

层合陶瓷基复合材料多尺度应力-应变计算模型

方光武¹, 宋迎东^{1,2}, 高希光¹

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院 江苏省航空动力系统重点实验室, 南京 210016;
2. 南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京 210016)

摘 要: 对层合陶瓷基复合材料(CMCs)的应力-应变行为进行了研究。基于多尺度分析方法,实现了由组分性能参数到层合陶瓷基复合材料整体应力-应变的计算。采用可实现单向纤维增强陶瓷基复合材料应力-应变计算的细观力学模型,由材料的细观组分性能计算出单向板的非线性弹性性能,并将单向板的弹性性能作为层合复合材料模型的输入参数,通过有限元法计算层合陶瓷基复合材料的整体应力-应变响应。与试验数据的对比表明:采用该模型可以实现层合陶瓷基复合材料在单调拉伸载荷及拉伸加卸载条件下应力-应变曲线的预测,其中数据的最大偏离为19.61%。

关 键 词: 陶瓷基复合材料(CMCs); 多尺度模型; 应力-应变行为; 细观力学模型; 有限元法(FEM)
中图分类号: V250; TB332 **文献标志码:** A

Multi-scale stress-strain calculation model of laminated ceramic matrix composites

FANG Guangwu¹, SONG Yingdong^{1,2}, GAO Xiguang¹

(1. Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System,
College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanics Structure,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The stress-strain behavior for laminated ceramic matrix composites (CMCs) was studied. A model of calculating the stress-strain behavior for CMCs directly from constituent parameters was presented based on multi-scale method. On the basis of the micro-mechanical model of unidirectional fiber reinforced CMCs, the nonlinear mechanical response of unidirectional laminate can be calculated from the mechanical parameters of constituents. Subsequently, the stress-strain response of the entire composites can be obtained from the response of unidirectional laminate by finite element methods. The predicted stress-strain curves of laminated CMCs under monotonic tensile and repeated loading were acceptable if compared with the experimental results. Among these curves and their corresponding experimental results, the biggest deviation was 19.61%.

Key words: ceramic matrix composites (CMCs); multi-scale model; stress-strain behavior; micromechanical model; finite element method (FEM)

收稿日期: 2015-05-18

基金项目: 国家自然科学基金(51575261, 51675266); 航空科学基金(2015ZB52016); 南京航空航天大学校博士学位论文创新与创优基金(BCXJ14-02); 江苏省高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 方光武(1989—),男,博士生,主要研究方向为航空发动机结构强度、陶瓷基复合材料失效机理及多尺度力学分析。

通讯作者: 宋迎东(1969—),男,教授、博士生导师,博士,主要研究方向为航空发动机结构强度。E-mail: ydsong@nuaa.edu.cn

引用格式: 方光武,宋迎东,高希光. 层合陶瓷基复合材料多尺度应力-应变计算模型[J]. 航空动力学报, 2017, 32(6): 1375-1380.
FANG Guangwu, SONG Yingdong, GAO Xiguang. Multi-scale stress-strain calculation model of laminated ceramic matrix composites[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(6): 1375-1380.

陶瓷基复合材料由高性能非金属纤维和陶瓷基体复合而成,具有良好的高温稳定性和较好的韧性,其应用范围主要为各种工程结构的热端部件^[1-4]。这些工程构件往往需承受复杂的载荷历程,为了保证安全服役,设计者不仅需要了解陶瓷基复合材料单调拉伸应力-应变性能,还需要对其在复杂载荷历程下应力-应变响应进行准确预测。因此,研究者们对陶瓷基复合材料在复杂载荷历程下的应力-应变性能展开了模型研究。

目前,针对陶瓷基复合材料应力-应变行为的模型研究,主要分为宏观力学方法和细观力学方法。宏观力学方法首先对材料的力学性能进行均匀化假设,然后采用损伤力学等方法,根据材料内部的损伤情况分析材料的宏观弹性模量等性能。Morscher 等^[5]采用损伤力学方法建立了表征二维(2D)编织陶瓷基复合材料内部损伤的损伤变量,并通过拉伸试验过程中监测到的声发射事件来确定损伤变量,进而对其拉伸应力-应变行为进行了拟合。Pardini 等^[6]则采用均匀化方法对 2.5D 编织陶瓷基复合材料的弹性性能进行了研究。李龙等^[7]在带基体纤维束尺度对材料性能进行均匀化假设,采用各向异性损伤力学方法计算了纤维束的弹性参数,进而实现了针刺 C/SiC 复合材料弹性参数计算。细观力学方法则可以实现由复合材料的组分性能直接计算得到复合材料的整体力学响应。Keith^[8]通过对圆柱单胞模型进行细观力学分析,建立了单向陶瓷基复合材料的应力-应变模型。许仁红等^[9]在其基础上模拟了正交铺设陶瓷基复合材料在准静态加载下的应力-应变行为。李潘等^[10]在圆柱单胞模型的基础上,将 2D 编织陶瓷基复合材料简化为正交铺设的层合板,对其拉伸加卸载行为进行了模拟。陶永强等^[11]将 2D 编织陶瓷基复合材料简化为正交铺设结构和纤维束波动结构的串联,对其应力-应变行为进行了模拟。Yang 等^[12]通过对圆柱单胞模型的细观力学分析,实现了单向陶瓷基复合材料在等幅循环载荷下的迟滞回线模拟。Li^[13]在 shear-lag 模型^[14]基础上,实现了正交铺设陶瓷基复合材料在等幅循环载荷下的应力-应变响应预测。

此外,复合材料力学研究者还发展了多尺度方法用以分析复合材料的力学性能。Zhou, Lu 等^[15-17]基于多尺度分析方法分别对 2D 编织、2.5D 编织、3D 编织树脂基复合材料的力学性能进行了预测。

作者在前期工作^[18-19]中建立了一种可实现任意加卸载历程下的单向纤维增强陶瓷基复合材料应力-应变响应预测的细观力学模型,即界面摩擦模

型。本文基于多尺度分析方法的思路,首先采用界面摩擦模型由材料的组分性能计算出单向板的非线性弹性性能,然后将单向板的弹性性能作为层合复合材料模型的输入参数,最后通过非线性有限元法计算得到了层合陶瓷基复合材料的整体应力-应变响应。该过程实现了由复合材料组分性能到单向板性能,进而获得层合复合材料整体性能的跨尺度分析。

1 基本理论

1.1 陶瓷基复合材料单向板弹性性能分析

层合陶瓷基复合材料是由 i 层单向板按一定顺序和角度叠层起来。单向板作为层合陶瓷基复合材料的基本结构单元,在力学性能上可等效为单向纤维增强复合材料(如图 1 所示,图中 t_i 表示单层厚度)。因此,单向板复合材料的弹性性能分析是实现层合陶瓷基复合材料力学响应计算的关键。

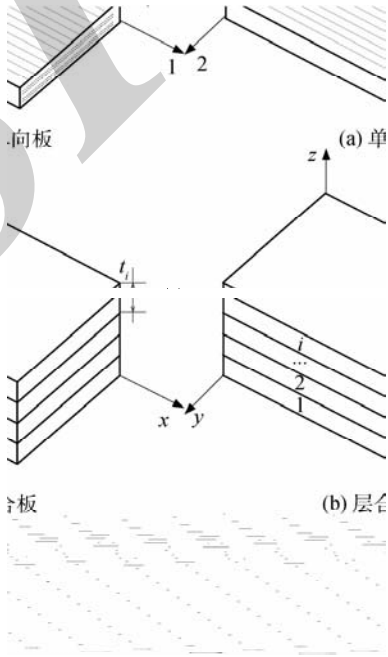


图 1 陶瓷基复合材料单向板及层合板结构示意图
Fig. 1 Structure diagram of unidirectional layer and laminated CMCs

单向板与单向纤维增强陶瓷基复合材料等效,可视为横观各向同性材料。其应力-应变关系可表示为

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{44} & 0 & 0 \\ & \text{sym.} & & & C_{66} & 0 \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,各刚度系数可由单向纤维增强陶瓷基复合材料的弹性参数求得.

$$\begin{cases} C_{11} = \frac{(1 - \mu_{23})E_1}{1 - \mu_{23} - 2\mu_{12}\mu_{21}} \\ C_{22} = \frac{(1 - \mu_{23})E_2}{(1 + \mu_{23})(1 - \mu_{23} - 2\mu_{12}\mu_{21})} \\ C_{12} = \frac{\mu_{12}E_2}{1 - \mu_{23} - 2\mu_{12}\mu_{21}} \\ C_{23} = \frac{(\mu_{23} + \mu_{12}\mu_{21})E_2}{(1 + \mu_{23})(1 - \mu_{23} - 2\mu_{12}\mu_{21})} \\ C_{44} = \frac{C_{22} - C_{23}}{2} \\ C_{66} = G_{12} \end{cases} \quad (2)$$

横观各向同性材料的独立弹性参数为 5 个: $E_1, E_2, \mu_{12}, G_{12}, \mu_{23}$ (或 G_{23}). 由于单向板是作为层合板的基本单元使用,其厚度方向和其它尺寸相比很小. 因此,本文主要关注单向板在材料主方向的弹性参数 E_1, E_2 的变化所引起的影响.

在平行纤维的方向,单向板承载能力强,且表现出明显的非线性,其失效模式包括基体开裂、界面脱黏、界面滑移以及纤维断裂等多种形式. 本文采用界面摩擦模型描述单向板在平行纤维方向的应力-应变行为. 界面摩擦模型从基本的摩擦定律出发,建立了纤维与基体之间载荷传递关系,并考虑了基体开裂、纤维断裂和界面磨损等多种损伤机制,最终建立了单向纤维增强复合材料沿纤维方向的应力-应变关系^[16]. 由该模型获得的单向板沿纤维方向的刚度可表示为

$$E_1 = \begin{cases} f(E_f, E_m, \varphi_f, r_f, \tau_i, \sigma_{cr}, \sigma_a(t)) & X_c < \sigma_1 < X_t \\ 0 & \sigma_1 \geq X_t \text{ 或 } \sigma_1 \leq X_c \end{cases} \quad (3)$$

其中 E_1 为单向板沿纤维方向的弹性模量; E_f 为纤维弹性模量; E_m 为基体弹性模量; φ_f, r_f 分别为单向板中碳纤维体积分数及半径; τ_i, σ_{cr} 分别为单向板界面强度和基体开裂应力; $\sigma_a(t)$ 为单向板所承受的加载历程; σ_1 为单向板所承受的平行纤维方向应力分量; X_t, X_c 分别为单向板平行纤维方向的拉伸、压缩极限强度.

在垂直纤维的方向,单向板由纤维和基体横向串联承力,承载能力很弱,其失效形式可视为脆性失效,失效前的弹性模量可以由混合律公式计算得到(式(4)). 因此单向板在垂直于纤维方向力学性能可由以下模型描述:

$$E_2 = \begin{cases} \frac{1}{\frac{\varphi_f}{E_f} + \frac{1 - \varphi_f}{E_m}} & Y_c < \sigma_2 < Y_t \\ 0 & \sigma_2 \geq Y_t \text{ 或 } \sigma_2 \leq Y_c \end{cases} \quad (4)$$

其中 E_2 为单向板垂直纤维方向的弹性模量; σ_2 为单向板所承受的垂直纤维方向应力分量; Y_t, Y_c 分别为单向板在垂直纤维方向的拉伸、压缩极限强度.

1.2 层合陶瓷基复合材料的宏观有限元模型

为了实现由组分参数对层合板整体力学性能的预测,需要建立层合板的宏观力学响应和单向板的局部应力-应变状态之间的联系,本文通过有限元法来实现该过程. 图 2 为建立的层合陶瓷基复合材料有限元模型,各单向板需根据铺设角度来确定材料主方向,并在有限元计算过程中定义不同的材料参数.

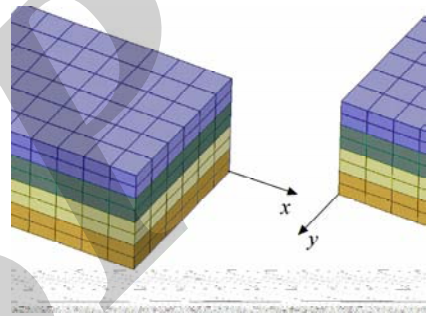


图 2 层合陶瓷基复合材料有限元模型
Fig. 2 Finite element model of laminated CMCs

1.3 层合陶瓷基复合材料的应力-应变计算流程

如前所述,基于界面摩擦模型和混合律,建立了复合材料组分参数和单向板弹性参数之间的联系(式(3)和式(4));有限元模型则将陶瓷基复合材料层合板的整体力学响应和单向板的局部应力-应变状态对应起来;将界面摩擦模型和有限元分析相结合,建立了复合材料基本组分性能参数和复合材料层合板的整体力学响应之间的联系. 上述过程即建立了一种层合陶瓷基复合材料应力-应变计算的多尺度分析方法,图 3 为其具体计算流程.

如图 3 所示,层合陶瓷基复合材料应力-应变计算主要包括以下步骤:

- 1) 根据相关组分参数和结构参数分别建立层合板的有限元模型及单向板的界面摩擦模型.
- 2) 定义边界条件包括宏观有限元模型及微观界面摩擦模型两部分. 宏观有限元模型按周期边界条件原理施加,载荷通过位移加载实现;微观界面摩擦模型的边界条件则需根据上一迭代步中有限元模型所计算的局部应力应变状态来更新.
- 3) 计算陶瓷基复合材料单向板的弹性参数.

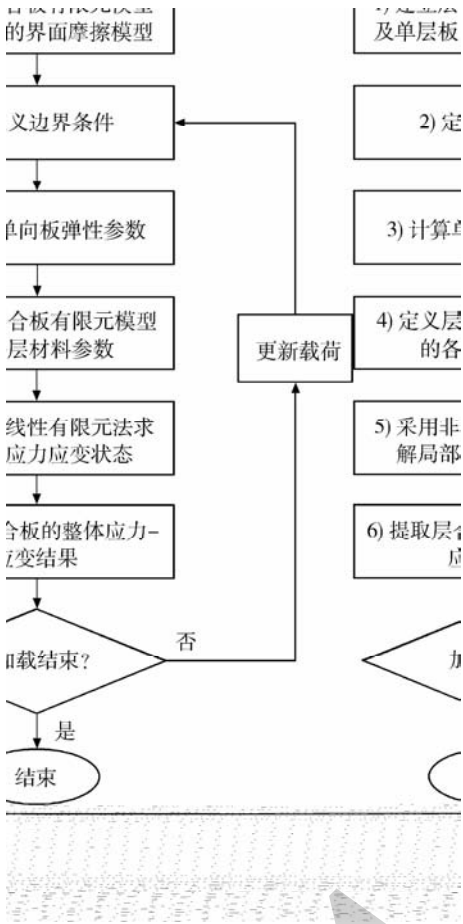


图 3 层合陶瓷基复合材料应力-应变计算流程图
Fig. 3 Flow chart of stress-strain calculation for laminated CMCs

首次加载的单向板弹性参数由混合率公式计算；后续迭代过程则根据文中第 1.1 节提出的方法分别更新材料主方向的弹性参数 E_1, E_2 。

4) 定义层合板有限元模型的各层材料参数。根据层合板各单向层的铺设角度以及步骤 2) 计算得到的弹性参数,对有限元模型中各层单元的材料特性进行定义。

5) 采用非线性有限元法求解层合板应力-应变状态。由于陶瓷基复合材料单向板的弹性参数具有明显的非线性特征,因此需要采用非线性有限元法进行迭代求解。

6) 根据有限元模型的计算结果,提取层合板的整体应力-应变响应。

2 算例分析

2.1 陶瓷基复合材料单向板应力-应变计算

首先采用本文发展的界面摩擦模型计算了陶瓷基复合材料单向板的应力-应变行为。以单向增强的 SiC/CAS 陶瓷基复合材料为例,该材料由碳

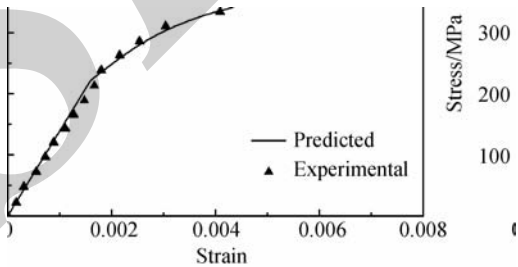
化硅纤维及陶瓷基体组成,其基本组分参数如表 1 所示^[1]。

表 1 单向纤维增强的 SiC/CAS 陶瓷基
复合材料组分参数

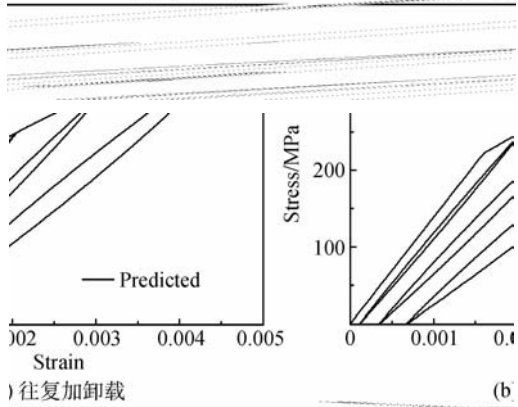
Table 1 Composition parameters of unidirectional fiber reinforced SiC/CAS CMCs

参数	数值
E_f/GPa	210
E_m/GPa	95.5
$\varphi_f/\%$	38
$r_f/\mu\text{m}$	7.5
τ_i/MPa	20
σ_{cr}/MPa	220

图 4 为采用界面摩擦模型预测的单向增强的 SiC/CAS 复合材料应力-应变曲线。与实验数据^[1]的对比表明,该模型能很好的预测单向增强的 SiC/CAS 陶瓷基复合材料在单调拉伸载荷的应力-应变行为。



(a) 单调拉伸载荷



(b) 往复加卸载

图 4 单向 SiC/CAS 复合材料应力-应变曲线
Fig. 4 Stress-strain curves of unidirectional SiC/CAS composites

2.2 层合陶瓷基复合材料应力-应变计算

根据本文建立的层合陶瓷基复合材料多尺度应力-应变计算方法,分析了 $[0/90]_{2s}$ -SiC/CAS

陶瓷基复合材料层合板的应力-应变行为,并与试验数据进行了对比.该层合板 0°和 90°单向层的厚度分别为 0.79 mm 和 0.7 mm.

如图 5 所示,由复合材料的组分性能参数及相关几何参数,可以实现[0/90]_{2s}-SiC/CAS 陶瓷基复合材料层合板在单调拉伸载荷及拉伸往复加卸载条件下应力-应变曲线预测,并与实验数据^[1]进行了对比.

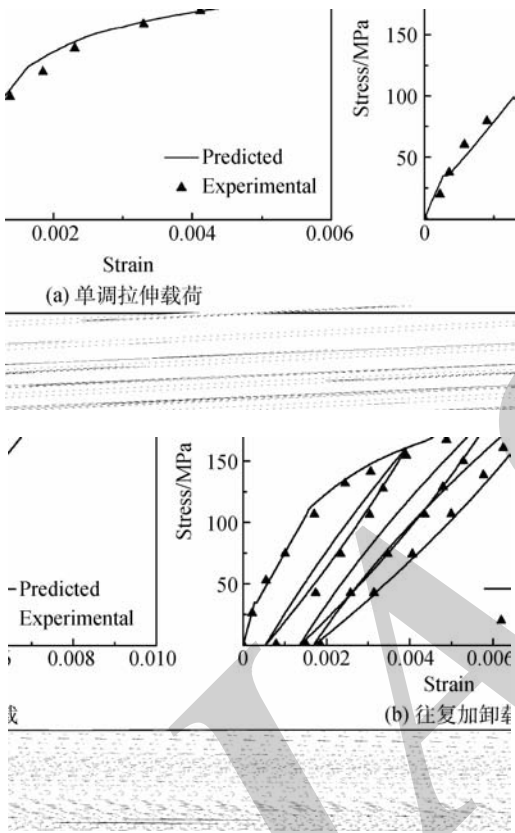


图 5 [0/90]_{2s}-SiC/CAS 复合材料应力-应变曲线
Fig. 5 Stress-strain curves of [0/90]_{2s}-SiC/CAS composites

3 结 论

1) 提出了陶瓷基复合材料层合板应力-应变行为的多尺度计算方法:首先,基于界面摩擦模型和混合律,建立了复合材料组分参数和单向板弹性参数之间的联系;其次,采用有限元方法建立了陶瓷基复合材料层合板的整体力学响应和单向板应力-应变状态之间的关系;最终,将界面摩擦模型和有限元分析相结合,实现了由复合材料组分性能参数预测层合陶瓷基复合材料的整体应力-应变响应.

2) 本文采用的界面摩擦模型可以实现单向增强陶瓷基复合材料在任意加卸载历程下的应力-应变计算.与实验数据的对比表明,该模型能很好地预测单向 SiC/CAS 陶瓷基复合材料在单

调拉伸载荷下的应力-应变行为.

3) 运用本文的方法对[0/90]_{2s}-SiC/CAS 陶瓷基复合材料层合板在单调拉伸载荷及拉伸加卸载条件下的应力-应变曲线进行了预测,并将部分预测结果与实验数据进行了对比,数据的最大偏离为 19.61%.

参考文献:

[1] SOLT I J P. Modeling of progressive damage in fiber-reinforced ceramic matrix composites[D]. Dayton, Ohio: Air Force Institute of Technology, 1996.

[2] 张立同, 成来飞. 连续纤维增韧陶瓷基复合材料可持续发展战略探讨[J]. 复合材料学报, 2007, 24(2): 1-6.

ZHANG Litong, CHENG Laifei. Discussion on strategies of sustainable development of continuous fiber reinforced ceramic matrix composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(2): 1-6.

[3] WANG M, LAIRD C. Characterization of microstructure and tensile behavior of a cross-woven C-SiC composite[J]. Acta Materialia, 1996, 44(4): 1371-1387.

[4] 何新波, 杨辉, 张长瑞, 等. 连续纤维增强陶瓷基复合材料概述[J]. 材料科学与工程, 2002, 20(2): 273-278.

HE Xinbo, YANG Hui, ZHANG Changrui, et al. Review of continuous fiber reinforced ceramic matrix composites [J]. Materials Science and Engineering, 2002, 20 (2): 273-278.

[5] MORSCHER G N, SINGH M, KISER J D, et al. Modeling stress-dependent matrix cracking and stress-strain behavior in 2D woven SiC fiber reinforced CVI SiC composites [J]. Composites Science and Technology, 2007, 67 (6): 1009-1017.

[6] PARDINI L C, GREGORI M L. Modeling elastic and thermal properties of 2. 5D carbon fiber and carbon/SiC hybrid matrix composites by homogenization method[J]. Journal of Aerospace Technology and Management, 2010, 2 (2): 183-194.

[7] 李龙, 高希光, 史剑, 等. 考虑孔隙的针刺 C/SiC 复合材料弹性参数计算[J]. 航空动力学报, 2013, 28(6): 1257-1263.

LI Long, GAO Xiguang, SHI Jian, et al. Calculation of needled C/SiC composite elastic parameters in consideration of the porosity[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(6): 1257-1263.

[8] KEITH W K K. The stress-strain behaviour of a porous unidirectional ceramic matrix composite [J]. Composites, 1995, 26(3): 163-174.

[9] 许仁红, 宋迎东, 李龙彪, 等. 准静态加载下陶瓷基复合材料层合板应力-应变曲线的模拟[J]. 航空动力学报, 2008, 23(10): 1854-1858.

XU Renhong, SONG Yingdong, LI Longbiao, et al. Modeling behavior of cross-ply ceramic matrix composites under quasi-static loading[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(10): 1854-1858.

[10] 李潘,王波,甄文强,等. 2D-SiC/SiC 复合材料拉伸加卸载行为[J]. 复合材料学报,2014,31(3):676-682.
LI Pan,WANG Bo,ZHEN Wenqiang,et al. Tensile loading/unloading stress-strain behavior of 2D SiC/SiC composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2014,31(3):676-682.

[11] 陶永强,矫桂琼,王波,等. 2D 编织陶瓷基复合材料应力-应变行为的试验研究和模拟[J]. 固体力学学报,2010,31(3):258-268.
TAO Yongqiang,JIAO Guiqiong,WANG Bo,et al. Experimental investigation and numerical simulation of the stress-strain behavior of 2D weave ceramic matrix composites[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics,2010,31(3):258-268.

[12] YANG B,MALL S. Cohesive-shear-lag model for cycling stress-strain behavior of unidirectional ceramic matrix composites[J]. International Journal of Damage Mechanics,2003,12(1):45-64.

[13] LI L. Modeling hysteresis behavior of cross-ply C/SiC ceramic matrix composites[J]. Composites:Part B Engineering,2013,53:36-45.

[14] EVANS A G,ZOK F W,MCMECKING R M. Fatigue of ceramic matrix composites[J]. Acta Metallurgica et Materialia,1995,43(3):859-875.

[15] ZHOU Y,LU Z,YANG Z. Progressive damage analysis and strength prediction of 2D plain weave composites[J]. Composites:Part B Engineering,2013,47(3):220-229.

[16] LU Z X,ZHOU Y,YANG Z Y,et al. Multi-scale finite element analysis of 2. 5D woven fabric composites under on-axis and off-axis tension[J]. Computational Materials Science,2013,79(5):485-494.

[17] LU Z,XIA B,YANG Z. Investigation on the tensile properties of three-dimensional full five-directional braided composites[J]. Computational Materials Science,2013,77(3):445-455.

[18] 方光武,高希光,宋迎东. 单向纤维增强陶瓷基复合材料界面滑移规律[J]. 复合材料学报,2013,30(4):101-107.
FANG Guangwu,GAO Xiguang,SONG Yingdong. Interface slip distribution of unidirectional fiber-reinforced ceramic matrix composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2013,30(4):101-107.

[19] GAO X G,FANG G W,SONG Y D. Hysteresis loop model of unidirectional carbon fiber-reinforced ceramic matrix composites under an arbitrary cyclic load[J]. Composites:Part B Engineering,2014,56:92-99.

(编辑:王碧琚)