

三维四向 C/C 复合材料高温氧化环境强度预测

陈波, 温卫东, 崔海涛, 张宏建, 徐颖
(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 在细观尺度下, 基于逐渐损伤理论, 建立了一种三维四向 C/C 复合材料高温强度预测模型。模型考虑了纤维束挤压后的截面形状、单胞的周期性以及纤维束和基体的脱黏等因素, 引入考虑温度的三维 Hashin 失效准则进行单元的失效判定, 预测了三维四向 C/C 复合材料室温和有抗氧化保护 700 °C 的拉伸强度。为了将模型发展到高温氧化环境, 建立了考虑氧化速率的纤维束高温氧化环境力学性能退化模型, 结合纤维束和单向板力学性能等价性原理, 实现了无抗氧化保护下三维四向 C/C 复合材料 700 °C 拉伸强度的预测。研究了切边加工对三维四向复合材料强度的影响, 建立了考虑切边宽度的切边三维四向复合材料强度预测模型, 预测了有、无抗氧化保护切边宽度为 18 mm 的三维四向 C/C 复合材料拉伸强度。结果表明: 对非切边试验件在室温、有抗氧化涂层 700 °C 和无抗氧化涂层 700 °C 的预测误差分别为 5.51%、7.20% 和 7.13%, 拉伸过程的应力-应变曲线与试验结果吻合度较好; 对切边试验件在室温和有抗氧化涂层 700 °C 的预测误差分别为 0.88% 和 4.53%。多种类的算例表明预测模型合理、可靠。

关 键 词: 三维编织; C/C 复合材料; 高温; 氧化; 切边; 细观单胞; 逐渐损伤; 强度预测

中图分类号: V231.9; TB33

文献标志码: A

Strength prediction of 3-D four directional C/C composites by high temperature and oxidation environment

CHEN Bo, WEN Weidong, CUI Haitao, ZHANG Hongjian, XU Ying

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Based on progressive damage method, a kind of high temperature strength prediction model of 3-D four directional C/C composites was established on microscopic scale. The section shape of fiber bundle after extrusion, periodicity of unit cell, and fiber bundles debonding were taken into account in the model. The 3-D Hashin failure criterion considering temperature was introduced to determine the elements failure. And then the tensile strength prediction of 3-D four directional C/C composites at room temperature and 700 °C under oxidation protection was achieved. In order to introduce the model in high temperature oxidation environment, the mechanical property degradation model of fiber bundles was established in consideration of oxidation rate. The mechanical properties equivalence of fiber bundles and unidirectional plates was proposed. The tensile strength of 3-D four direc-

收稿日期: 2018-05-31

基金项目: 江苏省高校研究生创新基金(KYLX_0238); 中央高校基本科研基金(1002-56XQA15002);

航空动力基金(6141B090304)

作者简介: 陈波(1986—), 男, 博士生, 研究方向为先进复合材料结构设计技术。E-mail: chenbocepe@nuaa.edu.cn

引用格式: 陈波, 温卫东, 崔海涛, 等. 三维四向 C/C 复合材料高温氧化环境强度预测[J]. 航空动力学报, 2019, 34(4): 853-863.
CHEN Bo, WEN Weidong, CUI Haitao, et al. Strength prediction of 3-D four directional C/C composites by high temperature and oxidation environment[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(4): 853-863.

tional C/C composites without oxidation protection was predicted. Trimming process influence on the strength of 3-D four directional composites was investigated, and the strength prediction model of trimming 3-D four directional composites considering trimming width was established. The tensile strength of trimming 3-D four directional C/C composites with and without oxidation protection 18 mm width was predicted. Results show that the prediction errors are 5.51%, 7.20% and 7.13% for non-trimming specimens at room temperature, 700 °C with anti-oxidation coating and 700 °C without anti-oxidation coating. The stress-strain curve of tensile process for prediction is quite in accord with experiment. The prediction errors are 0.88% and 4.53% for trimming specimens at room temperature, 700 °C with anti-oxidation coating. Several kinds of examples show that the prediction model is reasonable and reliable.

Key words: 3-D braided; C/C composites; high temperature; oxidation; trimming; mesoscopic unit cell; progressive damage; strength prediction

C/C 复合材料结合了碳材料的高温性能和复合材料优异的力学性能,具有比强度高、比刚度大、良好的烧蚀性能、摩擦性能、抗热振性能等优点。因而可以作为功能材料和高温结构材料,并在航空航天、医疗、汽车、船舶等领域得到重要应用^[1-6]。三维编织工艺具有纤维三维空间多向取向、整体连续分布的特点,能够阻止或减缓了冲击载荷作用下复合材料层间裂纹的扩展,使得复合材料层间性能大大提升^[7]。

复合材料强度是一个材料微观、细观尺度的属性,受材料加工工艺、生产制作等原因影响严重。基于单胞的逐渐损伤有限元法能够详细的描述复合材料在破坏过程中的纤维断裂、基体开裂、纤维/基体脱黏和分层等多种损伤模式。现阶段三维编织 C/C 复合材料强度预测研究以室温为主。朱元林^[8]对三维四向 C/C 复合材料建立了细观单胞模型,并基于逐渐损伤分析方法和三维 Hashin 失效准则,预测了室温下三维四向 C/C 复合材料的拉伸强度,预测误差为 9.3%。宋健等^[9]对 2.5D 树脂基复合材料进行了室温、180 °C 和 240 °C 经向和纬向的拉伸试验,得到了相应工况下的 2.5D 树脂基复合材料的应力/应变曲线。基于细观有限元法,建立了 2.5D 树脂基复合材料全胞体模型,采用温度环境下的三维 Hashin 失效准则,预测了室温和 240 °C 下 2.5D 树脂基复合材料的经向、纬向的拉伸强度。

C/C 复合材料耐热性能良好,但在高温下极易氧化,其起始氧化温度一般在 450~550 °C^[10]。目前,三维编织 C/C 复合材料高温拉伸试验可分为无氧环境试验和表面增加涂层试验。无氧环境多采用真空环境箱或惰性气体环境箱实现,此类

研究方案试验成本高、条件苛刻、获取数据有限,其优点在于可显著提高测试温度,并能保证 C/C 复合材料高温力学性能的测试结果。武保华等^[11]对 C/C 复合材料三向正交结构编织件进行了室温至 3000 °C 纵向、横向拉伸试验。试验结果表明:C/C 复合材料的力学性能在 2000 °C 以内随温度的升高而增加,造成 C/C 复合材料的力学性能随温度升高而强化的原因主要为:石墨是一种六方晶体结构,该晶体的力学性能随着温度升高而增加。温度超过 2000 °C 后,力学性能开始下降,当温度超过 2600 °C,力学性能急剧下降。在 C/C 复合材料高温试验前,可在试验件表面增加抗氧化涂层,以实现试验件的防氧化保护。涂层的成分一般为 P、Si、Al 等化合物的混合物,通过烧结与 C/C 复合材料表面发生化学反应形成一层抗氧化薄膜,从而阻碍氧气的进入。涂层法成本低,加工周期短,是现阶段理想的 C/C 复合材料抗氧化手段,在高温环境工作的 C/C 复合材料构件中得到广泛应用。目前,有氧环境的 C/C 复合材料高温试验研究主要集中在层合板范畴。兰逢涛等^[12]对有涂层的 C/C 复合材料层合板接头试验件进行了室温到 1500 °C 范围内的剪切试验。试验结果表明:温度在 1200 °C 以内时,试验件剪切强度逐渐增加;当温度超过 1200 °C,试验件的剪切强度发生剧烈下降。说明该文献所研究抗氧化涂层的有效温度低于 1200 °C。陈波等^[13]对三维四向编织 C/C 复合材料进行了室温、有防氧化涂层 700 °C 和无防氧化涂层 700 °C 的拉伸和拉-拉疲劳试验,获得了三维四向编织 C/C 复合材料在不同工况下的弹性模量、拉伸强度、应力-应变曲线等拉伸性能和寿命、剩余刚度、剩余强度

等疲劳性能。

三维编织 C/C 复合材料为了完成复杂造型,经常需要进行沿宽度或厚度方向进行的“切边”加工,由于三维编织复合材料的力学性能非常敏感,因此切边加工后构件的力学性能远低于材料本身。文献[14-15]对树脂基三维编织复合材料非切边、切边拉伸、三点弯曲以及钻孔后的拉伸性能进行了测试,得到了相应的力学性能以及材料的破坏形式,但未能通过理论方法对切边后的试验件进行相应的预测,无法定量的描述机械加工对试验件的影响。

本文从细观力学出发,基于逐渐损伤研究方法,引入三维四向复合材料单胞的周期性边界条件和纤维束/基体脱黏约束,并以高温三维 Hash-in 失效准则为单元判定依据,考虑了纤维束力学性能的氧化退化以及切边对三维四向复合材料的影响,建立了三维四向 C/C 复合材料高温强度预测模型,计算得到了室温、有、无防氧化保护 700℃ 以及切边等工况下的拉伸强度,并模拟了纤维束和基体受拉伸载荷下的损伤扩展过程,对比试验结果,验证了模型的可靠性。

1 三维编织 C/C 复合材料高温强度预测模型

1.1 细观单胞的建立

在细观尺度下,对三维四向复合材料建立细观单胞模型。根据编织工艺中携纱器的运动规律^[16],本文对模型做出如下假设:

- 1) 编织工艺足够稳定,以保证一定长度范围内编织结构的均匀一致性。
- 2) 纤维束因打紧工序在空间保持直线走向。
- 3) 纤维束为同一材料,且具有相同的刚度。
- 4) 打紧前纤维束截面呈椭圆形,打紧后纤维束相互挤压,纤维束截面呈多边形,这里假设为六边形。

本文假设纱线截面在打紧前为椭圆型,打紧后为六边形,如图 1 所示。图中 a_2 、 b_2 为打紧前纱线截面的长轴和短轴, a_1 、 b_1 为打紧后纱线截面内切椭圆长轴和短轴,则可通过此两组参数确定打紧后纱线的形状参数。

图 1 中 $a_1=b_1\sqrt{3}\cos\gamma$ 。以椭圆中心为原点,短轴为 x 轴;长轴为 y 轴建立坐标系;则 CD 所在直线的直线与 y 轴夹角为 γ ;其方程为

$$y = x \cot \gamma + a_2 \tag{1}$$

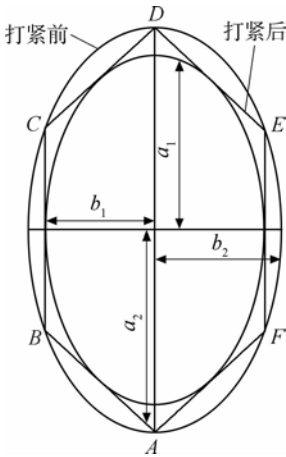


图 1 纱线截面打紧前后形状
Fig.1 Yarn cross section shape before and after tightening

则 C 点坐标为 $(-b_1, -\cot\gamma b_1 + a_2)$ 。

文献[16]中给出了复合材料宏观尺寸和纤维束内切椭圆短轴之间的关系为

$$W_x = 2\sqrt{2}mb_1 + (4 - \sqrt{2})b_1 \tag{2}$$

$$L_y = 2\sqrt{2}nb_1 + (4 - \sqrt{2})b_1 \tag{3}$$

式中 W_x 为织物宽度, L_y 为织物长度, m 为主体纱排数, n 为主体纱列数。

花节高度(即单胞高度)为

$$h = \frac{8b_1}{\tan\gamma} \tag{4}$$

复合材料的纤维体积分数可以由式(5)、式(6)得到

$$\varphi_{if} = \frac{\pi\sqrt{3}}{8}\epsilon_i \tag{5}$$

$$\epsilon_i = \frac{\pi D_y^2}{4a_1b_1} \tag{6}$$

式中 ϵ_i 为内部单胞的纱线填充因子, $D_y = \sqrt{\frac{4\lambda}{\pi\rho}}$ 为纱线的等效直径, λ 为纱线的线密度, ρ 为纱线的体密度。

通过以上参数可以得到内部单胞的细观几何模型,如图 2 所示。

1.2 约束的设置

1.2.1 周期性边界条件

三维编织复合材料内部结构存在周期性,为保证位移连续和应力连续,需要对所建立的单胞模型施加周期性边界条件。文献[17]提出的一种周期性位移边界条件能够满足三维编织复合材料的内部结构要求,其表达式为

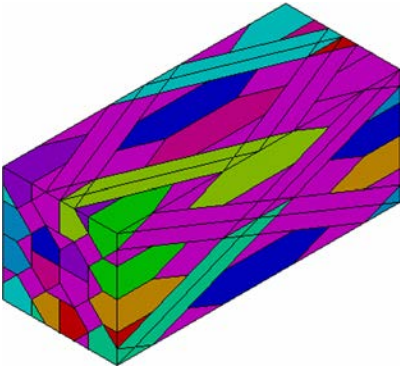


图2 内部单胞几何模型

Fig. 2 Geometric model of inner cell model

$$u_i^{j+} - u_i^{j-} = \bar{\epsilon}_{ik}(x_k^{j+} - x_k^{j-}) = \bar{\epsilon}_{ik} \Delta x_k^j \quad (7)$$

式中 $j+$ 、 $j-$ 分别为单胞的第 j 组相对平行面; $\bar{\epsilon}_{ik}$ 为单胞全场平均应变; Δx_k^j 为沿 x 方向相对平行面的距离, 为一个常数。

当温度为室温时, $\bar{\epsilon}_{ik}$ 为机械应变; 当温度升高后, $\bar{\epsilon}_{ik}$ 为机械应变和热应变的合应变。则式(7)可转化为

$$u_i^{j+}(t) - u_i^{j-}(t) = \bar{\epsilon}_{ik}(A)[x_k^{j+}(t) - x_k^{j-}(t)] = \bar{\epsilon}_{ik}(A)\Delta x_k^j(t) \quad (8)$$

式中 $\bar{\epsilon}_{ik}(A) = \bar{\epsilon}_{ik}(M) + \bar{\epsilon}_{ik}(t)$ 。其中 $\bar{\epsilon}_{ik}(M)$ 为平均机械应变, $\bar{\epsilon}_{ik}(t)$ 为平均热应变。

三维四向复合材料内部单胞有 3 对平行面, 根据图 3 可列出式(9)约束方程。

$$\begin{cases} U_{F_b} - U_{E_b} = 0 \\ V_{F_b} - V_{E_b} = 0 \\ W_{F_b} - W_{E_b} = \bar{\epsilon}(A)h \\ U_{B_b} - U_{A_b} = \bar{\epsilon}(A) \cdot 8b_1 \\ V_{B_b} - V_{A_b} = 0 \\ W_{B_b} - W_{A_b} = 0 \\ U_{C_b} - U_{D_b} = 0 \\ V_{C_b} - V_{D_b} = \bar{\epsilon}(A) \cdot 8b_1 \\ W_{C_b} - W_{D_b} = 0 \\ U_A = V_A = W_A = 0 \\ V_B = W_B = U_E = V_E = U_D = W_D = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中 U 、 V 、 W 为节点沿 x 、 y 、 z 方向的位移; U_{F_b} 、 U_{E_b} 、 V_{F_b} 、 V_{E_b} 、 W_{F_b} 、 W_{E_b} 、 U_{A_b} 、 U_{B_b} 、 V_{A_b} 、 V_{B_b} 、 W_{F_b} 、 W_{E_b} 、 U_{A_b} 、 U_{B_b} 、 V_{A_b} 、 V_{B_b} 、 W_{F_b} 、 W_{E_b} 为相应面上节点相应方向上的节点位移; U_A 、 V_A 、 W_A 、 V_B 、 W_B 、 U_E 、 V_E 、 U_D 、 W_D 为单胞各顶点相应方向上的节点位移; $\bar{\epsilon}(A)$ 为高温环境下的平均应变。

1.2.2 纤维束/基体脱黏的模拟

采用对纤维束和基体接触面上的对应单元节

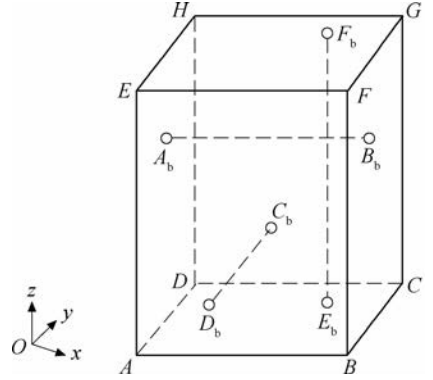


图3 内部单胞周期性边界条件示意图

Fig. 3 Internal cell periodic boundary conditions diagram

点进行 x 、 y 、 z 位移耦合进行界面的模拟。对单胞进行计算过程中, 当耦合节点受力小于界面强度时, 纤维束和基体的耦合节点不发生变化, 材料的受力形式与节点合并相同, 当耦合节点受力大于等于界面时, 将相应的耦合节点纤维束方向位移耦合删除, 保留其他方向位移耦合, 以此完成纤维束/基体界面脱黏的模拟。

1.3 C/C 复合材料高温氧化环境力学性能退化

1.3.1 C/C 复合材料高温氧化环境力学性能退化模型

氧化速率是材料氧化研究中的一个重要指标, 氧化速率的高低直接反映了材料的氧化敏感度。氧化速率在同一温度下较为稳定, 建立考虑氧化速率的纤维束力学性能退化模型能够直观的得到氧化作用对纤维束力学性能的影响。为了研究 C/C 复合材料在高温氧化环境下力学性能变化规律, 本文建立了一种考虑氧化速率的 C/C 复合材料力学性能退化模型, 如式(10)所示。通过对不同氧化时间下 C/C 复合材料单向板高温氧化拉伸试验数据拟合, 得到试验参数, 本文假设纤维束和基体的力学性能服从相同的氧化退化模型。

$$\frac{S_{k(t),t}}{S_0} = a + b e^{\frac{\bar{k}(t)T}{c}} \quad (10)$$

式中 a 、 b 、 c 为试验参数; $S_{k(t),T}$ 为 T 时刻的力学强度, $\bar{k}(t)$ 为氧化速率的平均值; S_0 为室温环境下材料的力学强度。

1.3.2 纤维束与单向板力学性能的等价性

由于 C/C 复合材料中碳纤维束的力学性能难以直接获得, 故需要采用其他方法获取等效数据。本文推导了相同温度、相同纤维体积分数下, 纤维束与单向板的等效性原理。相关推导如下:

取长度 l 纤维束与单向板,则有

$$\frac{V_{\text{fib}}^{\text{bun}}}{V_{\text{bun}}} = \varphi_{\text{f}}^{\text{bun}}, \frac{V_{\text{fib}}^{\text{lam}}}{V_{\text{lam}}} = \varphi_{\text{f}}^{\text{lam}} \quad (11)$$

$$\sigma_{\text{bun}} = \frac{F_{\text{bun}}}{A_{\text{bun}}} = \frac{F_{\text{bun}} l}{A_{\text{bun}} l} = \frac{F_{\text{bun}} l}{V_{\text{bun}}} = \frac{F_{\text{bun}} \varphi_{\text{f}}^{\text{bun}} l}{V_{\text{fib}}^{\text{bun}}} = \frac{F_{\text{bun}} \varphi_{\text{f}}^{\text{bun}} l}{n_{\text{fib}} \pi r^2 l} = \frac{F_{\text{fib}} \varphi_{\text{f}}^{\text{bun}}}{\pi r^2} = \sigma_{\text{fib}} \varphi_{\text{f}}^{\text{bun}} \quad (12)$$

$$\sigma_{\text{lam}} = \frac{F_{\text{lam}}}{A_{\text{lam}}} = \frac{F_{\text{lam}} l}{A_{\text{lam}} l} = \frac{F_{\text{lam}} l}{V_{\text{lam}}} = \frac{F_{\text{lam}} \varphi_{\text{f}}^{\text{lam}} l}{V_{\text{fib}}^{\text{lam}}} = \frac{F_{\text{lam}} \varphi_{\text{f}}^{\text{lam}} l}{n_{\text{lam}} \pi r^2 l} = \frac{F_{\text{fib}} \varphi_{\text{f}}^{\text{lam}}}{\pi r^2} = \sigma_{\text{fib}} \varphi_{\text{f}}^{\text{lam}} \quad (13)$$

式中 $V_{\text{bun}}, V_{\text{fib}}^{\text{bun}}, \varphi_{\text{f}}^{\text{bun}}, \sigma_{\text{bun}}, A_{\text{bun}}, F_{\text{bun}}, n_{\text{fib}}$ 、分别为纤维束的总体积、纤维束内纤维体积、纤维束内纤维体积分数、纤维束所受应力、纤维束横截面积、纤维束所受外力及纤维束内纤维总数; $V_{\text{lam}}, V_{\text{fib}}^{\text{lam}}, \varphi_{\text{f}}^{\text{lam}}, \sigma_{\text{lam}}, A_{\text{lam}}, F_{\text{lam}}, n_{\text{lam}}$ 分别为单向板的总体积、单向板内纤维的体积、单向板纤维体积分数、单向板所受应力、单向板的横截面积、单向板所受外载荷及单向板内纤维总数; σ_{fib} 为纤维应力; r 为纤维单丝半径。

则纤维束、单向板的弹性模型可表示为

$$E_{\text{bun}}(t) = \frac{\sigma_{\text{bun}}(t)}{\varepsilon(t)} = \frac{\sigma_{\text{fib}}(t) \varphi_{\text{f}}^{\text{bun}}}{\varepsilon(t)} \quad (14)$$

$$E_{\text{lam}}(t) = \frac{\sigma_{\text{lam}}(t)}{\varepsilon(t)} = \frac{\sigma_{\text{fib}}(t) \varphi_{\text{f}}^{\text{lam}}}{\varepsilon(t)} \quad (15)$$

式中 $E_{\text{bun}}(t), E_{\text{lam}}(t)$ 分别为 t 温度下纤维束、单向板弹性模量; $\varepsilon(t)$ 为对应方向上的应变。

由式(11)~式(15)可知,当纤维束和单向板的温度、纤维体积分数相同时,有

$$\sigma_{\text{bun}}(t) = \sigma_{\text{lam}}(t), \quad E_{\text{bun}}(t) = E_{\text{lam}}(t) \quad (16)$$

因此,本文采用与三维四向 C/C 复合材料具有相同纤维束体积分数、相同温度的单向板静力学性能代替三维四向 C/C 复合材料中相同纤维束体积含量、相同温度纤维束性能。

1.4 失效判定

1.4.1 单元的失效判定

三维四向编织复合材料的本构模型可由式(17)表示。

$$\bar{\sigma} = E_{ij} \bar{\varepsilon} \quad (17)$$

式中 $\bar{\sigma}$ 为单胞平均应力, $\bar{\varepsilon}$ 为单胞平均应变, E_{ij} 为单胞等效刚度矩阵。

则单胞平均应力可通过式(18)求得,即

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{V} \int_V \sigma_{ij} dV = \frac{(p_i)_j}{A_j} \quad (18)$$

式中 A_j 为单胞的第 j 个表面面积, $(p_i)_j$ 为第 j

个表面所有节点在 i 方向上的节点力之和。

采用 Hashin 三维失效准则对三维四向复合材料中纤维束进行失效判定,由于该模型高估了剪切失效分量对于材料损伤失效的影响^[18],故本文对 Hashin 失效准则进行了改进,失效准则具体形式如下所示:

1) 纤维束内纤维断裂失效

$$\left[\frac{\sigma_{11}}{S_{11}(t)} \right]^2 + \alpha \left[\frac{\sigma_{12}}{S_{12}(t)} \right]^2 + \alpha \left[\frac{\sigma_{13}}{S_{13}(t)} \right]^2 \geq 1 \quad (19)$$

2) 纤维束内基体失效

$$\left[\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{S_{22}(t)} \right]^2 + \frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_2 \sigma_3}{S_{23}(t)^2} + \left[\frac{\sigma_{12}}{S_{12}(t)} \right]^2 + \left[\frac{\sigma_{13}}{S_{13}(t)} \right]^2 \geq 1 \quad (20)$$

式中 σ_{ij} 为纤维束主轴方向的应力分量; $S_{11}(t), S_{22}(t), S_{ij}(t)$ 为 t 温度下的纤维束纵向、横向拉伸强度及剪切强度; α 为剪切损伤权重因子。

三维四向编织复合材料纯基体可视为各向同性材料,本文采用 von Mises 强度失效准则来判断纯基体部分的失效,具体形式为

$$(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{11} - \sigma_{33})^2 + 6(\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2 + \tau_{23}^2) \geq 2X_m(t)^2 \quad (21)$$

式中 S_m 为基体屈服强度。

1.4.2 材料的性能退化

采用的材料退化方法如下:

1) 纤维束失效。 $E_1, G_{12}, G_{13}, \mu_{12}, \mu_{13}$ 发生一定退化,刚度折减系数 $k=0.45$ 。

2) 纤维束中基体失效。 E_2, μ_{12} 发生完全退化。

3) 纯基体部分失效。 E_m, μ_m 发生一定退化,刚度折减系数 $k=0.45$ 。

1.4.3 材料最终失效判定

当载荷达到复合材料的损伤失效值时,复合材料不一定完全失效,只有当损伤扩展到一定程度,复合材料才会失去继续承载的能力,导致结构发生最终破坏。根据实际拉伸过程中三维四向 C/C 复合材料的失效特征,本文约定三维四向 C/C 复合材料发生最终失效的判定准则为:

1) 单胞内纤维束沿纵向破坏的有限单元比例超过 50%。

2) 断裂损伤贯穿整个单胞截面。

3) 单胞内应力随应变的增加开始下降。

1.5 切边效应对三维四向复合材料强度预测的影响

当试验件经切边加工后,其强度将会明显降

低。主要原因在于三维四向复合材料切边后破坏了纤维束的完整性,导致切边附近的纤维断裂,且三维四向复合材料中较多纱线走向流经边界,造成结构内部纤维发生一定程度破坏。通过试验了解到,切边宽度越宽,材料的切边效应越小,当切边试验件宽度达到一定程度,切边试验件达到极限强度 S_{qbm} ,记 S_0 为完整试验件强度,则有切边试验件强度 $S_{qb} \leq S_{qbm} < S_0$ 。本文对材料宽度和强度建立如下关系:

$$S_{qb}/S_0 = y_1 + c_0 e^{-y_2 (\omega_{qb}/\omega_0)} \tag{22}$$

式中 y_1 、 y_2 、 c_0 为拟合系数; ω_{qb} 为切边试验件宽度; ω_0 非切边试验件宽度。

利用切边三维编织 C/C 复合材料试验件进行一组室温下的拉伸试验,并拟合式(22)中的试验参数,拟合后的公式为此编织参数预制体下三维四向 C/C 复合材料切边强度和非切边强度的关系,利用此公式可以对具有相同编织参数预制体的三维四向 C/C 复合材料在任意工况下进行切边强度和非切边强度的转换。因此,在无法直

接获得三维编织 C/C 复合材料非切边强度值时,通过切边强度预测模型和切边高温强度试验值,计算获取非切边强度值。

1.6 三维四向 C/C 复合材料高温强度预测计算流程

三维四向 C/C 复合材料高温强度预测流程图如图 4 所示。首先利用单胞建模参数、无氧化组分性能参数、约束和载荷等输入条件,完成内部单胞有限元模型的建立。考虑是否进行氧化强度分析,若考虑氧化,则利用式(10)对初始的组分性能进行折减。之后进行应力分析并利用失效准则对单元进行失效判断,通过不断增加载荷形成单元失效,在单元发生失效后对单元进行刚度折减,利用载荷的增加和单元的刚度折减,使材料满足最终失效判定条件。则记此时的单胞等效应力为非切边三维四向 C/C 复合材料拉伸强度。若需要进行切边计算,则将计算得到的拉伸强度进行式(22)转化,可得到切边试验件拉伸强度。

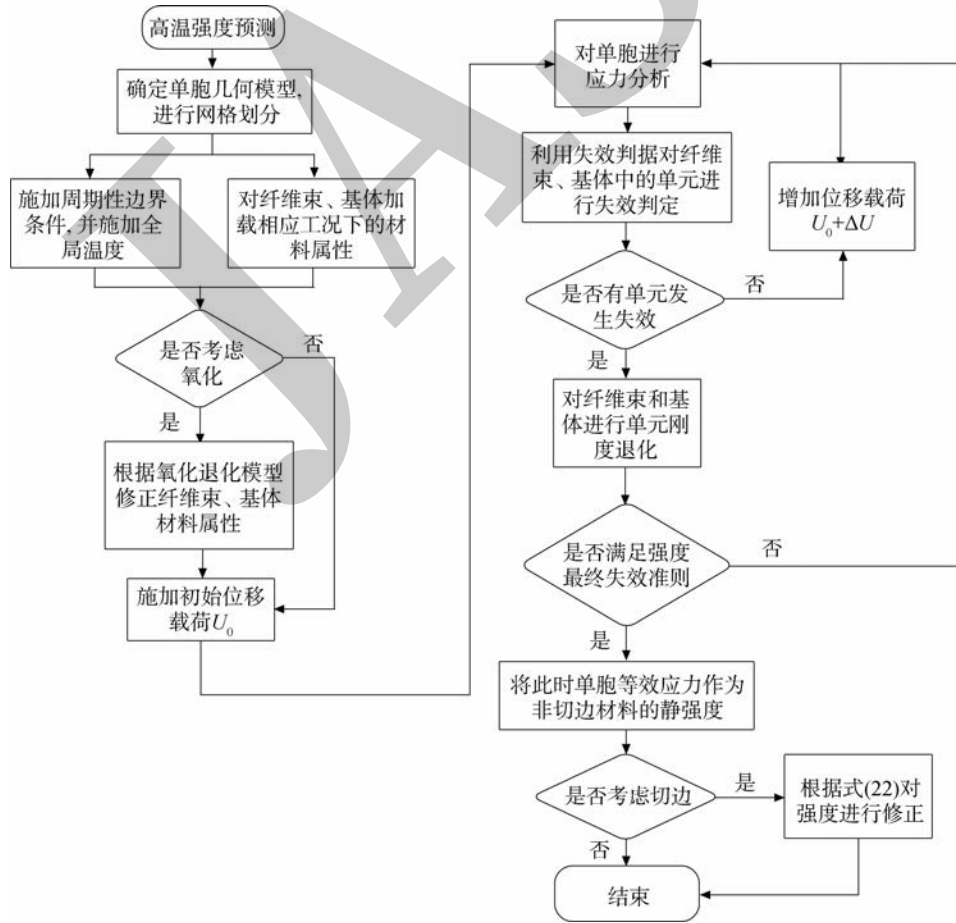


图 4 三维四向 C/C 复合材料高温强度预测流程图

Fig. 4 Strength prediction flow chart of 3-D four directional C/C composites at high temperature

2 模型验证

2.1 非切边三维四向 C/C 复合材料强度预测

本文制作的三维四向 C/C 复合材料预制体材料为 T300、3K 碳纤维,纤维单丝直径为 7 μm,纤维密度为 1.76 g/cm³,预制体采用 1×1、4 步法将碳纤维束加工成预制体编织件,内部编织角为 22°,通过树脂传递模塑成形(RTM)灌注树脂后进行高温预处理、常压碳化、高压碳化及石墨化等工序,实现三维四向 C/C 复合材料的成型,其中高温预处理温度为 2 200 ℃,碳化周期为 4 周期。C/C 复合材料的抗氧化保护措施为试验件表面增加防氧化涂层。

无抗氧化保护三维四向 C/C 复合材料拉伸试验结果表 1 所示。利用式(10)对表 1 中试验数据进行拟合,拟合参数如表 2 所示,结合纤维束和单向板力学性能的等价性原理,则 C/C 复合材料纤维束在 700 ℃氧化环境强度退化规律如图 5 所示。

表 1 无抗氧化保护 C/C 复合材料单向板拉伸试验结果
Table 1 Tensile experiment results of C/C composite unidirectional laminates without anti-oxidation protection

温度/℃	保温时间/h	平均拉伸强度/MPa
700	0.5	421.34
	1	407.51
	2	358.87
	3	283.88
	4	163.50

表 2 无抗氧化保护 C/C 复合材料单向板高温氧化环境拉伸强度退化模型拟合参数
Table 2 Fitting parameters of strength degradation model for C/C composites unidirectional laminates without anti-oxidation protection

温度/℃	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
700	1.462	−0.149	0.449

三维四向 C/C 复合材料组分力学性能见表 3,高温试验保温时间为 2 h。

非切边三维四向 C/C 复合材料室温和有、无抗氧化保护 700 ℃拉伸强度预测结果和试验结果对比如表 4 所示。

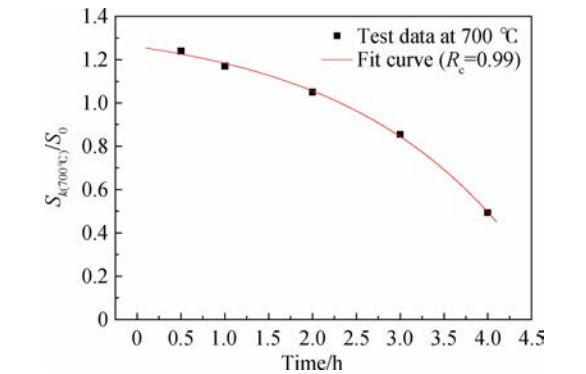


图 5 无抗氧化保护 C/C 复合材料纤维束在 700 ℃的拉伸强度退化拟合曲线
Fig. 5 Fitting curves of tensile strength degradation for C/C composites unidirectional laminates without anti-oxidation protection at 700 ℃

表 3 三维四向 C/C 复合材料组分力学性能
Table 3 3-D four directional C/C composites component mechanical properties

组分	参数	室温	有抗氧化保护 700 ℃	无抗氧化保护 700 ℃
纤维束	S_{11} /MPa	331.79	455.97	348.87
	S_{12} /MPa	1.61	1.62	1.24
	τ_{112} /MPa	30.20	43.66	33.40
	E_1 /GPa	87.34	98.72	66.64
	E_2 /GPa	17.75	21.36	7.26
	G_{12} /GPa	16.81	22.21	7.55
	μ_{12}	0.25	0.25	0.25
	S_m /MPa	1.93	1.96	1.50
	E_m /GPa	3.82	3.82	1.30
	G_m /GPa	1.63	1.63	0.55
基体	μ_m	0.15	0.15	0.15
	界面 τ_t /MPa	17.68	20.92	20.92

表 4 非切边三维四向 C/C 复合材料拉伸强度预测结果和试验结果对比
Table 4 Comparisons between predictions and experimental tensile strength of non-trimming 3-D four directional C/C composites

工况	温度/℃	拉伸强度试验值/GPa	拉伸强度预测值/GPa	误差/%
室温	25	168.22	177.49	5.51
有抗氧化保护	700	212.02	196.76	7.20
无抗氧化保护	700	94.50	101.24	7.13

由表 4 可知,非切边三维四向 C/C 复合材料的预测值与试验值的误差均低于 10%,表明模型的预测精度较高。

有、无防氧化保护非切边三维四向 C/C 复合材料 700℃ 应力/应变曲线模拟结果和试验结果对比如图 6 和图 7 所示。

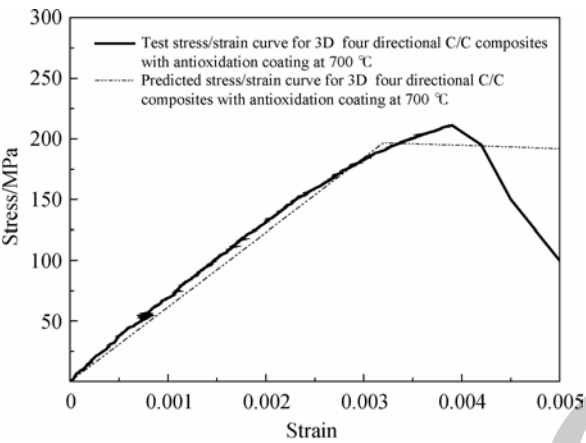


图 6 有防氧化保护三维四向 C/C 复合材料 700℃ 拉伸应力/应变曲线预测值与试验值对比
Fig. 6 Comparisons between predictions and experimental tensile stress/strain curve of 3-D four directional C/C composites with anti-oxidant protection at 700℃

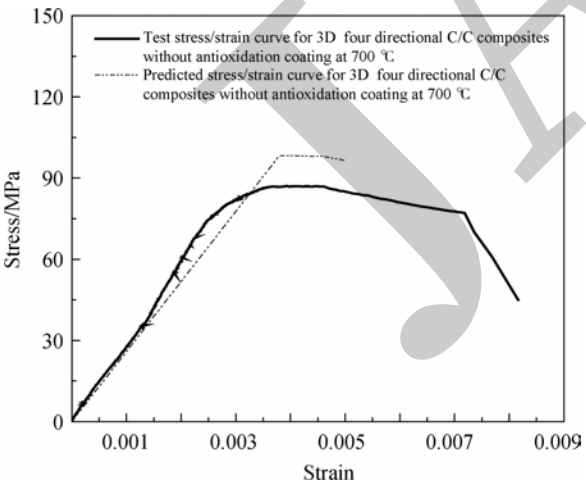


图 7 无防氧化保护三维四向 C/C 复合材料 700℃ 拉伸应力/应变曲线预测值与试验值对比
Fig. 7 Comparisons between predictions and experimental tensile stress/strain curve of 3-D four directional C/C composites without anti-oxidant protection at 700℃

有防氧化保护非切边三维四向 C/C 复合材料 700℃ 拉伸过程组分损伤扩展图如图 8 和图 9 所示。

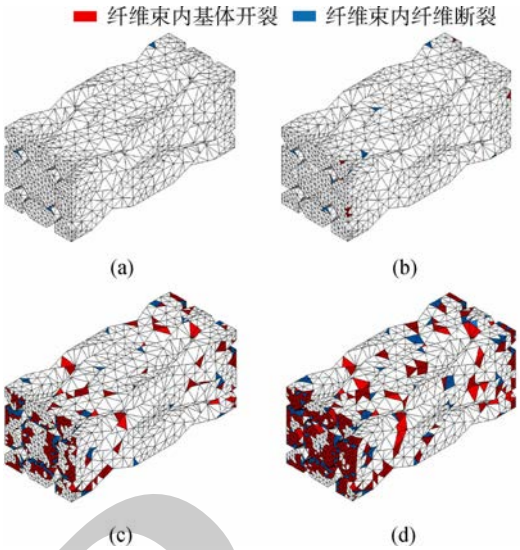


图 8 有防氧化保护非切边三维四向 C/C 复合材料 700℃ 拉伸过程纤维束损伤扩展图
Fig. 8 Fiber bundle damage extension of non-trimmin g 3-D four directional C/C composites with anti-oxidant protection at 700℃

由图 8 可知,在拉伸载荷作用下应变达到 0.001 时,纤维束区域中的基体在应力集中区域率先发生破坏;当应变达到 0.0014 时,纤维束内纤维开始出现损伤。此后损伤开始扩展,当应变达到 0.003 时,材料的纤维断裂已扩展至整个单胞截面。单元的应力随着应变的增加无法进一步提高,判定材料完全失效。

由图 9 可知,纯基体发生损伤早于纤维束,在应变达到 0.0006 时,纯基体发生初始损伤,基体在应变达到 0.0014 时已完全失效。

各损伤类型占总体比例扩展过程如图 10 所示。

由图 10 可知,随着拉伸载荷的增加,纯基体区域率先发生损伤,当单胞总体应变达到 0.0014 时,纯基体区域完全失效;纤维束内纤维损伤初始扩展缓慢,随着应变的增加,损伤发展速度加快,在材料完全失效时,纤维破坏可达 30%;纤维束内基体损伤初始扩展缓慢,随后在载荷作用下发展迅速,当损伤扩展到一定程度时,损伤减缓,当材料完全失效时,基体开裂损伤可达 28%;纤维/基体界面脱粘损伤在应变为纤维发生损伤时开始发生,在材料发生完全失效时,失效百分比提高到 11%。

2.2 切边三维四向 C/C 复合材料强度预测

对文献[8]中三维四向 C/C 复合材料沿宽度方向进行切边加工后进行室温拉伸试验。试验结果如表 5 所示。

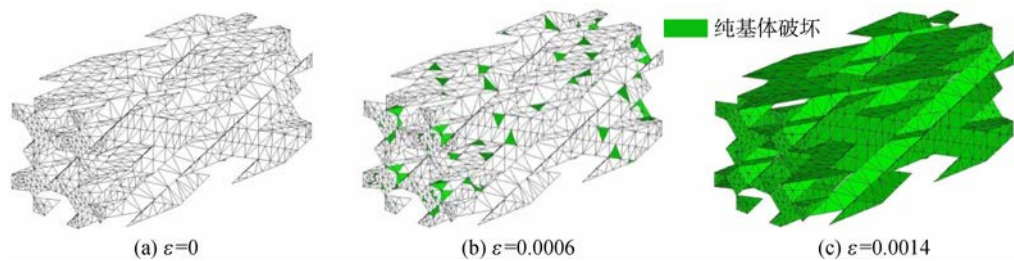


图 9 有抗氧化保护非切边三维四向 C/C 复合材料 700 °C 拉伸过程纯基体区域损伤扩展图
Fig.9 Matrix damage extension of non-trimming 3-D four directional C/C composites with antioxidant protection at 700 °C

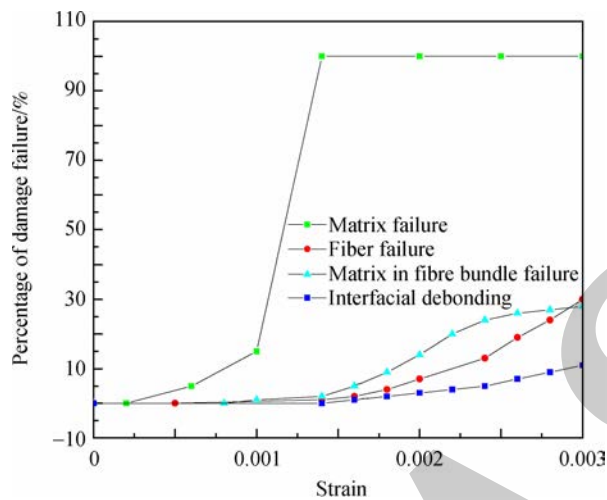


图 10 各损伤类型占比
Fig.10 Proportion of each damage

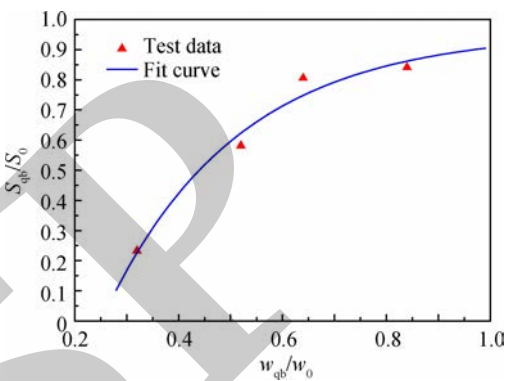


图 11 切边三维四向 C/C 复合材料强度预测模型
拟合结果
Fig.11 Fitting result of trimming 3-D four directional C/C composites strength prediction model

表 5 四种切边宽度试验件拉伸试验结果
Table 5 Tensile experiment results of four kinds of trimming width specimens

宽度/mm	平均拉伸强度/MPa	平均弹性模量/GPa
8	85.71	63.43
13	213.99	72.48
16	296.25	74.77
21	308.98	81.06

表 6 切边三维四向 C/C 复合材料拉伸强度预测值和试验值对比

Table 6 Comparisons between predictions and experimental tensile strength of trimming 3-D four directional C/C composites			
工况	拉伸强度 试验值/GPa	拉伸强度 试验值/GPa	误差/%
室温	136.56	135.36	0.88
700 °C	163.28	170.68	4.53

利用式(22)对表 3 中数据进行拟合,拟合后表达式见式(23),拟合曲线如图 11 所示。

$$S_{qb}/S_0 = 0.958 - 2.552e^{-3.906(w_{qb}/w_0)} \quad (23)$$

对文中第 2.1 节算例中三维四向 C/C 复合材料试验件沿宽度方向进行切边加工,并添加抗氧化涂层,切边后试验段宽度为 18 mm。利用式(23)并结合表 4 中非切边三维四向 C/C 复合材料 700 °C 拉伸强度试验数据对切边三维四向 C/C 复合材料 700 °C 拉伸强度进行计算,预测值和试验值对比如表 6 所示。由表 6 可知,两种工况下的预测误差均小于 5 %,说明切边三维四向 C/C

复合材料强度预测模型具有较高的预测精度和较强的通用性。

3 结 论

通过本文研究,得到以下结论:

1) 基于细观单胞有限元法,建立了考虑纤维束挤压的三维四向复合材料内部单胞模型,施加了考虑温度的周期性边界条件和用以模拟界面脱黏的耦合约束,结合温度环境下的单元失效判定准则和材料退化条件,完成了三维四向 C/C 复合材料强度预测模型的建立。

2) 建立了考虑氧化速率的纤维束高温氧化环境力学性能退化模型,推导了纤维束和单向板力学性能等价性原理,利用 C/C 复合材料单向板在相应工况下的力学性能试验,获取纤维束的力学性能。研究了切边效应对三维四向复合材料力学性能的影响,建立了一种考虑切边宽度的三维四向复合材料强度预测模型。

3) 采用本文建立的模型对非切边三维四向 C/C 复合材料进行了室温、有防氧化保护 700℃ 和无氧化保护 700℃ 的拉伸强度进行了预测,预测误差均小于 10%。模拟了三维四向 C/C 复合材料在 700℃ 下的应力/应变曲线,由于本文模型没有考虑剪切的非线性,使得模拟存在一定误差。模拟了有防氧化保护的三维四向 C/C 复合材料纤维束和基体受拉伸载荷中的损伤扩展过程,以及各损伤的占比。

4) 利用本文建立的切边强度预测模型拟合了一组切边三维四向 C/C 复合材料试验件室温拉伸强度数据,获得了内部编织角为 22° 的三维四向 C/C 复合材料切边强度随宽度的变化趋势。预测了切边宽度为 18mm 的三维四向 C/C 复合材料在室温和 700℃ 的拉伸强度值,预测误差均小于 5%,表明了模型的有效性。

参考文献:

[1] 李贺军. 碳/碳复合材料[J]. 新型碳材料, 2001, 16(2): 70-80.
LI Hejun. C/C composites[J]. New Carbon Materials, 2001, 16(2): 79-80. (in Chinese)

[2] 李爱军, 李贺军, 李克智, 等. C/C 复合材料 CVI 工艺人工神经网络建模[J]. 中国科学: E 辑, 2003, 33(3): 209-216.
LI Aijun, LI Hejun, LI Kezhi, et al. Artificial neural network modeling for C/C composite CVI process[J]. Science in China: Series E, 2003, 33(3): 209-216. (in Chinese)

[3] 高燕, 宋怀河, 陈晓红. C/C 复合材料的研究进展[J]. 材料导报, 2002, 16(7): 44-47.
GAO Yan, SONG Huaihe, CHEN Xiaohong. Progress in research on C/C composites[J]. Materials Review, 2002, 16(7): 44-47. (in Chinese)

[4] 郭正, 赵稼祥. C/C 复合材料的研究与发展[J]. 宇航材料工艺, 1995, 25(5): 1-7.
GUO Zheng, ZHAO Jiaxiang. Research and development of C/C composite materials[J]. Aerospace Materials and Technology, 1995, 25(5): 1-7. (in Chinese)

[5] 李崇俊, 马伯信, 金志浩, 等. C/C 复合材料的新发展[J]. 材料科学与工程学报, 2000, 18(3): 135-140.
LI Chongjun, MA Boxin, JIN Zhihao, et al. Recent developments of C/C composites[J]. Materials Science and Engineering, 2000, 18(3): 135-140. (in Chinese)

[6] 李贺军, 罗瑞盈, 杨峥. C/C 复合材料在航空领域的应用研究现状[J]. 材料工程, 1997, 25(8): 8-10.
LI Hejun, LUO Ruiying, YANG Zheng. The status and future on research and application about C/C composites in the aeronautical area[J]. Journal of Materials Engineering, 1997, 25(8): 8-10. (in Chinese)

[7] 董孚允, 王春敏, 董娟. 三维纺织复合材料的发展和应用[J]. 纤维复合材料, 2001, 18(3): 37-40.
DONG Fuyun, WANG Chunmin, DONG Juan. Development and application of 3D textile composites[J]. Fiber Composites, 2001, 18(3): 37-40. (in Chinese)

[8] 朱元林. C/C 复合材料疲劳寿命预测与分析方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
ZHU Yuanlin. Research on prediction of damage failure and fatigue life C/C composites[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)

[9] 宋健, 温卫东. 考虑温度环境下树脂基复合材料力学性能及模型研究[J]. 航空动力学报, 2016, 31(1): 31-39.
SONG Jian, WEN Weidong. Study on mechanical properties of resin composites and models considering temperature environment[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(1): 31-39. (in Chinese)

[10] 杨尊社, 卢刚认, 曲德全, 等. C/C 复合材料的磷酸盐与硼系涂料的防氧化研究[J]. 材料保护, 2001, 34(3): 12-13.
YANG Zunshe, LU Gangren, QU Dequan, et al. Anti-oxidation of phosphate and boron contained coatings for C/C composite brake material[J]. Materials Protection, 2001, 34(3): 12-13. (in Chinese)

[11] 武保华, 刘春立, 张涛, 等. 碳/碳复合材料超高温力学性能测试研究[J]. 宇航材料工艺, 2001, 31(6): 67-72.
WU Baohua, LIU Chunli, ZHANG Tao, et al. Research on mechanical properties test of C/C composites at ultra high temperature[J]. Aerospace Materials and Technology, 2001, 31(6): 67-72. (in Chinese)

[12] LAN Fengtao, LI Kezhi, LI Hejun, et al. High-temperature property of carbon/carbon composite joints bonded with ternary Ti-Si-C compound[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 480(2): 747-749.

[13] 陈波, 温卫东, 崔海涛, 等. 三维四向 C/C 复合材料高温氧化环境力学试验[J]. 航空动力学报, 2018, 33(8): 1916-1922.
CHEN Bo, WEN Weidong, CUI Haitao, et al. Test on mechanics of three dimensional four directional C/C composites at elevated temperature and oxidation environment[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(8): 1916-1922. (in Chinese)

[14] 孙慧玉. 三维编织复合材料拉伸性能研究[J]. 南京航空航天大学学报, 1995, 27(6): 721-725.
SUN Huiyu. Research on tensile properties of 3-D braided composite materials[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 1995, 27(6): 721-725. (in Chinese)

[15] 魏丽梅. 切边对三维编织复合材料力学性能的影响[D]. 天津:天津工业大学,2005.

[16] CHEN L,TAO X M,CHOY C L. On the microstructure of three-dimensional braided performs [J]. Composites Science and Technology,1999,59(3):391-404.

[17] XIA Z, ZHANG Y, ELLYIN F. A unified periodical boundary conditions for representative volume elements of composites and applications[J]. International Journal of Solids and Structures,2003,40(8):1907-1921.

[18] 张超,许希武,毛春见. 三维编织复合材料渐进损伤模拟及强度预测[J]. 复合材料学报,2011,28(2):222-230.

ZHANG Chao, XU Xiwu, MAO Chunjian. Progressive damage simulation and strength prediction of 3D braided composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2011,28(2):222-230. (in Chinese)

(编辑:叶 青)