

文章编号:1674-8190(2014)01-104-05

二维 C/SiC 复合材料的室温疲劳行为及寿命预测

吕美平^{1,2}, 童小燕¹, 任少华^{1,2}, 姚磊江¹

(1. 西北工业大学 无人机特种技术国防科技重点实验室, 西安 710065)

(2. 西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

摘要: 为了研究二维 C/SiC 复合材料的疲劳行为并对其进行寿命预测, 进行室温下二维 C/SiC 复合材料的拉伸试验和疲劳试验, 并使用扫描电镜(SEM)观察其断口形貌。结果表明: C/SiC 复合材料表现出类似金属的韧性断裂行为, 疲劳极限约为极限拉伸强度(UTS)的 85%, 在室温下具有较为优良的抗疲劳性能; 由于复合材料的缺口钝化效应, 缺口试样的 S-N 曲线要高于光滑试样, 但两者趋势一致, 据此提出基于名义应力的疲劳寿命预测方法。

关键词: 疲劳; 寿命预测; C/SiC; 复合材料; 扫描电镜

中图分类号: TB33

文献标识码: A

Fatigue Behavior and Life Prediction of 2D C/SiC under Room Temperature

Lü Meiping^{1,2}, Tong Xiaoyan¹, Ren Shaohua^{1,2}, Yao Leijiang¹

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on UAV, Northwestern

Polytechnical University, Xi'an 710065, China)

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

Abstract: Monotonic tension tests and tension-tension fatigue tests combined with microscopic observation by scanning electron microscopy(SEM) are performed to investigate the fatigue behavior and life prediction of 2D C/SiC. The results show that C/SiC exhibits metal-similar ductile fracture behavior. The fatigue limit is about 85% of ultimate tensile strength(UTS), which indicates that C/SiC has excellent fatigue performance under room temperature. The tendency of the S-N curve of the notched specimen is consistent with the curve of the smooth specimen. But the curve of the notched specimen is higher than that of the smooth specimen, due to the notch insensitivity and notch blunted effect of composite materials. According to the test results, a fatigue prediction model based on the nominal stress is presented.

Key words: fatigue; life prediction; C/SiC; composite; scanning electron microscopy

0 引言

连续纤维增韧陶瓷基复合材料具有耐高温、低密度、高比强度、抗氧化等优异性能, 成为未来可重复使用空天飞行器结构的主要候选材料, 应用前景

广阔^[1-2]。C/SiC 复合材料广泛应用于航空发动机的热端部件, 如尾喷管调节片、密封片、航天飞行器的头锥、机翼前缘以及火箭与动能武器的喷管及其扩张段等^[3-4]。力学性能表征对了解结构材料的基础性能非常重要^[5-7], 研究材料在外部载荷环境中的响应和破坏机理有助于改进材料的制造工艺, 提高材料的服役性能。国外科研机构对编织结构陶瓷基复合材料力学性能的研究十分重视, 进行了较多的理论和试验研究^[8-11], 但由于纤维和基体材料

收稿日期: 2013-02-03; 修回日期: 2013-04-01

基金项目: 国家自然科学基金(11072195)

通信作者: 吕美平, lvmpvictor@163.com

种类繁多、微观结构的差异以及制造工艺的区别,各国所研制的陶瓷基复合材料的力学性能不尽相同。近年来,国内在 C/SiC 静力性能的试验研究方面也做了不少工作,如管国阳等^[12-13]进行了二维 C/SiC 复合材料的宏观拉压特性试验和失效模式分析,初步得出了平纹编织 C/SiC 复合材料的失效判据;陈刘定等^[14]针对开孔对平纹编织 C/SiC 陶瓷基复合材料力学行为的影响进行了研究;孙龙生等^[15]研究了二维平纹编织 CVI 工艺 C/SiC 复合材料的疲劳行为;管国阳等^[16]还进行了平纹编织 C/SiC 复合材料的剪切性能试验。但由于疲劳试验周期长、成本高,试验数据相对静力试验更为分散等原因,目前对 C/SiC 疲劳性能和寿命预测的研究工作开展得还比较少。

本文在室温下对二维 C/SiC 复合材料进行拉伸和疲劳试验,并用 SEM 观察断口的微观形貌,研究其疲劳行为和寿命预测。

1 试验

1.1 二维 C/SiC 试验件的制备

试验材料为采用化学气相浸渗方法 (Chemical Vapor Infiltration, 简称 CVI) 制备的二维碳布叠层连续碳纤维增韧碳化硅基复合材料,由西北工业大学超高温结构复合材料实验室研制。其制作过程为:通过化学气相渗透工艺 (CVI) 将热解碳界面层和 SiC 基体沉积到预先编织好的 T300 碳布叠层纤维预制体中,经过表面机械加工,光滑试件和中心孔试件分别如图 1 和图 2 所示,再次沉积 SiC 基体到试验件表面,起到防氧化的作用。最终制成的材料密度约为 $2.1 \sim 2.2 \text{ g/cm}^3$,孔隙率约为 15%,基体含量 45%,纤维含量 40%。

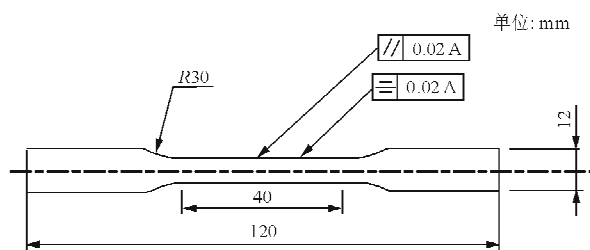


图 1 光滑试件

Fig. 1 Smooth specimen

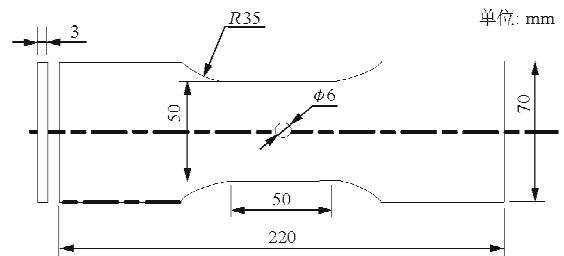


图 2 中心孔试件

Fig. 2 Center-notched specimen

1.2 单调拉伸试验和疲劳试验

室温下,在 MTS810 试验机上分别完成光滑试件和中心孔试件的单调拉伸和拉-拉疲劳试验。其中拉-拉疲劳试验采用应力控制,应力比为 0.1,频率为 10 Hz。最大应力与极限应力的比值分别取 0.85、0.86、0.87、0.88、0.89 和 0.90。

2 试验分析

2.1 单调拉伸试验

光滑试件单调拉伸试验的应力-应变曲线如图 3 所示。

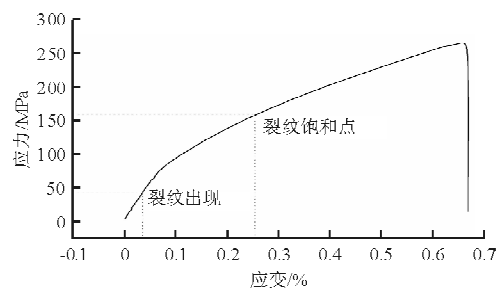


图 3 光滑试件单调拉伸应力-应变曲线

Fig. 3 Tensile stress-strain curve for smooth specimen

试件整个拉伸过程是非线性的,拉伸过程可分为三个阶段。初始的线性段很短,表明 C/SiC 复合材料在较低的应力下即发生损伤,主要是由于基体裂纹的产生而导致应力-应变曲线的斜率降低。随着应力的增加,出现基体裂纹饱和点,此后逐渐发生纤维的拔出和断裂,切线斜率进一步降低,直至试验件断裂。光滑试样的极限拉伸强度和断裂应变分别为 264.5 MPa 和 0.647%。

中心孔试件单调拉伸试验的应力-应变曲线

如图 4 所示,其趋势与光滑试样的拉伸应力—应变曲线较为相似,也具有明显的非线性特征。存在低应力状态下(约 25 MPa 以前)的直线段(即比例极限),但其在数值上稍低于光滑试件。随着拉伸应力的增加,其切线斜率逐步减小,并不存在明显的基体裂纹饱和点。中心孔试件的极限拉伸强度和断裂应变分别为 204.1 MPa 和 0.38%。

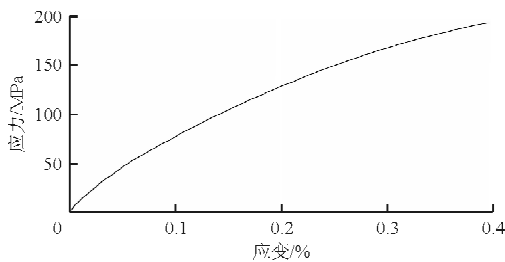


图 4 中心孔试件单调拉伸应力—应变曲线

Fig. 4 Tensile stress-strain curve for center-notched specimen

由于应力集中的存在,开孔试样的极限拉伸强度低于光滑试样。定义应力集中系数为

$$K_t = \frac{\sigma_b}{S_{\max}} \quad (1)$$

式中: S_{\max} 为中心孔试件的极限拉伸强度; σ_b 为光滑试件的极限拉伸强度。

对于二维 C/SiC 复合材料,中心开孔试件的应力集中系数为 1.296。

2.2 拉—拉疲劳试验

拉—拉疲劳试验结果如图 5 所示。C/SiC 复合材料疲劳性能的分散性非常大,加载相同应力下的疲劳寿命量级相差最大可以达到 4。光滑试样的疲劳寿命曲线较为平坦,疲劳极限(疲劳寿命 $N = 5 \times 10^5$ 时)约为极限拉伸强度的 80%~85%。当应力超过极限拉伸强度的 88%时,疲劳失效较快;当应力低于极限拉伸强度的 87%时,循环造成的疲劳损伤不明显。表明 C/SiC 复合材料具有较为优良的抗疲劳性能,疲劳极限较高。根据试验结果,C/SiC 复合材料的疲劳 S-N 曲线可用下式描述

$$\frac{S}{\sigma_b} = 0.895 N^{-0.023} \quad (2)$$

式中: S 为名义应力; N 为疲劳极限。

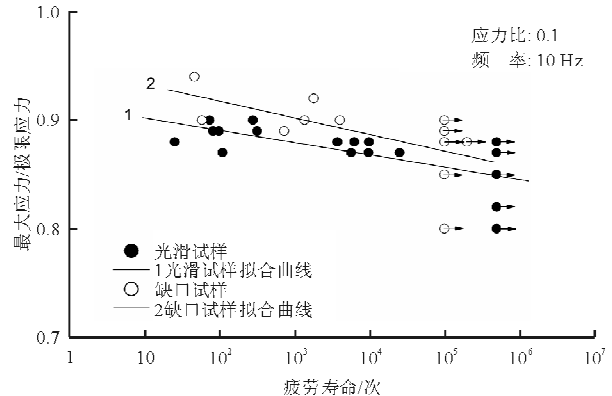


图 5 光滑试样和缺口试样的拉—拉疲劳试验结果

Fig. 5 Tension-tension fatigue tests results of smooth and center-notched specimens

从图 5 可以看出,C/SiC 复合材料中心孔试件的 S-N 曲线与光滑试件类似。对于相同的疲劳寿命,中心孔试件对应的最大应力与极限应力的比值较光滑试件的要高,这与复合材料的缺口钝化效应有关,试验所用材料的孔径与试验件宽度之比较小,对试验件的拉伸强度影响小。另外,此种复合材料的基体与纤维束的弹性模量量级相当,开孔后对结构的受力影响不显著,即复合材料对缺口不敏感,缺口的钝化使得局部应力集中降低。

2.3 疲劳寿命预测模型

C/SiC 复合材料中心孔试样的 S-N 曲线与光滑试样具有相同的趋势,根据光滑试件 S-N 曲线的拟合公式,中心孔试件疲劳 S-N 曲线可以描述为

$$\frac{S}{S_{\max}} = C \times 0.895 N^{-0.023} \quad (3)$$

式中: S 为名义应力; C 为材料常数, $C=1 \sim 1.05$ 。

定义疲劳集中系数为

$$K_f = \frac{K_t}{C} \quad (4)$$

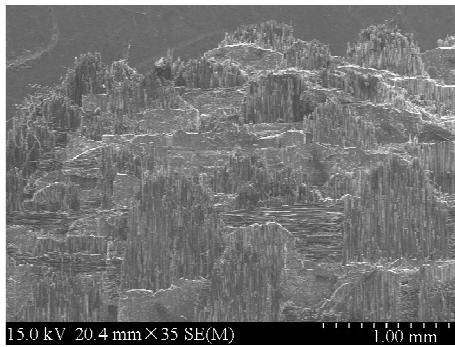
将式(1)、式(4)代入式(3),可得

$$\frac{K_f S}{\sigma_b} = 0.895 N^{-0.023} \quad (5)$$

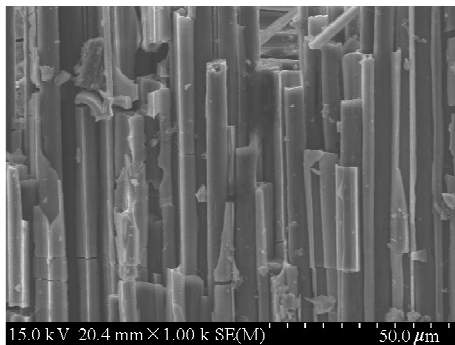
从式(5)可以看出,只需知道名义应力和局部应力集中系数,便可预测 C/SiC 复合材料构件的疲劳寿命。

2.4 断口的微观形貌分析

室温下拉伸断裂断口形貌如图 6 所示,疲劳断裂断口形貌如图 7 所示。



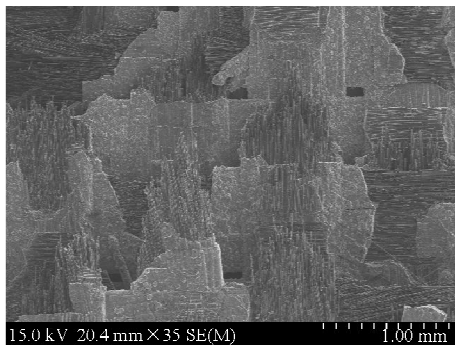
(a) 室温下拉伸断裂断口 SEM 图片



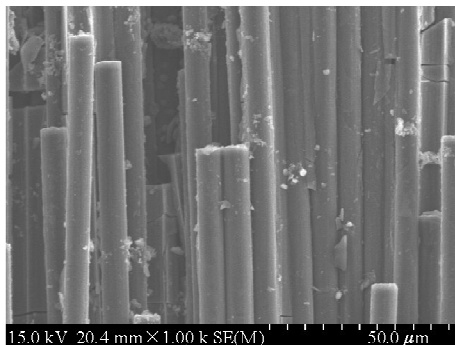
(b) 室温下拉伸断裂断口径向纤维束 SEM 图片

图 6 室温下拉伸断裂断口形貌

Fig. 6 Tensile fracture surfaces at room temperature



(a) 室温下疲劳断裂断口 SEM 图片



(b) 室温下疲劳断裂断口径向纤维束 SEM 图片

图 7 室温下疲劳断裂断口形貌

Fig. 7 Fatigue fracture surfaces at room temperature

从断口的微观形貌可以看出,拉伸与疲劳破坏类似,都极不平整,呈群山状,断口以纤维束的破坏为主。从侧面看,各铺层断裂位置不同,并有较多的分层现象;沿试件宽度方向,0°纤维束基本从0°/90°搭接的位置断裂,然后拔出,形成一排孤立纤维束,局部位置90°纤维束发生剪切断裂。对比不同强度的拉伸试件断口,发现纤维束拔出较长的试件强度高,平齐断口强度低。当0°纤维束拉伸断裂拔出时,将90°纤维束带出,形成层状拔出。

疲劳断口与拉伸断口的不同之处在于疲劳断口纤维拔出长度较拉伸断口稍长,而且同一0°纤维束内纤维拔出长度较拉伸不一致,拔出的纤维表面很少有基体外壳,而拉伸断口纤维大部分仍处于被基体包裹状态。疲劳断口处裸露的纤维表面附着了一些细小的基体碎屑,这也能证明疲劳过程中纤维发生脱粘后与基体在界面处发生反复地磨损。

3 结 论

(1) C/SiC 复合材料的疲劳极限约为 0.85 UTS,在室温下具有较优良的抗疲劳性能。

(2) 中心孔试件的 S-N 曲线和光滑试件的 S-N 曲线具有相似的趋势,据此提出了基于名义应力的疲劳寿命预测方法,即只需知道其名义应力和局部的应力集中系数,即可预测 C/SiC 复合材料构件的疲劳寿命。

(3) 室温下,疲劳试件和拉伸试件的断口微观形貌差距不大,断口均呈现出层状分离,以纤维束的断裂和拔出为主;但失效的拉伸试件断口处的纤维被完整的基体外壳包裹着,而失效的疲劳试件断口处的纤维没有被完整的基体外壳包裹。

参考文献

- [1] 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.
- [2] Liu Mingshuang, Li Yulong, Xu Fei, et al. Dynamic compressive mechanical properties and a new constitutive model of 2D-C/SiC composites [J]. Material Science and Engineering: A, 2008, 489(1/2): 120-126.
- [3] Christin F Design, fabrication and application of thermos-structural composites(TSC) like C/C, C/SiC, and SiC/SiC composites [J]. Advanced Engineering Materials, 2002, 4 (12): 903-912.

- [4] Schmidt S, Beyer S, Knabe II, et al. Advanced ceramic matrix composite materials for current and future propulsion technology applications[J]. *Acta Astronautica*, 2004, 55(3-9): 409-420.
- [5] Yotte S, Quenisset J M. Toughness characterization of damageable ceramic matrix composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1999, 30(3): 191-201.
- [6] 戚来飞, 徐永东, 张立同, 等. 3D C/SiC 复合材料在复杂环境实验中性能演变的两重性[J]. *稀有金属材料与工程*, 2006, 35(4): 521-527.
Cheng Laifei, Xu Yongdong, Zhang Litong, et al. Dualism in evolution of 3D C/SiC composites under complex environmental testing[J]. 2006, 35(4): 521-527. (in Chinese)
- [7] Hui Mei, Cheng Laifei, Zhang Litong. Thermal cycling damage mechanisms of C/SiC composites in displacement constraint and oxidizing atmosphere[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2006, 89(7): 2330-2334.
- [8] Naik R A. Failure analysis of woven and braided fabric reinforced composites[J]. *Journal of Composite Materials*, 1995, 29(17): 2334-2363.
- [9] Jacobsen T K, Brondsted P. Mechanical properties of two plain-woven chemical vapor infiltrated silicon carbide-matrix composites[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2001, 84(5): 1043-1051.
- [10] Chaboche J L, Maire J F. New progress in micromechanics based CMD models and their application to CMCs[J]. *Composite Science and Technology*, 2001(61): 2239-2246.
- [11] Zhu S, Mizuno M, Kagawa Y, et al. Monotonic tension, fatigue and creep behavior of SiC-fiber-reinforced SiC-matrix composites; a review[J]. *Composites Science and Technology*, 1999, 59(6): 833-851.
- [12] 管国阳, 矫桂琼, 张增光. 2D C/SiC 复合材料的宏观拉压特性和失效模式[J]. *复合材料学报*, 2005, 22(4): 81-85.
Guan Guoyang, Jiao Guiqiong, Zhang Zengguang. Uniaxial macro-mechanical property and failure mode of a 2D-woven C/SiC composite[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2005, 22(4): 81-85. (in Chinese)
- [13] 管国阳, 矫桂琼, 张增光, 等. 平纹编织 C/SiC 复合材料的失效判据[J]. *硅酸盐学报*, 2005, 33(9): 1100-1104.
Guan Guoyang, Jiao Guiqiong, Zhang Zengguang, et al. Phenomenal failure criteria of a plain woven C/SiC composite[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2005, 33(9): 1100-1104. (in Chinese)
- [14] 陈刘定, 童小燕, 姚磊江, 等. 开孔对平纹编织 C/SiC 陶瓷基复合材料力学行为的影响[J]. *材料工程*, 2009(9): 71-74.
Chen Liuding, Tong Xiaoyan, Yao Leijiang, et al. Influence of open hole on mechanical behavior of plain-woven C/SiC ceramic matrix composites[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2009(9): 71-74. (in Chinese)
- [15] 孙龙生, 姚磊江, 吕国志, 等. 二维平纹编织 CVI 工艺 C/SiC 复合材料的疲劳行为[J]. *西北工业大学学报*, 2007, 25(4): 478-481.
Sun Longsheng, Yao Leijiang, Lü Guozhi, et al. Fatigue behavior of 2D plain-woven carbon/silicon carbide composites using chemical vapor infiltration (CVI) technique[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2007, 25(4): 478-481. (in Chinese)
- [16] 管国阳, 矫桂琼, 张增光. 平纹编织 C/SiC 复合材料的剪切性能[J]. *机械科学与技术*, 2005, 24(5): 515-517.
Guan Guoyang, Jiao Guiqiong, Zhang Zengguang. In-plane shear fracture characteristics of plain-woven C/SiC composite[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2005, 24(5): 515-517. (in Chinese)

作者简介:

吕美平(1986—),男,硕士研究生。主要研究方向:飞行器结构设计。

童小燕(1963—),男,教授。主要研究方向:飞行器结构完整性、材料的疲劳与断裂、智能材料数据库设计、结构与材料失效的数字仿真。

任少华(1988—),男,硕士研究生。主要研究方向:飞行器结构设计。

姚磊江(1973—),男,博士,副教授。主要研究方向:新型复合材料的结构完整性、结构与材料的疲劳断裂、工程材料数据库的设计开发。

(编辑:马文静)