

热塑性预浸丝铺放过程中温度场数学模型及其仿真

李志猛 杨涛 杜宇 戴维荣

(天津工业大学机械学院,天津 300387)

文 摘 建立了热塑性碳纤维预浸丝铺放过程中二维温度场分布的模型。考虑铺放中热气筒的热气速率、热气温度的影响,当热气流速从 650 升高至 800 m/s 时,APC2 的对流传热系数增加 150 W/(m²·℃)。利用 ANSYS 对整个铺放过程热量的瞬态热传导进行了仿真,得到复合材料构件在整个铺放过程中温度场分布及其随时间的变化。通过对铺放头分别以 40 和 20 mm/s 进行铺放时温度场随时间变化的比较,可知铺放头移动速率越慢,粘合点处的温度峰值越高。当把铺放头移动速率降至 20 mm/s 以后,粘合点温度峰值升至 355℃ 以上,达到 APC2 的熔点,因此在此条件下加工时铺放头移动速率理论上应低于 20 mm/s。通过对比,证明了温度场数学模型的正确性。

关键词 预浸丝铺放,温度场分布,仿真

Modeling and Simulation of Heat Transfer in Thermoplastic Composite Tow-Placement Process

Li Zhimeng Yang Tao Du Yu Dai Weirong

(School of Mechanical and Electronic Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387)

Abstract A model of two-dimensional temperature distribution in thermoplastic tow-placement process was established and the effect of the speed and temperature of the hot gas on the process was studied. As the speed of the hot air increased from 650 m/s to 800 m/s, convective heat transfer coefficient increased 150. Simulation for transient heat conduction throughout the placement process was made by ANSYS, which studied the distribution and changes with time of the composite component in the temperature field throughout the placement process. According to the comparison of changes of temperature field with time during placement at the speed of 40 mm/s and 20 mm/s, respectively, it is proved that the slower of the speed, the higher of the temperature peak at the nip-point. As the speed decreased to 20 mm/s, the temperature peak increased over 355℃, which was the composite processing temperature. Therefore, the speed at this condition should be lower than 20 mm/s theoretically. Correctness of the mathematical model of the temperature field is proved by comparison.

Key words Thermoplastic composite tow-placement, Temperature distribution, Simulation

0 引言

热塑性复合材料铺放过程中温度场的研究早已在国外引起重视,目前已有许多这方面的研究。Po-Jen Shih^[1]建立了复合材料缠绕成型过程中温度场的数学模型,并利用 ABAQUS 进行仿真。S. Tumkor^[2]利用有限差分法建立了热塑性复合材料铺放过程中温度场的数学模型,给出了温度场随时间变化的解析

解。X. Guan^[3]分析了以高温气体为热源的热塑性复合材料铺放过程中高速气流冲击热传导问题。从 PEEK 的晶体动力学角度,重点研究粘合点处特殊的角形几何区域的努塞尔数。Noha Hassan^[4]基于拉格朗日方程,利用八节点矩阵单元建立了热固性复合材料铺放过程中三维热传导模型,并开发了给出模型精确解的计算机代码。

目前国内对碳纤维复合材料铺放成型的研究主

收稿日期:2011-10-13;修回日期:2011-11-23

基金项目:天津市应用基础与前沿技术研究计划重点项目(11JCZDJC23000)

作者简介:李志猛,1987 年出生,硕士研究生,研究方向为机电一体化、复合材料成型技术与装备。E-mail:lzmxcg@163.com

表 1 APC2 的热导率和比热容

Tab.1 Thermal conductivity and heat capacity of APC2

$t/^\circ\text{C}$	$k(x)/\text{W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$	$k(y)/\text{W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$	$C/\text{W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$
0	0.6	6	800
60	0.65	6.5	908
120	0.7	7	1016
180	0.75	7.5	1124
240	0.8	8	1232
300	0.85	8.5	1340
360	0.9	9	2080
390	0.95	9.25	1660
420	0.9	9.5	1663
480	0.9	10	1664

在相同温度的高温气体冲击下,表面传热系数越大,则基体从表面得到的热量越多,其温度峰值也越高。在铺放过程中(图 1),因为热气载荷直接施加到 A 区,热气流速率和热气温度对温度场的影响主要表现在 A 区。在对流热传导中,表面传热系数 h 的计算公式如(3)式^[10]。

$$h = \frac{k}{L_c} Nu \quad (3)$$

式中, L_c 是特征长度, Nu 是努塞尔数。在 A 区受到高温高速气体的冲击情况下,努塞尔数按(4)式计算^[10]。

$$Nu = 0.228 Re^{0.731} Pr^{1/3} \quad (4)$$

式中,

$$Re = \frac{vL_c}{\nu} \quad (5)$$

式中, v 是气体出筒速率,气体的物性量 k, Pr 和 ν 由边界层平均温度 $T_f = \frac{T_s - T_\infty}{2}$ 决定,在高温高速气体冲击下,气体的物性量有明显变化, T_∞ 用参考温度 T_* 代替^[8]。

$$T_* = T_\infty + 0.5(T_w - T_\infty) + 0.22(T_r - T_\infty) \quad (6)$$

式中, T_r 是恢复温度, T_w 是工件表面温度, T_∞ 是气体静态温度。边界层平均温度在 400 ~ 850 $^\circ\text{C}$ 、热气流速率为 650 和 800 m/s 时的表面传热系数见表 2。

表 2 高速热气流冲击下 APC2 的表面传热系数

Tab.2 Coefficient of thermal conductivity at surface of APC2 under high speed hot gas

$t/^\circ\text{C}$	传热系数/ $\text{W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$	
	650m/s	800m/s
400	953.4	1109.8
450	950.5	1106.4
500	947.2	1102.5
550	942.5	1097.1
600	940.8	1094.2
650	936.0	1089.5
700	933.2	1086.2
750	928.1	1080.2
800	925.4	1076.7
850	922.3	1073.2

从表 2 可以发现:当热气速率从 650 升至 800 m/s

要集中在研制原理样机^[5]、铺放轨迹规划^[6]和 CAD/CAM 软件开发^[7],而对温度场的研究尚属空白。根据铺放过程中的热源不同,可将复合材料铺放分为以下 3 种:激光加热、高温气体加热、连续超声波加热^[1]。由于高温气体热源成本低且技术相对成熟,文中将以高温气体作为热源进行研究。本文建立了温度场的数学模型,分析了热气流速和热气温度对铺放过程中碳纤维复合材料温度场的影响;利用 ANSYS 对整个铺放过程进行建模及仿真,在有限元仿真中研究了铺放头移动速率对温度场分布的影响。

1 铺放过程中碳纤维复合材料温度场的数学模型

为了便于得到温度分布随时间变化函数,将模型和预浸丝带均看做刚体。铺放过程示意图见图 1:将图 1 分为 A、B 两个区域,用半无限大固体的高速气流热冲击模型对 A 区进行分析,用半无限大固体在自然对流下的热传导和热辐射混合传热模型对 B 区进行分析。

1.1 数学模型

为了简化分析,使用半无限大固体的对流传热模型对铺放过程中的热对流和热传导进行分析。模型可描述为:一个无限大平面的一侧暴露于流体中,另一面是沿各个方向无限延伸的固体。对复合材料丝束进行铺放时,与基体和芯模的厚度相比,粘合点的厚度很小,可以忽略不计。因此可把问题简化成一维热传导问题,铺放过程中,模型的热传导方程为:

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中, k 是热导率, ρ 是密度, c 是比热容, T 是温度, x 轴为竖直方向。在模型表面处,根据牛顿冷却方程,其热对流传热方程为:

$$\dot{q} = h(T_s - T_B) \quad (2)$$

式中, \dot{q} 是热流密度, T_s 是表面温度, T_B 是周围气体温度。

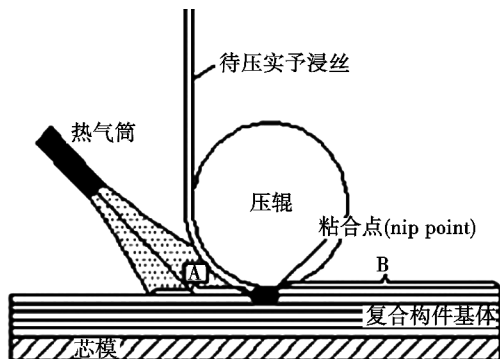


图 1 碳纤维预浸丝铺放示意图

Fig.1 Schematic diagram of carbon fiber prepreg wire placement

1.2 复合材料热参数计算

APC2,其密度为 1 562 kg/m³;热导率和比热容随温度的变化见表 1^[2]。

后,各温度下的传热系数升高了约 150 W/(m²·K);在 400~850℃,表面传热系数随温度的升高而略微降低。

在 B 区,基体散热由对流传热和辐射传热两部分构成,总散热量等于构成并联系统的两种基本换热方式散热量的叠加总和^[9],即

$$\Phi = \Phi_c + \Phi_r \quad (\text{W}) \quad (7)$$

式中, Φ_c 为对流换热量: $\Phi_c = h_c(t_s - t_\infty)A$, h_c 为自然对流换热表面传热系数。 Φ_r 为辐射换热量: $\Phi_r = h_r(t_s - t_\infty)A$, h_r 为辐射换热表面传热系数。合并上面三式有

$$\Phi = (h_c + h_r)(t_s - t_\infty)F = h_2(t_s - t_\infty)A \quad (8)$$

式中, h_2 称为复合换热表面传热系数。辐射换热表面传热系数:

$$h_r = \frac{\varepsilon C_b [(T_s/100)^4 - (T_\infty/100)^4]}{t_s - t_\infty} \quad (9)$$

式中, ε 是物体的发射率, C_b 是黑体辐射系数。经计算得到复合换热表面传热系数如表 3 所示。

表 3 自然对流下 APC2 的复合换热表面传热系数

Tab.3 Coefficient of thermal conductivity at surface of APC2 under hot gas

APC2 under hot gas

$t/^\circ\text{C}$	$h_r/\text{W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$	$h_c/\text{W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$	$h_2/\text{W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$
0	0	12.32	12.32
50	8.12e-3	12.51	12.51
100	0.05	12.84	12.89
150	0.15	12.57	12.72
200	0.35	12.36	12.71
250	0.68	12.05	12.73
300	1.16	11.77	12.93
350	1.82	11.50	13.32
400	2.69	11.25	13.94
450	3.81	10.95	14.76

1.3 温度场数值计算

设初始及边界条件为:热气筒气体温度 $T_\infty = 800^\circ\text{C}$,热气筒气体速率 $v = 650 \text{ m/s}$,铺层厚度 $\delta = 0.15 \text{ mm}$,铺层长度 $L = 400 \text{ mm}$ 时,当铺放头以 40 mm/s 的速率进行第 6 次铺放时温度分布的图像如图 2 所示。

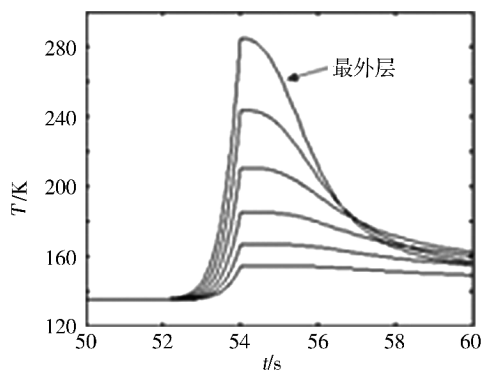


图2 第6次铺放时各层温度随时间的变化

Fig.2 Temperature changes at sixth placement

2 基于 ANSYS 的有限元仿真

2.1 控制方程及边界条件

铺放过程中,温度场的控制微分方程为^[11]:

$$-\frac{\partial}{\partial x} \cdot q + r - \rho \dot{U} = 0 \quad (10)$$

式中, q 为热量穿过单位面积的时间速率,流入为正, r 为热量从单位体积内向外流的流出速率, ρ 是材料密度, \dot{U} 是材料内部能量的时间速率。在 ANSYS 中,其对应的瞬态热传导有限元控制方程为^[11]:

$$[C]\{T\} + [K]\{T\} = \{Q\} \quad (11)$$

式中, $[K]$ 为热传导矩阵, $[C]$ 为比热矩阵, $\{T\}$ 为节点温度向量, \dot{T} 为温度对时间的导数, $\{Q\}$ 为节点热流率向量。整个模型边界条件总结为:与芯模接触的表面温度和芯模温度相等;A 区受高温热气冲击,为对流热传导,表面处气体温度为 800°C ;B 区未受到热载荷,为自然对流热传导和辐射热传导,表面处气体温度为 25°C 。初始条件:整个模型初始温度为 25°C 。

2.2 铺放过程的有限元建模

在预浸丝铺放过程中,预浸丝厚度为 0.15 mm ,芯模厚度为 10 mm ,铺叠长度为 400 mm ,将整个模型视为刚体。由此,在 ANSYS 中创建宽 0.9 mm 、高 400 mm 的矩形和宽 10 mm 、高 400 mm 的矩形分别作为复合材料和芯模。由于复合材料部分的宽度远小于芯模部分的宽度,而问题研究重点在于复合材料部分,所以划分网格时采用不均匀的网格密度。

为不使表面衔接处网格相差悬殊太大,定义复合材料部分的单元尺寸大小为 0.05 mm ,定义芯模右端面的单元尺寸大小为 5 mm 。图 3 为进行六次铺放的温度场模型网格划分的局部视图。

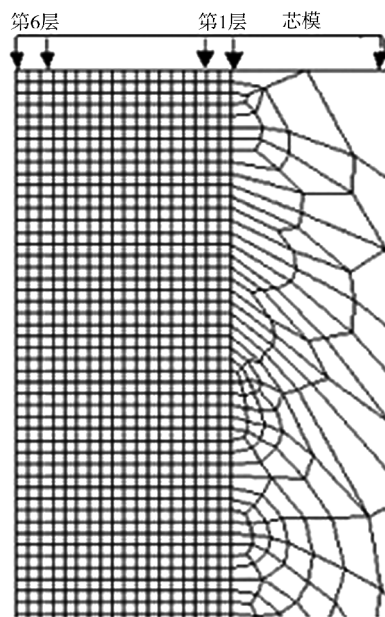


图3 热塑性预浸丝铺放过程温度场模型网格划分

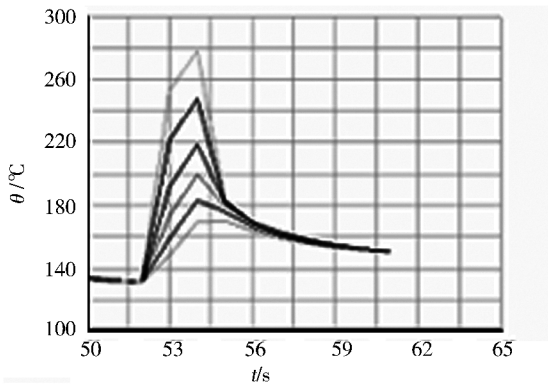
Fig.3 Temperature field model partition in thermoplastic prepreg wire placement process

对铺放过程的有限元分析属于瞬态热分析问题。

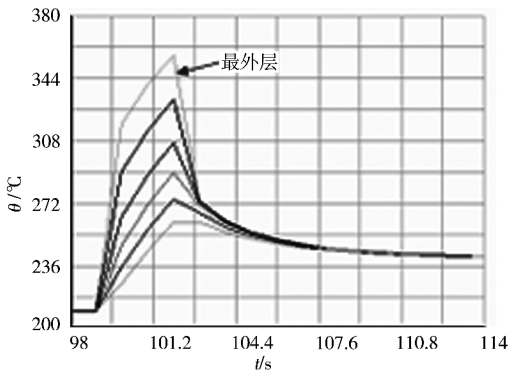
对于半无限大体,温度仅沿厚度方向变化。故选取二维平面单元 PLANE55 单元进行求解。铺放过程中的热载荷是从热气筒中高速喷出的热气,在 ANSYS 中属于热对流载荷。铺放头移动速率既是热载荷移动速率,假设热气流有效宽度即热载荷宽度为 10 mm。根据表 2 定义受到高速热气流冲击区域的热对流载荷的对流换热系数为 $940 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,温度为 800°C ;未受到高速气流冲击的区域,即黏合点以外的区域,施加的热对流载荷的对流换热系数为 $13 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,温度为 25°C 。

2.3 有限元仿真结果分析

在模型铺放的每一层都取一个节点,记录整个铺放过程中各层温度随时间的变化规律。首先模拟铺放头以 40 mm/s 的速率进行铺放,进行六次铺放的温度场变化。受到热气冲击的很小区域内,复合材料基体温度迅速上升至最高点,随后温度快速回落,与实际铺放情况相符。图 4 左侧显示了第 6 次铺放时各层温度变化曲线,温度峰值为 280°C ,温度上升时间在 $52 \sim 54 \text{ s}$ 。数学模型中解析解温度峰值为 285°C ,温度上升时间在 $52 \sim 54 \text{ s}$,证明数学模型是正确的。



(a) 40 mm/s



(b) 20 mm/s

图 4 铺放速率为 40 和 20 mm/s 时各个铺放层的节点温度随时间的变化曲线

Fig. 4 Junction temperature changes of every placement layer at placement speed of 40 and 20 mm/s

2.4 铺放头移动速率对温度场的影响

将铺放头移动速率降低至 20 mm/s ,重新分析整个模型,得到各层温度随时间变化曲线(图 4)。当铺

放头移动速率降低至 20 mm/s 后,温度峰值从 280 上升到 355°C ,且上升时间由原来的 2 s 增加到 3 s 。经过对比发现,铺放头移动速率越大,节点温度峰值越小,温度保持在 T_g 以上时间越短。在铺放过程中,可以根据热塑性碳纤维复合材料界面特性来调整铺放头移动的速率,以便最终得到优质复合材料构件。

3 结论

根据热传导及热对流传热理论,建立了碳纤维复合材料铺丝过程中二维温度场分布的数学模型,数学模型主要考虑了铺放过程中热气筒的热气出筒速率、热气温度对温度场的影响。当热气流速从 650 升高至 800 m/s 时,APC2 的对流传热系数增加 $150 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。热气流速相同时,APC2 的对流传热系数随温度升高略微下降。利用 ANSYS 对整个铺放过程进行仿真,通过对比,验证了温度场数学模型的正确性。通过对铺放头分别以 40 和 20 mm/s 进行铺放时温度场随时间变化的比较,可知铺放头移动速率越慢,黏合点处的温度峰值越高。当把铺放头移动速率降至 20 mm/s 以后,黏合点温度峰值升至 355°C 以上,进入复合材料加工温度。因此实际加工时应把铺放头移动速率控制在 20 mm/s 以内。

参考文献

- [1] Shih Pojen. On-line consolidation of thermoplastic composites[J]. Engineering Science and Mechanics, 1997(2): 112-145
- [2] Tumkor S, Turkmen N, Chassapis C. Modeling of heat transfer in thermoplastic composite tape lay-up manufacturing[J]. Heat Mass Transfer, 2001, 28(1): 49-58, 52-56
- [3] Guan X, Pitchumani R. Modeling of spherulitic crystallization in thermoplastic tow-placement process: heat transfer analysis[J]. Composites Science and Technology, 2004, 64: 1123-1134
- [4] Noha Hassan, Thompson J E, Batra R C. A heat transfer analysis of the fiber placement composite manufacturing process[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2005, 24: 871-876
- [5] 富宏亚, 邵忠喜. 七自由度纤维铺丝样机研制[J]. 航空制造技术, 2010, (17): 46-48
- [6] 胡翠玲, 肖军, 李勇. 复合材料自动铺带技术研究(1)——“自然路径”特性分析及算法[J]. 宇航材料工艺, 2007, 37(1): 40-42
- [7] 还大军, 李勇, 吴海桥. 复合材料自动铺带技术研究(3)——平面铺带 CAD/CAM 软件开发[J]. 宇航材料工艺, 2007, 37(1): 47-50
- [8] 曹玉璋. 传热学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001: 58-70
- [9] 杨世铭. 传热学基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 12, 34-42
- [10] 森吉尔 (Cengel. Y. A.). 冯妍卉(改编). 传热学 Heat transfer; a practical approach (Second edition) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 6, 105-120

(编辑 吴坚)