

碳纤维/环氧树脂预浸带铺放应力场及制品微观结构的模拟与实验

张宏基 葛媛媛 万增利 拓耀飞 孙志勇 唐虹 史耀耀

Simulation and experiment study of stress field and microstructure of carbon fiber/epoxy resin prepreg laying products

ZHANG Hongji, GE Yuanyuan, WAN Zengli, TUO Yaofei, SUN Zhiyong, TANG Hong, SHI Yaoyao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201202.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

复合材料自动铺丝工艺参数对应力波传播特征的作用机制

Mechanism of effect of processing parameters on stress wave propagation characteristics during automated fiber placement
复合材料学报. 2019, 36(5): 1200–1209 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180713.001>

铺放工艺参数对预浸料丝束曲线铺贴质量的影响

Influence of laying process parameters on curve trajectory placement quality of prepreg tow
复合材料学报. 2021, 38(6): 1795–1808 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200826.004>

RTM成型玻璃纤维增强阴离子聚合尼龙6复合材料及其性能

Preparation and properties of glass fiber–reinforced anionic nylon 6 composites by RTM process
复合材料学报. 2021, 38(2): 414–423 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200528.001>

三维机织复合材料残余应力/应变多尺度分析及工艺参数优化

Multiscale analysis and process parameters optimization of residual stress/strain of 3D woven composite
复合材料学报. 2021, 38(4): 1167–1176 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200720.002>

基于灰色关联分析和响应面法的复合材料缠绕成型多目标工艺参数优化

Multi–response parameter optimization for the composite tape winding process based on grey relational analysis and response surface methodology
复合材料学报. 2019, 36(12): 2822–2832 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190304.003>

热塑性复合材料自动铺放工艺参数分析与优化

Analysis and optimization of the processing parameters for automated fiber placement of thermoplastic composites
复合材料学报. 2018, 35(5): 1149–1157 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170712.003>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

碳纤维/环氧树脂预浸带铺放应力场及制品微观结构的模拟与实验



分享本文

张宏基^{*1,3}, 葛媛媛^{1,3}, 万增利^{1,3}, 拓耀飞¹, 孙志勇¹, 唐虹², 史耀耀²

(1. 榆林学院 能源工程, 榆林 719000; 2. 西北工业大学 机电学院, 西安 710072;

3. 榆林市先进材料成型与先进制造技术重点实验室, 榆林 719000)

摘要: 碳纤维/环氧树脂预浸带复合材料在铺放成型时, 由于树脂基体与碳纤维之间的热膨胀系数存在差异以及成型时热-力参数作用下由于纤维的变形而导致纤维与基体接触处产生应力集中等原因, 在制品材料中会产生热残余应力。针对碳纤维/环氧树脂预浸带复合材料的实际结构特点, 利用 ABAQUS 有限元软件建立含有界面的碳纤维/环氧树脂预浸带复合材料的细观代表性体积单元 (Representative volume element, RVE) 有限元模型, 采用实验研究和有限元仿真分析的方法, 研究在温度-压力参数作用下预浸带铺放制品残余应力的分布规律及影响机理。首先, 建立预浸带铺放时的温度和压力模型, 研究不同温度和压力参数条件下碳纤维/环氧树脂预浸带铺放制品残余应力的分布情况。其次, 采用耦合降温法模拟碳纤维/环氧树脂预浸带残余应力随纤维体积含量、铺放压力以及铺放温度的变化规律, 并采用扫描电镜对不同工艺参数条件下预浸带铺放制品的微观结构进行分析。通过对模拟结果进行分析比较得到各因素对制品残余应力的基本影响规律; 最后进行不同温度和压力等铺放参数对预浸带铺放成型时残余应力影响的实验测试研究。

关键词: 预浸带; 自动铺放成型; 复合材料; 残余应力; 工艺参数

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2021)09-2882-12

Simulation and experiment study of stress field and microstructure of carbon fiber/epoxy resin prepreg laying products

ZHANG Hongji^{*1,3}, GE Yuanyuan^{1,3}, WAN Zengli^{1,3}, TUO Yaofei¹,
SUN Zhiyong¹, TANG Hong², SHI Yaoyao²

(1. College of Energy Engineering, Yulin University, Yulin 719000, China; 2. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 3. Yulin Key Laboratory of Advanced Materials Molding and Advanced Manufacturing Technology, Yulin 719000, China)

Abstract: The deformation of fiber under the action of thermal mechanical parameters is caused by the differences of thermal expansion coefficient between the epoxy resin matrix and carbon fiber, and the stress concentration at the contact of fiber and matrix. Thermal residual stress is experienced in the product material during the laying process of carbon fiber/epoxy resin prepreg composites. Due to the structural characteristics of the carbon fiber/epoxy resin prepreg composite, the micro representative volume element (RVE) finite element model of the carbon fiber/epoxy resin prepreg composite with interface phase was established by using ABAQUS finite element software. The distribution rule and influence mechanism of the residual stress of the prepreg caused by temperature and pressure parameters were investigated by use of theoretical research and finite element simulation analysis. First, the temperature and pressure models of the prepreg were established to study the distribution of the residual stress

收稿日期: 2020-09-14; 修回日期: 2020-11-16; 录用日期: 2020-11-21; 网络首发时间: 2020-12-02 17:26:24

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201202.001>

基金项目: 国家自然科学基金 (5147377); 陕西省科技计划项目 (2019GY-205); 榆林学院高层次人才科研启动基金 (20GK07); 榆林市科技计划项目 (2019-86-5)

通信作者: 张宏基, 博士, 副教授, 研究方向为复合材料成型工艺及性能控制 E-mail: sanxing258@163.com

引用格式: 张宏基, 葛媛媛, 万增利, 等. 碳纤维/环氧树脂预浸带铺放应力场及制品微观结构的模拟与实验 [J]. 复合材料学报, 2021, 38(9): 2882-2893.
ZHANG Hongji, GE Yuanyuan, WAN Zengli, et al. Simulation and experiment study of stress field and microstructure of carbon fiber/epoxy resin prepreg laying products[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(9): 2882-2893(in Chinese).

of the products under different temperatures and pressure parameters. Second, the indirect coupling temperature reduction method was applied to simulate the change of residual stress of carbon fiber/epoxy resin prepreg with fiber volume content. Pressure, temperature and the microstructure of the product were analyzed by electron microscopy scanning. The basic influence rules of each factor on the residual stress of the products were thus obtained through analysis and comparison of the simulation results. In conclusion, the influences of different underlying parameters such as temperature and pressure on the residual stress of the prepreg were then tested.

Keywords: prepreg tape; automatic laying and forming; composites; residual stress; process parameters

铺放成型是碳纤维/环氧树脂预浸带复合材料构件可靠、高效的制造技术之一,具有铺放角度灵活多样、复杂曲面零件可制造以及制品性能可设计等诸多优点,已成为国内外预浸带复合材料制造领域的研究热点^[1-4]。碳纤维/环氧树脂预浸带铺放成型是在一定工艺参数(温度、张力、线速度、压力)作用下进行的,由于碳纤维和树脂基体的热膨胀系数不一致以及成型过程中热-力参数作用下纤维的变形等原因,在温度降低的过程中碳纤维/环氧树脂预浸带制品复合材料会产生横向和纵向残余应力,这两个方向的力共同构成了界面处的接触压力和剪切力是影响碳纤维/环氧树脂预浸带复合材料力学性能的主要因素之一^[5-6]。碳纤维/树脂复合材料(Carbon fiber reinforced polymer, CFRP)相比于其它类型的复合材料,其力学性能受残余应力的影响更加显著^[7-8]。一些不同形式的理论公式可应用于复合材料热残余应力的计算,包括纤维的纵向、横向热残余应力等^[9-10]。然而这些理论公式只能对实际纤维中热残余应力近似预测,不能预测纤维端部及附近的热残余应力^[11-14]。Sonmez Fazil 等^[15]使用自主开发的铺放过程模型,确定铺放过程温度场的分布,进而采用零阶搜索算法获得铺放构件的残余应力。除了模型法之外,有限元法是模拟复合材料热残余应力的另一常用方法。Francisco 等和 Fazil 等^[16-17]对预浸带铺放过程中的残余应力进行了研究,运用一个热粘弹性有限元模型来预测复合材料预浸带在铺放过程中的残余应力。Patricia P 等^[18]研究了因纤维和基体之间热膨胀系数的不匹配而产生的残余应力,然后通过实验对产生残余热应力的因素进行研究,最后分析了热残余应力对复合材料性能的影响。杨涛等^[19]基于生死单元和循环载荷方法,对预浸带铺放成型复合材料构件的应力场进行了数值模拟,利用 ANSYS 中间耦合方法,实现铺放过程的温度-应力耦合分析。然而,关于碳纤维/环氧树脂预浸带铺放过程中,在温度-压力等工艺参数作用下预浸带自身性能变化以及温度-压

力等工艺参数对预浸带铺放制品残余应力影响的研究文献极少。Meijer 等^[20]的研究表明当预浸带成型时留存的残余应力水平较高,其制品压缩屈服强度大于拉伸屈服强度,而压缩模量小于拉伸时的弹性模量。由此可见,由成型工艺参数引起的残余应力对其制品的力学性能具有很大的影响。

针对上述研究现状,本文以碳纤维/环氧树脂预浸带铺放过程中,在温度和压力等参数的作用下预浸带铺放制品产生的残余应力及其随温度和压力等参数的变化规律为研究对象,通过建立预浸带铺放过程的温度-压力模型,采用有限元模拟的方法,对碳纤维/环氧树脂预浸带复合材料制品在不同温度及压力作用下的残余应力分布规律进行了详细研究。采用耦合降温法模拟碳纤维/环氧树脂预浸带复合材料制品的热残余应力,并且分析了纤维体积含量、铺放压力、铺放温度等因素对热残余应力的影响。在不同温度和压力作用下对碳纤维/环氧树脂预浸带铺放制品残余应力进行实验测试,验证有限元模拟计算方法的可行性和结果的可靠性。

1 碳纤维/环氧树脂预浸带铺放有限元模型的建立

采用 ABAQUS 有限元分析仿真软件,建立的预浸带铺放有限元模型如图 1 所示,模型的截面

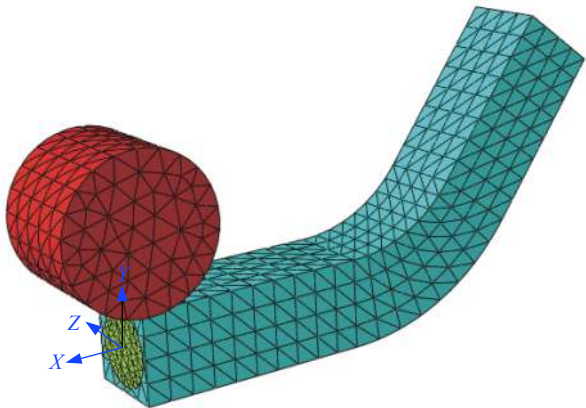


图 1 碳纤维/环氧树脂预浸带铺放有限元模型

Fig. 1 Finite element model of carbon fiber/epoxy resin prepreg laying

y和z方向的尺寸分别为10 mm×10 mm。在对碳纤维/环氧树脂预浸带铺放制品残余应力模拟过程中做出以下二点假设^[21-24]：(1)各组分材料的应力-应变为线性关系；(2)为了保证制品材料残余应力模拟结果的准确性，在细观有限元模型中不考虑制品材料的微观缺陷。在有限元模型中将纤维和树脂基体的结合方式设置为Coupling约束。使用Coupling结合方式建立纤维和树脂基体之间的约束，使纤维和树脂基体之间有相同的刚体运动。在约束形式上Coupling为点对面的一中约束，允许纤维和树脂基体在成型过程中发生相对变形。

表 1 碳纤维/环氧树脂预浸带的性能参数^[25]

Table 1 Performance parameters of carbon fiber/epoxy resin prepreg^[25]

	Density ρ /(g·cm ⁻³)	Poisson's ratio	Modulus E /GPa
Fiber	1.76	0.3	248
Matrix	1.68	0.38	2.35
Roll	7.93	0.3	206
	Thermal conductivity coefficient/(W·(m ² ·°C) ⁻¹)	Thermal expansion coefficient α /(10 ⁻⁶ °C ⁻¹)	
Fiber	0.43	-0.74	
Matrix	0.18	63.90	

2 碳纤维/环氧树脂预浸带铺放制品残余应力的影响因素

影响碳纤维/环氧树脂预浸带铺放制品残余应力的因素包括纤维体积含量、铺放温度、铺放压力等^[25-26]。对应不同纤维体积分含量的制品材料需要重新建立其细观RVE有限元模型，且建模过程中仍遵循上述的假设。

2.1 纤维体积含量对预浸带残余应力分布的影响

分别计算纤维体积分数为0.65%、0.70%、0.75%、0.80%时，对碳纤维/环氧树脂预浸带复合材料制品各组分残余应力的影响进行分析。其中，界面层(预浸带在铺放成型过程中，由于热-力参数的综合作用，在纤维和基体接触位置产生的具有独特性能的过渡区域)的参数如表2所示。

表 2 碳纤维/环氧树脂界面层参数^[27]

Table 2 Parameters of interface layer between carbon fiber and epoxy resin^[27]

Parameter of interface layer	Value
Interfacial thickness/ μm	0.2
Volume fraction/%	3.45
Elastic modulus/GPa	8.3
Poisson's ratio	0.176
Coefficient of thermal expansion/(10 ⁻⁶ ·°C ⁻¹)	28.34
Density/(g·cm ⁻³)	1.26

铺放过程可以描述为预浸带的平移加压辊转动的复合运动，压辊的旋转速度与铺放速度可根据下式计算：

$$vt = nR$$
 (1)

式中： n 为压辊旋转速度； R 为压辊半径。在模拟时选取压辊中心点为刚性参考点，在参考点上施加沿z向的转动及x向的移动，同时施加y向的压力。模拟过程中所使用的碳纤维/环氧树脂预浸带性能参数如表1所示。在仿真过程中设置模型的温度范围为60~120℃，作用在预浸带表层不同的恒定压力值的范围为50~200 N，模型边界上对流系数设为6 W/(m²·℃)。

铺放温度80℃、压辊压力设定为150 N时，纤维体积含量对各组分残余应力的影响，如图2所示。可以看出树脂基体的残余应力随纤维体积分含量的增大而增大，但这种增大趋势是非线性的。因为随着纤维体积分含量的增大树脂基体变得越来越薄，基体的轴向平均残余应力受基体与界面层

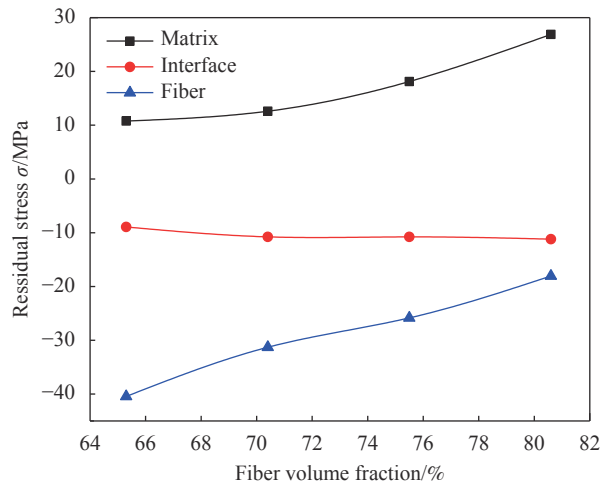


图 2 纤维体积含量对碳纤维/环氧树脂预浸带铺放制品各组分残余应力的影响

Fig. 2 Effect of fiber volume content on residual stress of components of carbon fiber/epoxy resin prepreg laying products

交界处应力的影响也越来越大，所以树脂基体的残余应力会出现加速增加的趋势。而碳纤维的应力在较低的纤维体积含量区间内 [0.3, 0.6] 呈现单调增加趋势，在较高的纤维体积含量区间内 [0.6, 0.8] 则变化不大。这是由于铺放制品的残余应力不仅与纤维体积含量有关，还受纤维间距离的影响，纤维体积含量高则纤维间距离较小，故而碳纤维残余应力随着纤维间距离的减小而减小。而界面的残余应力受纤维体积含量的影响较小，始终稳定在较小的区间范围内变化，并呈现减少趋势。

2.2 铺放温度对预浸带残余应力分布的影响

分别计算铺放温度为 60℃、80℃、100℃、120℃ 时，温度对碳纤维、树脂基体、界面层平均残余应力的影响，如图 3 所示。界面层厚度为 0.2 μm，纤维体积含量为 0.75%，压辊压力设定为 150 N。

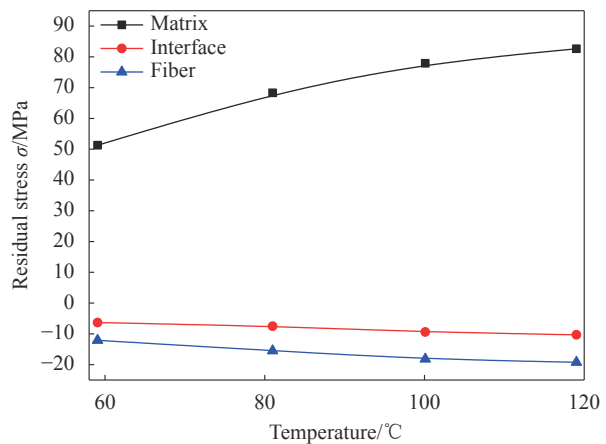


图 3 温度对碳纤维/环氧树脂预浸带铺放制品各组分残余应力的影响
Fig. 3 Effect of temperature on residual stress of components of carbon fiber/epoxy resin prepreg laying products

可以看出基体所受的残余应力为拉应力且随着铺放温度的升高而快速增大，而界面层和碳纤维所受的残余应力为压应力且随着铺放温度的升高而缓慢增大，其中碳纤维的残余应力增加更为显著。这是由于在较高温度的作用下基体和界面层的状态转变相比于碳纤维更为明显。界面层的残余应力值介于碳纤维和基体之间，起到了过渡的作用。

图 4 所示为不同铺放温度条件下，预浸带铺放制品残余应力分布规律。可知，残余应力随着温度的升高不断增大，随着与铺放起始位置距离的增加而逐渐减小。由于纤维与树脂基体热膨胀系数存在较大差异，温度变化会引起残余应力的增大，但随着距离的不断增大，纤维受到树脂基

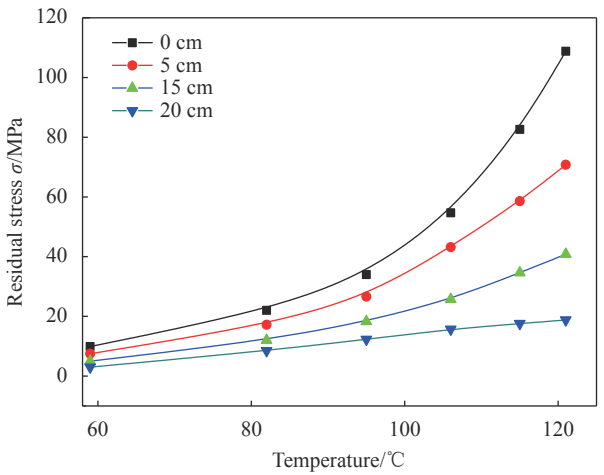


图 4 与铺放起始位置不同距离下温度对碳纤维/环氧树脂预浸带铺放时残余应力的影响
Fig. 4 Effect of temperature on residual stress of carbon fiber/epoxy resin prepreg laying under different distance from the start laying point

体的两个相反方向的约束，在一定程度上相互抵消，从而使残余应力值相对较小。

图 5 为模拟预测温度在 60℃、80℃、100℃ 和 120℃ 条件下，碳纤维/环氧树脂预浸带铺放时 y 方向的残余应力分布云图。对比分析可知，预浸带铺放制品中的残余应力，随着温度升高呈现出逐渐增大的趋势，最大残余应力位于树脂密集区域，最小残余应力位于树脂稀疏区域。并且随着树脂密集区域逐渐增大，预浸带表面最大残余应力值逐渐增大。由图 5 可知，预浸带在铺放过程中残余应力存在着较大的差别，这是由于预浸带在横向上树脂含量较多，由于温度变化而产生的热膨胀行为作用在纤维表面上的约束力增大，从而导致纤维表面产生较大的残余应力。而在树脂含量相对较小的方向，纤维受到的约束力作用较小使得残余应力值也相对较小。图 6 所示为预浸带铺放时 x-z 面上的应力分布云图。可知，预浸带残余应力总体随着温度的升高不断增大，随着与端面距离的增加而逐渐减小。由于纤维与树脂基体热膨胀系数存在较大差异，温度变化会引起残余应力的增大，但随着距离的不断增大，纤维受到树脂基体的两个相反方向的约束在一定程度上相互抵消，从而使纤维的残余应力值相对较小。

2.3 压力对预浸带残余应力分布的影响

图 7 为碳纤维/环氧树脂预浸带在压力作用下残余应力分布 (压力大小分别为 50 N、100 N、150 N、200 N)。铺放温度 100℃，预浸带纤维体积含量为 0.75%。可见，随着压辊压力的不断增大碳纤维/

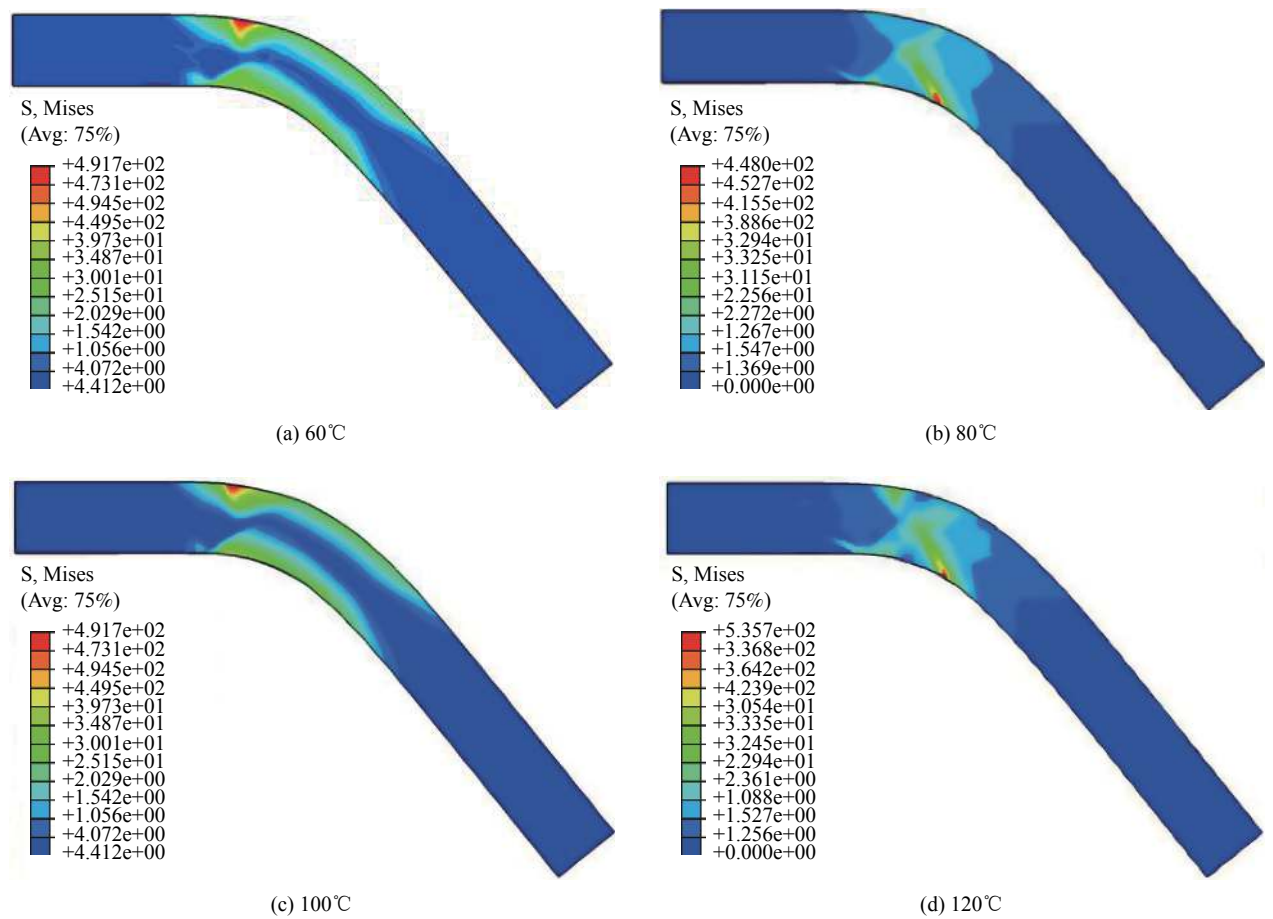


图 5 温度作用下碳纤维/环氧树脂预浸带 y 方向残余应力分布云图

Fig. 5 Residual stress distribution in y direction of carbon fiber/epoxy resin prepreg under the action of temperature

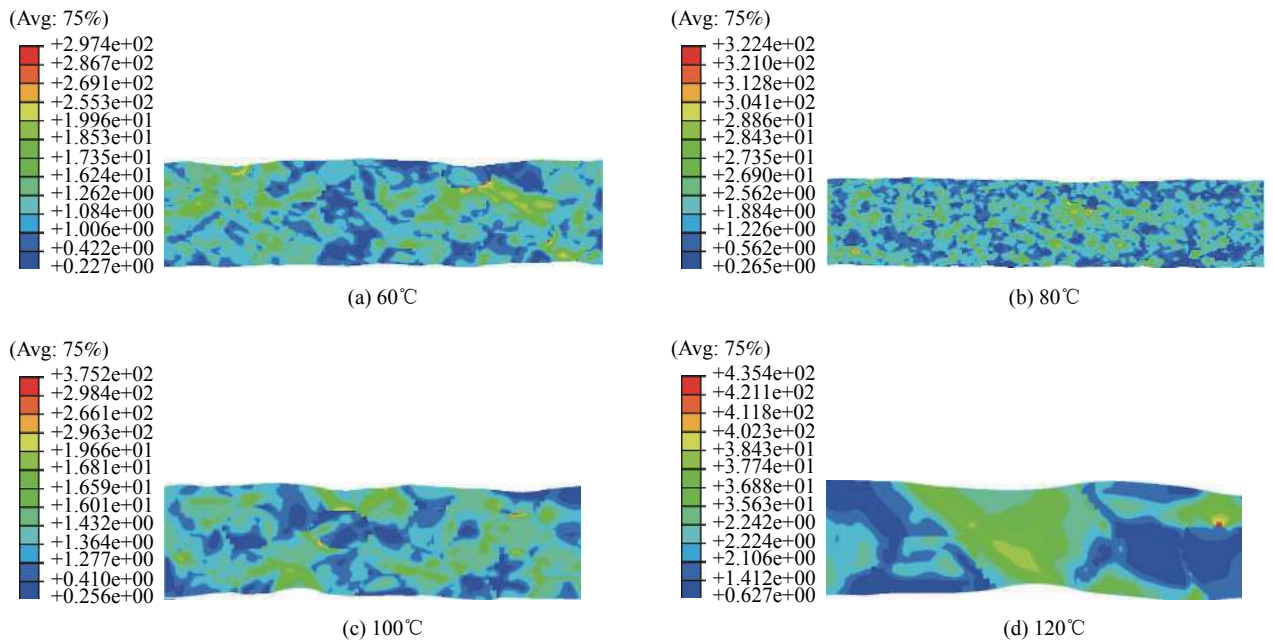


图 6 温度作用下碳纤维/环氧树脂预浸带 x-z 方向应力分布云图

Fig. 6 Residual stress distribution in x-z direction of carbon fiber/epoxy resin prepreg under the action of temperature

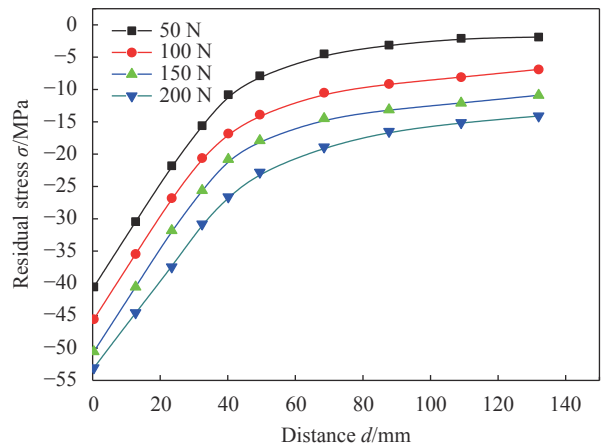


图7 碳纤维/环氧树脂预浸带在压力作用下残余应力分布规律
Fig. 7 Residual stress distribution of carbon fiber/epoxy resin prepreg under pressure action

环氧树脂预浸带铺放制品残余应力逐渐增大,当压力增大到一定程度时,树脂表面残余应力逐渐

趋向于饱和。同时在压力作用下,残余应力随着压辊与初始端面距离的增大,残余应力呈现出不断减小的趋势。

图8和图9分别为不同压力作用下预浸带y方向和x-z方向残余应力分布云图。可以看出,随着铺放过程的进行,预浸带材料中的热残余应力不断增加,预浸带材料表面两侧具有较大的变形,因此这两处的热残余应力明显高于中心层(变形小)。弯曲变形会在试样厚度方向形成应变梯度,厚度越小,应变梯度越大,需要更多的应力来协调非均匀变形。

图9为不同压辊压力时,预浸带整体残余应力分布规律。由应力分布云图可以看出,残余应力主要集中在预浸带铺放制品的表面上,最大应力出现在纤维与树脂基体接触的界面处。当压辊匀速运动时,碳纤维/环氧树脂预浸带z方向的最

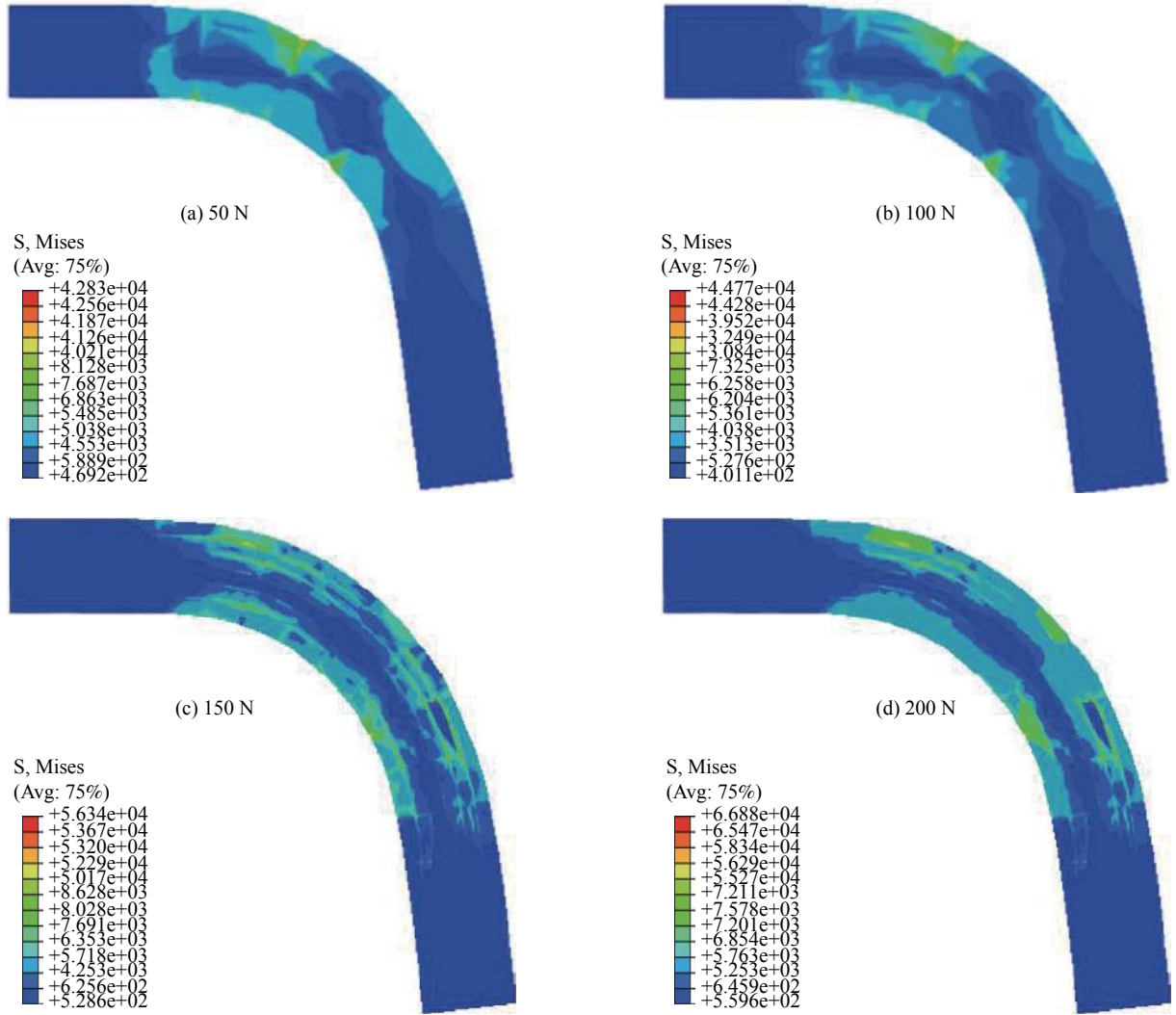


图8 压力作用下碳纤维/环氧树脂预浸带y方向残余应力分布云图
Fig. 8 Residual stress distribution in y direction of carbon fiber/epoxy resin prepreg under the action of pressure

大应力出现在压辊与纤维丝束带接触的区域，已铺放表面和待铺放表面应力变化较大。

3 碳纤维/环氧树脂预浸带铺放残余应力的实验测量和分析

3.1 样品制备

实验用的碳纤维/环氧树脂预浸带由威海光威复合材料有限公司提供，其中碳纤维为 T700-12K (日本东丽)，基体为环氧树脂，预浸带厚度为 0.13 mm，树脂基体体积分数为 20%~40%，铺放宽度为 80 mm。碳纤维/树脂预浸带铺放成型是在如图 10 所示的自动铺放设备上进行的，通过改变温度控制系统的设定值及压辊的压力值即可实现不同的铺放温度和压力时的制品材料。采用热压

罐按照 90℃/2 h+120℃/3 h 的条件，对铺放后的碳纤维/环氧树脂预浸带铺放制品进行固化，冷却至室温用于制备试样。

在铺放过程中利用自动加热系统对预浸带进行加热，通过柔性压辊向预浸带表面施加正向压力，控制系统控制铺放头左右移动进行反复铺层，铺放制品如图 11 所示。根据 GB/T-26140—2010 残余应力无损检测标准^[28]进行残余应力实验测试。其中，测定残余应力的实验样品尺寸为 50 mm×10 mm×2.5 mm。

为了研究不同温度和压力对预浸带铺放成型残余应力的影响规律，采用 LXR D MG2000 型 X 射线残余应力测试分析系统，进行残余应力的测试，

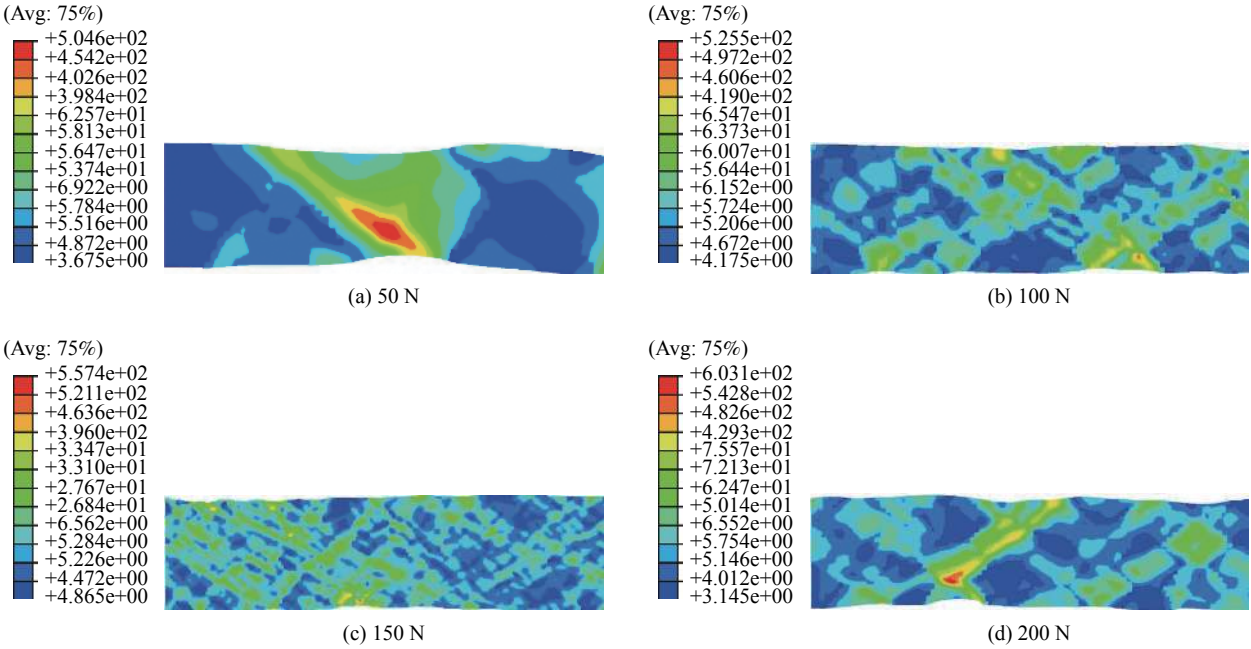


图 9 压力作用下碳纤维/环氧树脂预浸带 x-z 方向应力分布云图

Fig. 9 Residual stress distribution in x-z direction of carbon fiber/epoxy resin prepreg under the action of pressure



图 10 预浸带自动铺放设备

Fig. 10 Automatic laying equipment of prepreg



图 11 铺放样件

Fig. 11 Samples fabricated by fiber placement

如图 12 所示。X 射线测量残余应力的基本原理是当试样中存在残余应力时，晶面间距将发生变化，发生布拉格衍射时，产生的衍射峰也将随之移动，而且移动距离的大小与应力大小有关。以测量衍射线位移作为原始数据，通过胡克定律由残余应变计算得到制品的残余应力。

3.2 实验结果与分析

3.2.1 铺放制品微观结构

图 13 为不同压力参数条件下预浸带铺放制品的微观结构。可知，当铺放温度设定在较低范围内 (60~80℃)。同时铺放压力值也较低的情况下，树脂基体与纤维未能很好的黏合，树脂基体在纤维束中呈现不连续的碎块状分布如图 13(a) 和图 13(b) 所示。随着铺放压力的继续升高，树脂基体在纤维束中的分布也呈现出一定的连续性如图 13(c) 所示，但当铺放压力继续增大的情况下，长时间的高压作用会导致树脂溢出纤维束如图 13(d) 所示，对最终预浸带复合材料制品性能产生不利影响。



图 12 残余应力测试系统
Fig. 12 Residual stresses measurement system

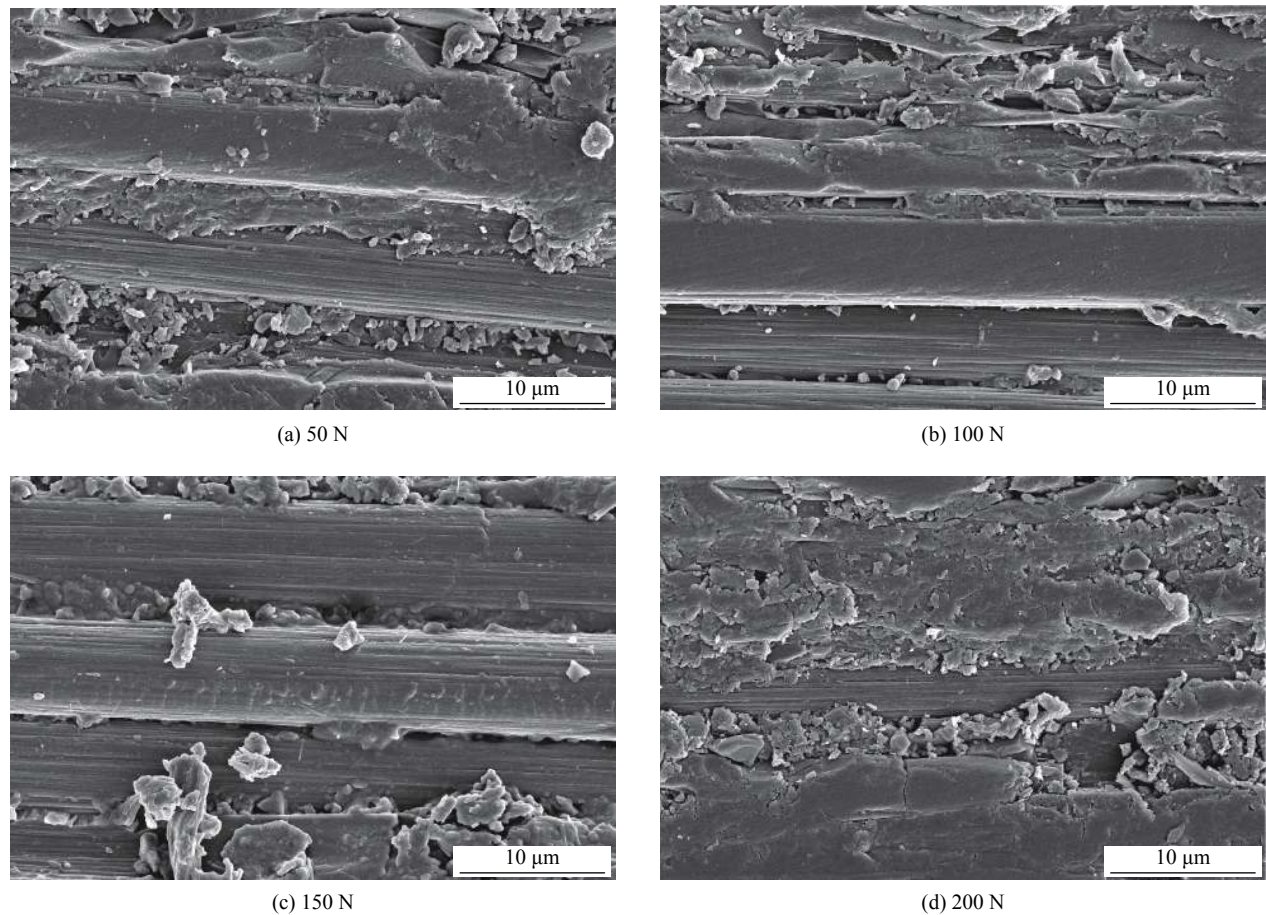


图 13 80℃ 时不同压力参数条件下碳纤维/环氧树脂预浸带铺放制品的微观结构

Fig. 13 Microstructures of carbon fiber/epoxy resin prepreg products of 80℃ at different pressure parameters

图 14 为不同温度作用下预浸带铺放制品的微观结构。由图 14(a)~14(c) 可知，在压力一定的情况下，随着温度在一定范围内升高 (60~100℃)，达到树脂的加工温度后进入熔融黏流状态，树脂分子链的扩散能力增强，纤维与树脂基体之间黏合效果也就越好。但随着铺放温度的继续升高，树脂基体的流动性也在逐渐增强，在压力的作用下，导致部分树脂溢出纤维束，如图 14(d) 所示。

3.2.2 温度对铺放残余应力的影响

图 15 为不同温度条件下，预浸带铺放制品沿垂直于纤维方向测得的残余应力的分布曲线。可以看出，随着铺放温度的变化，残余应力的大小和最大值的位置均有变化。残余应力的最大值均出现在制品材料表面以下约 60 μm 处的位置，且随着铺放温度的升高，制品材料的残余应力也不断升高。由实验测量结果可知，当铺放温度为 60℃ 时，残余应力的最大值为 30 MPa，当温度升高到 120℃ 时，残余应力的最大值为 60 MPa。随着 X 射线的入射深度继续增加时，残余应力呈现震荡

减小为零的趋势，由此可知，预浸带铺放制品残余应力的分布情况为，在制品表面以下一定深度范围内残余应力达到最大，随着温度的增大残余应力整体变化呈现增大趋势，这与有限元仿真结果一致。

3.2.3 压力对铺放残余应力的影响

图 16 为不同压力条件下，碳纤维/环氧树脂预浸带铺放制品沿垂直于纤维方向测得的残余应力的分布曲线。可以看出，随着压辊输出压力值的变化，制品材料的残余应力均有增大的趋势，这是因为压辊压力增大，预浸带变形量会增大。由图 16 可知，相比于温度对制品残余应力的影响结果，压辊压力的变化对预浸带铺放制品残余应力的影响不明显，测试结果表明，压辊压力为 50 N 时，残余应力的最大值测试值为 45 MPa，当压辊压力的输出值增大到 150 N 时，制品材料的最大残余应力测试值为 60 MPa，最大残余应力位于制品材料表明下约 80 μm 处。随着压辊压力的增大，制品材料最大残余应力值也向制品材料表明深度

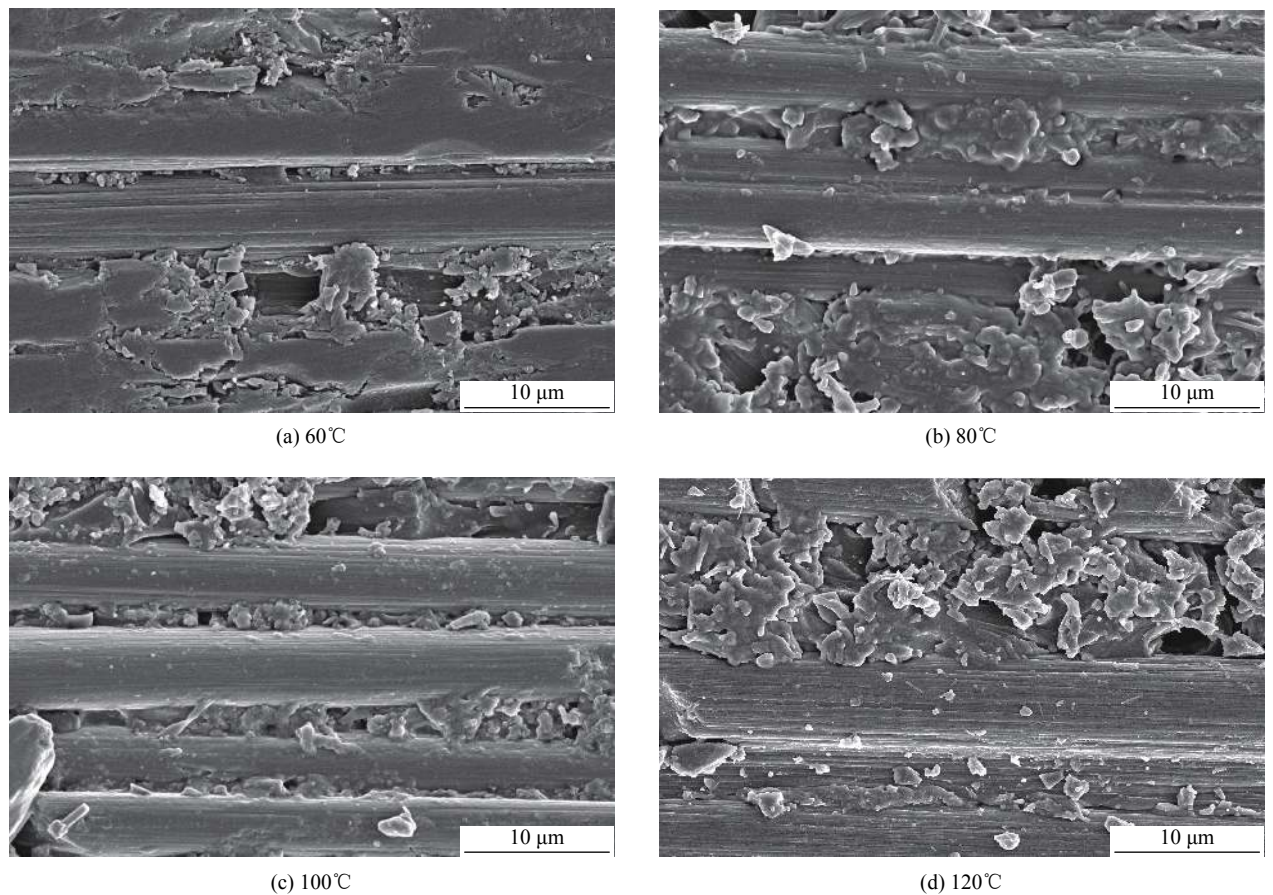


图 14 150 N 时不同温度参数条件下碳纤维/环氧树脂预浸带铺放制品的微观结构

Fig. 14 Microstructures of carbon fiber/epoxy resin prepreg products of 150 N at different temperature parameters

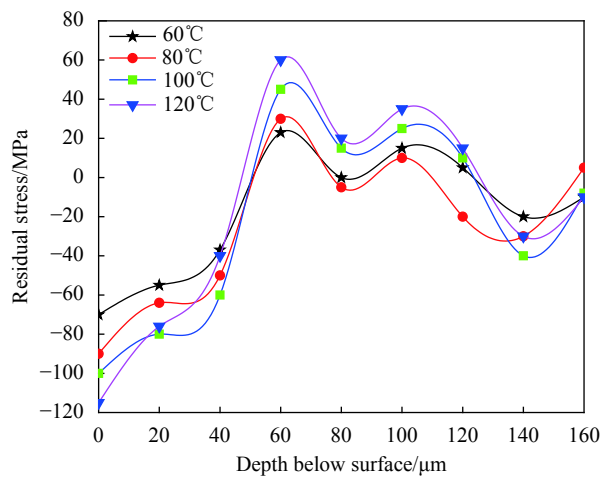


图 15 不同温度时碳纤维/环氧树脂预浸带铺放制品残余应力测试结果

Fig. 15 Test results of the residual stress of carbon fiber/epoxy resin prepreg laying products at different temperatures

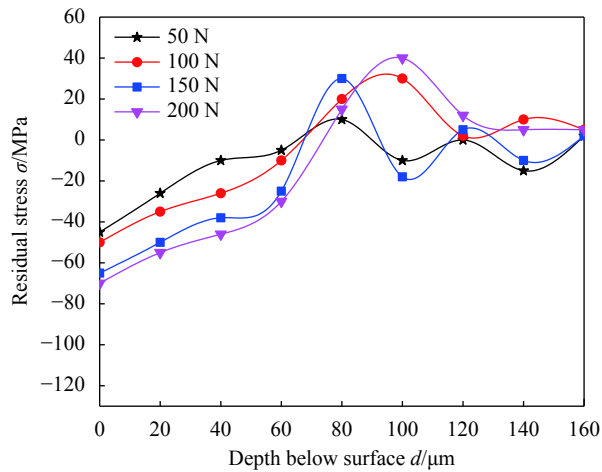


图 16 不同压力时碳纤维/环氧树脂预浸带铺放制品残余应力测试结果

Fig. 16 Test results of the residual stress of carbon fiber/epoxy resin prepreg laying products under different pressures

方向移动,这是因为,预浸带铺放压力过大时,会导致预浸带在铺放时的永久变形,使得制品材料出现整体形状的变化。残余应力总体变化趋势为逐渐增大,随着压辊的移动,残余应力逐渐趋于稳定。

3.2.4 纤维体积含量对铺放残余应力的影响

图 17 为预浸带材料在不同纤维体积含量条件下,预浸带铺放制品沿垂直于纤维方向测得的残余应力的分布曲线。可以看出,制品材料残余应力随着纤维体积含量的不断增加,制品材料的残余应力均呈现小幅增大,预浸带材料的纤维体积含量为 65% 时,最大残余应力值的测试值为 15 MPa,而当纤维体积含量达到 75% 时,最大残余应力得

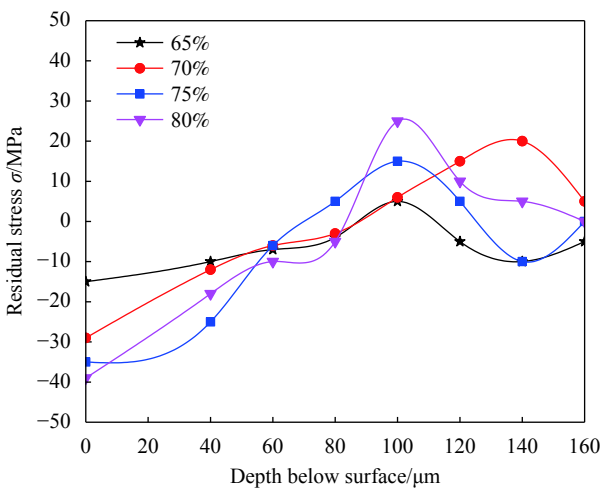


图 17 不同纤维体积含量时碳纤维/环氧树脂预浸带铺放制品残余应力测试结果

Fig. 17 Test results of the residual stress of carbon fiber/epoxy resin prepreg laying products with different fiber volume contents

测试值为 39 MPa,且最大残余应力均位于制品材料表面以下约 100 μm 处。相比于铺放温度和压力对制品材料残余应力的影响,预浸带纤维体积含量对制品材料厚度方向残余应力的影响更为显著。

4 结论

(1) 采用耦合降温法模拟碳纤维/环氧树脂预浸带铺放制品残余应力可知,基体所受的残余应力为拉应力且随着铺放温度的升高而快速增大,而界面层和碳纤维所受的残余应力为压应力,且随着铺放温度的升高而缓慢增大,其中碳纤维的残余应力增加更为显著。界面层的残余应力值介于碳纤维和基体之间,起到了过渡的作用。因此,对于预浸带铺放工艺,发展低温工艺是降低树脂基体的残余应力,提高制品性能的一个有效手段。

(2) 随着压力的不断增大,碳纤维/环氧树脂预浸带铺放制品残余应力逐渐增大。同时在压力作用下,残余应力随着压辊与初始端面距离的增大,残余应力呈现出不断减小的趋势。铺放压力过大会造成预浸带会发生较大的变形,严重影响铺放精度和铺放质量,同样会使得制品残余应力值变大。

(3) 通过预浸带铺放制品残余应力测试实验可知,温度对制品残余应力的影响最大,纤维体积含量对制品残余应力的影响最小。且随着温度、压力、纤维体积含量的增加,预浸带铺放制品材料的残余应力均呈现增大的趋势,最大残余应力位于制品材料表面以下约 60-100 μm 处。

参考文献:

- [1] WANG Jianhua, QIAN Linfang, YUAN Renshu. Thermal residual stresses in composite material barrel[J]. *Journal of Ballistics*, 2007, 19: 82-85.
- [2] 洪旗, 史耀耀, 路丹妮, 等. 基于灰色关联分析和响应面法的复合材料缠绕成型多目标工艺参数优化[J]. *复合材料学报*, 2019, 36(12): 2822-2832.
HONG Qi, SHI Yaoyao, LU Danni, et al. Multi-response parameter optimization for the composite tape winding process based on grey relational analysis and response surface methodology[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(12): 2822-2832(in Chinese).
- [3] 康峻铭, 孙亮亮, 王继辉. 电子封装用环氧树脂固化温度与应变的三维有限元模拟[J]. *复合材料学报*, 2019, 36(10): 2330-2340.
KANG Junming, SUN Liangliang, WANG Jihui, et al. Three-dimensional finite element simulation of temperature and strain in epoxy resin used to electronic packaging during curing[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(10): 2330-2340(in Chinese).
- [4] MALIGNO A R, WARRIOR N A, LONG A C. Effects of interphase material properties in unidirectional fiber reinforced composites[J]. *Composite Science and Technology*, 2010, 70: 36-44.
- [5] PEREZ E, MORENO M, VALADEZ A, et al. Effect of the interphase microstructure on the behavior of carbon fiber/epoxy resin model composite in a thermal environment[J]. *Journal of Materials Science*, 2011, 46(11): 4026-4033.
- [6] SHOKRIEH M M, SAFARABADI M. Three-dimensional analysis of micro-residual stresses in fibrous composites based on the energy method: A study including interphase effects[J]. *Journal of Composite Materials*, 2012, 46(6): 727-735.
- [7] GRACIANI E, VARAN J, MANTIC V, et al. Evaluation of interfacial fracture toughness and friction coefficient in the single fiber fragmentation test[J]. *Procedia Engineering*, 2011, 10: 2478-2483.
- [8] CORREA E, MANTIC V, PARLS F. Effect of thermal residual stresses on matrix failure under transverse tension at micro-mechanical level: A numerical and experimental analysis[J]. *Composites Science and Technology*, 2011, 71: 622-629.
- [9] 惠新育, 许英杰, 张卫红, 等. 平纹编织SiC/SiC复合材料多尺度建模及强度预测[J]. *复合材料学报*, 2019, 36(10): 2380-2388.
HUI Xinyu, XU Yingjie, ZHANG Weihong, et al. Multi-scale modeling and strength prediction of plain woven SiC/SiC composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(10): 2380-2388(in Chinese).
- [10] BENEDIKT F, ANDREW H, LUISE K. Multi-objective CFRP patch optimization with consideration of manufacturing constraints and integrated warpage simulation[J]. *Composite Structures*, 2019, 221: 1-10.
- [11] 冀运东, 郑凯东, 曹东风. 基于内聚力行为和扩展有限元的砂/树脂复合材料拉伸失效行为的数值计算[J]. *复合材料学报*, 2019, 36(12): 2851-2859.
JI Yundong, ZHENG Kaidong, CAO Dongfeng, et al. Numerical calculation of tensile failure behavior of sand/resin composite model based on extended finite element and cohesive behavior[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(12): 2851-2859(in Chinese).
- [12] 顾建平, 方常青, 孙慧玉, 等. 碳纤维增强形状记忆聚合物复合材料的热-力学行为建模与影响因素碳纤维增强形状记忆聚合物复合材料的热-力学行为建模与影响因素[J]. *复合材料学报*, 2019, 36(6): 1438-1446.
GU Jianping, FANG Changqing, SUN Huiyu, et al. Modeling and influence factors of the thermo-mechanical behaviors of the carbon fiber reinforced shape memory polymer composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(6): 1438-1446(in Chinese).
- [13] WU Y, XING Y, LIU B. Analysis of isotropic and composite laminated plates and shells using a differential quadrature hierarchical finite element method[J]. *Composite Structures*, 2018, 205: 11-25.
- [14] CIVAILEK O. Free vibration of carbon nanotubes reinforced (CNTR) and functionally graded shells and plates based on FSDT via discrete singular convolution method[J]. *Composite Part B: Engineering*, 2017, 111: 45-59.
- [15] SONMEZ F O, AKBULUT M. Process optimization of tape placement for thermoplastic composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2007, 38(9): 2013-2023.
- [16] CHINESTA C, FRANCISCO O, DEDIEU M, et al. On the prediction of residual stresses in automated tape placement[J]. *International Journal of Material Forming: Official Journal of the European Scientific Association for Material Forming - ESAFORM*, 2017, 10(4): 633-640.
- [17] FAZIL Sonmez, HAHN Thomas, MUSTAFA Akbulut. Analysis of process-induced residual stresses in tape placement[J]. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2002, 15(3): 525.
- [18] PATICIA P, HARALD E N. Residual stresses in thermoplastic-composites-a study of the literature. Part III: Effects of thermal residual stresses[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2007, 38(6): 1581-1596.

[19] 杜宇,李志猛,杨涛,等. 预浸带铺放成型复合材料构件应力场研究[J]. 固体火箭技术, 2015, 38(05): 116-120.
DU Yu, LI Zhimeng, YANG Tao, et al. Stress field on prepreg lay-up modeling for component[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2015, 38(05): 116-120(in Chinese).

[20] MEIJIER G, ELLYIN F, XIA Z. Aspect of residual thermal stress/strain in particle reinforced metal matrix composites[J]. Composites, 2000, 8(46): 29-37.

[21] Z. 塔德莫尔, C. G. 高戈斯. 聚合物加工原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
ZEHEV Tadmor, COSTAS Gogos. Principles of Polymer Processing[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008 (in Chinese).

[22] 张建宝, 文立伟, 肖军, 等. 自动铺带成形压力控制技术[J]. 航空学报, 2009(10): 1973-1977.
ZHANG Jianbao, WEN Liwei, XIAO Jun, et al. Processing pressure control technique for automatic tape laying[J]. Acta Aeronautica & Astronautica Sinica, 2009(10): 1973-1977(in Chinese).

[23] ZHAO Q, HOA S V, GAO Z J. Thermal stresses in rings of thermoplastic composites made by automated fiber placement process[J]. Science Engineering of Composite Materials, 2011, 18(3): 35-49.

[24] SONMEZ F O, AKBULUT M. Process optimization of tape placement for thermoplastic composites[J]. Composites, 2007, 38(4): 2013-2023.

[25] QU P, GUAN X, JIA Y, et al. Effective elastic properties and stress distribution of 2D biaxial nonorthogonally braided composites[J]. Journal of Composite Materials, 2012, 46(8): 997-1008.

[26] LEI Yang, YING Yan, JIAN Ma. Effects of inter-fiber spacing and thermal residual stress on transverse failure of fiber-reinforced polymer-matrix composites[J]. Computational Materials Science, 2013, 68(3): 255-262.

[27] 李起阳. 考虑尺寸效应和温度影响的纤维增强树脂基复合材料的界面剪切行为研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
LI Qiyang. Size and temperature effects on interfacial shearing behavior of fiber reinforced polymer matrix composites[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019 (in Chinese).

[28] 中国国家标准化管理委员会. 无损检测测量残余应力的中子衍射方法: GB/T 26140—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Non-destructive testing-Standards test method for determining residual stresses by neutron diffraction: GB/T 260140—2010[S]. Beijing: China Standards Press, 2010 (in Chinese).