edu.cn.

(责编 大漠)