

开孔对平纹编织 C/ SiC 陶瓷基复合材料力学行为的影响

Influence of Open Hole on Mechanical Behavior of Plain-woven C/ SiC Ceramic Matrix Composites

陈刘定^{1,2}, 童小燕¹, 姚磊江¹, 程起有^{1,2}

(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 710072;

2 西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

CHEN Liu-ding^{1,2}, TONG Xiao-yan¹, YAO Lei-jiang¹, CHENG Qi-you^{1,2}

(1 National Laboratory of UAV Special Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi an 710072, China;

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

摘要: 通过拉伸、压缩和疲劳实验结合断口显微观察并与光滑试样进行对比, 研究开孔对平纹编织 C/ SiC 陶瓷基复合材料力学行为的影响。结果表明: 开孔试样的拉伸行为和光滑试样一样表现为非线性, 拉伸强度降低 11. 8%, 拉伸破坏应变降低 54. 3%; 开孔试样的压缩行为与光滑试样不同, 低应力时表现为线性, 应力增大到一定程度时由于裂纹闭合效应较为明显, 开始表现出明显的非线性, 压缩强度降低 12. 2%, 压缩破坏应变降低 54. 9%; 开孔试样的疲劳极限约为其极限拉伸强度的 88%, 与光滑试样相同; 开孔试样在拉伸、压缩和疲劳载荷作用下都具有较小的应力集中系数, 对开孔敏感性较小; 开孔试样断口一般从孔中间穿过, 破坏首先发生在试样孔边应力集中最严重的地方, 断口方向与孔边初始缺陷有关。

关键词: 陶瓷基复合材料; 平纹编织 C/ SiC; 开孔; 拉伸行为; 压缩行为; 疲劳行为

中图分类号: TB332 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2009)09-0071-04

Abstract: Tension, compression and fatigue experiments were performed to investigate the mechanical behavior of plain-woven C/ SiC composite specimen with open hole compared with that of smooth specimen. The fracture surfaces of specimens were observed by scanning electron microscope(SEM) and optical microscope(OM) to analyze its damage mechanism. The results indicate that, the response of plain-woven C/ SiC ceramic matrix composite specimen with open hole under tensile loading is nonlinear to rupture and the same as that of smooth specimen, tensile strength decreases by 11. 8% and tensile fracture strain decreases by 54. 3%. The response of specimen with open hole under compression loading is different from that of smooth specimen, it is linear at low stress level and then becomes nonlinear due to obvious crack closure effect. Compression strength decreases by 12. 2% and compression fracture strain decreases by 54. 9%. Fatigue limite of specimen with open hole is 88% of its ultimate tensile strength and equivalent to that of smooth specimen. The specimen with open hole has low stress concentration factor and hence has low sensitivity to open hole. The fracture surfaces all go across the center of open hole. Damage appears at the hole edge where has severe stress concentration effect. The direction of fracture surface is related to the initial imperfection of open hole.

Key words: ceramic matrix composite; plain-woven C/ SiC; open hole; tension behavior; compression behavior; fatigue behavior

平纹编织 C/ SiC 复合材料是典型的陶瓷基复合材料(Ceramic Matrix Composites, CMCs), 具有高比强度, 高比模量, 耐高温和低密度等特点, 在航空航天

领域具有广阔的应用前景^[1]。由于碳纤维增强相的引入, 平纹编织 C/ SiC 复合材料在破坏时会出现微裂纹、裂纹偏转、纤维桥联、界面滑移和脱粘、纤维断裂和

拔出等增韧机制,改善了材料的力学性能。新材料面向工程应用必须解决力学行为的表征问题^[2],研究材料的破坏机理有助于改进工艺,提高材料性能。

国际上对编织结构陶瓷基复合材料的力学行为的研究颇为重视,进行了较多的实验和理论研究^[3-7],但由于工艺的差别,各国的材料表现出的力学行为不尽相同^[8]。近年来,国内陆续报道了三维编织 C/SiC 复合材料的拉压性能^[9]、剪切性能^[10]、疲劳性能^[11]、声发射响应^[12]、蠕变特性^[13]、热震行为^[14]等,对二维平纹编织 C/SiC 复合材料也进行了一些研究^[15-20]。但是这些都局限于材料本身的力学性能研究,平纹编织 C/SiC 复合材料作为未来可重复使用空天飞行器结构的候选材料,在服役过程中不可避免地会存在开孔等缺陷从而引起应力集中,对其力学性能会产生一定的影响,而开孔应力集中对材料力学性能的影响尚不清楚。

鉴于此,本工作对平纹编织 C/SiC 复合材料开孔试样进行拉伸、压缩和疲劳实验,分析其损伤机制,并与光滑试样进行对比研究,为材料优化设计和工程应用提供重要参考。

1 试样与实验过程

实验所用平纹编织 C/SiC 复合材料试样由西北工业大学超高温复合材料实验室采用化学气相渗透 (CVI) 工艺制造,其主要组分材料为 T-300 碳纤维和 SiC 基体。材料的密度大约为 $2.1 \sim 2.2 \text{ g/cm}^3$,孔隙体积分数约 15%,基体体积分数 45%,纤维体积分数 40%。平纹编织 C/SiC 复合材料板加工成型后,用金刚石线切割机将其切割成狗骨状试样,在其中心钻出半径为 3mm 的通孔,试样如图 1 所示 (mm)。

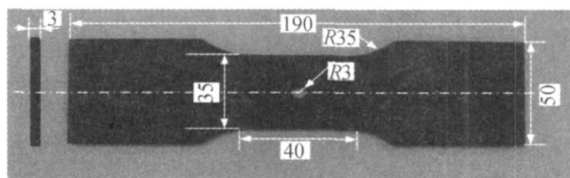


图 1 平纹编织 C/SiC 复合材料试样

Fig.1 Plain-woven C/SiC composite specimen

开孔试样的拉伸、压缩和疲劳实验均在 MTS810 液压伺服疲劳试验机上进行。拉伸和压缩实验采用位移控制加载,加载速率为 0.5 mm/min ,载荷从零开始直至试样断裂。通过拉伸实验,确定疲劳实验峰值应力的取值范围,单向等幅疲劳实验采用位移控制加载,

加载速率为 0.6 mm/min ,应力比和加载频率分别取 0.1 和 10 Hz 。实验中利用 MTS Model632 引伸计全程记录应力应变曲线。

2 实验结果与分析

开孔试样的拉压应力-应变曲线如图 2 所示,由图 2 看出拉伸过程和光滑试样^[15]一样是非线性过程,在低应力时就出现损伤。压缩过程开始阶段呈线弹性,当应力增加到如图 2 所示的裂纹闭合点 (Crack Closure Point) 后,由于基体裂纹闭合引起材料宏观模量增加,开始出现非线性过程,直至试样断裂破坏。根据拉伸实验结果确定开孔试样的极限拉伸强度 (Ultimate Tensile Strength, UTS) 为 233.2 MPa ,疲劳实验峰值应力取值范围为 $0.85 \sim 0.91 \text{ UTS}$ 。开孔试样的疲劳寿命曲线如图 3 所示,横轴为循环次数,纵轴为疲劳峰值应力与极限拉伸强度之比。与光滑试样一样^[18],当疲劳峰值应力达到 0.88 UTS 时,疲劳寿命迅速降低,取开孔试样的疲劳极限为 0.88 UTS (取 $N = 5 \times 10^5$)。

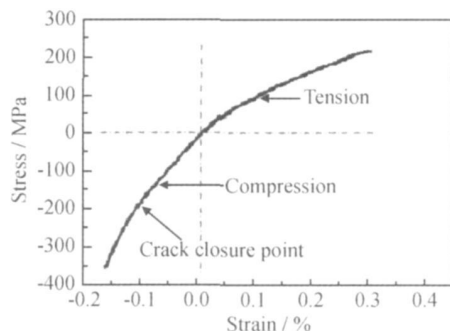


图 2 开孔试样拉压应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curve of specimen with open hole

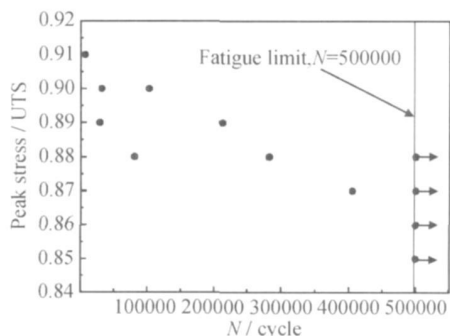


图 3 开孔试样的疲劳寿命曲线

Fig.3 Fatigue life curve of specimen with open hole

表 1 为开孔试样的拉伸、压缩和疲劳性能,可以看出,开孔使平纹编织 C/SiC 陶瓷基复合材料的性能有

一定程度的降低。拉伸强度和破坏应变分别降低了 11.8% 和 54.3%，压缩强度和破坏应变分别降低了 12.2% 和 54.9%，拉压破坏应变降低的程度比较大，

说明开孔使试样的韧性降低。开孔试样和光滑试样的疲劳极限都为各自极限拉伸强度的 88%，即分别为 205.2MPa 和 232.8MPa。

表 1 开孔试样与光滑试样的拉伸、压缩和疲劳性能对比

Table 1 Comparison of tension, compression and fatigue performances of open-hole specimen and smooth specimen

Specimen	σ_t /MPa	ϵ_t /%	σ_c /MPa	ϵ_c /%	σ_f /MPa
Smooth specimen	264.5	0.674	405.6	0.375	0.88UTS, 232.8
Open-hole specimen	233.2	0.308	356.8	0.169	0.88UTS, 205.2

Note: σ_t -tensile strength; ϵ_t -tensile fracture strain; σ_c -compressive strength; ϵ_c -compressive fracture strain; σ_f -fatigue limit strength

对于开孔试样, 在受轴向拉压载荷或疲劳载荷作用时, 应力集中系数(受疲劳载荷时为疲劳缺口系数)可简单表示为 $k_t = \sigma_s / \sigma_h$, 其中 σ_s 和 σ_h 分别为光滑试样和开孔试样的破坏极限。可以算出在拉伸载荷作用下应力集中系数为 1.13, 在压缩载荷作用下应力集中系数为 1.14, 疲劳载荷作用下应力集中系数为 1.13。说明开孔对平纹编织 C/SiC 复合材料的拉伸、压缩和疲劳性能有较小程度的影响, 该材料对开孔有较小的敏感性。

图 4、图 5 和图 6 分别为拉伸、压缩和疲劳断口形貌, 可以看出和光滑试样一样, 拉伸破坏呈现韧性断裂, 断裂机理为分层后 0 纤维束的断裂, 携带 90 纤维束拔出。压缩破坏形成一个与加载方向成 (13°) 角的断裂平面, 此角度正好沿着径向纤维束倾斜角度的最大方位, 与径向纤维束的波纹度有关。图 5 可看出明显的层间分层现象, 其破坏机理为层间裂纹、0/90 之间裂纹和 90 纤维束内裂纹的产生和扩展, 最后 0 纤维束剪切断裂。疲劳断口和拉伸断口相似, 只是断口平整程度和纤维拔出长度不同, 疲劳行为经历了基体开裂、基体裂纹饱和、纤维/基体界面处脱粘、纤维沿界面往复滑动、纤维断裂和拔出等阶段, 界面剪应力的降低以及界面滑动引起的纤维磨损是其主要损伤机理。

图 7 为断口宏观形貌。拉伸、压缩和疲劳断口宏观形貌差距不大, 断口都从开孔中间穿过, 表明开孔产生了应力集中。断口方向与加载方向成一定角度, 角度大小并不固定, 与开孔附近材料的初始缺陷(图 8)有关。

3 结论

(1) 开孔试样的拉伸行为与光滑试样相同, 呈非线性, 低应力时就出现损伤, 拉伸破坏强度降低了 11.8%, 拉伸破坏应变降低了 54.3%。

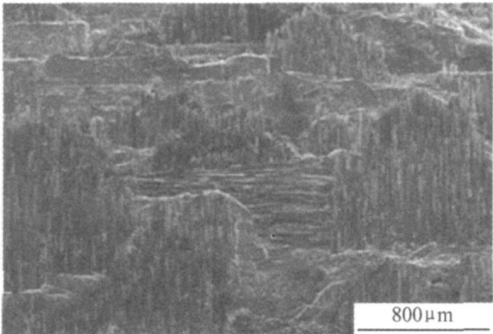


图 4 拉伸断口 SEM 形貌

Fig. 4 SEM morphology of tensile fracture surface

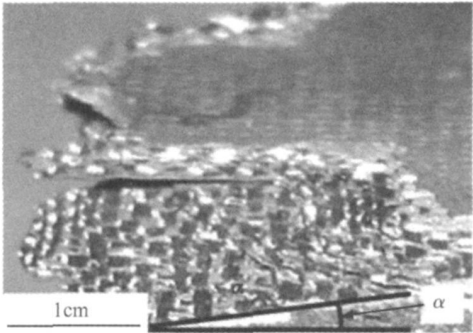


图 5 压缩断口 OM 形貌

Fig. 5 OM morphology of compression fracture surface

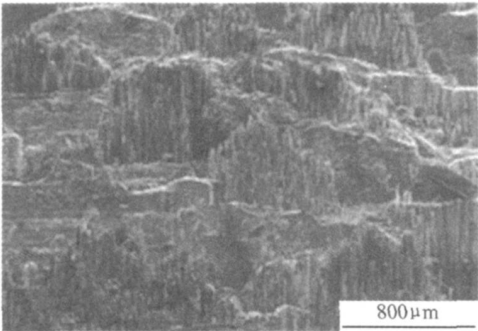


图 6 疲劳断口 SEM 形貌

Fig. 6 SEM morphology of fatigue fracture surface

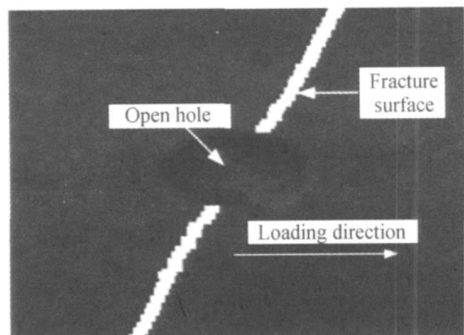


图 7 断口宏观形貌

Fig. 7 Macroscopic feature of fracture surface

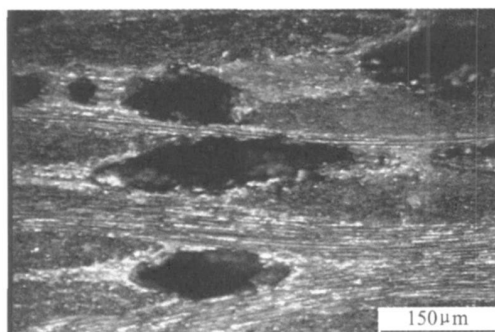


图 8 材料初始缺陷 OM 形貌

Fig. 8 OM morphology of initial imperfection of material

(2) 开孔试样的压缩行为与光滑试样不同, 在低应力水平下呈线性; 当应力水平达到一定程度后出现明显的裂纹闭合效应, 导致材料宏观模量显著增加, 开始出现非线性, 直至试样断裂。压缩破坏强度降低了 12.2%, 压缩破坏应变降低了 54.9%。

(3) 开孔试样的疲劳极限与光滑试样一样, 为各自极限拉伸强度的 88%, 分别为 205.2MPa 和 232.8MPa。当应力水平超过 0.88UTS 时, 疲劳寿命迅速降低。

(4) 应力集中系数的计算结果表明, 开孔对平纹编织 C/SiC 复合材料的拉伸、压缩和疲劳行为影响较小, 说明它对开孔具有较小的敏感性。

(5) 开孔试样的拉伸、压缩和疲劳破坏机理与光滑试样相同, 断口从孔中间穿过, 说明破坏首先在孔周围有初始缺陷的地方产生, 断口方向与加载方向夹角的大小与开孔周围初始缺陷的位置有关。

参考文献

- [1] 张立同, 成来飞, 徐永东. 新型碳化硅陶瓷基复合材料的研究进展[J]. 航空制造技术, 2003, (1): 24-32.
- [2] 成来飞, 徐永东, 张立同, 等. 3D C/SiC 复合材料在复杂环境试验中的性能演变的两重性[J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(4): 521-527.
- [3] JACOBSEN T, BRONSTED P. Mechanical properties of two

plain-woven chemical vapor infiltrated silicon carbide matrix composites[J]. J Am Ceram Soc, 2001, 84 (5): 1043-1051.

- [4] CALARD V, LAMON J. A probabilistic-statistical approach to the ultimate failure of ceramic-matrix composites. Part 1: experimental investigation of 2D woven SiC/SiC composites[J]. Composites Science and Technology, 2002, 62: 385-392.
- [5] DALMAZ A, DU CRET D, GUERJOU MA R, et al. Elastic module of a 2.5D C_f/SiC composite: experimental and theoretical estimates[J]. Composite Science and Technology, 2000, 60: 913-925.
- [6] CAMUS G. Modeling of the mechanical behavior and damage processes of fibrous ceramic matrix composites: application to a 2-D SiC/SiC[J]. International Journal of Solids and Structures, 2000, 37: 919-942.
- [7] CHABOCHE J, MAIRE J. New progress in micromechanics-based CDM models and their application to CMCs[J]. Composite Science and Technology, 2001, 61: 2239-2246.
- [8] CAMUS G, GUILLAUMAT L, BASTE S. Development of damage in a 2D woven C/SiC composite under mechanical loading: mechanical characterization[J]. Composite Science and Technology, 1996, 56: 1363-1372.
- [9] 王波, 矫桂琼, 潘文革. 三维编织 C/SiC 复合材料的拉压实验研究[J]. 复合材料学报, 2004, 21(3): 110-114.
- [10] 王波, 矫桂琼. 三维编织 C/SiC 复合材料剪切和弯曲性能的实验研究[J]. 机械强度, 2007, 29(1): 44-47.
- [11] 杜双明, 乔生儒, 纪岗昌, 等. 3D C/SiC 复合材料在室温和 1300 的拉-拉疲劳行为[J]. 材料工程, 2002, (9): 22-25.
- [12] 潘文革, 矫桂琼, 王波, 等. 声发射技术在三维编织 C/SiC 复合材料拉伸损伤分析中的应用[J]. 无机材料学报, 2004, 19(4): 871-875.
- [13] 乔生儒, 杨忠学, 韩栋, 等. 3D C/SiC 复合材料拉伸蠕变损伤和蠕变机理[J]. 材料工程, 2004, (4): 34-36.
- [14] 任伟华, 乔生儒, 敖强. 3D C/SiC 复合材料热震损伤行为[J]. 材料工程, 2003, (12): 26-28.
- [15] 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.
- [16] 潘文革, 矫桂琼, 管国阳. 二维机织碳纤维/碳化硅陶瓷基复合材料损伤分析[J]. 硅酸盐学报, 2005, 33(11): 1321-1325.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 梅辉, 成来飞, 张立同, 等. 二维 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.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10372081)

收稿日期: 2008-12-10; 修订日期: 2009-07-23

作者简介: 陈刘定(1984), 男, 博士研究生, 主要研究方向为飞行器复合材料结构完整性及优化设计. 联系地址: 陕西省西安市友谊西路 127 号西北工业大学 661 信箱(710072), E-mail: chenliuding@hotmail.com