

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20200720.002

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



分享本文

王琦¹, 蒋秋梅², 杨旭锋¹, 任明法^{*1}

(1. 大连理工大学 工程力学系, 大连 116024; 2. 西安航天动力技术研究所 燃烧, 热结构与内流场重点实验室, 西安 710100)

摘要: 为预测三维机织复合材料工艺引入的残余应力/应变, 提出工艺制度优化方案, 建立了一种工艺过程分析的多尺度模型。通过建立纤维尺度及纱线尺度代表体元 (RVE), 计算了成型过程中纤维纱线及三维机织复合材料的模量演化历程。考虑固化过程中树脂的化学收缩效应, 在纱线尺度上开展热-化学-力学耦合分析, 预测了细观残余应力-应变及其演化规律。采用三维机织技术, 实现了光纤布拉格光栅传感器 (FBG) 在三维机织预制体中的预埋, 并对其树脂传递模塑 (RTM) 成型过程中的温度、应变历程进行监测, 试验结果验证了有限元模型的准确性。采用基于空间信息、误差信息和优化结果的三种序列采样方法, 建立了工艺过程分析代理模型, 并开展工艺参数优化设计, 结果显示采用优化后的工艺参数, 残余应变降低了 15.4%, 工艺周期缩短了 10.6%。

关键词: 三维机织复合材料; 多尺度; 残余应力; 代理模型; 优化设计

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2021)04-1167-10

Multiscale analysis and process parameters optimization of residual stress/strain of 3D woven composite

WANG Qi¹, JIANG Qiumei², YANG Xufeng¹, REN Mingfa^{*1}

(1. Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. National Key Laboratory of Combustion, Thermal Structure and Flow, Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: To predict the process-induced residual stress/strain of 3D woven composite and propose the optimal cure cycle, a multiscale model of the process analysis has been developed. Based on the representative volume elements (RVE) at the fiber and yarn scale, the modulus development of yarns and 3D woven composite was obtained. A thermal-chemical-mechanical coupling analysis was conducted on the yarn scale with the consideration of chemical shrinkage effect of resin, and the evolution of the microscopic stress-strain was calculated. The fiber Bragg grating (FBG) sensors were embedded in the 3D woven preform through the 3D weaving technique, and the evolutions of temperature and strain were monitored. The accuracy of the finite element model was validated by the experimental result. Three sequential sampling methods based on space, error and result were adopted to establish the surrogate model of the process analysis of 3D woven composite. Based on the surrogate model, the optimization of process parameters of 3D woven composite forming process was carried out. The results show that the residual strain is reduced by 15.4% and the cure cycle is shortened by 10.6%.

Keywords: 3D woven composite; multiscale; residual stress; surrogate model; optimization design

三维机织复合材料是由机织加工技术将纤维注射、固化等步骤形成的一种复合材料^[1-4]。由于束制成具有空间网状结构的预制体, 再经过树脂其纤维具有三维空间结构, 弥补了传统层合复合

收稿日期: 2020-05-21; 录用日期: 2020-07-01; 网络首发时间: 2020-07-21 09:35:34

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200720.002>

基金项目: 国家自然科学基金 (U1837204)

通信作者: 任明法, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为复合材料力学及其结构分析 E-mail: renmf@dlut.edu.cn

引用格式: 王琦, 蒋秋梅, 杨旭锋, 等. 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 [J]. 复合材料学报, 2021, 38(4): 1167-1176.

WANG Qi, JIANG Qiumei, YANG Xufeng, et al. Multiscale analysis and process parameters optimization of residual stress/strain of 3D woven composite[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(4): 1167-1176(in Chinese).

材料层间性能及抗冲击性能差等缺点。此外，三维机织预制体还具有极强的仿形性，易于加工成具有复杂曲面的结构。如新一代 LEAP 发动机风扇叶片及风扇机匣，均采用三维机织复合材料制造而成。然而，风扇叶片等结构对于成型精度具有极高的要求，复合材料制造过程中常常会产生残余应力及应变，若不能对其加以有效控制，则会导致装配问题甚至制件作废。因此建立有效的残余应力、应变分析方法，并对固化工艺过程进行优化设计，对提高三维机织复合材料成型性能具有重要意义^[5-6]。

复合材料残余应力主要可以分为两类：宏观残余应力和细观残余应力^[7]。宏观残余应力主要由复合材料不同铺层间的热膨胀系数不匹配等引起，因此又称单层-单层残余应力。宏观残余应力会导致复合结构产生翘曲等宏观变形。细观残余应力主要是由纤维和树脂间热膨胀系数不匹配、树脂固化收缩应变及吸湿应变引起，又称为纤维-树脂残余应力^[8]。细观残余应力可能会导致树脂开裂及纤维与基体脱粘，从而降低复合材料结构强度。现有研究大多数为针对宏观残余应力开展。

早期的复合材料残余应力研究仅关心降温阶段，假设复合材料为线弹性材料，结合经典层合理理论计算冷却后结构中的残余应力、应变^[9]。这种方法对于厚度较薄构件较有效，由于树脂未固化时复合材料模量较低，故可认为其几乎不产生残余应力。但对于复合材料厚板或具有复杂型面的结构线弹性本构模型预测的准确性不高。在复合材料的固化成型过程中，其材料性能随温度、固化度等因素逐渐变化，为深入研究复合材料残余应力演化机制，必须要建立描述其固化成型过程中材料性能变化的力学模型。Bogetti 等^[10]提出了固化硬化瞬时线弹性模型 (CHILE)，其认为树脂在每一分析步都是线弹性材料，该模型仅需少量参数就能有效描述复合材料固化过程中的材料演化，因此被国内外学者广泛使用^[11-13]。虽然 CHILE 模型本质上是基于线弹性本构，但 Zobeiry 等^[14]通过对比发现，CHILE 模型是一种简化的、伪黏弹性的本构模型。Ding 等^[15]也对比了线弹性模型、CHILE 模型及黏弹性模型的计算效率和精度，认为 CHILE 模型能在较少牺牲精度的情况下有效预测复合材料固化变形和残余应力。在复合材料固化成型过程中，除了材料性能发生极大变

化之外，树脂的体积收缩也对残余应力、应变的发展有着重要影响。Prasatya 等^[16]研究结果表明，环氧树脂的固化体积收缩对总体残余应力的贡献占 30% 以上。Rosso 等^[17]研究发现由于树脂固化收缩作用，复合材料纤维-基体截面处的残余应力增长约 60%。

近年来，国内外学者逐渐开始采用细观力学及多尺度分析方法，对复合材料细观残余应力、应变开展研究。李东娜^[18]基于多物理场仿真软件 COMSOL，建立了复合材料固化过程多物理场耦合的细观尺度分析模型，讨论了铺层设计及固化工艺对复合材料固化过程的影响。Yuan 等^[19]建立了复合材料残余应力多尺度分析模型，其研究结果表明引入多尺度效应后对复合材料细观残余应力的计算有显著影响。

由于复合材料的固化过程是一个极其复杂的过程，其涉及热-化学场、树脂流动场、应力应变场等多场耦合，且具有强非线性特征，导致求解过程非常耗时，而为了获得最优的设计参数，需进行多次迭代计算。为提高优化设计效率，有学者提出了基于试验设计和近似理论的代理模型方法，构建计算量小且在一定程度上满足预测结果精度的代理模型来替代真实物理问题的数值模型^[20]。近年来，代理模型逐渐在优化设计领域得到广泛应用^[21-23]。

本文针对三维机织角联锁复合材料，首先基于细观力学有限元法，建立不同尺度下的代表体元 (RVE)，计算固化过程中的纱线、复合材料材料性能；开展温度场、固化度场和应力应变场的耦合分析，对其细观残余应变场进行预测，并采用光纤布拉格光栅 (FBG) 传感器对三维机织复合材料成型进行监测，验证数值模型准确性；综合采用三种分别基于空间、误差和结果的自适应序列采样方法，建立成型工艺参数与残余应变间的径向基函数 (RBF) 代理模型，最后以最小残余应变为优化目标，对三维机织复合材料成型工艺参数进行优化。

1 模型建立

1.1 热-化学模型

热-化学模型用于描述复合材料固化过程中的热传导及固化反应放热，可采用一个带有内部热源的热传导方程来描述这一过程^[24]：

$$\rho_c c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \dot{Q} \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (1)$$

式中: ρ_c 为复合材料密度; c_p 为复合材料比热; T 为成型过程中的制件温度; k_{ij} 为复合材料的热导率; t 为固化时间; x_i 为坐标; $\dot{Q}$ 为固化反应中树脂固化的生热速率, 其表达式为

$$\dot{Q} = \rho_r V_r \left(\frac{d\alpha}{dt} \right) H_r \quad (2)$$

式中: ρ_r 为树脂的密度; V_r 为树脂体分比; H_r 为树脂基体完全固化时产生的化学反热; $d\alpha/dt$ 为固化反应速率。不同树脂固化反应速率可采用不同的经验公式描述, 以 AS4/3 501-6 材料体系为例, 其固化反应动力学方程如下:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \begin{cases} (k_1 + k_2\alpha)(1-\alpha)(0.47-\alpha) & \alpha \leq 0.3 \\ k_3(1-\alpha) & \alpha > 0.3 \end{cases} \quad (3)$$

$$k_i = A_i \exp \left(-\frac{\Delta E_i}{RT} \right) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (4)$$

式中: A_i 为频率因子; ΔE_i 为活化能; R 为气体常数。

1.2 应力应变模型

根据 CHILE 模型假设, 认为树脂在固化过程中的每个分析步为线弹性材料, 其模量可以用下式表示^[7]:

$$E_r = \begin{cases} E_r^0 & T^* < T_{c1} \\ \left(\frac{T_{c2}-T^*}{T_{c2}-T_{c1}} \right) E_r^0 + \left(\frac{T^*-T_{c1}}{T_{c2}-T_{c1}} \right) E_r^\infty & T_{c1} \leq T^* < T_{c2} \\ E_r^\infty & T^* \geq T_{c2} \end{cases} \quad T^* = T_g - T \quad (5)$$

式中: E_r^0 为树脂在低固化度下的模量; E_r^∞ 为完成固化时的树脂模量; T_{c1} 为树脂模量开始增长时的固化度; T_{c2} 为树脂模量停止增长时的固化度; T_g 为树脂玻璃化转变温度。

为获得纱线材料参数, 首先建立纤维尺度 RVE 模型, 本文中所建立的六边形 RVE 有限元模型如图 1 所示。 R 代表纤维半径, L 代表六边形对边距离, 则纤维尺度 RVE 的纤维体分比可通过该两个参数确定, 本文纤维尺度 RVE 纤维体积比 $V_{fa} = 88\%$ 。假设固化过程中纤维的材料属性不变, 基体材料由式 (5) 确定。对纤维尺度 RVE 赋予组分材料属性后, 施加周期性边界条件及相对应的单位应变, 获得 RVE 应力场分布, 对其按下式进行体平均则求得纤维尺度 RVE 的平均应力及纱线的等效刚度阵:

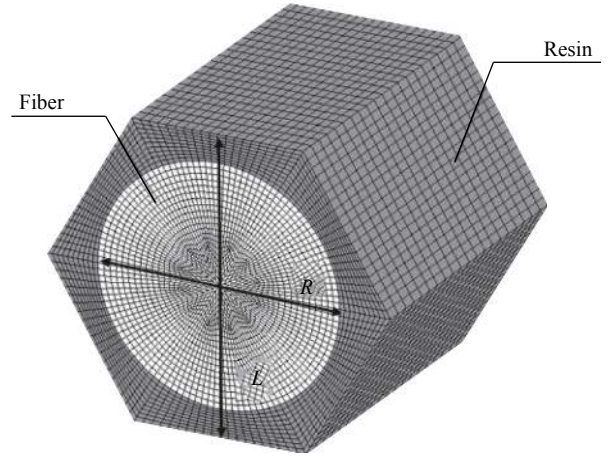


图 1 纤维尺度代表性体积单元 (RVE)

Fig. 1 Fiber scale representative volume element (RVE)

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{1}{V} \sum_{k=1}^N \sigma_{ij}^k V^k \quad (6)$$

式中: $\bar{\sigma}_{ij}$ 为平均应力分量; N 为 RVE 中总单元数; V 为 RVE 体积; σ_{ij}^k 和 V^k 分别是第 k 个单元的应力分量和体积。其中六边形 RVE 周期性边界见文献 [25]。

固化过程中的树脂体积收缩与固化度 C_s 间的关系如下^[7]:

$$V_r^S = \begin{cases} 0 & \alpha \leq C_1 \\ AC_s + (V_r^{S\infty} - A)C_s^2 & C_1 < \alpha \leq C_2 \\ V_r^{S\infty} & \alpha > C_2 \end{cases} \quad (7)$$

$$C_s = \frac{\alpha - C_1}{C_2 - C_1} \quad (8)$$

式中: V_r^S 为树脂固化体积收缩; A 为线性固化收缩系数; $V_r^{S\infty}$ 为树脂总体积收缩; C_1 和 C_2 分别为树脂收缩的起点和终点。由树脂固化体积收缩可得树脂收缩应变 ϵ_r^S 为

$$\epsilon_r^S = (1 + V_r^S)^{\frac{1}{3}} - 1 \quad (9)$$

以上模型中用到的工艺过程参数, 如温度、固化度等由纱线尺度 RVE 计算获得。首先建立纱线尺度 RVE 模型如图 2 所示, 其由经纱、纬纱和基体组成。为模型方便, 假设经纱和纬纱截面为椭圆形, 且纱线截面在固化过程中不发生变化。纱线所占体积比 $V_y = 66\%$, 则三维机织复合材料中总纤维体积比 $V_f = 58\%$ 。基于纱线尺度 RVE, 综合以上各数学模型, 开展热-化学-力学耦合分析。其中, 热-化学分析采用第一类边界条件, 在纱线尺度 RVE 的外表面上施加固化温度; 力学分析中, 对其施加周期性边界条件并约束刚体位移, 三维机织复合材料代表体元的周期性边界条件参考文献

献 [1]。最终可获得三维机织复合材料固化过程中的温度、固化度、细观残余应力/应变分布及其演化情况。

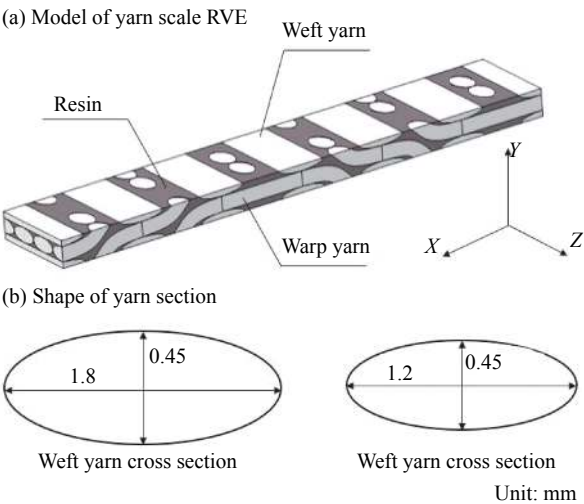


图 2 纱线尺度 RVE
Fig. 2 Yarn scale RVE

本文以国内外常用的材料体系 AS4 碳纤维增强 3501-6 环氧树脂为例开展研究。3501-6 环氧树脂热-化学性能如表 1 所示。AS4 碳纤维和 3501-6 环氧树脂的力学性能见表 2。AS4 碳纤维热-力学性能见表 3 所示。

表 1 3501-6 环氧树脂热-化学性能^[7]
Table 1 Thermo-chemical properties of 3501-6 epoxy resin^[7]

Parameter	Value
$\rho_r/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$90\alpha + 1\,232(\alpha \leq 0.45) \quad 1\,272(\alpha > 0.45)$
$C_r/(\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1})$	$4\,148(0.468 + 5.975 \times 10^{-4}T - 0.141\alpha)$
$k_r/(\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1})$	$0.04184(3.85 + (0.035T - 0.141)\alpha)$
$H_r/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1})$	473 600
A_1/min^{-1}	2.102×10^9
A_2/min^{-1}	-2.104×10^9
A_3/min^{-1}	1.960×10^5
$\Delta E_1/(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$	8.07×10^4
$\Delta E_2/(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$	7.78×10^4
$\Delta E_3/(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$	5.66×10^4

Notes: ρ_r —Density of the resin; C_r —Specific heat capacity of the resin; k_r —Thermal conductivity of the resin; A_i —Frequency factors; ΔE_i —Activation energies.

1.3 优化模型

本文以固化历程结束后的 RVE 平均残余应变为目标函数，图 3 为典型固化工艺周期，取其第一阶段升温速率 (h_1)、第二阶段升温速率 (h_2) 和

表 2 AS4 碳纤维和 3501-6 环氧树脂力学性能^[10]

Table 2 Mechanical properties of AS4 carbon fiber and 3501-6 epoxy resin^[10]

Parameter	Value
E_r^∞/GPa	3.447
E_r^0/GPa	3.447/1 000
ν_r^∞	0.37
$\phi_r/^\circ\text{C}^{-1}$	57.6×10^{-6}
E_{f1}/GPa	206.8
E_{f2}/GPa	20.7
ν_{f12}	0.2
ν_{f13}	0.2
ν_{f23}	0.5
G_{f12}/GPa	27.6
G_{f13}/GPa	27.6
G_{f23}/GPa	6.9
$\phi_{f1}/^\circ\text{C}^{-1}$	-9.0×10^{-7}
$\phi_{f2}/^\circ\text{C}^{-1}$	7.2×10^{-6}

Notes: E , ν and G —Elastic modulus, Poisson's ratio and shear modulus, respectively; ϕ —Coefficient of thermal expansion; subscripts f and r represent fiber and resin respectively.

表 3 AS4 碳纤维热-力学性能^[26]

Table 3 Thermo-chemical properties of AS4 carbon fiber^[26]

Parameter	Value
$\rho_f/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 790
$C_f/(\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1})$	$750 + 2.05T$
$k_f^L/(\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1})$	$0.04184 \times (3.85 + (0.035T - 0.141)\alpha)$
$k_f^T/(\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1})$	$2.4 + 0.00507T$

Notes: ρ_f —Density of the fiber; C_f —Specific heat capacity of the fiber; k_f^L , k_f^T —Longitudinal and transverse thermal conductivity of the fiber respectively.

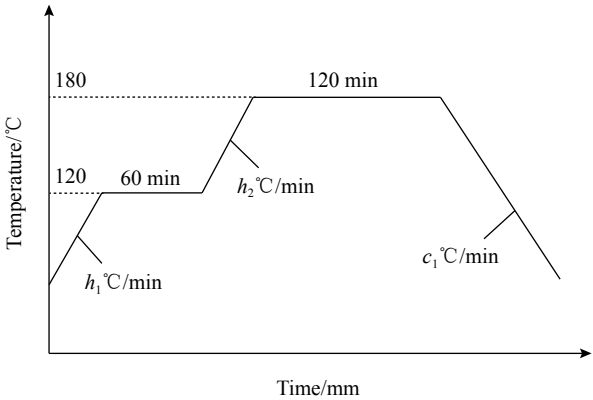


图 3 典型固化工艺周期

Fig. 3 Typical autoclave process cycle

冷却速率 (c_1) 为设计变量，优化约束为设计变量在上、下界之间，最终模型中的最小固化度大于 0.98 (即固化完全)，且优化后的固化周期总时间不长于原固化周期。优化设计的数学表述为

Find : x

Min : $\bar{\varepsilon}_{zz}(x)$

S.T. : $x_1 \leq x \leq x_2$

$\alpha_{\min} > 0.98$

$t_{cc} \leq t_{cc}^0$

(10)

式中： x 为设计变量； $\bar{\varepsilon}_{zz}(x)$ 为固化结束 RVE 纬纱方向（Z 向）平均残余应变； x_1 和 x_2 分别为变量的上、下限； $\alpha_{\min}$ 为固化结束时的最小固化度； t_{cc} 和 t_{cc}^0 分别为优化后和优化前的固化周期总时间。本文中设计变量的上、下限取为 5℃/min 和 0.3℃/min。

为提高优化设计效率，本文建立 RBF 代理模型来代替三维机织复合材料真实固化过程的仿真模型。代理模型的样本点集是决定代理模型精度的关键，本文首先采用基于空间信息的蒙特卡洛空间减缩 (MCSR) 算法^[20]进行采样，为保证样本点集具有良好的投影特性，MCSR 算法在已有样本沿各维度方向上均设置一个长度为 L 的拒绝区间，并使后续添加的样本点不落入这些区间之内， L 可定义为

$$L = \frac{\lambda}{m}$$

(11)

其中： λ 是缩放因子； m 为当前已有的样本点数。 λ 越大样本投影特性越好，减缩后的设计空间越小，因此 λ 取值不能过小，以免设计空间消失。

为保证样本点集具有良好的空间填充特性，在设计空间 S_n 上采用 MCSR 生成一定数量的随机点，计算每个随机点到已有样本点集的最小距离，再根据最小距离最大化准则选取样本点：

$$d_{\min} = \min_{e_i, e_j \in E} \sqrt{\sum_{k=1}^m |e_i^k - e_j^k|^2}$$

(12)

其中： d 为两样本间的欧氏距离； e_i 和 e_j 为样本点集 E 中的任意两点； m 为设计空间的维度； e_i^k 和 e_j^k 为点 e_i 和 e_j 的 k 维坐标^[27]。

根据上述过程，即可建立具有良好空间填充特性和投影特性的初始样本点集，为提高代理模型整体精度，采用 CV-Voronoi 算法^[28]进行基于误差信息的序列加点，具体步骤如下：(1) 并基于初始样本点集 E 和响应集 R 构造近似模型 $\hat{f}_0$ ；(2) 采用泰森图解法将设计空间分割为一系列泰森多边形 C ，每个泰森多边形采用一组随机点近似描述；(3) 采用“留一交叉验证”方法，识别最敏感多边形 c_{sen} ，并从其对应的随机点集中挑选一个距中心点最远的随机点作为新点 e_{m+1} ；(4) 计算新点 e_{m+1}

的真实响应 r_{m+1} ，并更新样本点集和响应集，重新构造代理模型 $\hat{f}_1$ ；(5) 检查代理模型是否满足精度要求，若满足则算法停止；若不满足，重复步骤 (2)。

最后再采用基于结果信息的序列加点方法，提高最优点精度。其具体步骤为：基于上述建立的代理模型进行优化并获得最优点，对比最优点的代理模型解和有限元解的误差，若误差满足要求则完成优化程序，若不满足，则将该最优点添加到样本集重新构造代理模型，并重复以上步骤直至误差满足要求。

综合以上各模型，本文总体流程如图 4 所示。首先根据序列采样策略，获得工艺仿真所需的输入参数（固化升温及冷却速率），带代入纱线尺度 RVE，开展热-化学分析，获得温度及固化度，再将其代入纤维尺度 RVE，计算出纱线的力学性能及固化收缩应变，随后开展应力应变分析，获得细观残余应力-应变信息，并作为输出参数反馈给序列采样模块，形成一个样本点；基于 MCSR 算法，获得初始样本点集后，再采用 CV-Voronoi 算法，对初始样本点集进行加点，以进一步提高代理模型整体精度；基于样本点集，构建 RBF 代理模型，并开展优化

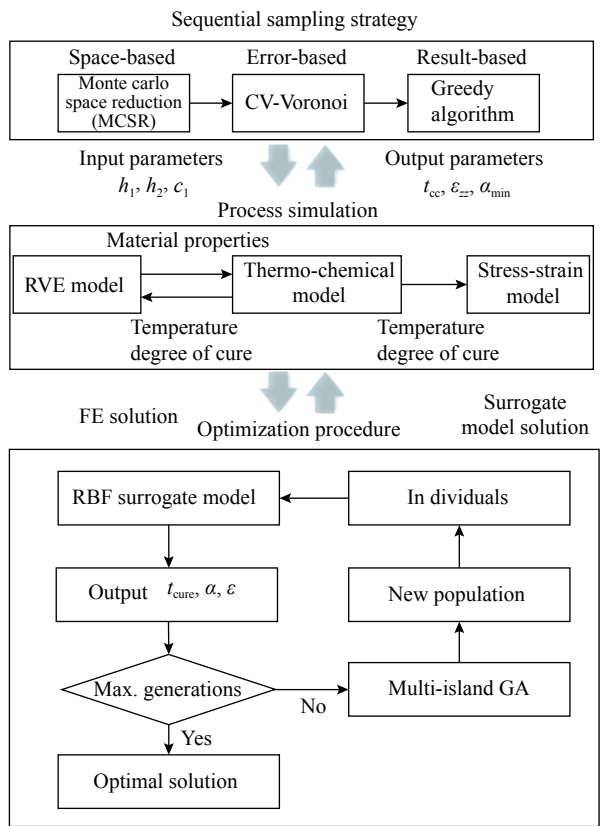


图 4 固化工艺优化流程

Fig. 4 Flow chart of the optimization of the curing process

分析, 在最优点处开展基于结果信息的自适应序列加点, 以提高最优点处精度, 最终获得满足代理模型精度要求和优化设计要求的最优解。

2 三维机织复合材料固化过程仿真

基于以上数学模型, 采用多物理场分析软件 COMSOL 全耦合分析方法 (在单次迭代中包含各未知量之间的所有耦合并求解所有未知量) 对三维机织复合材料的固化成型过程进行仿真。其中纤维尺度 RVE 采用六面体单元划分网格, 单元总数为 3 300 个。纱线尺度 RVE 采用四面体单元对模型划分网格, 单元总数为 507 006 个。由于三维机织预制体的厚度远小于面内尺寸, 因此对 RVE 上、下表面施加第一类边界条件, 即直接施加固化周期温度。固化周期为: 由 20℃ 以 2℃/min 的速率升温至 120℃, 保温 1 h, 再以同样升温速率升温至 180℃ 并保温 2 h, 最后以 2℃/min 的速率冷却至 20℃。

图 5 为计算得到的纱线尺度 RVE 中心点温度和固化度曲线。可见, 由于 RVE 厚度较薄, 中心点温度历程与固化周期一致, 没有明显的“温度越界”现象。从固化度曲线来看, 树脂固化速率在第二升温阶段及第二保温平台初期最快 (126~160 min), 并在 225 min 左右固化度接近于 1。

图 6 为固化过程中树脂收缩应变和树脂模量演化规律。可见树脂模量变化趋势与固化度基本一致。树脂在 33~160 min 期间发生化学收缩, 随后达到稳定状态。

图 7 和图 8 分别为 126 min 和 225 min 时三维机织复合材料纱线尺度 RVE 温度及固化度分布云图。对比图 7 和图 8 可见, 126 min 时 RVE 外侧温

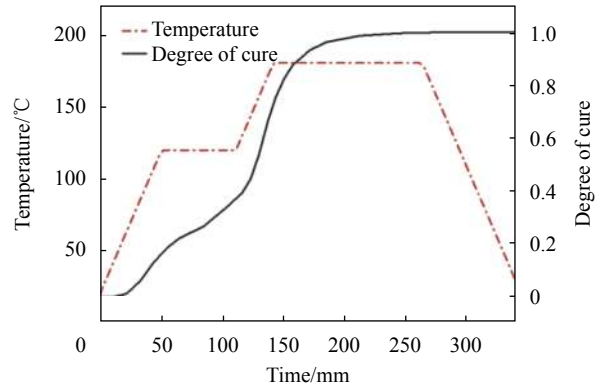


图 5 纱线尺度 RVE 中心点温度和固化度曲线
Fig. 5 Histories of temperature and degree of cure at the center of yarn scale RVE

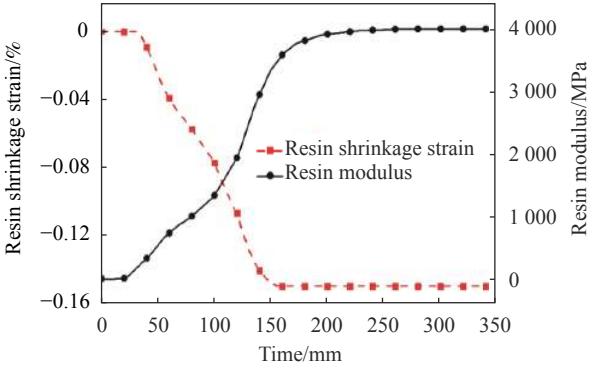


图 6 固化过程中树脂收缩应变和树脂模量演化规律
Fig. 6 Evolutions of resin shrinkage strain and resin modulus during curing process

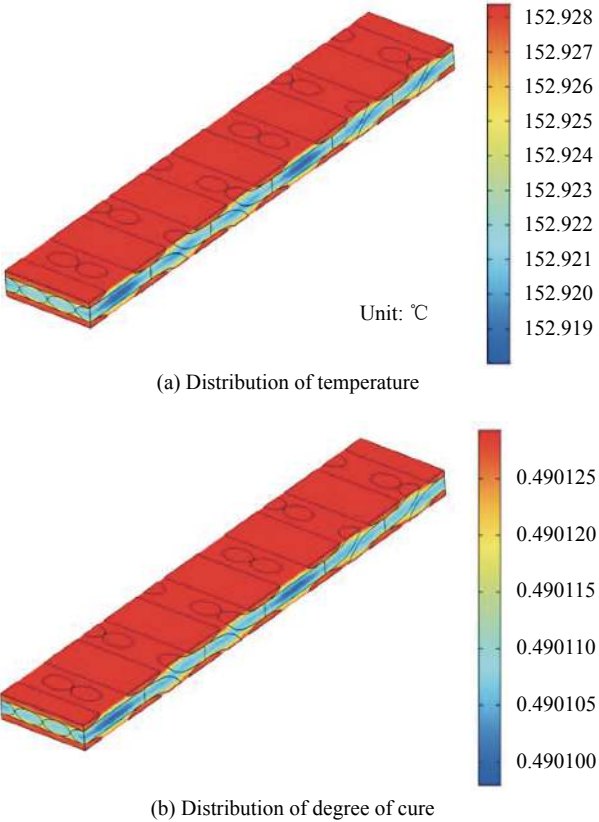


图 7 126 min 时三维机织复合材料纱线尺度 RVE 温度和固化度分布云图
Fig. 7 Distribution of temperature and degree of cure of 3D woven composite yarn scale RVE at 126 min

度略高于内部, 而 225 min 时由于固化放热作用, 内侧温度高于外侧。由于 RVE 厚度方向尺寸较小, 其梯度分布现象不明显。若对于较厚的复合材料制件, 这一现象将进一步累积, 从而出现“温度越界”的情况。

获得固化周期结束时的各方向残余应变场分布如图 9 所示。观察 X 方向 (经纱方向) 残余应变

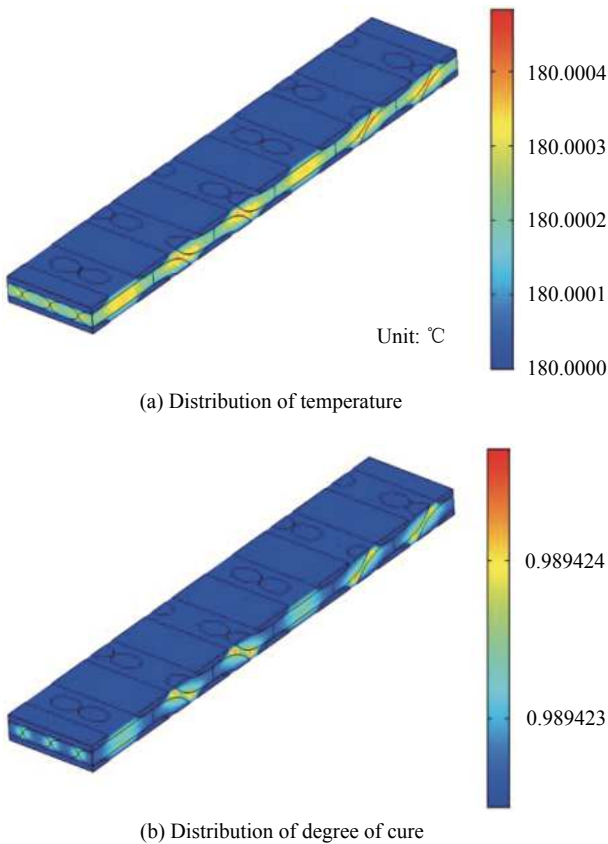


图 8 225 min 时三维机织复合材料纱线尺度 RVE 温度和固化度分布云图
Fig. 8 Distribution of temperature and degree of cure of 3D woven composite yarn scale RVE at 225 min

场分布云图可见，树脂由于固化收缩，主要产生负应变，且其对纬纱横向产生拉伸作用，故纬纱在 X 方向主要出现正应变，而由于经纱在 X 方向的模量较大，因此其应变较小；Y 和 Z 方向同理，由于树脂收缩，在经纱和纬纱各自的横向产生拉伸应变，而纱线纵向的应变较小。固化结束时 Z 方向平均残余应变为 $-1\ 089 \times 10^{-3}$ 。

3 试验验证

为验证数值模型的准确性，开展三维机织复合材料树脂传递模塑 (RTM) 成型试验。首先将 FBG 应变和温度传感器随纬纱织入三维机织预制体中间厚度层，并从模具上预留的通孔引出，采用黄胶对模具进行密封，以保证模具气密性，提高成型质量。三维机织预制体与模具照片如图 10 所示。

将模具合模后抽真空并加压注射树脂，最后放入高温烘箱中进行固化。通过 FBG 温度传感器监测到三维机织复合材料固化中内部温度曲线如图 11 所示。可见，复合材料内部温度落后于预设

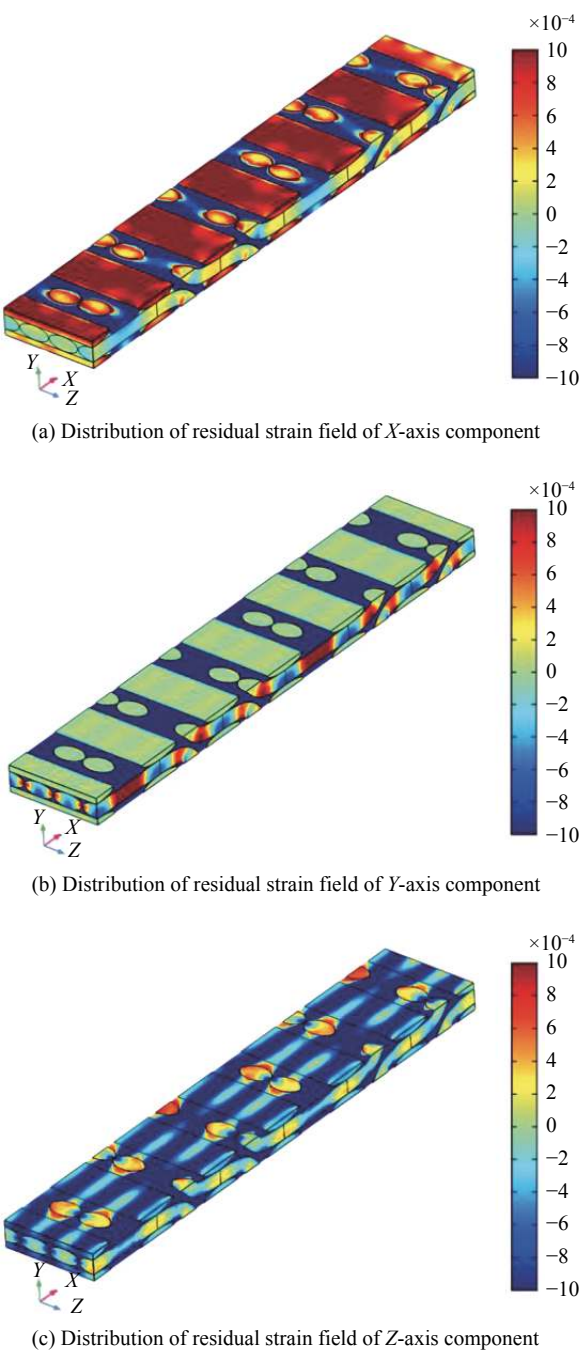


图 9 三维机织复合材料纱线尺度 RVE 固化后各方向残余应变场分布
Fig. 9 Distribution of residual strain field after curing of 3D woven composite yarn scale RVE

的固化周期，这是由于试验中所采用的环境箱 (SETH-A, Espec) 能达到的最高温度 (150℃) 为固化周期的第二保温平台温度，而环境箱壁留有开孔供 FBG 尾纤引出，因此复合材料制件上的实际温度要低于预设固化周期温度。为验证数值模型的准确性，将 FBG 温度传感器监测到的温度数据代入 RVE 模型中进行固化过程仿真分析，作为温度

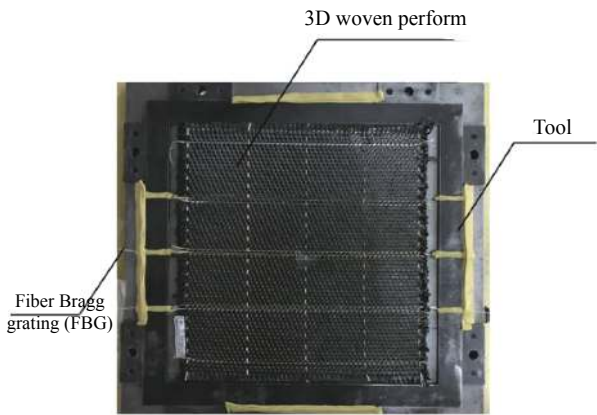


图 10 三维机织预制体与模具

Fig. 10 3D woven perform and tool

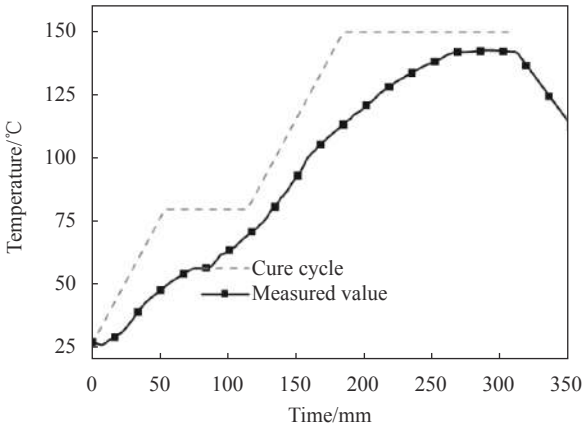


图 11 三维机织复合材料固化中内部温度曲线

Fig. 11 Internal temperature history of 3D woven composites during curing

边界条件，计算固化历程中纬纱方向(Z向)残余应变演化规律并与FBG应变传感器监测值对比，结果如图12所示。从结果来看，在固化过程的初始阶段，树脂模量较低，其与碳纤维间应力传递效果差，因此这一阶段三维机织复合材料产生的应变较小且无明显规律；随后(90 min)树脂逐渐开始凝胶，并产生固化收缩应变，故整体应变看是降低；至190 min时，随着温度的进一步升高，此时的树脂收缩已趋于平稳，复合材料的应变在热膨胀效应影响下开始上升；至310 min开始降温，应变随温度降低而下降。可见数值模型预测的结果与试验结果趋势一致，验证了模型的准确性。

4 工艺参数优化

基于1.3节所述过程进行抽样，最终样本点个数为114个，采用RBF方法建立代理模型，并采用多岛遗传算法(Multi-island GA)^[29]开展优化，优

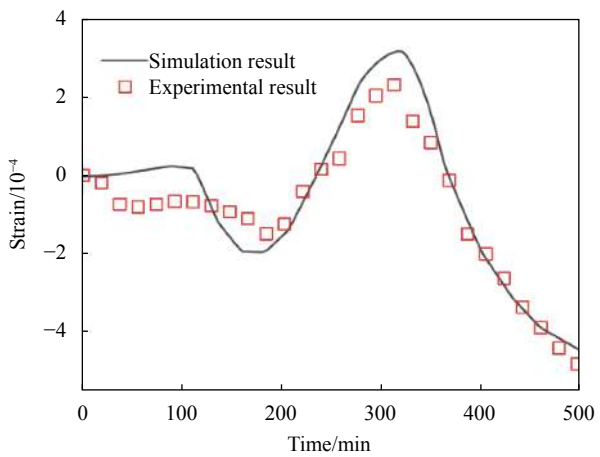


图 12 三维机织复合材料固化过程残余应变演化仿真与试验结果对比

Fig. 12 Comparison of simulation and experiment result of residual strain evolution of 3D woven composite during curing process

化算法参数设置如表4所示。

优化后的最小固化固化度为0.99，得到的最优工艺参数及残余应变见表5。

表 4 多岛遗传优化算法参数

Table 4 Parameters used for multi-island GA optimization	
Parameter	Value
Number of generations	50
Number of islands	2
Rate of migration	0.25
Rate of mutation	0.01
Sub-population size	100
Elite size	2

表 5 三维机织复合材料固化工艺参数优化结果

Table 5 Optimized results of process parameters for 3D woven composite curing		
Parameter	Original value	Optimal value
$h_1 / (^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1})$	2	2.038
$h_2 / (^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1})$	2	1.794
$c_1 / (^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1})$	2	3.88
t_{cc}/min	340	303.7
$\bar{\varepsilon}_{zz}(x)/10^{-6}$	-1 089	-921.2

对比优化前、后结果可见，采用优化后的工艺参数可使残余应变降低15.4%，工艺周期缩短10.6%。将优化后的工艺参数代入有限元模型，得到有限元解为 -937.5×10^{-6} ，代理模型结果误差为1.7%，具有良好的精度。

5 结论

(1) 基于细观力学有限元法(FEBM)，结合CHILE本构模型，建立了三维机织复合材料固化成型过

程残余应力、应变多尺度分析模型;以AS4碳纤维/3501-6环氧树脂材料体系为例,对三维机织复合材料固化成型过程开展了热-化学-力学耦合分析,预测了其细观残余应力、应变场分布情况。

(2)采用三维机织技术,对三维机织预制体预埋了光纤布拉格光栅(FBG)传感器,并开展了三维机织复合材料树脂传递模塑(RTM)成型试验,监测到复合材料内部温度及应变演化历程,并与数值仿真结果对比,验证了数值模型的准确性。

(3)综合采用了基于空间、误差和结果的三种序列加点准则,基于径向基函数(RBF)方法建立了工艺参数和残余应变间的代理模型,对固化工艺制度进行优化,结果显示最优点处代理模型解与有限元解相比误差为1.7%。采用优化后的工艺制度残余应变降低了15.4%,固化周期缩短了10.6%。

参考文献:

- [1] 周储伟,张音旋.三维机织复合材料多尺度黏弹性分析[J].[复合材料学报](#),2007,24(5):125-129.
ZHOU Chuwei, ZHANG Yinxuan. Multi-scale viscoelastic analysis of 3D woven composite materials[J]. [Acta Materialiae Compositae Sinica](#), 2007, 24(5): 125-129(in Chinese).
- [2] 杨彩云,李嘉禄.三维机织复合材料力学性能的各向异性[J].[复合材料学报](#),2006,23(2):59-64.
YANG Caiyun, LI Jialu. Mechanical anisotropy of three dimensional woven composites[J]. [Acta Materialiae Compositae Sinica](#), 2006, 23(2): 59-64(in Chinese).
- [3] 周光明,王新峰,王鑫伟,等.三维机织复合材料的力学模型与实验验证[J].[南京航空航天大学学报](#),2004,36(4):444-448.
ZHOU Guangming, WANG Xinfeng, WANG Xinwei, et al. Mechanical model and experimental verifications of 3D woven composites[J]. [Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics](#), 2004, 36(4): 444-448(in Chinese).
- [4] 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.
- [5] 郭兆璞,陈浩然,息志臣.复合材料层合板的固化残余应力和变形分析[J].[复合材料学报](#),1996,13(1):105-110.
GUO Zhaopu, CHEN Haoran, XI Zhichen. Analysis of residual stress and deformation of composite laminates[J]. [Acta Materialiae Compositae Sinica](#), 1996, 13(1): 105-110(in Chinese).
- [6] 张江涛,尚云东,张梅,等.复合材料固化相关黏弹性性能演化及残余应力分析[J].[复合材料学报](#),2017,34(5):978-986.
ZHANG Jiangtao, SHANG Yundong, ZHANG Mei, et al. Analysis on the process dependent viscoelastic properties and residual stresses of composites during cure[J]. [Acta Materialiae Compositae Sinica](#), 2017, 34(5): 978-986(in Chinese).
- [7] JOHNSTON A A. An integrated model of the development of process-induced deformation in autoclave processing of composite structures[D]. Vancouver: University of British Columbia, 1997.
- [8] 丁安心.热固性树脂基复合材料固化变形数值模拟和理论研究[D].武汉:武汉理工大学,2016.
DING Anxin. Numerical and theoretical study on process-induced[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2016(in Chinese).
- [9] STANGO R J, WANG S S. Process-induced residual thermal stresses in advanced fiber-reinforced composite laminates[J].[Journal of Engineering for Industry](#), 1984, 106(1): 48-54.
- [10] BOGETTI T A, GILLESPIE J W. Process-induced stress and deformation in thick-section thermoset composite laminates[J]. [Journal of Composite Materials](#), 1992, 26(5): 626-660.
- [11] BENAVENTE M, MARCIN L, COURTOIS A, et al. Numerical analysis of viscoelastic process-induced residual distortions during manufacturing and post-curing[J]. [Composites Part A: Applied Science and Manufacturing](#), 2018, 107: 205-216.
- [12] TWIGG G, POURSTARTIP A, FERNLUND G. Too-part interaction in composites processing. Part II: numerical modeling[J]. [Composites Part A \(Applied Science and Manufacturing\)](#), 2004, 35(1): 0-141.
- [13] BARAN I, HATTEL J H, AKKERMAN R. Investigation of process induced warpage for pultrusion of a rectangular hollow profile[J].[Composites Part B: Engineering](#), 2015, 68: 365-374.
- [14] ZOBEIRY N, VAZIRI R, POURSAITIP A. Computationally efficient pseudo-viscoelastic models for evaluation of residual stresses in thermoset polymer composites during cure[J]. [Composites Part A: Applied Science and Manufacturing](#), 2010, 41(2): 247-256.
- [15] DING A, LI S, SUN J, et al. A comparison of process-induced residual stresses and distortions in composite structures with different constitutive laws[J]. [Journal of Reinforced Plastics and Composites](#), 2016, 35(10): 807-823.
- [16] PRASATYA P, MCKENNA G B, SIMON S L. A viscoelastic model for predicting isotropic residual stresses in thermosetting materials: Effects of processing parameters[J]. [Journal of Composite Materials](#), 2001, 35(10): 826-848.
- [17] ROSSO P, FIEDLER B, FRIEDRICH K, et al. The influence of

- residual stresses implicated via cure volume shrinkage on CF/VEUH—composites[J]. *Journal of Materials Science*, 2006, 41(2): 383-388.
- [18] 李冬娜. 树脂基复合材料固化行为的多尺度仿真研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2018.
- LI Dongna. Multiscale simulation investigation of curing behavior in resin matrix composites[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2018(in Chinese).
- [19] YUAN Z, WANG Y, YANG G, et al. Evolution of curing residual stresses in composite using multi-scale method[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 155: 49-61.
- [20] 徐胜利, 刘海涛, 王晓放, 等. 基于序列采样算法的轮盘减质优化[J]. *航空动力学报*, 2014, 29(9): 2097-2103.
- XU Shengli, LIU Haitao, WANG Xiaofang, et al. Mass optimization of turbine disk based on sequential sampling algorithm[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2014, 29(9): 2097-2103(in Chinese).
- [21] 殷艺云, 郭海丁. 基于粒子群神经网络的轮盘优化[J]. *航空动力学报*, 2007, 22(9): 1578-1582.
- YIN Yiyun, GUO Haiding. Optimization of turbine disk based on particle swarm optimization and neural network[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2007, 22(9): 1578-1582(in Chinese).
- [22] 黄章俊, 王成恩. 基于Kriging模型的涡轮盘优化设计方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2010, 16(5): 905-911.
- HUANG Zhangjun, WANG Cheng'en. Turbine discs optimization design based on Kriging model[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2010, 16(5): 905-911(in Chinese).
- [23] 李铁柱, 李光耀, 陈涛, 等. 基于Kriging近似模型的汽车乘员约束系统稳健性设计[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(22): 123-129.
- LI Tiezhu, LI Guangyao, CHEN Tao, et al. Robustness design of occupant restraint system based on Kriging model[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(22): 123-129(in Chinese).
- [24] REN M, WANG Q, CONG J, et al. Study of one-dimensional cure simulation applicable conditions for thick laminates and its comparison with three-dimensional simulation[J]. *Science and Engineering of Composite Materials*, 2018, 25(6): 1197-1204.
- [25] HUANG C, REN M F, LI T, et al. Trans-scale modeling framework for failure analysis of cryogenic composite tanks[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 85: 41-49.
- [26] SHIN D D, HAHN H T. Compaction of thick composites: Simulation and experiment[J]. *Polymer Composites*, 2004, 25(1): 49-59.
- [27] LIU H, XU S, WANG X. Sequential sampling designs based on space reduction[J]. *Engineering Optimization*, 2015, 47(7): 867-884.
- [28] 刘海涛. 基于近似模型的工程优化方法中相关问题研究及应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- LIU Haitao. The research and application of metamodel-based engineering optimization[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016(in Chinese).
- [29] WHITLEY D. A genetic algorithm tutorial[J]. *Statistics & Computing*, 1994, 4(2): 65-85.