

基于自动铺放成型的红外加热系统研究

文立伟*, 余永波, 齐俊伟, 肖军, 严飙

南京航空航天大学 材料科学与技术学院, 江苏 南京 210016

摘要: 通过与传统的热风加热技术对比并参照国外相关研究,采用红外加热替代热风加热,根据稳态下自动铺放成型的红外加热数学模型,基于自动铺带机的硬件结构,通过采用前馈控制方式,制定相应的控制策略,搭建了以速度为变量、温度为控制量、可编程控制器为控制核心的红外加热温度自动控制系统。实验结果表明:使用红外加热恒温自动控制系统成型的复合材料构件表面光滑、无褶皱,层间间隙与气泡少,预浸带黏性适中,无粘接背衬纸及滑移等现象产生,此加热系统能够满足预浸料高速、变速工况下的温度控制要求。

关键词: 自动铺放; 前馈控制; 可编程控制器; 红外加热系统; 温度控制

中图分类号: V261.97 文献标识码: A

随着自动铺放成型技术在航空航天大型构件中的广泛应用,高速铺放成为快速、高效成型的主要手段。铺放速度的提高,给成型过程带来了诸多挑战。为了使预浸料具备适于铺放成型的黏性,必须对其进行加热。目前,国内外大多数自动铺放设备都采用热风加热。但是,热风加热热损失率高、系统反应时间长、灵敏度低,特别是在加热器刚刚启动的时候,这个问题显得尤为突出。此外,国内自行研制的自动铺放成型系统的加热装置并不能满足变速工况下预浸料恒定温度的控制要求,加热系统与工况割离。概括来讲,国内自主研发的自动铺带机中的热风加热系统存在以下不足:①检测温度并非预浸带实际温度;②风机速度不可调;③控制系统未将速度纳入控制变量范围内;④系统硬件结构复杂。在实际操作过程中,变速铺放工况要求加热装置在所有速度范围内快速响应以保证足够的热量供给,这样才能顺利地完成预浸料铺贴。

国外关于自动铺放成型红外加热研究多为热传导/辐射的数学模型建立和有限元模拟分析^[1-6]、自动铺放成型红外加热系统结构及方法的相关专利。其中,Electroimpact公司进行了自动铺带中的红外加热研究,并建立了相关的经验公式,Ingersoll Machine Tools在2008年时就已经成功将红外加热技术运用到自动铺丝成型中,铺放速度达到了50 m/min,极大地提高了制造效率。国内关于自动铺放成型中红外加热技术的研究尚未见报道。

自动铺放成型中红外加热技术是为了满足高速铺放成型以及实现对温度的快捷、恒定控制而发展起来的加热方法^[7-10]。较传统的热风加热,红外加热具有很多优势,如表1所示。本文在已建立的红外加热恒温控制数学模型及自主研发的自动铺带机的基础上开展自动铺放成型中红外加热系统的研究。

收稿日期: 2011-01-17; 退修日期: 2011-02-16; 录用日期: 2011-04-19; 网络出版时间: 2011-06-15 13:21

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20110615.1321.001.html

DOI: CNKI:11-1929/V.20110615.1321.001

基金项目: 国家重大科技专项(2009ZX4004-102); 南京航空航天大学青年科技创新基金(NS2010167)

* 通讯作者. Tel.: 025-84892980 E-mail: wenliwei@nuaa.edu.cn

引用格式: 文立伟, 余永波, 齐俊伟, 等. 基于自动铺放成型的红外加热系统研究[J]. 航空学报, 2011, 32(10): 1937-1944. Wen Liwei, Yu Yongbo, Qi Junwei, et al. Study on infrared heating system based on automatic tape laying[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(10): 1937-1944.

表 1 红外加热与热风加热的比较

Table 1 Comparison between infrared heating and hot gas heating

Property	Heating manner	
	Infrared heating	Hot gas heating
Structure of device	Tight	Waste space
Response speed	Slow	Rapid
Heating directivity	Emanative	Concentrated
Heat loss	High	Low
Heat transmission efficiency	Low	High

1 红外加热系统的硬件结构

红外加热数学模型中,影响铺放成型中预浸料的主要变量为铺放速度。模型从理论上推导出稳态下即预浸料在静止和匀速运行时的温度控制方程,并通过实验得到了验证。在实际应用中多为变速工况,速度变化规律未知,针对这一问题,本文拟采用以速度为变量、温度为控制量的在线跟随模式进行温度控制。

红外加热系统的硬件结构包括:可编程控制器(PLC)、旋转编码器、调压器、红外加热灯、电压表、电流表、温度显示器、热电阻。系统的工作原理为:首先确定预浸料在铺放成型时的目标温度,随后旋转编码器实时采集预浸带的铺放速度信号,并向可编程控制器传送脉冲。可编程控制器根据设定的目标温度及采集到的预浸带脉冲信号、红外加热模型中确定的参数,通过运算获得辐射加热功率,并以电压信号向调压器输出。接收到可编程控制器的调压信号之后,调压器调节电压输出,红外灯获得加热电压,最终向预浸带输出相应的辐射热量。流程图如图 1 所示。

1.1 可编程控制器

红外加热系统所采用的可编程控制器是 CP1H-XA40DR-A 型 PLC(如图 2 所示)。它具有一个高速计数输入端口,通过编写梯形图程序可以读取这一端口的脉冲频率。

1.2 旋转编码器

本系统中所使用的编码器为 E6B2-CWZ6C 增量型编码器(如图 3 所示)。最高响应频率为

100 kHz;分辨率为 2 000 P/R;最高允许转速为 6 000 r/min。

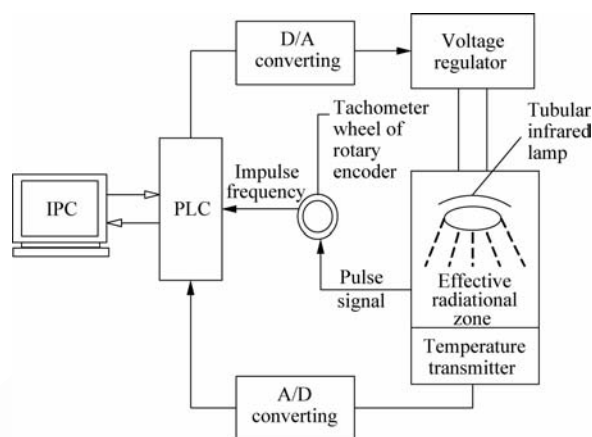


图 1 红外加热温度控制系统框图

Fig. 1 System of temperature control for infrared heating

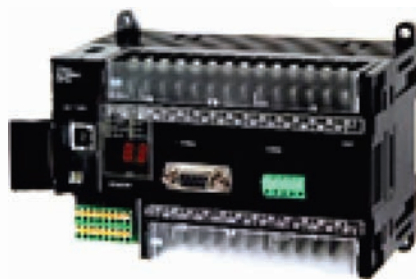


图 2 欧姆龙 CP1H 系列 PLC

Fig. 2 OMRON CP1H series PLC



图 3 E6B2-CWZ6C 编码器

Fig. 3 E6B2-CWZ6C encoder

1.3 调压器

红外加热系统所使用的调压器型号是光电隔离单向交流调压模块 LTVDH-220-15(如图 4 所示)。它具有很高的调压线性度,可以采用电压、电流以及电位器等控制方式进行调压。

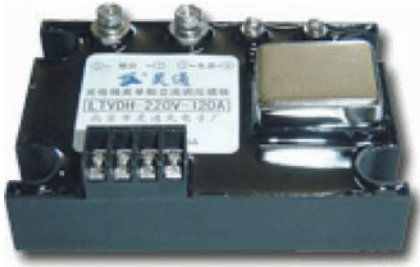
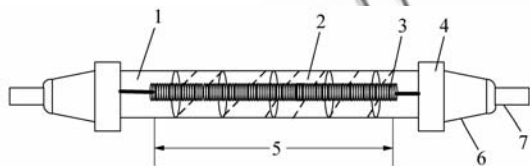


图4 LTVDH-220-15 光电隔离单相交流调压模块

Fig.4 LTVDH-220-15 single phase alternating current (AC) voltage regulator with photoelectric isolation

1.4 红外加热灯

红外加热灯是把电能转化为辐射能的热源。本文采用了管式红外加热灯,其结构可以简单用图5表示。图5中:1为石英管;2为涂金辐射层;3为电热丝;4为夹箍;5为辐射段;6为夹管;7为接线端。



1—Quartz shade; 2—Radiation coat of gold; 3—Electrothermal helix; 4—Clamp; 5—Radiation region; 6—Clamp end; 7—Wiring port

图5 管式红外加热灯结构

Fig.5 Structure of tubular infrared lamp

2 控制方式的选择

通过分析红外加热系统,它具有以下特点:

① 预浸带实时温度难以采集 预浸带的不断运动使实时温度采集几乎不可能。此外,温度传感器存在大滞后,满足不了快速温度采集要求。

② 系统具有快速响应特性 为了保持预浸带温度的恒定,系统需在很短的时间内输出变化的加热功率。输出功率的频繁变换要求系统具有良好的快速响应特性。

③ 系统具有开放性 红外辐射加热区域完全敞开,与外界相通。增加了影响预浸带温度恒定的干扰因素,未知因素的引入也会使系统的不稳定性增加。

前馈控制(Feedforward Control)^[11-12]又称干扰补偿控制,当干扰刚刚出现而又能检测时,前馈控制器便发出调节信号使控制量做出相应的变化,在偏差产生之前,通过控制作用及时抵消干扰作用。前馈控制具有以下特征:

① 依据明确的控制准则进行工作,比反馈控制及时、有效。

② 属于开环控制。

③ 是视对象特性而定的“专用”控制器。

前馈控制主要应用于如下场合:

① 干扰幅值大且变化频繁,对被控量影响剧烈,反馈控制达不到其要求。

② 主要干扰是可测不可控的变量。

③ 对象的控制通道滞后,反馈控制不及时,控制质量较差。

通过对比红外加热系统及前馈控制的特点,结合前馈控制适用的场合,本文采用了前馈控制方式。

3 恒温控制策略

在自动铺放成型过程中,铺放速度随着成型工艺、模具外形以及设备的结构发生变化。在本文的红外加热控制系统中,采用可编程控制器作为控制核心,具有信号采集、数据处理、命令发送迅速的特点,大大降低了系统惯性引起的滞后。基于此,结合建立的匀速下恒温控制方程,本文拟采用匀速处理的方法来实现红外加热的恒温控制。

对匀速状态下的红外加热恒温控制方程进行变换,红外灯辐射功率与预浸带的运行速度关系为

$$P_E = \kappa v \quad (1)$$

式中: P_E 为红外灯辐射功率; v 为预浸带的运行速度; κ 为红外辐射折合系数,它将有效辐射传递系数、红外灯的比热容、预浸带加热目标温度等常数都包含在内,这一系数通常通过实验方法获得。掌握了预浸带运行速度与红外灯加热功率的关系之后,还需要明确红外灯的加热功率与输入电压之间的关系,因为红外加热系统是通过调压方式来实现温度控制。通过实验,获得了红外灯加热功率与输入电压之间的关系。对实验数据进行分析,使用 Origin 软件绘图,结果如图6所示。

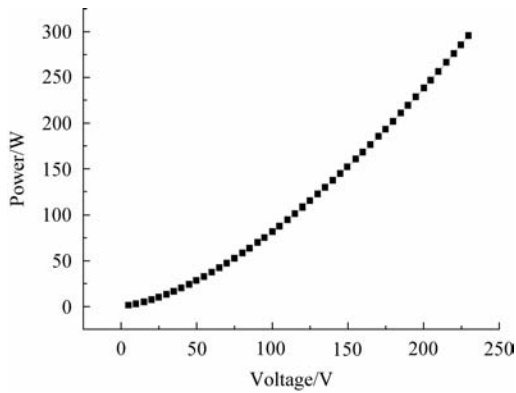


图6 电功率与电压的关系

Fig. 6 Relationship between power and voltage

经过多项式拟合,得到红外灯电功率与电压 U 的关系为

$$P_E = 0.003\ 42U^2 + 0.530\ 93U - 5.402\ 59 \quad (2)$$

代入式(1)得到:

$$P_E = 0.003\ 42U^2 + 0.530\ 93U - 5.402\ 59 = \kappa v \quad (3)$$

即

$$0.003\ 42U^2 + 0.530\ 93U - 5.402\ 59 = \kappa v \quad (4)$$

在这个方程中, κ 为常数,求解得到:

$$U = \{ [0.530\ 93^2 + 4 \times 0.003\ 42 \times (5.402\ 59 + \kappa v)]^{\frac{1}{2}} - 0.530\ 9 \} / (2 \times 0.003\ 42) \quad (5)$$

式(5)即为本文红外加热恒温控制数学模型。它是红外加热软件系统结构的核心,是软件控制系统进行数据运算、处理的依据。

3.1 铺放速度信号的获取

红外加热前馈控制系统中主要控制变量为预浸带的传送速度。采集速度信号的传感器为增量型编码器。CP1H-XA型可编程控制器具有脉冲输入接口,将编码器连接在PLC的脉冲输入端口可以实现对预浸带实时输送速度的采集^[13]。具体的信号采集过程如下:编码器与预浸带适当接触,编码器中心轴与预浸带同步旋转,即编码器测速轮具有和预浸带相同的

线速度。

图7为编码器测速示意图。从图7可以看出,预浸带在运行时带动编码器测速轮,编码器的输出信号为脉冲量,而数学模型中采用的是速度信号,因此需要将脉冲信号转化为速度信号。

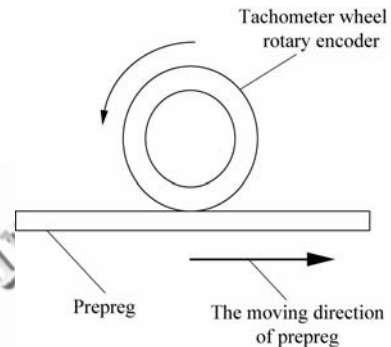


图7 编码器测速示意图

Fig. 7 Schematic of speed collection with encoder

下面以 T 测速法描述脉冲量转化为速度信号的过程。特定的编码器都有唯一的分辨率,假如编码器的分辨率为 n P/R,即编码器旋转一周发出 n 个脉冲量。编码器测速轮的半径为 R 。

每个脉冲量对应的位移量为

$$S_0 = 2\pi R/n \quad (6)$$

设 T 时间内发出脉冲频率为 N ,则该时刻旋转编码器的线速度为

$$V_L = 2\pi RN/(nT) \quad (7)$$

3.2 速度信号采集周期的确定

采用匀速处理方法可以简化数据处理过程,缩短PLC运算周期,同时也会带来误差,使预浸料的实际温度偏离理论计算值。而将预浸料温度误差控制在可接受范围之内,的关键就在于速度采样周期的选择。本文通过估算的方式确立了采样周期。

在一个控制周期内,PLC将初始时刻采集到的速度作为该周期内的控制变量进行数据运算,假定在一个周期内预浸料接收的辐射热量为 Q ,则:

当预浸料以速度 v 匀速铺放时,

$$Q = cm_1 \Delta T_1 = c\rho vt \Delta T_1 \quad (8)$$

当预浸料以速度 v 为初始速度、自动铺放系

统的最高加速度 a 匀速铺放时,

$$Q = cm_2\Delta T_2 = c\rho\left(vt + \frac{1}{2}at^2\right)\Delta T_2 \quad (9)$$

式(8)、式(9)中: Q 为预浸料吸收的辐射热量; c 为预浸料的比热容; a 为自动铺放系统的加速度; t 为采样周期; ρ 为预浸料的线密度; m_1 为预浸料在采样周期内匀加速铺放时的质量; m_2 为预浸料在采样周期内匀速铺放时的质量; ΔT_1 为预浸料匀加速铺放时的温度变化; ΔT_2 为预浸料匀速铺放时的温度变化。

联立式(8)、式(9)得到:

$$c\rho\left(vt + \frac{1}{2}at^2\right)\Delta T_2 = c\rho vt\Delta T_1 \quad (10)$$

则在两种状态下预浸料的温差为

$$\frac{|\Delta T_2 - \Delta T_1|}{\Delta T_1} = \left| \frac{at^2}{2vt + at^2} \right| \quad (11)$$

当 $a > 0$ 时:

$$\frac{|\Delta T_2 - \Delta T_1|}{\Delta T_1} = \frac{at^2}{2vt + at^2} \quad (12)$$

目前国内自主研发的自动铺放成型设备的最高工作速度为 0.5 m/s 左右,若要将预浸料温度的相对误差控制在 10% 以内,则:

$$t < (1/9)a \quad (13)$$

在实际成型过程中,除了在启动、停止时系统的加速度较高之外,铺放速度变化不宜过于激烈。原因在于:剧烈的速度变化容易引起预浸料曲皱或者与上一层拉脱,破坏层间结合,影响制品的质量。另外,从红外加热系统的数据处理能力来看,采样周期过小增加了 PLC 的运算负担,并且快速的速度切换使红外加热系统变得不稳定,高频电压调节也会大大缩短红外灯的使用寿命。结合实践,本文的速度采样周期确定为 0.1 s。

3.3 加热功率的调节

加热功率的调节是通过改变输出电压的方式来实现^[13],因此需要利用 CP1H PLC 的数模转换模块。在 CP1H PLC 中有 1/6 000 和 1/12 000 两个分辨率可供选择,如图 8 所示。

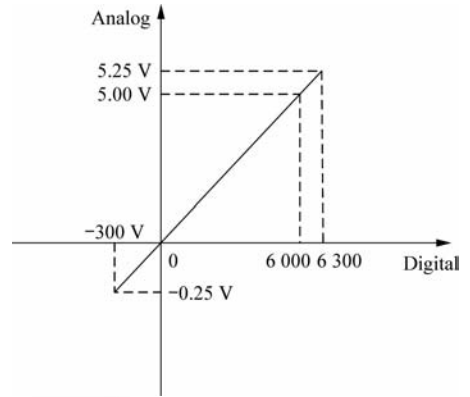


图 8 D/A 转换关系图

Fig. 8 Graph of D/A conversion

4 红外加热系统的软件结构

红外加热系统的软件结构是实现恒温控制的核心部分。如图 9 所示,软件的功能模块包括系统初始化模块、参数设定模块、实时脉冲频率采集模块、数据运算模块、命令输出模块、超调保护模块。本系统的软件部分采用 CX-programmer 7.3 编写。

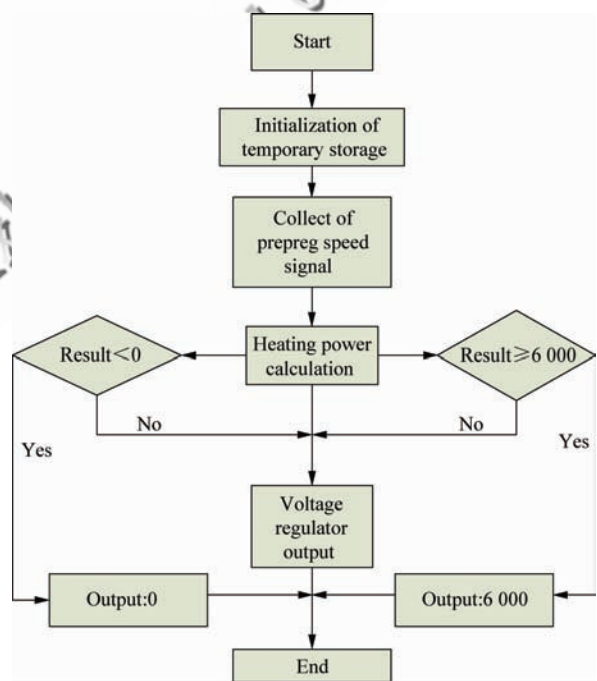


图 9 控制流程图

Fig. 9 Control flowchart

(1) 系统初始化模块

初始化模块是为了实现 PLC 与上位机通讯、向 PLC 传送相关参数设定等操作。

① PLC 与上位机的通讯

PLC 与上位机的通信主要是实现 PLC 与人机界面的交互功能,完成在线运行时相关参数的监测以及命令发送。

② 参数传送

通过参数传送指令,将式(7)中几个参数存储在指定通道内,供后续运算使用。

(2) 实时脉冲频率采集模块

本软件系统中采用 PRV 指令持续采集 0# 高速计数输入的频率,并将其传送到专用数据通道中保存。

(3) 数据运算处理模块

数据运算模块包括脉冲频率与速度的转换和电压输出值的计算。最后输出数字量信号。

(4) 命令输出模块

在命令传送模块中采用了 FIX 指令,将指定的浮点 32 位数据转换为带符号的 BIN16 位数据。

(5) 超调保护模块

为了使系统正常工作,需要对关键数据进行

超调限制,保护外围硬件设备不被损坏。通过采用限位指令 LMT 将输出电压数字量限制在 0~6 000 之间,保证了模拟量输出信号在调压器及红外灯的额定功率之内。此外,在 PLC 的外围还连接了触点开关,在系统发生故障或者运行错误时按下停止按钮即可中断系统的运行。

5 实验分析

为了验证搭建的红外加热恒温控制系统的准确性,使用本系统在自动铺带机进行实验。实验设备及相关工艺参数如表 2 所示。实验使用的预浸带为 5228 环氧预浸带,规格为 0.125 mm × 150 mm,在 600 mm × 700 mm 的平板模具上进行 0° 方向单向铺放。根据 5228 预浸带的热风加热铺放实验数据,本实验将预浸带的目标加热温度设定为 50 °C。实验分别进行了不同速度下的匀速铺放实验及单条轨迹的变速度铺放实验,以验证速度对铺放效果的影响。

表 2 实验设备及相关工艺参数

Table 2 Experimental facilities and related technological parameters

Facilities		Technological parameters		Tape path
Automatic tape laying machine	Die	Temperature	Pressure	Laying in single direction of 0, three prepreg laying parallelly
Automatic tape laying equipment manufactured by NUAA independently	600 mm × 700 mm flat-die made in aluminium	50 °C	230 N	

Note: NUAA is Nanjing University of Aeronautics and Astronautics

通过编写机代码将 3 条路径的进给速度分别设定为 50 mm/s、100 mm/s、150 mm/s (如表 3 所示)。调节输出倍率模拟铺放变速铺放工况,在变速实验中,单条轨迹铺带的铺放速度随着输出倍率的调节而发生变化,3 条铺带的倍率变化范围为 20%~50%。即在每条轨迹铺放的初始位置的输出倍率为 20%,运行至轨迹的终点时为 50%。在自动铺带机的控制系统下,按照设定的参数进行编程,运行的机代码如图 10 所示。

表 3 铺放速度调节表

Table 3 The adjustment of laying speed

Laying under constant speed/(mm · s ⁻¹)			Laying under variable speed/(mm · s ⁻¹)		
Tape 1	Tape 2	Tape 3	Tape 1	Tape 2	Tape 3
50	100	150	10-25	20-50	30-75

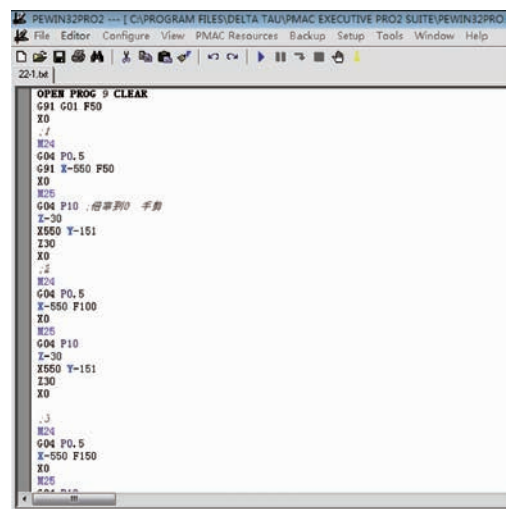


图 10 自动铺带成型机代码

Fig. 10 Machine code of automatic tape laying

在上述温度、压力和速度工艺参数下,获得了单向预浸带铺层。从铺放效果可以看出,预浸带层间结合较好。经手工测试,层间具有较高的抗撕裂强度。铺层气泡及间隙数量较少,铺层光滑、平整。在铺放过程中,预浸带的黏度满足自动铺放的要求,没有出现滑移现象。由此可以得出,本文的红外加热恒温控制系统基本上能够满足变速铺放的要求,并且在不同速度下表现出较好的适应性。铺放的整体效果如图 11 所示。

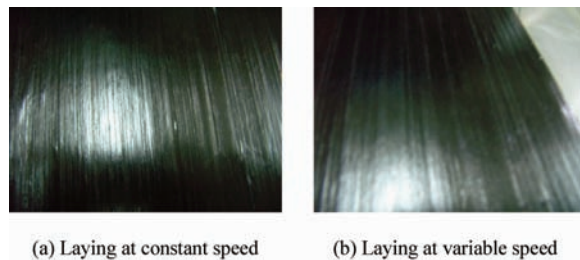


图 11 铺放整体效果图

Fig. 11 Overall effect of automatic placement

从匀速铺放整体效果图(图 12)中可以看出,匀速铺放时,效果良好。图 12 的 3 张铺放图从左至右表示带 3、带 2、带 1 分别在 150、100、50 mm/s 时的铺放效果。除了带 3 有少量的气泡之外,3 条铺放带都很平整。分析原因,带 3 中存在气泡主要是由于铺放速度较快所致。相比匀速铺放,变速铺放中气泡量有所增加,这是由于在实验中,压靴施加的压力恒定,没有调节铺放压力。图 13

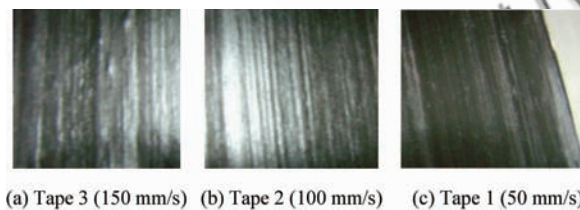


图 12 不同速度下匀速铺放效果图

Fig. 12 Automatic placement at different constant speeds

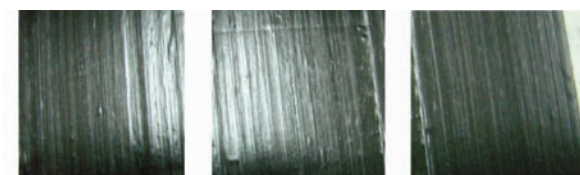


图 13 变速铺放效果图

Fig. 13 Automatic placement at variable speeds

为变速铺放效果图,图 13 带 2 中有压痕存在,这是压靴在该位置停留时间较长所致。

6 结 论

(1) 前馈控制方式能够满足开放、动态的红外加热系统在变速工况下的快速响应特性要求,有利于提高系统的控温精度。

(2) 红外加热在线跟随控制系统控制策略的关键在于速度信号采样周期的选择。

(3) 红外加热恒温自动控制系统能够较好地满足自动铺带成型对温度参数的要求,有益于自动铺放成型系统的整体高度自动化要求。

参 考 文 献

- [1] Sun W C, Mantell S C, Stelson K A. Modeling and control of the in-situ thermoplastic composite tape-laying process[J]. Transactions of the ASME, 1998, 120: 507-516.
- [2] Tumkor S, Turkmen N, Chassapis C. Modeling of heat transfer in thermoplastic composite tape lay-up manufacturing [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2001, 28(1): 49-58.
- [3] Ranganathan S, Don R C, Gillespie J W. Analysis of transport phenomena governing interfacial bonding and void dynamics during thermoplastic tow-placement [J]. Thermoplastic Automated Tow-Placement, 1998, 39(9): 1883-1897.
- [4] Guan X, Pitchumani R. Modeling of spherulitic crystallization in thermoplastic tow-placement process: heat transfer analysis [J]. Composites Science and Technology, 2004, 64(9): 1123-1134.
- [5] Calawa R, Nancarrow J. Medium wave infrared heater for high-speed fiber placement[EB/OL]. (2007-09-17)[2010-04-01]. <http://electroimpact.com/AFP/docs.asp>.
- [6] Zaffiro P A. Control of radiant heating system for thermoplastic composite tape: United States, US005177340A [P]. 1993-01-05.
- [7] 卜伯绘. 辐射换热的分析与计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988: 54-88.
Bian Bohui. Analysis and calculations of radiative heat transfer[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988: 54-88. (in Chinese)
- [8] Cope R D, S B Funck, Gruber M B, et al. Tape placement head for applying thermoplastic tape to an object: United States, US00074044846B2A[P]. 2008-06-29.
- [9] Brogan M T, Monaghan P F. Thermal simulation of quartz tube infrared heaters used in the processing of ther-

- moplastic composites[J]. *Composites*, 1996, 27(4): 301-306.
- [10] Funck R, Neitzel M. Improved thermoplastic tape winding using laser or direct-flame heating [J]. *Composites Manufacturing*, 1996, 6(3-4): 189-192.
- [11] 林锦国. 过程控制[M]. 南京: 东南大学出版社, 2006: 212-263.
Lin Jinguo. *Process control*[M]. Nanjin: Southeast University Publishing House, 2006: 212-263. (in Chinese)
- [12] 郭一楠, 常俊林, 赵峻, 等. 过程控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 176-218.
Guo Yinan, Chang Junlin, Zhao Jun, et al. *Process controlling system*[M]. Beijing: China Machine Press, 2009: 176-218. (in Chinese)
- [13] 霍罡, 樊晓兵. 欧姆龙 CP1H PLC 应用基础与编程实践[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 69-163.
Huo Gang, Fan Xiaobing. *Application foundation and programming practice of OMRON CP1H PLC* [M]. Beijing: China Machine Press, 2008: 69-163. (in Chinese)

作者简介:

文立伟(1970—) 男, 博士, 副教授。主要研究方向: 复合材料的自动化装备技术。

Tel: 025-84892980

E-mail: wenliwei@nuaa.edu.cn

余永波(1984—) 男, 硕士研究生。主要研究方向: 复合材料自动化成型技术。

Tel: 025-84892980

E-mail: yyboy12@163.com

Study on Infrared Heating System Based on Automatic Tape Laying

WEN Liwei^{*}, YU Yongbo, QI Junwei, XIAO Jun, YAN Biao

College of Materials Science & Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

Abstract: By contrasting the conventional hot gas heating and consulting relevant literature, this paper proposes the application of infrared heating to replace hot gas heating in an automatic tape laying machine. It employs feedforward control, establishes a relevant control strategy and constructs an automatic infrared heating thermostatic control system. This system is in accordance with the established infrared heating mathematical model under steady state and makes use of the hardware structure of the automatic tape laying machine. It takes speed as the variable and temperature as the variable to be controlled, and uses a programmable logic controller (PLC) as the cybernetic core. The experiment results show that the automatic infrared heating thermostatic control system can make composite components with smooth surfaces, little or no buckling, and only a low amount of gaps or bubbles between different prepreg layers. The tape stickiness insures that the prepreg does not bond with the backing paper and no slippage occurs. Thus, this system can satisfy the requirements of automatic thermostatic control under high and variable speed situations.

Key words: automatic tape laying; feedforward control; programmable logic controller; infrared heating; temperature control

Received: 2011-01-17; **Revised:** 2011-02-16; **Accepted:** 2011-04-19; **Published online:** 2011-06-15 13:21

URL: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20110615.1321.001.html **DOI:** CNKI:11-1929/V.20110615.1321.001

Foundation items: National Science and Technology Major Project (2009ZX4004-102); NUA A Youth Science and Technology Innovation Funding (NS2010167)

*** Corresponding author.** Tel.: 025-84892980 E-mail: wenliwei@nuaa.edu.cn