

# 自电阻加热对碳纤维增强PEEK 复合材料层间强度和 结晶度的影响\*

张小辉,张绍磊,朱玉祥,王 奔,段玉岗

(西安交通大学机械工程学院高端制造装备协同创新中心,西安 710049)

**[摘要]** 针对热塑性复合材料自动铺放时高效加热需求,研究了采用碳纤维 PEEK 预浸丝束自电阻特性进行高效加热的方法。通过对自电阻加热对流和辐射散热数学关系分析,以及 ABAQUS 电热仿真模拟,获得了热塑性 PEEK 复合材料自电阻加热基本规律。利用设计的双压辊电极自电阻加热铺放试验装置,研究了 PEEK 复合材料的自电阻特性和自电阻加热铺放效果。研究表明,采用自电阻加热方式铺放成型的复合材料,其层间剪切强度随加热电功率的增大先增大后减小,当电参数为直流电压 30V、电流 3.3A 左右时达到最大值 35.6MPa;随铺放压辊压力的增大也是先增大后减小,当压辊压力为 322N 左右时达到最大值 29.5MPa。另外,预浸丝束的结晶度随温度的升高而下降,压辊压力对结晶度的影响不明显。

**关键词:** 自电阻加热;复合材料;聚醚醚酮;层间强度;结晶度

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2020.18.046



张小辉

助理研究员,博士,从事先进复合材料自动铺丝工艺与装备、复合材料增材制造技术研究,主持和参与多台/套自动铺丝装备的研制工作,申请发明专利 20 余项,学术研究论文 SCI 检索 6 篇。

碳纤维增强热塑性复合材料具有成型周期短,耐热性能、力学性能、焊接性能好,可回收复用,以及其预浸料可在常温下长期储存等一系列优势,已经在先进复合材料制造领域获得了广泛应用<sup>[1-4]</sup>。热塑性树脂的熔点比较高(120~340℃),其成型的难点在于热源的选择及在加热过程中对温度的控制,常用的加热方式包括热风加热、激光加热、红外加热、超声波焊接加热。热风加热通常采用工业热风枪提供高温气体<sup>[5-6]</sup>,热风枪尺寸较小,可以安装在狭小空间内,但是其热量的利用率过低。

Heider 等<sup>[7]</sup>搭建双氮气热风枪加热形式,一个热风枪用于两层预浸带之间的融合;另一个热风枪提供厚度上加热,从而进一步提高整体的粘合程度。激光加热加热能量集中,可以在瞬间达到需要的温度,但其设备成本高,需要特制的激光镜头以产生较大尺寸的均匀光斑,并且需要较大的激光头安装空间<sup>[8-10]</sup>。Stokes-Griffin 等<sup>[11]</sup>搭建了激光加热系统,激光直射在两层预浸带之间,并建立了三维光热耦合模型,指出在激光加热粘点附近存在阴影区<sup>[12]</sup>。爱尔兰复合材料研究中心<sup>[13]</sup>使用 CF/PEEK 预

\* 基金项目:国家自然科学基金(51875444);陕西省重点研发计划项目(2019ZDLGY02-08);国防基础科研计划(JCKY2019204A001)。

浸料制造翼箱表面的加强筋,发现铺放方向与激光功率对加强筋界面的断裂韧性有显著影响。红外加热是采用红外辐射传热的方式对复合材料试件进行加热<sup>[14-15]</sup>,其加热过程能耗较低,加热响应速度快,装置简单利于维护和更换。宋清华等<sup>[16]</sup>研究了高速响应的红外辐射前馈控制加热技术,对预浸带的加热温度进行精确控制,但是红外加热方式加热温度低,无法实现高温高效率加热。超声波焊接加热通过摩擦生热的形式将两层 PEEK 预浸带加热粘合在一起。Rizzolo 等<sup>[17]</sup>开发了超声波焊接成型试验装置,表明了超声波焊接加热可以在不与其他加热形式结合的情况下,制造出性能与焊件相当的复合材料试件。王鑫<sup>[18]</sup>、陈浩然<sup>[19]</sup>等以超声波为热源,制备 CF/PEEK 层合板,研究超声功率、铺放速度、张力等工艺对成型质量的影响。电加热是以碳纤维自电阻发热的形式来提供基体熔化所需要的热量。任小珍<sup>[20]</sup>采用统计分析和 ABAQUS 仿真分析的方法建立平纹织物的等效电阻网络,并对模拟结果与试验结果进行了对比研究。Gigliotti 等<sup>[21]</sup>分析了电流对复合材料制件的影响,研究了在直流电作用下复合材料的热电响应。Liu 等<sup>[22]</sup>利用电热效应加速混凝土基复合材料的水化反应。益小苏<sup>[23]</sup>与王永军等<sup>[24]</sup>利用热压模具通电的方法,将模具作为电极给预浸料通电加热固化。

碳纤维优异的导电性能给采用自电阻加热的方法成型 CF/PEEK 复合材料试件带来了可能,目前这方面的研究较少,本文针对碳纤维增强 PEEK 复合材料自电阻加热进行研究,设计并搭建碳纤维增强 PEEK 复合材料自电阻加热成型试验设备,并对其制备的复合材料构件各项性能进行表征,探索不同自电阻加热参数对复合材料层间强度和结晶度的影响。

## 理论及有限元模拟分析

碳纤维本身具有导电性和一定电阻,由于电流的热效应,电流在经过碳纤维时会产生焦耳热。利用预浸带自身电阻通电发热消耗电功率,将电能转化为热能,使预浸带自身温度上升。

对于 PEEK 预浸带,其温度上升满足:

$$T = \frac{Q_1 - Q_s}{m \cdot c} = \frac{\eta \cdot P \cdot t}{m \cdot c} - \frac{\frac{h_c}{T_p - T_e} + \varepsilon \cdot C_b \cdot [(T_p / 100)^4 - (T_e / 100)^4]}{m \cdot c}$$

式中,  $T$  为电加热预浸带到达的温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $Q_1$  为总加热热量,  $\text{J}$ ;  $Q_s$  为总散热量,  $\text{J}$ ;  $m$  为预浸带质量,  $\text{kg}$ ;  $c$  为预浸带的比热容,  $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$ ;  $\eta$  为电加热效率;  $P$  为电加热功率,  $\text{W}$ ;  $t$  为加热时间,  $\text{s}$ ;  $A$  为散热壁面面积,  $\text{mm}^2$ ;  $h_c$  为空气对流表面换热系数;  $T_p$  为预浸带表面温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_e$  为环境温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\varepsilon$  为预浸带的发射率;  $C_b$  为黑体辐射系数;  $T_p$  为预浸带表面温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_e$  为环境温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

进一步通过有限元仿真来模拟电加热过程。以具有良好的绝缘性能与耐高温性能的云母板作为加热底板,尺寸为长  $120\text{mm} \times$  宽  $50\text{mm} \times$  厚  $5\text{mm}$ ,预浸带模型的尺寸

为长  $100\text{mm} \times$  宽  $6\text{mm} \times$  厚  $0.08\text{mm}$ 。将两个部件进行装配,把预浸带居中放在云母板的上面并保持贴合。云母板平板模具全局尺寸控制为  $1\text{mm}$ ,选择专门用于热电耦合的单元类型 DC3D8E 八节点线性六面体单元,单元形状为结构化六面体,预浸带全局尺寸控制为  $1\text{mm}$ ,并在厚度方向上布种为  $0.08\text{mm}$ ,同样采用 DC3D8E 单元,划分完的网格如图 1 所示。

创建实体均质的预浸带截面属性并赋予给预浸带模型,设定  $K_{11}$  方向为  $X$  方向,即沿着纤维长度的方向,  $K_{22}$  为  $Y$  方向,即沿预浸带宽度方向,  $K_{33}$  为  $Z$  方向,即沿预浸带厚度方向。另外设定预浸带 3 个方向的电导率,  $S_{11}$  为  $X$  方向的电导率,  $S_{22}$  和  $S_{33}$  分别为  $Y$  方向和  $Z$  方向的电导率。根据试验中测试到的预浸带电阻值,得到电加热仿真参数如表 1 所示。

电加热会在极短的时间内在导体内产生焦耳热,使预浸带的温度迅速上升。设定预浸带电阻为  $4\Omega$ ,集中电流为  $2\text{A}$ ,电压为  $8\text{V}$ ,在不同时刻,预浸带的温度场分布如图 2 所示。可以看出,在电流施加的局部地区温度较高,由两边逐渐向中间进行传热,随着电加热时间的累积,温度场的温度越来越高,并超过了 PEEK

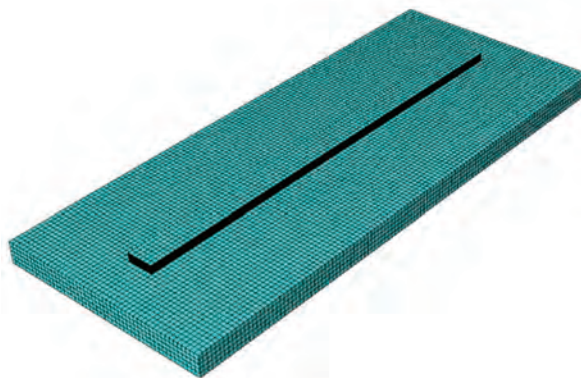


图1 电加热模型网格划分图

Fig.1 Electric heating model mesh

的熔融温度(340℃)。仿真结果表明,采用自电阻加热方式能够实现 PEEK 预浸带的快速加热,从而能够实现 PEEK 复合材料试件的制作。

## 试验及方法

### 1 直流电加热装置设计

自电阻加热是通过碳纤维在通电时自身电阻所产生的热量对其进行加热,从而使碳纤维预浸带达到熔融状态的一种加热方法。PEEK 预浸带直流电加热采用接触压辊形式,利用气缸施压给压辊,并让两个压辊分别导通电源的正负极,两个压辊之间设定一定的距离,移动时保持压辊之间的距离不变。控制气缸的伸出缩回可控制电路的导通断开,利用弹簧片的弹性与压辊表面始终保持接触来接入电流对预浸带进行加热,可通过控制移动速度来控制加热时间,以达到控制热量的目的(图 3 和图 4)。为了试验安全,设计了绝缘防护,确保电功率加载在 PEEK 预浸带上。

### 2 预浸带加热特性的测试

制作预浸带试验试片,用万用表(型号: FTIKE DT-0205A)测量预浸带电阻值变化,分别测试沿纤维长度方向(X方向)、沿预浸带宽度方向(Y方向)和沿预浸带厚度方向(Z方向)的电阻值。

采用设计的电加热装置对 PEEK 预浸带进行电加热试验,采用红外热像仪(型号: FLIR Systems AB, SC7300M)分别测试加热过程中 X 方向和 Y 方向的加热温度,分析预浸带加热特性。

### 3 CF/PEEK 复合材料试件的制作和测试

按照 ASTM—2344<sup>[25]</sup> 标准制作自加热 PEEK 复合材料试件,对复合材料层间剪切性能进行测试;根据 GB—T19466/3/2004<sup>[26]</sup>,结合试验用 PEEK 预浸带制定 DSC 测试温度控制过程如下, DSC 设备型号 METTLER—TOLEDO DSC1;室

表1 电加热仿真输入参数

Table 1 Electrical heating simulation input parameters

输入参数与单位	数值或范围
云母板密度 / (kg·m <sup>-3</sup> )	2350
云母板导热系数 / (W·m <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	0.71
云母板比热容 / (J·kg <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	880
云母板电导率 / (Ω·mm) <sup>-1</sup>	9.88 × 10 <sup>-5</sup>
CF/PEEK 预浸带密度 / (kg·m <sup>-3</sup> )	1560
CF/PEEK 预浸带比热容 / (J·kg <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	1425
CF/PEEK 预浸带电导率 / (Ω·mm) <sup>-1</sup>	S <sub>11</sub> =69.44~20.83, S <sub>22</sub> =S <sub>33</sub> =5
CF/PEEK 预浸带热传导率 / (W·m <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	K <sub>11</sub> =6, K <sub>22</sub> =K <sub>33</sub> =0.72
集中电流 /A	2~8
电势 /V	6~48
CF/PEEK 预浸带发射率	0.95

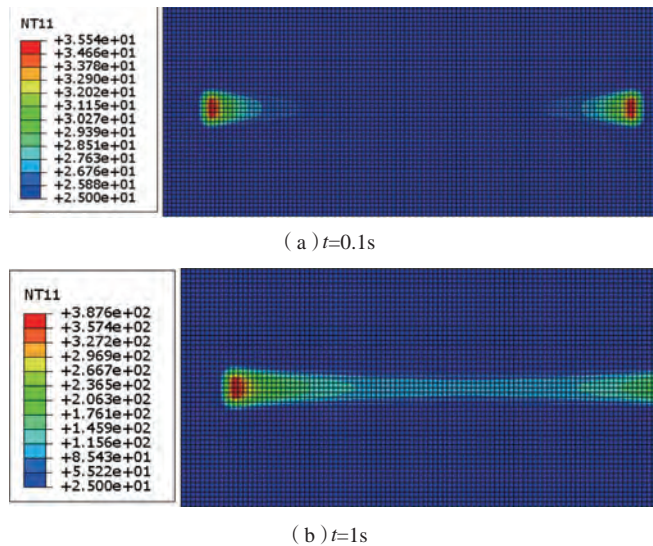


图2 不同时刻预浸带温度场

Fig.2 Temperature field of prepreg at different time

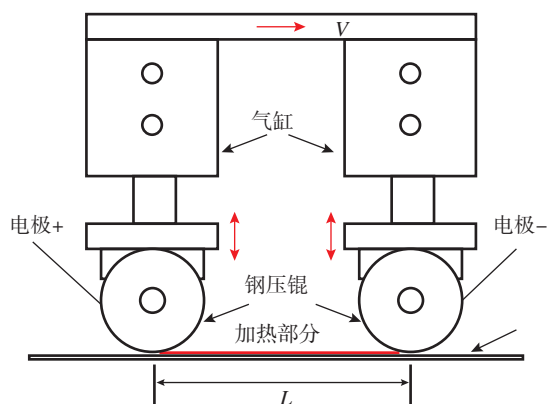


图3 电加热铺放原理示意图

Fig.3 Schematic of electrical heating assisted tape placement

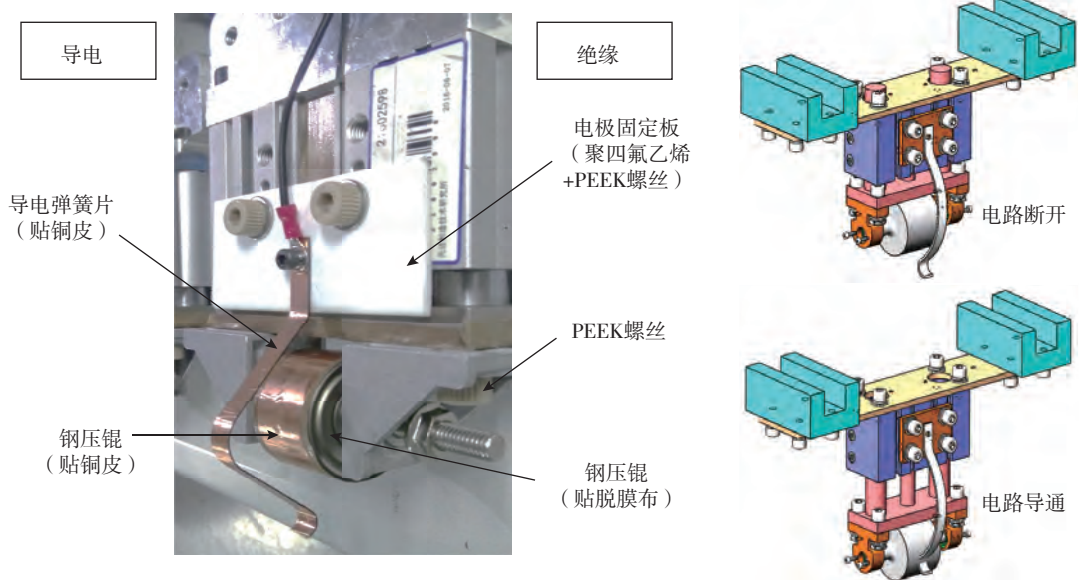


图4 压辊电加热的导电与绝缘处理

Fig.4 Electrical heating and insulation treatments of compression roller

温保温 0.5min; 以 40 °C/min, 升温至 200 °C; 再以 20 °C/min, 升温至熔融温度 +30 °C (380 °C); 保持温度 5min, 完成测试后, 降温至室温。



图5 不同长度的预浸带电阻值测试样件

Fig.5 Resistance-testing prepreg samples with various lengths

## 结果与讨论

### 1 电阻值的各向异性

铜电极与预浸带之间的背胶影响了电阻的测试, 为排除背胶的影响, 设置了不同长度的预浸带测量其电阻值, 有效长度分别为 100mm, 200mm、300mm、400mm、500mm, 宽度皆为 20mm, 厚度皆为 0.08mm, 如图 5 所示, 以测得稳定的电阻值。

测量 X 方向的预浸带电阻值, 每个长度预浸带测量 5 次, 求其平均值, 根据测得电阻值构建预浸带长度—电阻值线性回归方程, 回归方程 y 轴截距为平均接触电阻, 回归方程斜率即为预浸带平均电阻值。求得平均接触电阻为 47.45 Ω, PEEK 预浸带平均阻值为 0.15 Ω/mm。

测量 Y 方向的预浸带阻值, 预浸带长 100mm、宽 20mm、厚度 0.08mm, 预浸带两侧贴上铜电极, 横向的碳纤维遭遇 PEEK 树脂的阻挡,

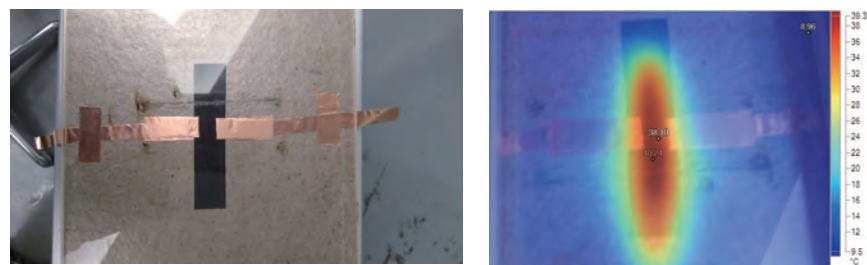


图6 Y方向通电测试及预浸带温度场分布

Fig.6 Current test and temperature field distribution of prepreg strip in Y direction

有很大的接触电阻, 测量 5 次, 计算平均电阻值为 123.5 Ω/mm。

测量 Z 方向的预浸带电阻分为两种, Z 为单层形式, 将铜电极贴到单层预浸带的上下表面, 预浸带厚度 0.08mm, 测量 5 次, 计算平均电阻值为 343.75 Ω/mm。

首先进行单层 Y 方向通电的试

验, 从电阻值的各向异性可知, 预浸带在 Y 方向(预浸带宽度方向)上的电阻很大, 现设置 Y 方向的通电试验装置如 5 所示, 试验样件尺寸长 100mm × 宽 20mm × 厚 0.08mm, 在 Y 方向的上下两侧贴好铜电极, 使电极之间间隔为 10mm, 并用铜皮将电极引出, 接入稳压电源的正负极。在

预浸带两侧通入不同的电压,预留足够的限制电流,当施加到稳压电源的最大电压 60V,通电时间 40s,从红外热像仪拍到的温度场分布(图 6)来看,温度分布不均匀,在中间电极接触部位温度最高,沿着 X 方向两边逐渐降低,而且预浸带所能到达的最高温度也只有 40℃左右,无法为预浸带的熔化提供足够的热量。考虑试验安全,未进一步提高电压,上述试验结果表明预浸带在 Y 方向上的自电阻加热效应不明显,论文后续主要采用在 X 方向上进行通电加热的方

法来制作试件。

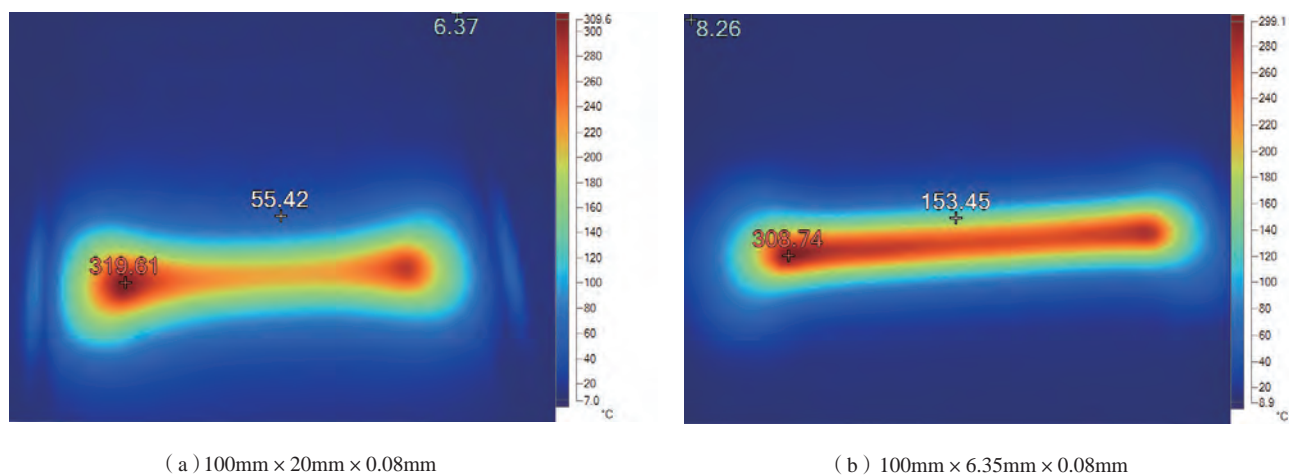
进行 X 方向上的通电试验,剪裁不同尺寸的预浸带,在两侧接通电源,设定电参数为 30V,限定电流 8A,通电时间 40s,观察不同的温度场分布,如图 7 所示。

由结果可知,对于不同尺寸的预浸带,加热过程预浸带整面的温度场分布不均,在与铜电极接触的地方由于接触电阻比较大,会产生局部的高温,预浸带整面的平均温度大约是最高温度的一半,较窄的预浸带温度在宽度方向上分布较为均匀。

X 方向的通电试验,其加热温度场趋势与 ABAQUS 电热耦合分析的温度场趋势基本一致,如图 2 (b) 所示,即实际预浸带与电极接触的地方升温比较快,随后,等温线会逐渐向中间合拢。由焦耳定律可知,电阻越小,电压不变的情况下所产生的加热电流越大,从而能够提高热塑性预浸带的加热温度。随着热量的增加和传导,加热均匀性有所改善。

## 2 电加热参数对 CF/PEEK 复合材料试件层间粘和效果的影响

为观察两层预浸带层间粘和效

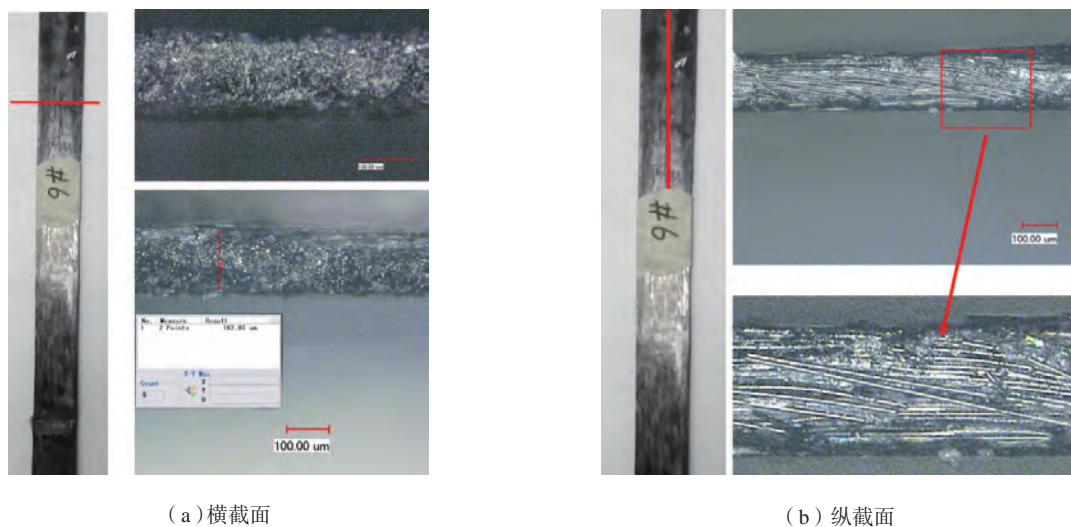


(a) 100mm × 20mm × 0.08mm

(b) 100mm × 6.35mm × 0.08mm

图7 X方向通电不同尺寸预浸带温度场分布(长×宽×厚)

Fig.7 Temperature field distribution of prepreg strips of different sizes energized in X direction (Length × width × thickness)



(a) 横截面

(b) 纵截面

图8 电加热后的预浸带横截面和纵截面

Fig.8 Cross section and longitudinal section of prepreg strip after electrical heating

果,将电加热后的预浸带进行断面微观分析,利用光学显微镜进行观察。图8为电参数30V、限定电流8A、通电时间40s的电加热样件,从横向截开(沿Y方向切断),已无法看到明显的分层情况,融合层厚度 $162.03\mu\text{m}$ ,大约是单侧厚度 $0.08\text{mm}$ 的两倍,从纵向截开(沿X方向),上下两层预浸带的纤维已经互相层,说明树脂经过流动重新结晶,上下两层已经融合为一体。气缸缸径为 $32\text{mm}$ ,气缸气压压强为 $0.4\text{MPa}$ ,压力约为 $322\text{N}$ 。

不同额定电压与电流参数试验结果如表2所示。考虑人体安全电压,最高电压设定为 $30\text{V}$ 。由表2可知,随着电压与电流的逐渐增大,两层预浸带之间的粘合效果越来越好,对于该尺寸下的预浸带,采用电压 $30\text{V}$ 及以上、电流 $3\text{A}$ 及以上的电参数能够使得上下两层预浸带粘合为一体。仿真条件与实际试验条件差异较大的原因主要是仿真环境中没有考虑实际测试中加热装置接触电阻、预浸带电阻均匀性、压辊接触导热等对最终加热温度的影响等。但仿真结果明确了自电阻加热的基本趋势,对后续的试验有一定的指导意义。

### 3 设定电参数对层间剪切强度的影响

对于斯泰克DP6020型号可调稳压直流电源,设定输出电压与输出电流,当预浸带的电阻值较大时,处于限压情况,即电压保持恒定输出,电流随预浸带的电阻值变化而变化;当预浸带的电阻值较小时,处于限流情况,即电流保持恒定输出,电压随预浸带的电阻值变化而变化。由于预浸带电阻值较小,试验中采用限流输出,设定电压 $30\text{V}$ ,通过调整限定电流来调整加热功率。

设定气缸气压压强为 $0.4\text{MPa}$ ,压力约为 $322\text{N}$ 。设定输出电压 $30\text{V}$ ,通过调整稳压电源限流控制输出功率的大小,在不同设定电功率下

进行PEEK预浸带的固化试验,并对固化试验样件进行层间剪切强度测试。

按照JC/T 773-1982单向纤维增强塑料层间剪切强度试验方法<sup>[27]</sup>,将固化得到的试验样件裁成尺寸较小的试样,利用电子万能力学试验机测量短梁层间剪切强度,测量结果如图9所示。当设定电压 $30\text{V}$ ,随着限定电流的不断提高,即电功率不断提高时,电加热功率增大使得层与层之间的融合效果增强,层间剪切强度

不断改善;当设定输出电压 $30\text{V}$ ,限定电流 $3.3\text{A}$ 时,即当设定电功率在 $100\text{W}$ 左右时,层间剪切强度达到最大值 $35.6\text{MPa}$ ;设定电压 $30\text{V}$ ,限定电流大于 $3.3\text{A}$ ,即设定电功率超过 $100\text{W}$ 后,大电流使得预浸带部分区域的红热烧伤,树脂基体产生分解,导致强度下降。

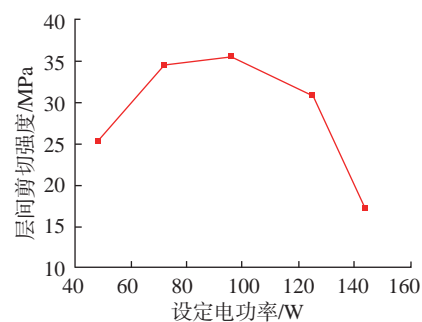
### 4 压紧力对层间剪切强度的影响

在双压辊固化过程中,压紧力通过压辊施加在已熔融的预浸带上,使得层与层或者层与模具贴合

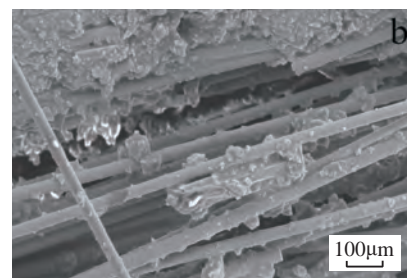
表2 不同额定电参数加热预浸带层间粘合效果

Table 2 Adhesion between layers of prepreg strips heated with different electrical parameters

组别	设定电压/V	最大限定电流/A	融合效果
1	20	5	不粘合
2	25	8	大部分粘合
3	30	5	粘合
4	30	8	粘合



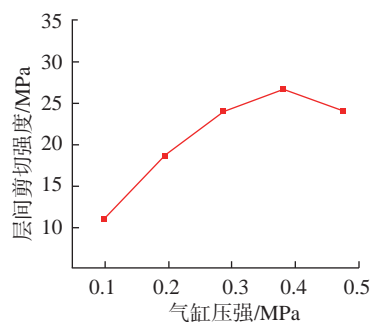
(a)层间剪切强度



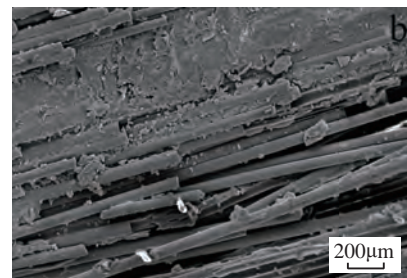
(b)树脂基体烧蚀分解

图9 短梁层间剪切强度

Fig.9 Interlaminar shear strength of short beams



(a)层间剪切强度



(b)局部的纤维集中和贫胶

图10 样件层间剪切强度

Fig.10 Interlaminar shear strength of samples

在一起。压紧力过大会导致树脂的层间流动,出现局部贫胶,压紧力过小不利于预浸带层间的粘接,从而影响铺层性能。

设置电参数为30V,最大限流8A,通过调整气缸压强,在不同压力下固化得到试验样件,压强调整范围为0.1~0.5MPa。按照JC/T 773—1982标准切成短梁样件,通过电子万能试验机测量样件的层间剪切强度,试验结果如图10所示。随着压力的增大,样件的层间剪切强度逐渐增大,在气缸压强为0.4MPa时有最大值29.5MPa;当气缸压强为0.5MPa时,压力过大使得材料在固化过程中变形严重,较大的压力使得纤维与树脂的分布不均匀,局部的纤维集中和贫胶造成层间剪切强度的

削弱。

## 5 电加热参数对CF/PEEK复合材料试件结晶度的影响

### 5.1 电加热温度对结晶度的影响

取预浸带样件尺寸(长)100mm×(宽)6.35mm×(厚)0.08mm,通过控制电压电流参数控制加热功率,在不同电参数下进行加热,通电时间40s,使用红外热像仪检测其温度,制备CF/PEEK复合材料试样。

得到的样件裁切成小块,使用差示扫描量热仪测试结晶度,测试结果如图11所示,加热温度由低到高的结晶度分别为12.35%、11.72%、10.98%、9.21%、7.74%,对应测得加热温度分别为62.93℃、120.32℃、223.57℃、296.98℃、359.99℃,未

加热常温下的预浸带结晶度为15.51%,认为常温下预浸带的加热温度为25℃。加热温度较低时,升降温速率较低,预浸带的加热温度未到PEEK树脂的熔融温度,PEEK树脂只发生了软化现象,预浸带的结晶度稍有下降,当加热温度升高,升温速率加快,树脂经过极速的加热熔融与冷却凝固,结晶度大幅降低。

### 5.2 压紧力对结晶度的影响

取预浸带样件尺寸长100mm×宽6.35mm×厚0.08mm,设定通电参数为电压30V,限流8A,通电时间40s,调节气缸气压,在不同的压紧力下制备CF/PEEK复合材料试样,并通过DSC测量其结晶度,结果如图12所示,自下而上气缸气压分别为0.1MPa、0.2MPa、0.3MPa、0.4MPa、

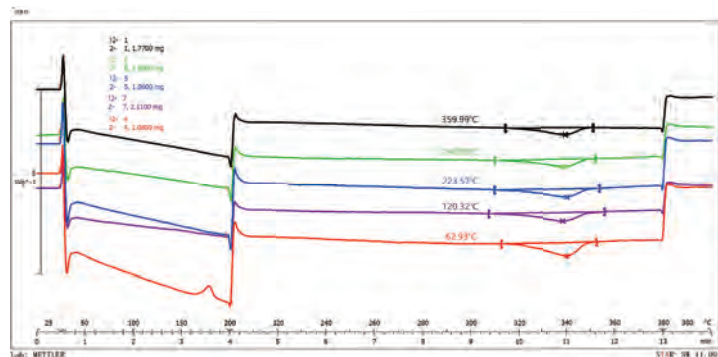
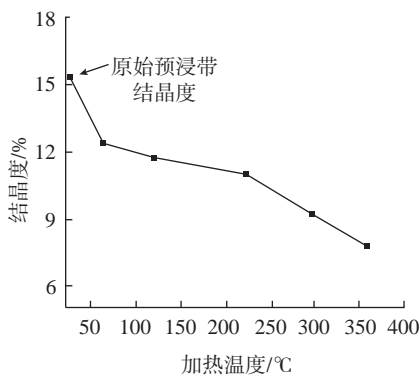


图11 不同加热温度下预浸带结晶度的变化

Fig.11 Crystallinity of prepreg strips at different heating temperatures

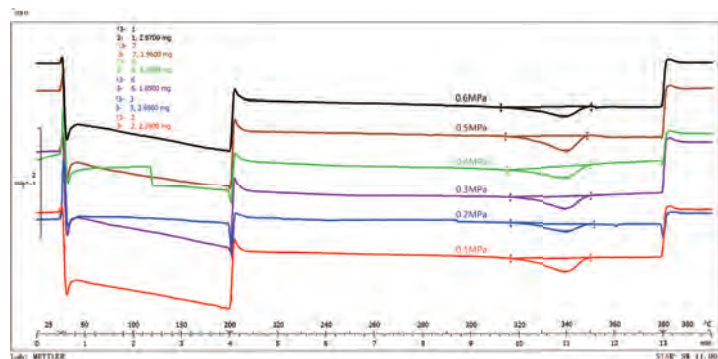
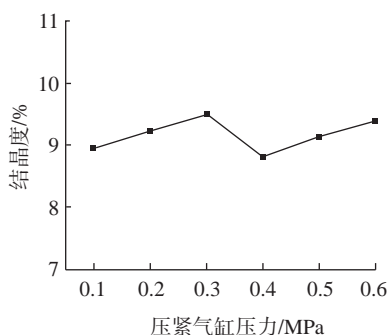


图12 不同压紧气缸压力下预浸带结晶度的变化

Fig.12 Crystallinity of prepreg strips under different cylinder pressures

0.5MPa、0.6MPa。结果显示不同气缸压力下,树脂的结晶度有上下浮动,但没有明显随气缸压力上升或下降的趋势,说明压力对树脂的融合与再结晶过程几乎没有影响。

## 结论

本文围绕 CF/PEEK 自电阻加热工艺展开研究,从预浸带电阻值、电加热特点、电功率、加热温度、压紧力 5 个方面,通过仿真分析与试验研究,得到了自电阻加热工艺参数对复合材料样件性能的影响,具体结论如下:

(1) 通过对预浸带电阻各向异性的分析和通电试验验证,发现 X 方向,即沿纤维方向为最合适的通电方向,加热时预浸带与电极接触的区域升温较快,中间区域升温较慢,较窄的预浸带在宽度方向上的温度分布较为均匀。

(2) 增大电加热功率可以使层间融合效果增强,进而提升层间剪切强度,当设定输出电压 30V、电流限制为 3.3A 时,即当设定电功率在 100W 左右时层间剪切强度达到最大值为 35.6MPa,继续提高电功率会使树脂基体产生分解,导致强度下降;增大压紧力有利于提升层间剪切强度,气缸压力为 0.4MPa 时层间剪切强度最大为 29.5MPa,但压紧力过大会使纤维树脂分布不均匀,导致强度下降。

(3) 预浸带的结晶度随加热温度的升高而下降,相同温度下,预浸带的结晶度与压紧力没有明显关系。

## 参考文献

[1] 孙银宝,李宏福,张博明.连续纤维增强热塑性复合材料研发与应用进展[J].航空科学技术,2016,27(5):1-7.

SUN Yinbao, LI Hongfu, ZHANG Boming. Progress in research and application of continuous fiber reinforced thermoplastic

composites[J]. Aeronautical Science and Technology, 2016, 27(5): 1-7.

[2] 杜巍峰.碳纤维增强聚醚醚酮的研究[D].吉林:长春工业大学,2015.

DU Weifeng. Study on enhanced effect of polyether-ether-ketone-based carbon fiber composites[D]. Changchun: Changchun University Technology, 2015.

[3] UADY Vaidya. 热塑性复合材料在航空航天中的应用[J]. 航空制造技术, 2015, 58(14): 69-71.

UDAY Vaidya. Thermoplastic composites for aerospace applications[J]. Aeronautical Manufacturing Gechnology, 2015, 58(14):69-71.

[4] 魏莉霞,马鸣图,杨洁.长纤维增强热塑性复合材料在汽车轻量化上的应用[J].新材料产业,2013(9):45-52.

WEI Lixia, MA Mingtu, YANG Jie. Application of continuous fiber-reinforced thermoplastic composites in lightweight of automobile [J]. Advanced Materials Industry, 2013(9): 45-52.

[5] SHADMEHRI F, CAI X, HOJJATI M, et al. Effect of autoclave process on the quality of thermoplastic composite truncated cones manufactured using automated fiber placement technique[J]. Science and Engineering of Composite Materials, 2015, 22(2): 175-186.

[6] SHADMEHRI F, HOA S V, FORTIN-SIMPSON J, et al. Effect of in situ treatment on the quality of flat thermoplastic composite plates made by automated fiber placement (AFP)[J]. Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science, 2018, 4(2): 41-47.

[7] HEIDER D, PIOVOSO M J, GILLESPIE J W J. A neural network model-based open-loop optimization for the automated thermoplastic composite tow-placement system[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2003, 34(8): 791-799.

[8] GROUVE W J B, WARNET L L, RIETMAN B, et al. Optimization of the tape placement process parameters for carbon-PPS composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2013, 50: 44-53.

[9] YASSIN K, HOJJATI M. Processing of thermoplastic matrix composites through automated fiber placement and tape laying methods: A review[J]. Journal of Thermoplastic

Composite Materials, 2018, 31(12): 1676-1725.

[10] PARANDOUSH P, TUCKER L, ZHOU C, et al. Laser assisted additive manufacturing of continuous fiber reinforced thermoplastic composites[J]. Materials & Design, 2017, 131: 186-195.

[11] STOKES-GRIFFIN C M, COMPSTON P. Investigation of sub-melt temperature bonding of carbon-fibre/PEEK in an automated laser tape placement process[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016, 84: 17-25.

[12] STOKES-GRIFFIN C M, COMPSTON P. Optical characterisation and modelling for oblique near-infrared laser heating of carbon fibre reinforced thermoplastic composites[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 72: 1-11.

[13] BANDARU A K, CLANCY G, PEETERS D, et al. Properties of a thermoplastic composite skin-stiffener interface in a stiffened structure manufactured by laser-assisted tape placement with in situ consolidation[J]. Composite Structures, 2019, 214: 123-131.

[14] JANSSEN H, PETERS T, BRECHER C. Efficient production of tailored structural thermoplastic composite parts by combining tape placement and 3D printing[J]. Procedia CIRP, 2017, 66: 91-95.

[15] STOKES-GRIFFIN C M, COMPSTON P, MATUSZYK T I, et al. Thermal modelling of the laser-assisted thermoplastic tape placement process[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2015, 28(10): 1445-1462.

[16] 宋清华,刘卫平,肖军,等.热塑性复合材料自动铺放过程中红外加热技术研究[J].材料工程,2019,47(1):77-83.

SONG Qinghua, LIU Weiping, XIAO Jun, et al. Thermoplastic composite materials automatically in the process of laying the infrared heating technology research[J]. Materials Engineering, 2019,47 (1): 77-83.

[17] RIZZOLO R, WALCZYK D. Ultrasonic consolidation of thermoplastic composite prepreg for automated fiber placement[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2016, 29(11): 1480-1497.

[18] 王鑫,李勇,还大军,等. CF/PEEK 超声原位固结铺放及其复合材料力学性能[J].

航空学报, 2018, 39(9): 224-232.

WANG Xin, LI Yong, HUAN Dajun, et al. Ultrasonic-assisted in-situ placement of CF/PEEK composite and its mechanical properties[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(9): 224-232.

[19] 陈浩然, 李勇, 还大军, 等. T700/PEEK 热塑性自动铺放预浸纱制备质量控制及性能研究[J]. 航空学报, 2018, 39(6): 228-237.

CHEN Haoran, LI Yong, HUAN Dajun, et al. Quality control and mechanical properties of T700/PEEK thermoplastic prepreg for AFP[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(6): 228-237.

[20] 任小珍. 树脂基碳纤维单层板电热效应特征的研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2016.

REN Xiaozhen. Characteristics of resin base carbon fiber electric heating effect on the single research[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2016.

[21] GIGLIOTTI M, LAFARIE-FRENOT M C, GRANDIDIER J C. Development of experimental and modelling tools for the characterisation of the thermo-

electro-mechanical behaviour of composite materials for aircraft applications[J]. Mécanique & Industries, 2011, 12(2): 87-101.

[22] LIU Y S, WANG M Z, WANG W. Ohmic heating curing of electrically conductive carbon nanofiber/cement-based composites to avoid frost damage under severely low temperature[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2018, 115: 236-246.

[23] 益小苏, 秦明. 碳纤维增强复合材料的自电阻加热成型方法: CN1544238A[P]. 2004-11-10.

YI Xiaosu, QIN Ming. Since the resistance heating forming method of carbon fiber reinforced composites: CN1544238A [P]. 2004-11-10.

[24] 王永军, 蔡豫晋, 王望, 等. 树脂基碳纤维复合材料的自电阻加热固化方法: CN105479768A[P]. 2016-04-13.

WANG Yongjun, CAI Yujin, WANG Wang, et al. Since the resistance of resin base carbon fiber composites electrical heating curing methods: CN105479768A [P]. 2016-04-13.

[25] American Society of Testing Materials. ASTM D2344 / D2344M-16 Standard test method for short-beam strength of polymer matrix composite materials and

their laminates[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2016.

[26] GB/T 19466.3—2004 塑料—差示扫描量热法(DSC)第3部分: 熔融和结晶温度及热焓的测定[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2004.

GB/T 19466.3—2004 Plastics—Differential scanning calorimetry(DSC)—Part 3: Determination of temperature and enthalpy of melting and crystallization[S]. Beijing: The State Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Management Committee, 2004.

[27] JC/T 773—2010 纤维增强塑料短梁法测定层间剪切强度[S]. 北京: 中华人民共和国工业和信息化部, 2010.

JC/T 773—2010 Short fiber reinforced plastic beam method determination of interlaminar shear strength[S]. Beijing: The People's Republic of China Ministry of Industry and Information Technology, 2010.

通讯作者: 张小辉, E-mail: zhangxiaohui@xjtu.edu.cn.

## Effects of Ohmic Heating on Interlaminar Shear Strength and Crystallinity of PEEK CFRP Composite

ZHANG Xiaohui, ZHANG Shaolei, ZHU Yuxiang, WANG Ben, DUAN Yugang

(Collaborative Innovation Center of High-End Manufacturing Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**[ABSTRACT]** In order to meet the requirement of high efficiency heating in automated fiber placement (AFP) of thermoplastic composites, a method of high efficiency heating by using the Ohmic characteristic of PEEK prepreg was studied. Through the mathematical analysis of Ohmic heating convection and radiation heat dissipation, and ABAQUS electrothermal simulation, the basic laws of Ohmic heating of PEEK composite were obtained. The Ohmic heating effect of PEEK composite was experimentally studied by using the designed double-roller electrodes experimental device. The results show that the interlaminar shear strength (ILSS) of the composite by Ohmic heating increases first and then decreases with the increase of heating electric power, and reaching a maximum of 35.6MPa when the electric parameters are DC voltage 30V and current 3.3A. With the increase of the compacting force, the ILSS also increases first and then decreases, and reaching a maximum of 29.5MPa when the compacting force is about 322N. In addition, the crystallinity of prepreg decreases with the increase of temperature, and the effect of compacting force on crystallinity of the prepreg is not obvious.

**Keywords:** Ohmic heating; Composite; PEEK; Interlaminar shear strength (ILSS); Crystallinity

(责编 大漠)