

文章编号:1674-8190(2020)03-332-06

# 材料初始缺陷对平纹编织 C/SiC 复合材料热残余应力的影响研究

白国栋<sup>1,2</sup>, 童小燕<sup>2</sup>, 姚磊江<sup>2</sup>

(1. 西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

(2. 西北工业大学 无人机特种技术重点实验室, 西安 710072)

**摘要:** C/SiC 热残余应力影响材料服役性能, 而初始缺陷影响热残余应力, 因此有必要对平纹编织 C/SiC 复合材料的初始缺陷与热残余应力的关系进行研究。通过试样截面扫描电镜(SEM)图像对材料各类初始缺陷的分布特征进行测量和统计, 建立含初始缺陷的宏观材料的代表体积单元(RVE)和纤维束 RVE 有限元模型; 采用稳态变温法及有限元细观计算力学(FECM)方法预测含初始缺陷的纤维束 RVE 有效性能参数及热残余应力。结果表明: 应力预测值与试验值吻合较好, 得到了各类初始缺陷与宏观材料热残余应力之间的定量映射关系。

**关键词:** C/SiC; 稳态变温法; 初始缺陷; 热残余应力; RVE 模型

中图分类号: V257; TB332

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2020.03.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Study on the Influence of Initial Defects on Thermal Residual Stress of Plain Weave C/SiC Composites

BAI Guodong<sup>1,2</sup>, TONG Xiaoyan<sup>2</sup>, YAO Leijiang<sup>2</sup>

(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. National Key Laboratory of Science and Technology on UAV, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** The thermal residual stress of C/SiC affects the service performance of the material, and the initial defects affect the thermal residual stress, so it is necessary to study the relationship between initial defects and thermal residual stress of plain weave C/SiC composites. The distribution characteristics of various initial defects of the material are measured and computed by scanning electron microscopy (SEM) image of the sample, and the representative volume unit (RVE) and fiber bundle RVE finite element model of the macroscopic material with initial defects are established. The steady change temperature method and finite element computational mechanics (FECM) method are used to predict the effective performance parameters and thermal residual stress of fiber bundle RVE with initial defects. The results show that the stress prediction values are in identical with test values, and the quantitative relationship between various initial defects and thermal residual stress of macroscopic materials are obtained.

**Key words:** C/SiC; steady variable temperature method; initial defects; thermal residual stress; RVE model

收稿日期: 2019-10-10; 修回日期: 2019-10-28

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0700503); 国家自然科学基金(51772244, 11072195)

通信作者: 姚磊江, yaolj@nwpu.edu.cn

引用格式: 白国栋, 童小燕, 姚磊江. 材料初始缺陷对平纹编织 C/SiC 复合材料热残余应力的影响研究[J]. 航空工程进展, 2020, 11(3): 332-337.

BAI Guodong, TONG Xiaoyan, YAO Leijiang. Study on the influence of initial defects on thermal residual stress of plain weave C/SiC composites[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(3): 332-337. (in Chinese)

## 0 引言

C/SiC 复合材料作为高温热结构部件的重要候选材料已经在航空航天领域大量应用<sup>[1-2]</sup>。该材料由化学气相渗透工艺制备而成,在其加工和服役过程中,由于纤维和基体热膨胀系数不匹配导致内部产生的热残余应力是 C/SiC 复合材料在工程应用中需要考虑的重要因素<sup>[3]</sup>。热残余应力的存在不仅影响基体裂纹的产生和扩展,纤维的拔出和界面层剥落,而且影响材料的宏观力学性能。国内外对复合材料热残余应力问题做了大量的试验研究<sup>[4-7]</sup>和数值模拟<sup>[8-10]</sup>。目前,关于 C/SiC 复合材料热残余应力预测的研究较少。吕毅<sup>[11]</sup>通过 SEM 照片精确测量建立了 C/SiC 复合材料 RVE 有限元模型,采用间接耦合降温法,模拟计算了 C/SiC 复合材料轴向热残余应力;姚磊江等<sup>[12]</sup>通过稳态变温法和有限元分析,研究了 C/SiC 初始缺陷对其热膨胀系数影响关系。但这类研究并未考虑初始缺陷对热残余应力的影响,与实际情况有较大差异。

一般认为,各类初始缺陷的统计性存在是 C/SiC 复合材料性能产生分散性的根本原因,要较为精确地预测其材料性能就必须考虑初始缺陷分布特征的影响<sup>[13]</sup>。

本文在前述研究工作的基础上,以平纹编织 C/SiC 复合材料为研究对象,考虑各类初始缺陷的分布特征,基于稳态变温法研究平纹编织 C/SiC 复合材料的初始缺陷对基体面内方向热残余应力的影响关系,以为材料研发和工程应用提供重要支撑。

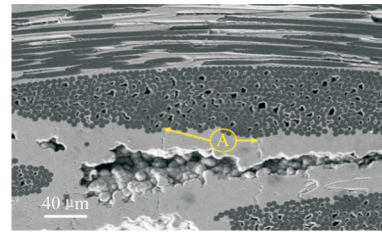
## 1 C/SiC 的初始缺陷

### 1.1 初始缺陷分类

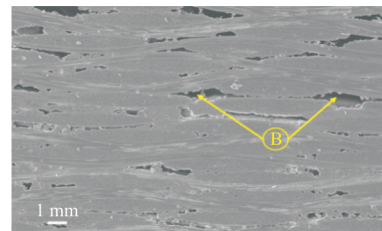
平纹编织 C/SiC 采用化学气相渗透工艺法制备,主要组成部分为 SiC 基体,C 纤维和界面层。这种制备工艺,在加工制造的过程中会产生大量初始缺陷。

C/SiC 初始缺陷 SEM 图如图 1 所示,其内部的初始缺陷主要包括:环绕纤维束基体裂纹(A 类)、纤维束交叉处孔洞(B 类)、界面层剥落(C 类)、环绕单丝纤维基体裂纹(D 类)和单丝纤维间

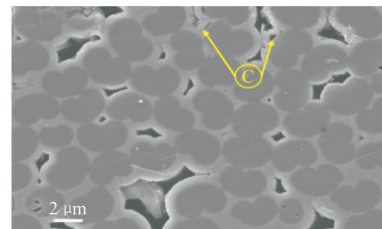
孔洞(E 类)。其中 A、C 和 D 类初始缺陷为裂纹型缺陷,主要是因为基体和纤维的热膨胀系数不一致导致;B 和 E 类初始缺陷为孔洞型缺陷,主要是因为 SiC 沉积过程不均匀导致。



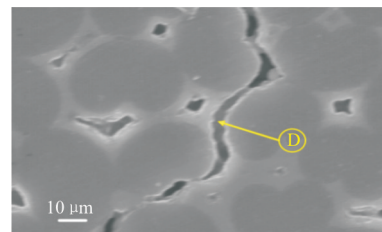
(a) A 类缺陷



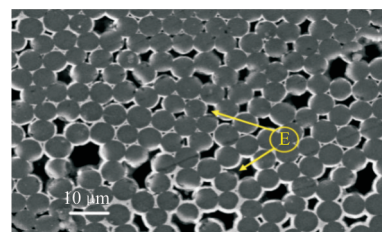
(b) B 类缺陷



(c) C 类缺陷



(d) D 类缺陷



(e) E 类缺陷

图 1 平纹编织 C/SiC 复合材料内部的初始缺陷 SEM 图

Fig. 1 SEM of initial defects inside plain weave C/SiC composite

## 1.2 缺陷的分布特征

裂纹型初始缺陷在 C/SiC 复合材料中以各种裂纹形式存在,因此可以采用裂纹的长度  $L$  和单位体积的数量  $N$  两个参数表征裂纹的分布情况。其中,A 类缺陷可以采用 RVE 宏观模型表征,C 和 D 类缺陷可以采用 RVE 纤维束表征。但是,界面层通常不会完全脱粘,而是仅有一小段圆弧剥落,因此需要对其剥落的角度进行统计。任意选取五个界面层剥落角度样本值列出,结果如表 1 所示。

表 1 界面层剥落角度样本值

Table 1 Sample peeling angle value of interface layer

样本编号	剥落角度/(°)	样本编号	剥落角度/(°)
1	23.1	4	38.8
2	30.4	5	44.9
3	36.0		

孔洞型初始缺陷在 C/SiC 复合材料中以各种孔洞形式存在,可以采用孔洞的体积含量  $P$  和单位体积的数量  $N$  两个参数表征孔洞型缺陷的分布情况。其中,B 类缺陷可以采用 RVE 宏观模型表征,E 类缺陷可以采用 RVE 纤维束表征。对试样的 B 类和 E 类孔洞型初始缺陷进行统计,孔洞体积总含量  $P$  用百分数来表示,任意选取以上两类孔洞型缺陷的五个孔洞体积含量样本值,结果如表 2 所示。

表 2 单丝纤维间孔洞体积总含量样本值

Table 2 Sample total pore volume of fibers

样本编号	B 类孔洞体积含量/%	E 类孔洞体积含量/%
1	5.85	8.43
2	6.35	9.64
3	7.02	10.71
4	7.35	11.65
5	8.18	13.35

## 2 宏观材料热残余应力的预测方法

### 2.1 含初始缺陷 C/SiC 的 RVE 模型

C/SiC 复合材料的初始缺陷主要包括纤维束

和宏观材料两个尺度,因此在建立模型时,需要分别建立 RVE 模型。要预测宏观材料的热残余应力,必须得到纤维束的力学性能参数和热膨胀系数。

宏观尺度的 RVE 模型根据材料的实际尺寸建立,C/SiC 的铺层和约束条件如图 2 所示,建立 C/SiC 宏观 RVE 有限元模型如图 3 所示。模型由 SiC 基体和纤维束组成,依据统计结果,将 A 和 B 两类初始缺陷置入其中。根据孔洞体积含量的大小确定所需删除的单元数,采用删除网格单元法在纤维束交叉处置入孔洞。

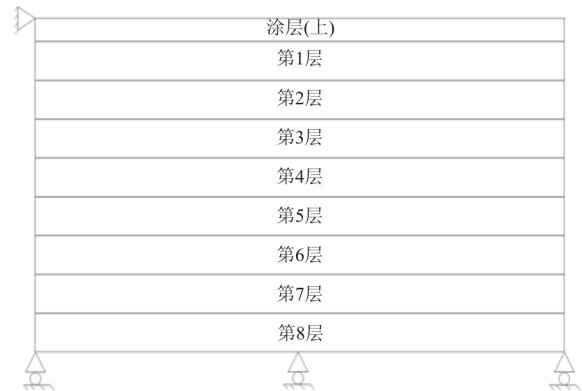


图 2 C/SiC 铺层及约束条件

Fig. 2 C/SiC layup and constraints

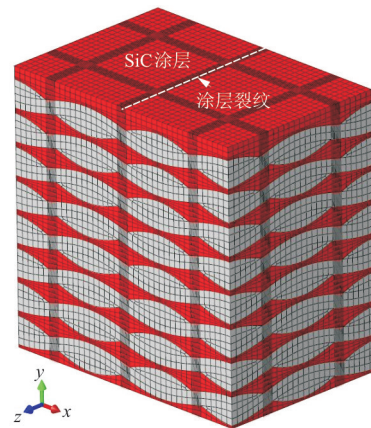


图 3 宏观材料 RVE 有限元模型

Fig. 3 RVE finite element model of macroscopic material

依据纤维直径和界面层的厚度,建立纤维束 RVE 有限元模型如图 4 所示。参照 A 和 B 类初始缺陷的置入方法,根据统计结果,将 C、D 和 E 三类初始缺陷置入纤维束 RVE 模型。

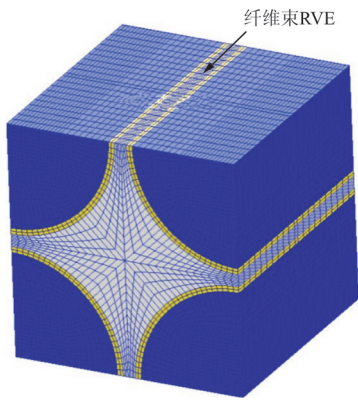


图 4 含初始缺陷的纤维束 RVE 有限元模型

Fig. 4 RVE finite element model of fiber bundle with initial defects

### 2.2 稳态变温法预测热残余应力

利用 FECM 方法预测含缺陷的纤维束 RVE 的力学性能参数,预测含缺陷的纤维束 RVE 的热膨胀系数<sup>[14]</sup>。平纹编织 C/SiC 复合材料从制备温度(1 000 °C)降到室温(20 °C)再升到服役温度的整个过程不是瞬时完成的,可以看作一个稳态过程<sup>[15]</sup>。因此,通过施加当前状态的温度载荷(本文当前温度载荷均为室温),模拟材料热残余应力的方法称为稳态变温法。假设模型某一顶点为坐标原点,对模型施加如下边界条件:

$$\begin{cases} u(0, y, z) = 0 \\ v(x, 0, z) = 0 \\ w(x, y, 0) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $u$ 、 $v$ 、 $w$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向的平动位移。

利用图 3 所示的含初始缺陷宏观材料 RVE 有限元模型,按照如上所述的稳态变温法和边界条件,以 MSC. PATRAN/NASTRAN 为平台对平纹编织 C/SiC 复合材料任一主轴方向的热残余应力进行模拟,预测 C/SiC 复合材料基体面内方向热残余应力。在有限元模型中,假设 1-2 方向为宏观材料 RVE 有限元模型的面内方向,3 方向为宏观材料 RVE 有限元模型的厚度方向,计算得到宏观材料 RVE 基体面内方向的热残余应力为 154.45 MPa,梅辉等<sup>[16]</sup>利用无残余热应力原点法测得平纹编织 C/SiC 复合材料 SiC 基体室温(20 °C)时的面内热残余应力为 134.85 MPa,说明预测效果较好。

### 3 初始缺陷对热残余应力的影响

按照上述过程分别计算不含缺陷和含单一缺陷时宏观材料基体面内方向热残余应力。A 和 D 类缺陷的分布稳定,因此只需各计算一次。B、C 和 E 类缺陷存在统计分布特征,因此按照统计样本值需要各计算五次。计算得到不含缺陷和分别只含 A 和 D 类缺陷时宏观材料基体面内方向的热残余应力如表 3 所示。

表 3 宏观材料基体面内方向的热残余应力

Table 3 The in-plane direction thermal residual stress of macro-material matrix

含缺陷情况	$\sigma$ /MPa
不含缺陷	160.44
含 A 类缺陷	166.83
含 D 类缺陷	147.50

平纹编织 C/SiC 复合材料从制备温度(1 000 °C)降到室温(20 °C),材料整体产生收缩现象,纤维束轴向热膨胀系数小于 SiC 相的热膨胀系数,在降温过程中其变形小于 SiC 相的变形,SiC 相受到纤维束轴向的拉应力,因此,预测出的值均为正值。从表 3 可以看出:与不含缺陷时相比,A 类缺陷使宏观材料基体面内方向的热残余应力升高,D 类缺陷使宏观材料基体面内方向热残余应力降低。

将计算得到的 B、C 和 E 类缺陷样本值对应的宏观材料基体面内方向的热残余应力绘制成曲线图。

B 类缺陷对宏观材料基体面内方向热残余应力的影响如图 5 所示。

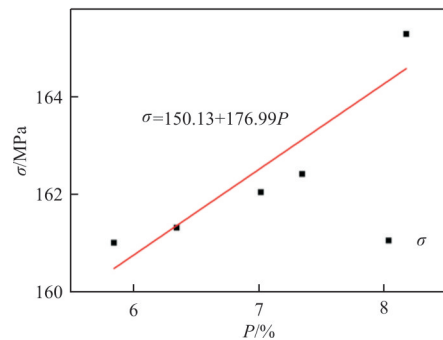


图 5 B 类缺陷对宏观材料基体面内热残余应力的影响

Fig. 5 Effect of defect B on in-plane thermal residual stress of macroscopic material matrix

从图 5 可以看出:随着 B 类缺陷的增大,宏观材料基体面内方向热残余应力增大较快。

C 类缺陷对宏观材料基体面内方向热残余应力的影响如图 6 所示,可以看出:随着 C 类缺陷的增大,宏观材料基体面内方向热残余应力急剧减小。

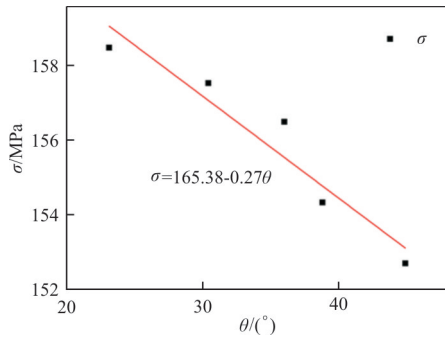


图 6 C 类缺陷对宏观材料基体面内热残余应力的影响  
Fig. 6 Effect of defect C on in-plane thermal residual stress of macroscopic material matrix

E 类缺陷对宏观材料基体面内热残余应力的影响如图 7 所示,可以看出:随着 E 类缺陷的增大,宏观材料基体面内方向热残余应力出现小幅增大。

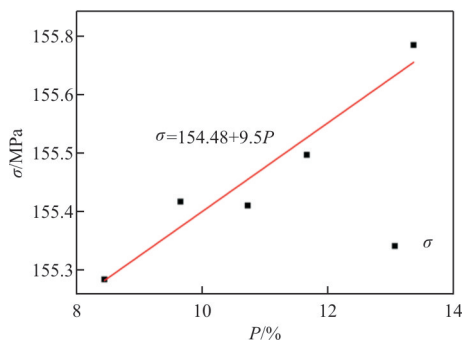


图 7 E 类缺陷对宏观材料基体面内热残余应力的影响  
Fig. 7 Effect of defect E on in-plane thermal residual stress of macroscopic material matrix

从平均意义上讲,五类初始缺陷对宏观材料基体面内方向热残余应力的影响从大到小依次为 D、A、E、C、B。将各图中的曲线进行线性拟合可得到各类初始缺陷与宏观材料基体面内热残余应力之间的定量映射关系,即图 5~图 7 中给出的表达式。

## 4 结 论

(1) 基于稳态变温法预测了平纹编织 C/SiC

复合材料基体面内方向的热残余应力。预测值与试验值对比效果较好,证明了预测方法的正确性和可靠性。

(2) 与不含缺陷模型相比,各类初始缺陷的存在均对宏观材料基体面内方向热残余应力有较大影响。从平均意义上讲,五类初始缺陷对宏观材料基体面内热残余应力的影响从大到小依次为:环绕单丝纤维基体裂纹、环绕纤维束基体裂纹、单丝纤维间孔洞、界面层剥落、纤维束交叉处孔洞。

(3) 通过稳态变温法,得到了各类初始缺陷与宏观材料基体面内热残余应力之间的映射关系,为材料研发与工程应用提供参考。

## 参考文献

- [1] NASLAIN R. Design, preparation and properties of non-oxide CMCs for application in engines and nuclear reactors: an overview [J]. Composites Science and Technology, 2004, 64(2): 155-170.
- [2] CHRISTIN F. Design, fabrication, and application of thermostructural composites(TSC) like C/C, C/SiC, and SiC/SiC composites[J]. Advanced Engineering Materials, 2002, 4(12): 903-912.
- [3] MEI H. Measurement and calculation of thermal residual stress in fiber reinforced ceramic matrix composites [J]. Composites Science and Technology, 2008, 68 (15/16): 3285-3292.
- [4] 赵艳茹,雷振坤,邢永明,等.单纤维树脂基复合材料界面热残余应力研究[J].工程力学,2009,26(5):251-256.  
ZHAO Yanru, LEI Zhenkun, XING Yongming, et al. Research of interface thermal residual stress in single fiber resin matrix composites[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26 (5): 251-256. (in Chinese)
- [5] 张博明,杨仲,孙新杨,等.含界面相复合材料热残余应力分析[J].固体力学学报,2010,31(2):142-148.  
ZHANG Boming, YANG Zhong, SUN Xinyang, et al. Thermal residual stress analysis of composite containing interphase phase[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2010, 31 (2): 142-148. (in Chinese)
- [6] KIM S S, MURAYAMA H, KAGEYAMA K, et al. Study on the curing process for carbon/epoxy composites to reduce thermal residual stress [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2012, 43(8): 1197-1202.
- [7] HARDIMAN M, VAUGHAN T, MCCARTHY C. The effect of microscale residual stress from thermal cooldown on the nanoindentation properties of fibre-reinforced composites[J]. Journal of Composite Materials, 2016(2): 1-12.
- [8] CHOO H, BOURKE M A M, DAYMOND M R. A finite-

- element analysis of the inelastic relaxation of thermal residual stress in continuous-fiber-reinforced composites [J]. *Composites Science & Technology*, 2001, 61(12): 1757-1772.
- [9] JUMBO F S, ASHCROFT I A, CROCOMBE A D, et al. Prediction of composite properties from a representative volume element[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2010, 30(7): 523-538.
- [10] 李维学, 张胡军, 戴剑锋, 等. 碳纳米管增强镁基复合材料热残余应力的有限元分析[J]. *复合材料学报*, 2011, 28(1): 166-171.
- LI Weixue, ZHANG Hujun, DAI Jianfeng, et al. Finite element analysis of thermal residual stress in Carbon nanotubes-reinforced Mg-matrix composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2011, 28(1): 166-171. (in Chinese)
- [11] 吕毅. 平纹编织 C/SiC 复合材料热残余应力的模拟和分析[J]. *强度与环境*, 2012, 39(1): 49-56.
- LÜ Yi. Simulation and analysis of thermal residual stress in plain weave C/SiC composites[J]. *Structure & Environment Engineering*, 2012, 39(1): 49-56. (in Chinese)
- [12] 姚磊江, 王梦, 陈刘定, 等. 初始缺陷对平纹编织 C/SiC 复合材料热膨胀系数的影响[J]. *机械科学与技术*, 2015, 34(2): 311-314.
- YAO Leijiang, WANG Meng, CHEN Liuding, et al. Effect of initial defects on thermal expansion coefficient of plain weave C/SiC composites[J]. *Mechanical Science and Technology*, 2015, 34(2): 311-314. (in Chinese)
- [13] 孙磊. 2D C/SiC 缺陷的无损检测与评价[J]. *复合材料学报*, 2008, 25(5): 85-90.
- SUN Lei. Nondestructive testing and evaluation of 2D C/SiC defects[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2008, 25(5): 85-90. (in Chinese)
- [14] 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(4): 115-130.
- FAN Jianping, ZHANG Bin. Numerical analysis of thermal residual stress in resin matrix composites[J]. *Materials Review*, 2011, 25(4): 115-130. (in Chinese)
- [15] 吴祖咸, 高子珺. 用等效降温法模拟预应力来实现张弦梁结构找形[J]. *浙江工业大学学报*, 2008, 36(5): 587-590.
- WU Zuxian, GAO Zijun. Using the equivalent cooling method to simulate prestressing to realize the shape finding of the stringed beam structure[J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 2008, 36(5): 587-590. (in Chinese)
- [16] 梅辉, 成来飞, 张立同, 等. 2维 C/SiC 复合材料的拉伸损伤演变过程和微观结构特征[J]. *硅酸盐学报*, 2007, 35(2): 137-143.
- MEI Hui, CHENG Laifei, ZHANG Litong, et al. Damage evolution and microstructural characterization of a cross-woven C/SiC composite under tensile loading[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2007, 35(2): 137-143. (in Chinese)

#### 作者简介:

白国栋(1995—),男,硕士研究生。主要研究方向:陶瓷基复合材料损伤分析、声发射损伤监测。

童小燕(1963—),男,博士,教授、博导。主要研究方向:陶瓷基复合材料损伤分析、飞行器设计。

姚磊江(1973—),男,博士,教授、博导。主要研究方向:陶瓷基复合材料损伤分析、固体力学。

(编辑:丛艳娟)