



三维角联锁机织铝基复合材料制备 残余应力细观力学分析

刘燕武, 蔡长春, 王振军, 张益豪, 童 德, 余 欢, 徐志锋

(南昌航空大学 航空制造工程学院, 南昌 330063)

摘 要: 针对三维角联锁机织纤维增强铝基复合材料, 通过细观力学数值模拟与实验结合的方法, 研究制备降温热收缩变形行为、残余应力分布及其对组元材料的影响。结果表明: 复合材料宏观热收缩应变的计算曲线与实验曲线吻合较好, 制备完成后基体合金主要处于残余拉应力状态, 最大残余拉应力(266.6 MPa)出现在纱线附近的基体合金区域内, 而经纱和纬纱均处于残余压应力状态, 且最大残余压应力主要出现在经纱部分; 不均匀分布的残余应力使得纱线周围的基体合金和界面区域出现不同程度的损伤, 经纱与纬纱搭接区域的基体合金损伤程度较大并出现局部的界面失效现象; 增大纬纱的层间距或减小经纱的层间距, 有助于降低复合材料内部残余拉应力和压应力水平。

关键词: 三维角联锁; 铝基复合材料; 热收缩行为; 残余应力; 细观力学

文章编号: 1004-0609(2022)-08-2261-12

中图分类号: TB331

文献标志码: A

引文格式: 刘燕武, 蔡长春, 王振军, 等. 三维角联锁机织铝基复合材料制备残余应力细观力学分析[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(8): 2261-2272. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42087

LIU Yan-wu, CAI Chang-chun, WANG Zhen-jun, et al. Mesomechanics analysis of process-induced residual stress in 3D angle interlocking woven aluminum matrix composites[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(8): 2261-2272. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42087

连续碳纤维增强铝基(CF/Al)复合材料具有高比强度、高比模量、耐热性能好、热膨胀系数低等特点, 在国防和航空航天领域极具发展和应用前景^[1-4]。大量研究发现, 单向CF/Al复合材料具有优异的轴向力学性能, 但横向或偏轴性能较差。2D层叠CF/Al复合材料虽然具有良好的面内力学性能, 但使用过程中易出现分层现象而发生层间失效^[2]。三维角联锁机织复合材料是处于2D层叠和3D编织复合材料之间的一种具有独特编织结构的复合材料, 其机织工艺相对于3D织物更为简单, 且兼具3D编织复合材料良好的整体性能、耐冲击

及抗分层等优点^[5-8]。针对三维角联锁机织复合材料的实验制备、性能测试、损伤与断裂机理等问题, 国内外学者开展了深入研究并取得了丰富的成果^[9-11], 但对其制备热残余应力的研究较少。

制备热残余应力的存在会对各类纤维增强复合材料(陶瓷基、金属基和树脂基)的极限强度、弹性模量及屈服应力等宏观性能造成显著影响^[12-13]。针对C_f/SiC复合材料, 李巾铨等^[14]采用有限元法分析了材料制备过程中的残余应力对界面剪切强度的影响, 结果表明, 残余应力会对界面造成损伤并降低界面脱黏载荷, 复合材料的界面承载能力与热膨胀

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51765045, 52165018); 航空科学基金资助项目(2019ZF056013); 江西省自然科学基金资助项目(20202ACBL204010); 国防基础科研计划资助项目(JCKY2018401C004)

收稿日期: 2021-07-25; **修订日期:** 2021-08-24

通信作者: 王振军, 教授, 博士; 电话: 18970951974; E-mail: wangzhj@nchu.edu.cn

系数呈正相关关系,而与固化温度呈负相关关系。WANG 等^[15]采用多尺度模型对 3D 机织纤维增强树脂基复合材料固化过程进行了热-化学-力学耦合分析,得到了温度、固化程度和残余应变/应力的变化规律,计算得到复合材料制备完成后纱线和基体上的最大残余应力分别为 111.4 MPa 和 50.8 MPa。SHARMA 等^[16]制备了碳化硼增强铝基复合材料,通过弹性模量及热膨胀系数实验结果与有限元模拟结果进行对比,证明了数值模拟的可行性;在此基础上模拟分析了复合材料由于热膨胀系数失配产生的残余应力,结果表明碳化硼和基体分别处于压应力和拉应力状态,最大残余应力分别为 100 MPa 和 50 MPa。METEHRI 等^[17]采用三维有限元法分析了纤维分布结构对硼纤维增强环氧基复合材料制备热残余应力的影响,研究表明纤维间距、中间层、纤维体分和纤维间相互作用对残余应力水平的影响显著;随着纤维间距减小约 25%,基体纵向热残余应力增大了约 4 倍,纤维纵向热残余应力减小了约 20%。YANG 等^[18]采用微观力学有限元法研究了纤维体积分数对单向碳纤维增强聚合物基复合材料热残余应力的影响,计算得到纤维体积分数为 50% 的复合材料的最大热残余拉应力和压应力分别为 86.78 MPa 和 67.55 MPa,纤维体积分数为 60% 的复合材料的最大热残余拉应力和压应力分别为 109.9 MPa 和 144.8 MPa,复合材料热残余应力随纤维体积分数的增大而增大。

综上所述,尽管关于各类三维编织结构增强树脂基复合材料固化残余应力已有大量研究,但有关金属基复合材料制备残余应力的研究较少,其形成机制的问题尚未完全解决,特别是缺乏三维机织结构增强铝基复合材料制备残余应力方面的研究^[19]。掌握复合材料制备残余应力的形成和分布特征,不

但可为改进其制备工艺提供理论指导,而且可为其结构设计奠定基础。

本文针对三维角联锁机织结构的 CF/Al 复合材料,实验测试其从制备温度下降至室温过程中的热收缩应变曲线,建立复合材料制备热收缩行为与残余应力分析的细观力学模型,计算获得复合材料降温过程的热收缩应变曲线,通过与实验曲线的对比验证细观力学分析的可靠性。在此基础上,研究复合材料内部制备热残余应力分布状态及其对基体合金与界面结构损伤的影响,计算预测经向和纬向纱线排列间距等参数对制备热残余应力的影响规律,为该复合材料的高性能设计与制备提供理论依据。

1 实验

本研究采用真空压力浸渗法制备三维角联锁结构的碳纤维增强铝基复合材料(三维角联锁机织 CF/Al 复合材料)^[20],其中基体材料采用的是北京航空材料研究院提供的铸造铝合金 ZL301,增强体材料为日本东丽公司的高模高强碳纤维 M40J,由江苏宜兴新立织造公司完成三维角联锁织物结构的机织成形,具体的机织结构参数如表 1 所示,复合材料真空压力浸渗制备工艺采用的工艺参数如表 2 所示。

根据国际标准 ISO17562—2016 开展热膨胀性能测试,为减少机械切割加工残余应力对试样性能的影响,利用电火花线切割机沿经纱方向加工得到 25 mm×5 mm×4 mm 的试样,如图 1 所示。采用热膨胀仪 DIL402 测量复合材料热膨胀性能,为防止材料发生氧化,全程通氩气保护。试样以 5 K/min 的速率从室温升温至 400 ℃,在 400 ℃下保温 20 min 以使得试样温度分布均匀并消除残余应力;根

表 1 三维角联锁机织物结构参数

Table 1 Structural Parameters of 3D angle interlocking woven fabric

Thickness/mm	Yarn specification	Warp density/(yarns·cm ⁻¹)	Weft density/(yarns·cm ⁻¹)	$V_f/\%$
4	195Tex×2	6.2–6.4	3.2–3.4	45

表 2 三维角联锁机织 CF/Al 复合材料制备工艺参数

Table 2 Fabrication parameters of 3D angle interlocking woven CF/Al composite

Preheating temperature/℃	Infiltration temperature/℃	Infiltration pressure/MPa	Pressure holding/min
520	720	8	20

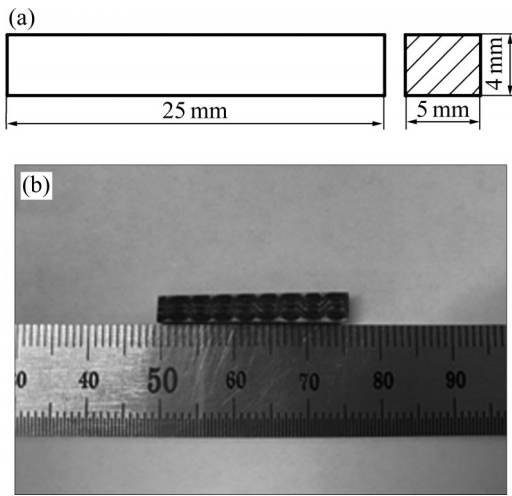


图1 三维角联锁机织CF/Al复合材料热膨胀性能试样
Fig. 1 Thermal expansion testing specimen of 3D angle interlocking woven CF/Al composites: (a) Specimen dimension; (b) Specimen appearance

据保温结束时的热膨胀应变值计算获得试样在400℃下的实际长度,以此实际长度作为降温时的初始试样长度。将试样以5 K/min的冷却速率从400℃降温至室温,测量获得整个降温过程复合材料经向的收缩位移随温度变化的数据,从而计算获得试样在经向的热收缩应变值,绘制复合材料降温

过程的热收缩应变-温度实验曲线。通过光学放大镜Dino lite/AM2111观察三维角联锁机织CF/Al复合材料中的经纱和纬纱的走向和分布。采用Quanta2000型扫描电镜观察三维角联锁机织CF/Al复合材料纱线内部纤维的排布情况,并通过Image Pro Plus软件定量分析和计算获得纱线内部的纤维体积分数。

2 细观力学有限元模型

2.1 复合材料细观结构模型

图2所示为三维角联锁机织CF/Al复合材料中的经纱和纬纱的走向和分布的光学检测结果。针对图2采用定量金相法测量其内部经纱、纬纱横截面的截面形状和尺寸,并对观察和测量到的形状和尺寸进行合理化的假设及简化,发现其经纱和纬纱在空间上的分布和走向具有一定的规律。在此基础上通过CATIA软件建立经纱和纬纱的机织结构模型如图3(a)所示,其中在经纱和纬纱方向上均截取了一个周期结构。根据建立的纱线的几何结构模型,通过布尔运算得到基体合金的几何结构模型如图3(b)所示,最终将二者进行装配获得的三维角

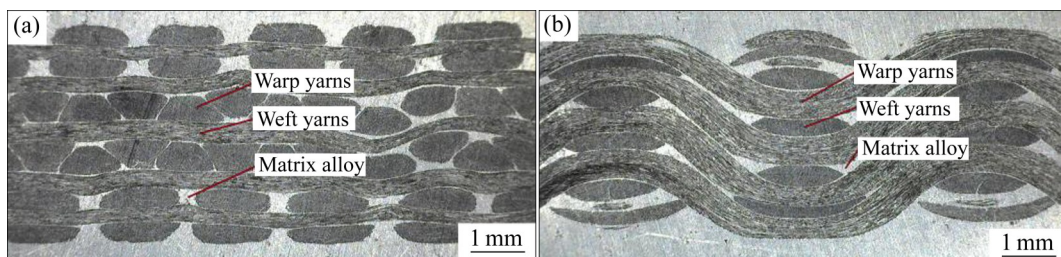


图2 三维角联锁CF/Al复合材料细观结构

Fig. 2 Mesoscopic structures of 3D angle interlocking CF/Al composites: (a) Cross section of warp yarns; (b) Cross section of weft yarns

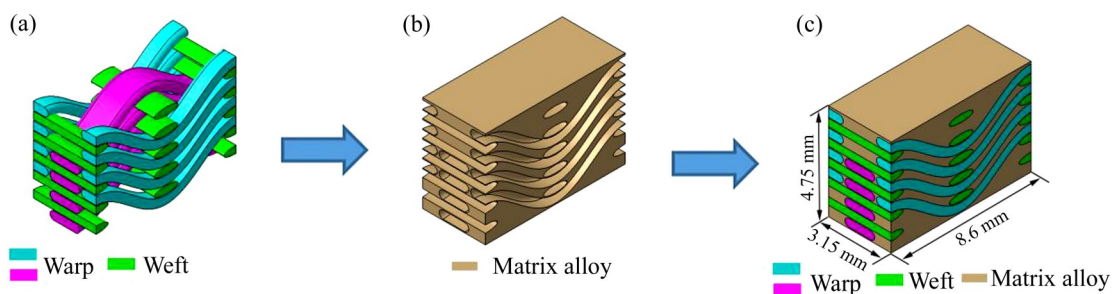


图3 三维角联锁CF/Al复合材料细观结构模型

Fig. 3 Mesoscopic structure model of 3D angle interlocking CF/Al composites: (a) Architecture of warp and weft yarns; (b) Structure model of matrix alloy; (c) Mesoscopic structure model of composites

联锁机织 CF/Al 复合材料细观结构模型如图 3(c) 所示。

扫描电镜获得的三维角联锁机织 CF/Al 复合材料纱线内部纤维的排布情况如图 4 所示。通过 Image Pro Plus 软件定量分析和计算, 得到纱线内部的纤维体积分数为 75%, 则基体合金所占体积分数为 25%。因此, 可将复合材料中的纱线等效为相同纤维体积分数的单向 CF/Al 复合材料。对于纤维体积分数较高且纤维分布均匀的单向复合材料, 采用纤维密排六方分布的单胞模型可较好地预测其横观各向同性性能^[21], 为此, 本文采用纤维体积分数 75% 的密排六方代表性单胞模型(见图 5)来计算和预测复合材料中纱线的热应变随温度的变化行为。

2.2 基体合金材料模型

前期对 CF/Al 复合材料中基体合金原位力学性能的研究结果表明, 其显微硬度约为铸态 ZL301 的 1.37 倍^[22-23]。根据铸态 ZL301 铝合金的拉伸力学响应实验结果, 按硬度比例可获得不同温度下基体合金的力学性能参数如表 3 所示, 其中热膨胀系数见

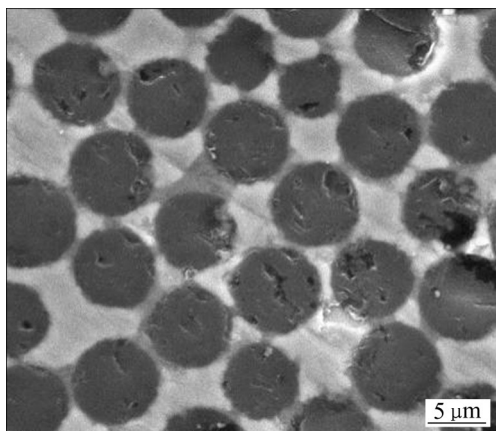


图4 纱线中纤维的分布形态

Fig. 4 Fiber distribution pattern in yarns (SEM)

表3 基体合金力学性能与热膨胀性能参数

Table 3 Mechanical properties and thermal expansion properties of matrix alloy

Temperature/ °C	Elastic modulus, E/GPa	Poisson ratio, ν	Ultimate strength, σ_b/MPa	Thermal expansivity, $\alpha/10^{-6} \text{K}^{-1}$
25	64	0.33	134.8	23.7
100	57		105.6	24.4
200	45		62.5	26.4
350	36		36.2	28.5
400	30		22.3	29.9

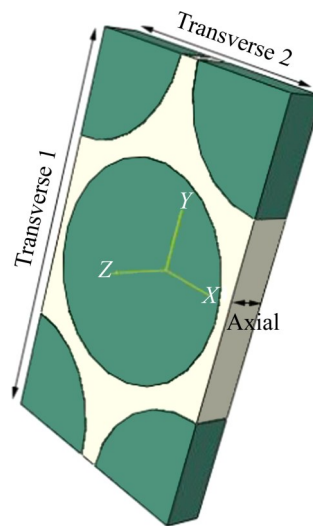


图5 纱线的密排六方单胞模型

Fig. 5 Hexagonal close-packed model of yarns ($V_f=75\%$)

参考文献[24]。从表 3 可见, 基体合金力学性能随温度升高而明显下降。本文采用的考虑基体合金弹性模量随温度变化的表达式如下^[25]:

$$E_m(\theta) = E_m(\theta_0) \exp \left(-k_1 \frac{\theta - \theta_0}{\theta_s - \Delta\theta_1 - \theta_0} \right) \quad (1)$$

式中: $E_m(\theta)$ 为基体合金的弹性模量; $E_m(\theta_0)$ 为室温 ($\theta_0=25^\circ\text{C}$) 条件下基体合金的弹性模量; θ_s 为基体合金的初始熔化温度, ($\theta_s=(370\pm 10)^\circ\text{C}$)。根据表 3 中的弹性模量数据, 拟合获得式(1)中的参数为: $k_1=0.554$; $\Delta\theta_1=10^\circ\text{C}$ 。

将基体合金视为各向同性的弹塑性材料, 本文采用延性损伤模型来定义其初始损伤和损伤演化过程^[26]。基体合金塑性损伤因子 D_m 定义如下:

$$D_m = \frac{\varepsilon - \varepsilon_0^{\text{pl}}}{\varepsilon_f^{\text{pl}} - \varepsilon_0^{\text{pl}}} \quad (2)$$

式中: ε 为等效塑性应变; $\varepsilon_0^{\text{pl}}$ 为 $D_m=0$ 时的等效塑性应变; $\varepsilon_f^{\text{pl}}$ 为 $D_m=1$ 时的等效塑性应变; 根据文献

[23]研究结果, 分别取 $\varepsilon_0^{\text{pl}}=0.5021\%$, $\varepsilon_f^{\text{pl}}=5.021\%$ 。

2.3 纱线材料模型

三维角联锁机织 CF/Al 复合材料纱线中的碳纤维 M40J 是横观各向同性的弹性材料, 其力学性能随温度变化不明显, 因此将其力学性能视为与温度无关。碳纤维 M40J 具有高强度高模量的性能, 制备过程中产生的残余应力不足以使其失效, 因此不对其进行强度失效分析。针对纱线性能预测的细观力学模型中纤维的弹性性能常数及热膨胀系数如表 4 所示。

利用上一节建立的密排六方单胞模型, 采用 Abaqus 软件模拟分析纱线的横向和轴向的热变形行为并获得热收缩应变-温度曲线如图 6 所示。可以看出在其面内横向 1 和横向 2 两个方向上的热应变行为非常相近, 这表明纱线的热膨胀行为具有横观各向同性的特点。计算得到纱线的轴向、横向 1 和横向 2 的热膨胀系数分别为 $2.28 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 、 $15.2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 和 $15.0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。由此确定纱线的轴向热膨胀系数为 $2.28 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, 横向热膨胀系数为 $15.1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。

将纱线视为单向纤维增强铝基复合材料, 忽略纱线内部界面对其力学性能的影响, 其横观各向同性弹性常数可采用 Chamis 模型公式计算^[30]:

$$\begin{cases} E_{11} = V_f E_{11}^f + (1 - V_f) E_m \\ E_{22} = E_{33} = \frac{E_m}{1 - \sqrt{V_f} (1 - E_m/E_{22}^f)} \\ G_{12} = G_{13} = \frac{G_m}{1 - \sqrt{V_f} (1 - G_m/G_{12}^f)} \\ G_{23} = \frac{G_m}{1 - \sqrt{V_f} (1 - G_m/G_{23}^f)} \\ \nu_{12} = \nu_{13} = V_f \nu_{12}^f + (1 - V_f) \nu_m \\ \nu_{23} = \frac{E_{22}}{2G_{23}} - 1 \end{cases} \quad (3)$$

表 4 碳纤维 M40J 的力学与热膨胀性能参数^[23, 27-29]

Table 4 Mechanical and thermal expansion properties of carbon fiber M40J^[23, 27-29]

Axial modulus of elasticity, E_L/GPa	Transverse modulus of elasticity, E_T/GPa	Axial poisson's ratio, ν_{LT}	Transverse poisson's ratio, ν_{TT}	Axial shear modulus, G_{LT}/GPa	Transverse shear modulus, G_{TT}/GPa	Axial thermal expansion coefficient, $\alpha_L/10^{-6} \text{ K}^{-1}$	Transverse thermal expansion coefficient, $\alpha_T/10^{-6} \text{ K}^{-1}$
377	19	0.26	0.3	8.9	7.3	2	8

式中: E_{11}^f 、 E_{22}^f 分别为纤维轴向和横向的弹性模量; G_{12}^f 、 G_{23}^f 分别为纤维轴向和横向的剪切模量; E_m 为基体的弹性模量; G_m 为基体的剪切模量; ν_{12}^f 为纤维轴向的泊松比; ν_m 为基体的泊松比; V_f 为纱线的纤维体积分数; 其中 $G_m = E_m/2(1 + \nu_m)$ 。根据基体合金和碳纤维的弹性常数(见表 3 和 4), 计算得到纱线的弹性性能常数如表 5 所示。

2.4 界面模型

由于基体合金与纱线之间的界面厚度较小, 因此引入零厚度内聚力单元模型, 利用牵引分离法则来表征界面的损伤与脱黏行为。其界面结合性能参数如表 6 所示[26]。本文采用最大名义应力准则作为界面单元初始损伤的判据(最大名义应力达到 1 时, 损伤开始):

$$\text{Max} \left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0}, \frac{t_s}{t_s^0}, \frac{t_t}{t_t^0} \right\} = 1, t_i^0 = \eta \sigma_s (i = n, s, t) \quad (4)$$

式中: t_n 、 t_s 、 t_t 为界面的法向应力和两个切向应力

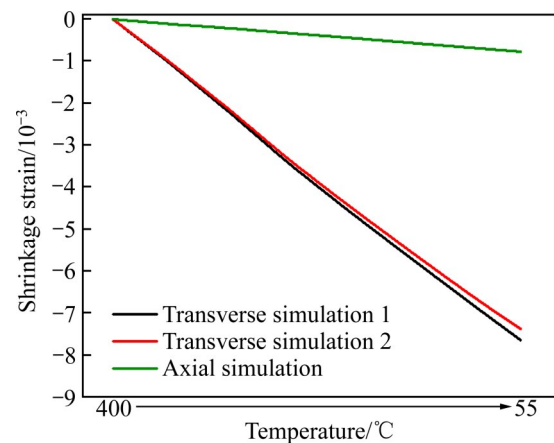


图 6 密排六方单胞模型计算得到纱线横向和轴向热收缩应变曲线

Fig. 6 Transverse and axial shrinkage strains curves calculated by hexagonal close-packed model of yarn ($V_f = 75\%$)

表5 纱线的弹性性能参数

Table 5 Elastic property parameters of yarn

E_{11}/GPa	E_{22}/GPa	G_{12}/GPa	G_{23}/GPa	ν_{12}	ν_{23}
302.7	21.2	13.7	9.1	0.28	0.18

表6 界面结合性能参数

Table 6 Mechanical property parameters of interface

t_n^0/MPa	t_s^0/MPa	t_t^0/MPa	$\delta_{eq}^0/10^{-6}\text{ m}$	$\delta_{eq}^f/10^{-6}\text{ m}$
16.0	9.5	9.5	0.08	0.72

分量; t_n^0 、 t_s^0 、 t_t^0 为界面法向和两个切向所对应的最大名义应力; η 为界面强度因子($\eta=0.726$), σ_s 为基体合金屈服强度^[31]。

当界面满足损伤判据的条件后, 基于界面的有效位移, 引入界面刚度损伤因子 d :

$$d = \frac{\delta_{eq}^f(\delta_{eq}^f - \delta_{eq}^0)}{\delta_{eq}^f(\delta_{eq}^f - \delta_{eq}^0)} \quad (5)$$

式中: δ_{eq}^f 为界面失效时的有效位移; δ_{eq} 为加载过程中界面的有效位移; δ_{eq}^0 为界面初始损伤时的有效位移。

3 结果与分析

3.1 复合材料热收缩行为分析

利用建立的三维角联锁机织CF/Al复合材料细观力学有限元模型, 采用Abaqus软件模拟分析了其降温过程经向的热收缩应变行为并与实验曲线进行对比, 结果如图7所示。由图7可以看出, 宏观热收缩应变的计算值和实验值分别为0.206%和0.182%, 而且细观力学计算得到的热收缩应变曲线与热性能实验曲线总体上吻合程度较好。根据图7中的热收缩应变随温度变化的细观力学模拟曲线和实验曲线, 获得制备降温过程中复合材料经向的宏观热膨胀系数的计算值和实验值, 二者较为接近, 分别为 $5.971 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 和 $5.275 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。

图8所示为在整个降温过程中热收缩应变计算值与实验值的对比, 通过对二者的相关性分析, 可以看出热收缩应变的计算值与实验值集中分布在45°等比例线附近。利用Origin软件计算了Pearson相关系数(R)和绝对误差的平均值(AARE, E_{AARE}), 计算公式如下^[32]:

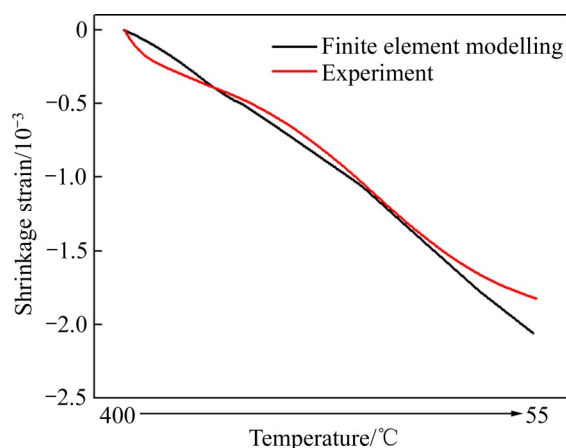


图7 三维角联锁机织CF/Al复合材料热收缩应变-温度实验曲线与细观力学模拟曲线

Fig. 7 Thermal shrinkage strain-temperature test curve and meso-mechanical simulation curve of 3D angle interlocking woven CF/Al composites

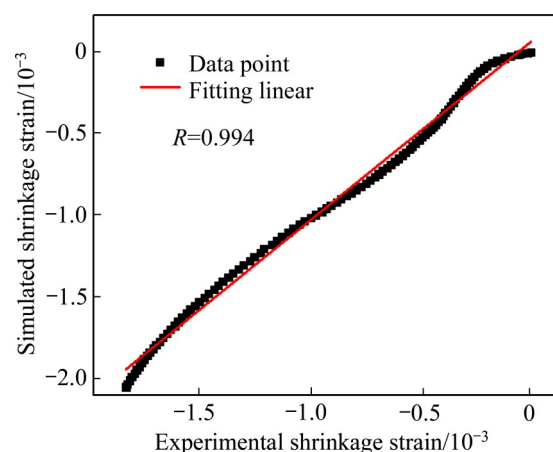


图8 热收缩应变实验值与计算值的相关性分析

Fig. 8 Correlation analysis between experimental and simulation data of thermal shrinkage strain

$$\left\{ \begin{aligned} R &= \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \\ E_{\text{AARE}}(\%) &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{E_i - P_i}{E_i} \right| \times 100\% \end{aligned} \right. \quad (6)$$

式中: E 为实验值; P 为计算值; $\bar{E}$ 、 $\bar{P}$ 分别代表 E 和 P 的平均值; n 为计算和实验曲线上采集的数据点的数量。

根据式(6)计算得到其Pearson相关系数 $R=0.994$, 绝对误差的平均值 $E_{\text{AARE}}=6.88\%$, 进一步说明所建立的细观力学有限元模型可以较好地分析和

预测复合材料制备降温过程中的热收缩变形行为。

3.2 残余应力及基体和界面损伤

在三维角联锁机织CF/Al复合材料制备过程中,温度的变化引起其内部组元材料发生不同程度的收缩变形,进而导致复合材料在宏观上的收缩变形。由于基体合金的热膨胀系数远大于纱线的热膨胀系数,使得基体合金的收缩量大于纱线的收缩量,从而导致复合材料内部在降温结束后存在残余应力。前期研究中^[33-34],根据国标GB/T 7704—2017《无损检测X射线应力测定方法》,选取侧倾角为 0° 、 $\pm 15^\circ$ 、 $\pm 30^\circ$ 和 $\pm 45^\circ$,利用Xstress3000型X射线应力分析仪测量了单向和三维编织CF/Al复合材料的制备残余应力。结果表明,两种铝基复合材料表层内的残余应力值分别为205 MPa和245 MPa,但X射线法无法测量获得复合材料内部残余应力大小及其分布状态。利用建立的细观力学模型计算了复合材料制备降温结束后的残余应力,结果如图8所示。由于纱线的轴向和横向热膨胀系数远低于基体合金,因此,在复合材料制备降温过程中,纱线的收缩量较小而基体合金收缩量较大,纱线抑制了基体合金的收缩变形行为,从而导致复合材料制备完成后其基体合金主要处于残余拉应力状态,而纱线则主要处于残余压应力状态。基体合金

和纱线的残余应力状态分别如图9(a)和(b)所示。从图9(a)可以看出,复合材料的最大残余拉应力为266.6 MPa,这与前期对三维编织CF/Al复合材料热残余应力的X射线检测实验结果较为接近。从图9(c)可以进一步看出,最大拉应力主要出现在经纱和纬纱附近的基体合金中,这是因为此处基体合金收缩变形受到的纱线的抑制作用最为显著。从图9(b)可以看出,复合材料中的最大热残余压应力为226.9 MPa。进一步分析可以看出,最大残余压应力普遍出现在经纱上,而纬纱上的残余压应力水平较低,如图9(d)所示。这是由于经纱呈弯曲状分布且其主要的平直段与基体合金接触区域较多,受到基体合金的收缩变形影响较大,因此其残余压应力水平较高;而纬纱附近区域的基体合金较为薄弱,其受到基体合金的约束作用不明显,二者之间相互作用力较小,因此纬纱上的残余应力远小于经纱,这与树脂基纤维复合材料中制备残余应力分布规律是相似的^[35]。

复合材料制备完成后其内部存在复杂的残余应力,这种非均匀分布的残余应力将对复合材料组元结构产生重要影响作用。通过细观力学有限元数值模拟分析了制备完成后复合材料内部界面和基体合金的损伤状态,结果如图10所示。由于基体合金和纱线分别处于残余拉伸应力和压缩应力状态,使

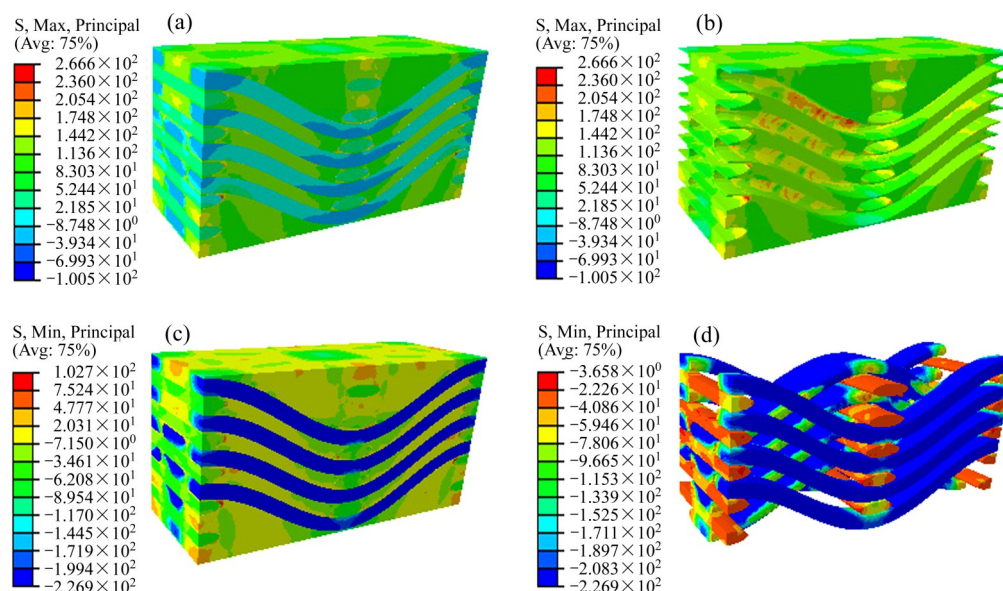


图9 三维角联锁机织CF/Al复合材料制备残余应力分布状态

Fig. 9 Distribution of process-induced residual stress in of 3D angle interlocking woven CF/Al composites: (a) Equivalent residual tensile stress; (b) Equivalent residual compressive stress; (c) Thermal residual tensile stress of matrix alloy; (d) Thermal residual compressive stress of yarn bundle

得二者之间的界面区域处于剪切应力状态,加之复杂的纱线空间构型,导致复合材料界面发生不同程度的损伤甚至局部失效。界面失效区域主要出现在经纱与纬纱搭接处,如图10(a)所示。由于此处经纱与纬纱之间间距小,因此该区域基体合金应力水平较高。此外,此处的经纱和纬纱在空间上处于垂直交叉状态,进一步加剧该区域的应力集中,从而导致经纬纱搭接处的界面出现局部失效。同样是在纱线之间基体较为薄弱的区域,较高的残余拉应力使得基体

合金发生了较为显著的损伤现象,基体合金损伤分布规律基本上与残余拉应力的分布状态一致,如图10(b)所示。由此说明,残余拉应力是引起基体合金损伤的主要因素。

3.3 机织结构参数对制备残余应力的影响

在图3所示的复合材料细观结构模型基础上,通过两种方式改变三维角联锁机织CF/Al复合材料的机织结构。其一,改变纬纱在水平方向(X 方向)上的层间距 D_X ,如图11(a)和(b)所示;其二,改变

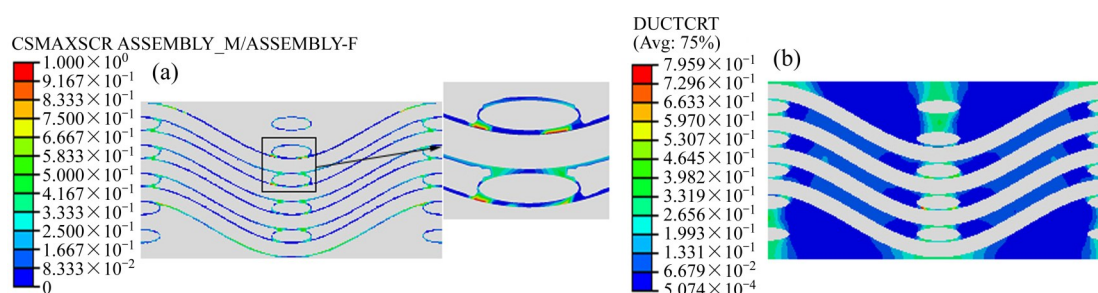


图10 制备残余应力对界面和基体合金损伤与失效状态的影响

Fig. 10 Effects of process-induced residual stress on damage and failure state of interface and matrix alloy: (a) Damage state of interface; (b) Damage state of matrix alloy

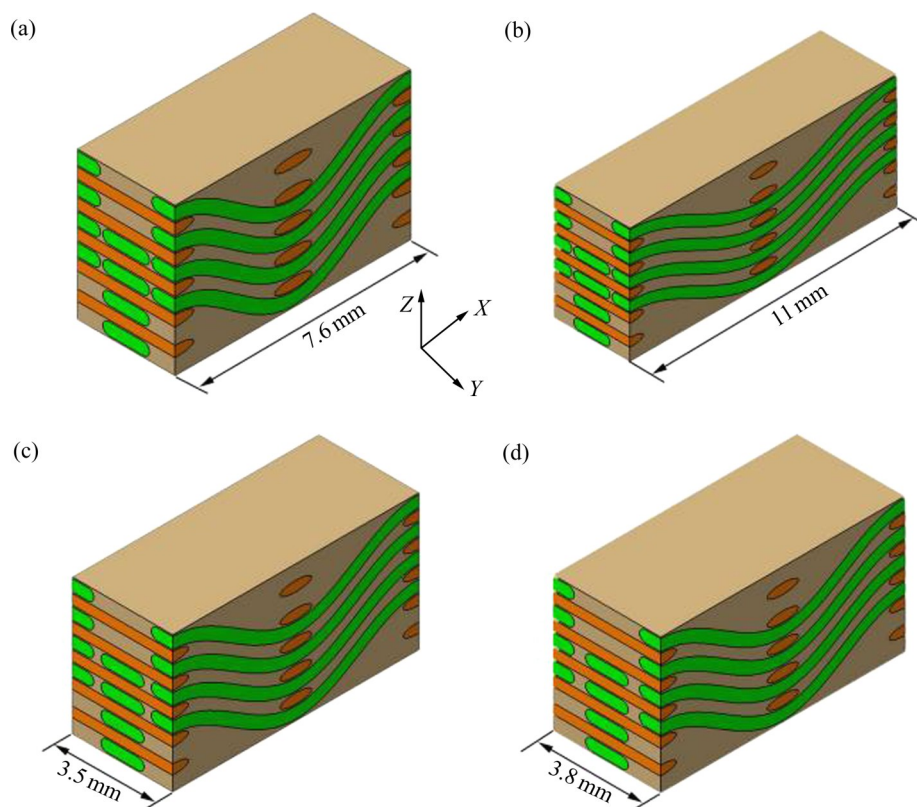


图11 不同机织结构的三维角联锁机织CF/Al复合材料细观结构模型

Fig. 11 Mesoscopic models of 3D angle interlocking woven CF/Al composites with different woven structures: (a) $D_X=7.6$ mm; (b) $D_X=11$ mm; (c) $D_Y=3.5$ mm; (d) $D_Y=3.8$ mm

经纱在水平方向(Y 方向)上的层间距 D_Y , 如图 11(c) 和(d)所示。利用第 2 节建立的细观力学有限元模型, 对不同机织结构参数的复合材料进行了制备残余应力的模拟分析, 最大残余应力的计算结果如图 12 和 13 所示。通过改变纬纱在水平方向(X 方向)上的层间距 D_X , 即 $D_X=7.6$ mm、 $D_X=8.6$ mm 和 $D_X=11$ mm, 计算得到复合材料最大残余拉应力分别为 298.3 MPa、266.6 MPa 和 223.5 MPa, 复合材料最大残余压应力数值分别为 257.6 MPa、226.9 MPa 和 203.3 MPa, 如图 12 所示。由图 12 可以看出, 随着纬纱层间距(D_X)的增大, 其制备残余应力水平随之降低。这是由于纬纱的 X 向水平层间距增大, 经纱的弯曲程度减小, 因此其应力集中有所减缓, 从而其制备残余应力随之减小。通过改变经纱在水平方向(Y 方向)上的层间距 D_Y , 即 $D_Y=3.15$ mm、 $D_Y=3.5$ mm 和 $D_Y=3.8$ mm, 计算得到复合材料最大残余拉应力分别为 266.6 MPa、286.7 MPa 和 309.8 MPa; 复合材料最大残余压应力数值为 226.9 MPa、243.5 MPa 和 274.3 MPa, 如图 13 所示。由图 13 可以看出, 随着经纱层间距(D_Y)的增大, 其制备残余应力随之增大。在经纱形状不变, 只增大经纱 Y 向层间距的情况下, 复合材料纤维体积分数降低明显, 其纱线间基体合金含量增大。由于基体合金的热膨胀系数远大于纱线, 基体合金体积分数的增大导致在制备降温过程中, 基体合金对纱线的挤压更为明显, 致使其制备残余应力水平也有所增大。

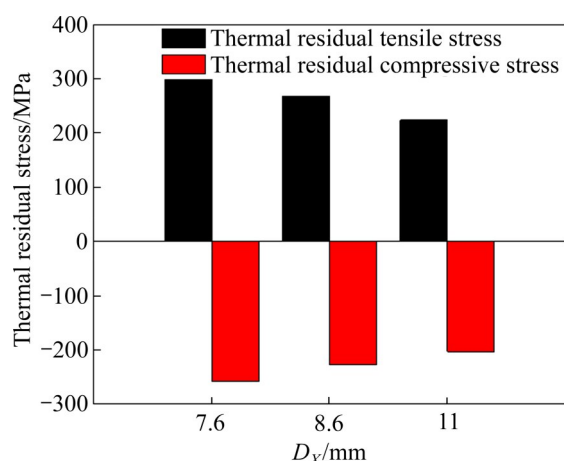


图 12 不同纬纱层间距复合材料制备残余应力计算结果
Fig. 12 Calculation results of process-induced residual stress of composite with different weft layer spacing

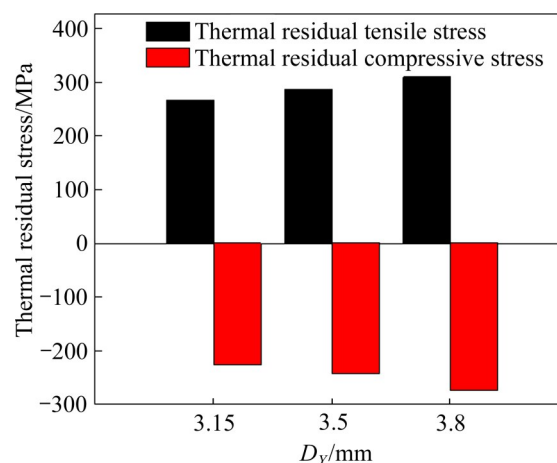


图 13 不同经纱层间距复合材料制备热残余应力计算结果
Fig. 13 Calculation results of process-induced residual stress of composite with different warp layer spacing

4 结论

1) 三维角联锁机织 CF/Al 复合材料降温热膨胀系数计算和实验值分别为 $5.971 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 和 $5.275 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, 且热收缩应变计算曲线与实验曲线基本吻合, 所建立的细观力学有限元模型可较好地反映复合材料热收缩变形行为。

2) 三维角联锁机织 CF/Al 复合材料基体合金和纱线分别处于残余拉应力和压应力状态, 不均匀分布的残余应力导致基体合金发生不同程度损伤, 经纱与纬纱相交处的界面出现局部失效, 不利于发挥复合材料的承载性能。

3) 三维角联锁机织结构参数对复合材料制备热残余应力的影响显著, 增大纬纱的层间距或减小经纱的层间距, 均有利于降低复合材料制备热残余应力水平。

REFERENCES

- [1] YANG Q, LIU J, LI S, et al. Fabrication and mechanical properties of Cu-coated woven carbon fibers reinforced aluminum alloy composite[J]. Materials & Design, 2014, 57: 442–448.
- [2] ALHASHMY H A, NGANBE M. Laminate squeeze casting of carbon fiber reinforced aluminum matrix composites[J]. Materials & Design, 2015, 67: 154–158.
- [3] 杨思远, 王振军, 周金秋, 等. 横向压缩载荷下 CF/Al 复合

- 材料微观损伤演化与断裂力学行为[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(5): 985–996.
- YANG Si-yuan, WANG Zhen-jun, ZHOU Jin-qiu, et al. Microscopic damage evolution and fracture behaviors of CF/Al composites subject to transverse compression loading[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(5): 985–996.
- [4] SHA Jian-jun, LÜ Zhao-zhao, SHA Ru-yi, et al. Improved wettability and mechanical properties of metal coated carbon fiber-reinforced aluminum matrix composites by squeeze melt infiltration technique[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(2): 317–330.
- [5] 胡银生, 余欢, 徐志锋, 等. 2.5D-C_f/Al复合材料的经向高温力学性能及其变形断裂行为[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(3): 507–517.
- HU Yin-sheng, YU Huan, XU Zhi-feng, et al. High temperature mechanical properties and deformation fracture behavior in warp direction of 2.5-C_f/Al composites[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(3): 507–517.
- [6] 李宗珀, 杨彩云. 不同线密度2.5D碳纤维机织物的设计与织造[J]. 国际纺织导报, 2017, 45(4): 28–32.
- LI Zong-po, YANG Cai-yun. Design and weaving of 2.5D carbon woven fabric with different fineness[J]. Melland China, 2017, 45(4): 28–30, 32.
- [7] 胡银生, 余欢, 王振军, 等. 织物结构对2.5D-C_f/Al复合材料微观组织与力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(12): 2512–2522.
- HU Yin-sheng, YU Huan, WANG Zhen-jun, et al. Effect of woven fabric structure on microstructure and mechanical properties of 2.5D-C_f/Al composites[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(12): 2512–2522.
- [8] 陆慧中, 孙颖, 焦亚男, 等. 典型多向2.5D机织预制体近净形编织结构设计[J]. 复合材料学报, 2021, 38(9): 3101–3109.
- LU Hui-zhong, SUN Ying, JIAO Ya-nan, et al. Near net-shaped design on the architecture of typical multi-directional 2.5D woven preform[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(9): 3101–3109.
- [9] 杨思远, 蔡长春, 王振军, 等. 2.5D编织复合材料宏观力学行为数值模拟研究进展[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版), 2019, 33(3): 41–47.
- YANG Si-yuan, CAI Chang-chun, WANG Zhen-jun, et al. Progress in numerical simulation of the macroscopic and micromechanical behavior of 2.5D fabric reinforced composites[J]. Journal of Nanchang Hangkong University (Natural Sciences), 2019, 33(3): 41–47.
- [10] DONG W F, XIAO J, LI Y. Finite element analysis of the tensile properties of 2.5D braided composites[J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 457(1/2): 199–204.
- [11] 董敬涛. 织物结构对2.5D-C_f/Al复合材料组织与力学性能的影响研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2017.
- DONG Jing-tao. Research on the effect of woven fabric structure on microstructure and mechanical properties of 2.5D-C_f/Al composites[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2017.
- [12] NEHARI T, BAHAM K, NEHARI D, et al. Numerical study of the analysis influences the maximum residual thermal stresses on the intensity factor between the matrix/particle interfaces in CMM[J]. Frattura ed Integrità Strutturale, 2020, 54: 275–281.
- [13] ARSENAULT R J, TAYA M. Thermal residual stress in metal matrix composite[J]. Acta Metallurgica, 1987, 35(3): 651–659.
- [14] 李巾铤, 吕哲, 任成祖, 等. 热残余应力对C/SiC复合材料界面剪切强度影响的有限元分析[J]. 材料科学与工程学报, 2017, 35(5): 801–805.
- LI Jin-ding, LYU Zhe, REN Chen-zu, et al. Finite element simulation of interface shear strength of C/SiC composites with thermal residual stress[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2017, 35(5): 801–805.
- [15] WANG Q, LI T, YANG X, et al. Multiscale numerical and experimental investigation into the evolution of process-induced residual strain/stress in 3D woven composite[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2020, 135: 105913.
- [16] SHARMA N K, MISRA R K, SHARMA S. Finite element modeling of effective thermomechanical properties of Al-B₄C metal matrix composites[J]. Journal of Materials Science, 2017, 52(3): 1416–1431.
- [17] METEHRİ A, SERIER B, BACHIR BOUIADJRA B, et al. Numerical analysis of the residual stresses in polymer matrix composites[J]. Materials & Design, 2009, 30(7): 2332–2338.
- [18] YANG L, YAN Y, MA J, et al. Effects of inter-fiber spacing and thermal residual stress on transverse failure of fiber-reinforced polymer-matrix composites[J]. Computational Materials Science, 2013, 68: 255–262.
- [19] SHIRVANIMOGHADDAM K, HAMIM S U, AKBARI M K, et al. Carbon fiber reinforced metal matrix composites: Fabrication processes and properties[J]. Composites: Part A, 2017, 92: 70–96.
- [20] 王振军, 董敬涛, WANG G, 等. 2.5维织物C_f/Al复合材料制备及其经纬向拉伸变形力学行为研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(12): 3744–3752.
- WANG Zhen-jun, DONG Jing-tao, WANG G, et al.

- Preparation of 2.5D woven fabric C_f/Al composite and its tensile deformation behavior in warp/weft direction[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2017, 46(12): 3744–3752.
- [21] ZHANG W X, WANG T J, LI L X. Numerical analysis of the transverse strengthening behavior of fiber-reinforced metal matrix composites[J]. *Computational Materials Science*, 2007, 39(3): 684–696.
- [22] 周金秋, 王振军, 杨思远, 等. 连续石墨纤维增强铝基复合材料准静态拉伸损伤演化与断裂力学行为[J]. *复合材料学报*, 2020, 37(4): 907–918.
- ZHOU Jin-qiu, WANG Zhen-jun, YANG Si-yuan, et al. Damage evolution and fracture behaviors of continuous graphite fiber reinforced aluminium matrix composites subjected to quasi-static tensile loading[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2020, 37(4): 907–918.
- [23] 田 亮. 连续 CF/Al 复合材料准静态拉伸细观损伤与断裂力学行为研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2018.
- TIAN Liang. Research on microscopic damage and fracture behavior of the continuous fiber reinforced aluminum alloy composites subjected to quasi-static tensile loading[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2018.
- [24] WILSON A J C. The thermal expansion of aluminium from 0 °C to 650 °C[J]. *Proceedings of the Physical Society*, 1941, 53: 235–244.
- [25] 刘 彤, 刘敏珊. 金属材料弹性常数与温度关系的理论解析[J]. *机械工程材料*, 2014, 38(3): 85–89, 95.
- LIU Tong, LIU Min-shan. Theoretical analysis of the relationship between elastic constants of metals and temperatures[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2014, 38(3): 85–89, 95.
- [26] WANG Zhen-jun, YANG Si-yuan, SUN Shi-ping, et al. Multiscale modeling of mechanical behavior and failure mechanism of 3D angle-interlock woven aluminum composites subjected to warp/weft directional tension loading [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34(8): 202–217.
- [27] PRADERE C, SAUDER C. Transverse and longitudinal coefficient of thermal expansion of carbon fibers at high temperatures (300 – 2500 K) [J]. *Carbon*, 2008, 46(14): 1874–1884.
- [28] 赵稼祥. 日本东丽公司碳纤维的现状与发展[J]. *炭素技术*, 1997, 16(1): 23–26.
- ZHAO Jia-xiang. Present status and development of carbon fibers in Japanese dongli company[J]. *Carbon Technology*, 1997, 16(1): 23–26.
- [29] 周金秋. CF/Al 复合材料准静态压缩细观损伤与断裂力学行为研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2019.
- ZHOU Jin-qiu. Research on microscopic damage and fracture behavior of the continuous fiber reinforced aluminum alloy composites subjected to quasi-static compress loading[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2019.
- [30] 黄争鸣. 复合材料细观力学引论[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- HUANG Zheng-ming. *Micromechanics of composite materials*[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [31] 路怀玉. 2.5维编织复合材料的强度研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- LU Huai-yu. Strength research of 2.5D braided composites [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [32] 张 良. $C_{sf}/AZ91D$ 复合材料近基体固相线塑性变形力学本构关系研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2014.
- ZHANG Liang. Research on constitutive behaviors of $C_{sf}/AZ91D$ hot compressed near the initial melting temperature of matrix[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2014.
- [33] 聂明明, 徐志锋, 余 欢, 等. 深冷处理对连续 $C_f/ZL301$ 复合材料拉伸强度与残余应力的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2017, 27(9): 1832–1837.
- NIE Ming-ming, XU Zhi-feng, YU Huan, et al. Effect of cryogenic treatment on tensile strength and residual stress of continuous $C_f/ZL301$ composite[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2017, 27(9): 1832–1837.
- [34] 姜小坤, 余 欢, 徐志锋, 等. 深冷处理时间对 3D- C_f/Al 复合材料残余应力与力学性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2018, 39(10): 1–7.
- JIANG Xiao-kun, YU Huan, XU Zhi-feng, et al. Effect of cryogenic treatment time on residual stress and mechanical properties of 3D- C_f/Al composites[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2018, 39(10): 1–7.
- [35] 樊建平, 张 斌. 树脂基纤维复合材料的热残余应力数值分析[J]. *材料导报*, 2011, 25(8): 115–117, 130.
- FAN Jian-ping, ZHANG Bin. Numerical analysis of the thermal residual stresses in polymer matrix composites[J]. *Materials Review*, 2011, 25(8): 115–117, 130.
- [36] 郭洪伟, 张立泉, 朱梦蝶, 等. 高性能复合材料用机织 2.5D 织物的结构设计与制造工艺[J]. *玻璃纤维*, 2017(3): 1–5.
- GUO Hong-wei, ZHANG Li-quan, ZHU Meng-die, et al. Structural design and weaving process of 2.5D woven fabrics used for high performance composites[J]. *Fiber Glass*, 2017(3): 1–5.

Mesomechanics analysis of process-induced residual stress in 3D angle interlocking woven aluminum matrix composites

LIU Yan-wu, CAI Chang-chun, WANG Zhen-jun, ZHANG Yi-hao, TONG De, YU Huan, XU Zhi-feng

(School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: In this paper, the thermal shrinkage deformation behavior, residual stress distribution and its effect on component materials of 3D angle interlocking woven fiber reinforced aluminum matrix composites were studied by using mesomechanics numerical simulation and experiments. The results show that the calculated macroscopic thermal shrinkage strain curve agrees well with the experimental curve. The matrix alloy in the as-prepared composites mainly is in residual tensile stress state, and the maximum residual tensile stress (266.6 MPa) occurs in the matrix alloy nearby yarns. Both the warp yarns and the weft yarns are in residual compressive stress state, and the maximum residual compressive stress mainly appears on the warp yarns. The inhomogeneous thermal residual stress results in the nonuniform damage state of matrix alloy and interface. The damage of matrix alloy between the warp and weft yarns is more serious than other area, which results in a local interface failure. The increase of weft interlayer spacing or decrease of warp interlayer spacing could be expected to reduce the maximum residual stress in the as-prepared composites.

Key words: 3D angle interlocking; aluminum matrix composites; thermal shrinkage behavior; residual stress; mesomechanics

Foundation item: Projects(51765045, 52165018) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(2019ZF056013) supported by the Aeronautical Science Foundation, China; Project (20202ACBL204010) supported by the Natural Science Foundation of Jiangxi Province, China; Project(JCKY2018401C004) supported by the National Defense Basic Scientific Research Program of China

Received date: 2021-07-25; **Accepted date:** 2021-08-24

Corresponding author: WANG Zhen-jun; Tel: +86-18970951974; E-mail: wangzhj@nchu.edu.cn

(编辑 何学锋)