

3D - C/SiC复合材料的高温疲劳性能

杜双明^{1,2} 乔生儒¹

(1 西北工业大学超高温复合材料实验室,西安 710072)

(2 西安科技大学材料科学与工程学院,西安 710054)

文 摘 采用应力比为 0.1 和 0.5,频率为 60 和 20 Hz 的正弦波从室温至 1 500 ℃,在 10^{-4} Pa 真空中对 3D - C/SiC 复合材料进行拉-拉疲劳实验;获得其在应力比 0.1 频率 60 Hz 条件下室温、1 100、1 300 和 1 500 ℃ 的疲劳曲线,以及应力比 0.1 频率 20 Hz 和应力比 0.5 频率 20 Hz 条件下 1 500 ℃ 的疲劳曲线。结果表明,若取循环基数为 10^6 周,应力比 0.1 频率 60 Hz 条件下,3D - C/SiC 复合材料在室温、1 100、1 300 和 1 500 ℃ 的疲劳极限分别为 235、350、285 和 240 MPa,约为其拉伸强度的 87%、97%、94% 和 90%;疲劳极限与比例极限和拉伸强度随温度有相似的变化规律,即随温度升高而增加,在 1 100 ℃ 达到最大值,尔后随温度增加而下降;但是 $S-N_f$ 曲线的斜率的变化规律恰好与此相反。应力比的增加和频率的降低,均使复合材料 1 500 ℃ 的疲劳极限有所减小。

关键词 3D - C/SiC 复合材料,疲劳,应力-寿命曲线,疲劳极限,高温

Fatigue Performance of 3D-C/SiC Composite at High Temperature

Du Shuangming^{1,2} Qiao Shengru¹

(1 Laboratory of Thermo-Structural Composite, Northwestem Polytechnical University, Xi 'an 710072)

(2 College of Material Science and Engineering, Xi 'an University of Science and Technology, Xi 'an 710054)

Abstract The tension-tension cyclic-fatigue tests were conducted from room temperature to 1 500 ℃ in 10^{-4} Pa vacuum under the condition with a sinusoidal loading frequency of 60 Hz and 20 Hz and stress ratio of 0.1 and 0.5 for 3D-C/SiC prepared by chemical vapor infiltration. The stress-life curves at 20 ℃, 1 100 ℃, 1 300 ℃ and 1 500 ℃ with frequency of 60 Hz and stress ratio of 0.1, and stress-life curves with frequency of 20 Hz and stress ratio of 0.1, 0.5 at 1 500 ℃ were obtained. Result shows that the fatigue limit (based on 10^6 cycles) at 20 ℃, 1 100 ℃, 1 300 ℃ and 1 500 ℃ is about 235 MPa, 350 MPa, 285 MPa and 240 MPa respectively, which can be as high as 87%, 97%, 94% and 90% of its ultimate tensile strength. The tendency of fatigue limit is similar to that of proportional limit and UTS, all of those increase as the temperature is elevated and have maximum value at 1 100 ℃, but decrease when temperature is higher than 1 100 ℃. The slope of stress-life curve is of opposite tendency. The fatigue limit of 3D-C/SiC composite at 1 500 ℃ decreases with the increase of stress ratio and decrease of loading frequency.

Key words 3D - C/SiC composite, Fatigue, Stress-Life curve, Fatigue-Limit, High temperature

1 前言

陶瓷基复合材料 (CMCs) 具有脆性和密度低、强度和模量高、耐高温和耐磨损等特点,成为许多高温结构中的潜在主要候选材料^[1]。文献 [2~8] 中对一维、二维纤维、2.5D CMCs 的疲劳性能作了报道,其中对 2D - NicalonTM/SiC 的研究最多,也较为充分。已有研究表明,CMCs 表现出明显的疲劳特性,室温

疲劳极限约为拉伸强度的 80%。温度对疲劳极限影响较大,例如,二维编织的 NicalonTM/SiC 在 1 000 ℃ 的比例极限和拉伸强度高于室温,而 1 000 ℃ 的疲劳极限却远低于室温,仅为拉伸强度的 30%。这一点对于高温零部件的设计者来说非常重要。

上述特征和规律是否在 3D - C/SiC 复合材料中存在,有待于实验验证。此外,应力比和加载频率对

收稿日期:2008 - 05 - 04

作者简介:杜双明,1963 年出生,博士,副教授,主要从事陶瓷基复合材料力学性能

疲劳性能会产生多大的影响也是值得研究的内容。本文对 3D-C/SiC 复合材料进行了室温和高温疲劳实验,研究了温度、应力比、加载频率等对疲劳寿命和疲劳极限的影响规律。

2 实验

2.1 材料

将日本 Toray 公司生产的 PAN 型 T-300 碳纤维编织成编织角为 22 的三维四向预制体。先用 CVD 在纤维预制体表面沉积一层厚约 0.2 μm 的热解碳,沉积温度为 850。然后采用 CVI 在 950~1000 沉积 SiC 基体,最终得到纤维体积分数约 45%、密度为 2.01 g/cm^3 、厚约 3.5 mm 的 3D-C/SiC 复合材料板材。3D-C/SiC 复合材料的主要力学性能见表 1。

表 1 3D-C/SiC 复合材料的主要力学性能
Tab 1 Main properties of 3D-C/SiC composite

温度 /	比例极限 /MPa	拉伸强度 /MPa
室温	95	270
1100	214	360
1300	196	305
1500	100	265

2.2 试样形状及尺寸

先将 3D-C/SiC 复合材料板材按图纸要求用金刚石砂轮磨削加工成近尺寸试样,然后采用 CVI 工艺在其表面均匀沉积一定厚度的 SiC 涂层。疲劳试样形状和结构尺寸如图 1 所示。拉伸方向与纤维编织轴向一致。

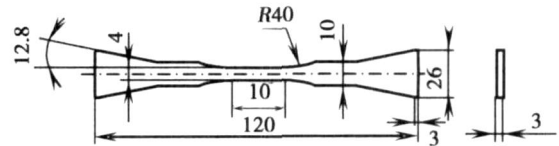


图 1 疲劳试样示意图

Fig 1 Schematic of specimen for tension-tension fatigue

2.3 设备及工艺参数

试验在乌克兰制造的 FIM-HT 疲劳试验机进行。施加应力比为 0.1 和 0.5,频率为 20 和 60 Hz 的拉-拉等幅循环载荷,试验温度为室温、1100、1300 和 1500。炉膛内真空度为 10^{-4} Pa。

3 结果与讨论

3.1 不同温度下的疲劳应力-寿命(S-N)曲线

3D-C/SiC 复合材料分别在室温、1100、1300 和 1500 的 S-N 曲线如图 2 所示。

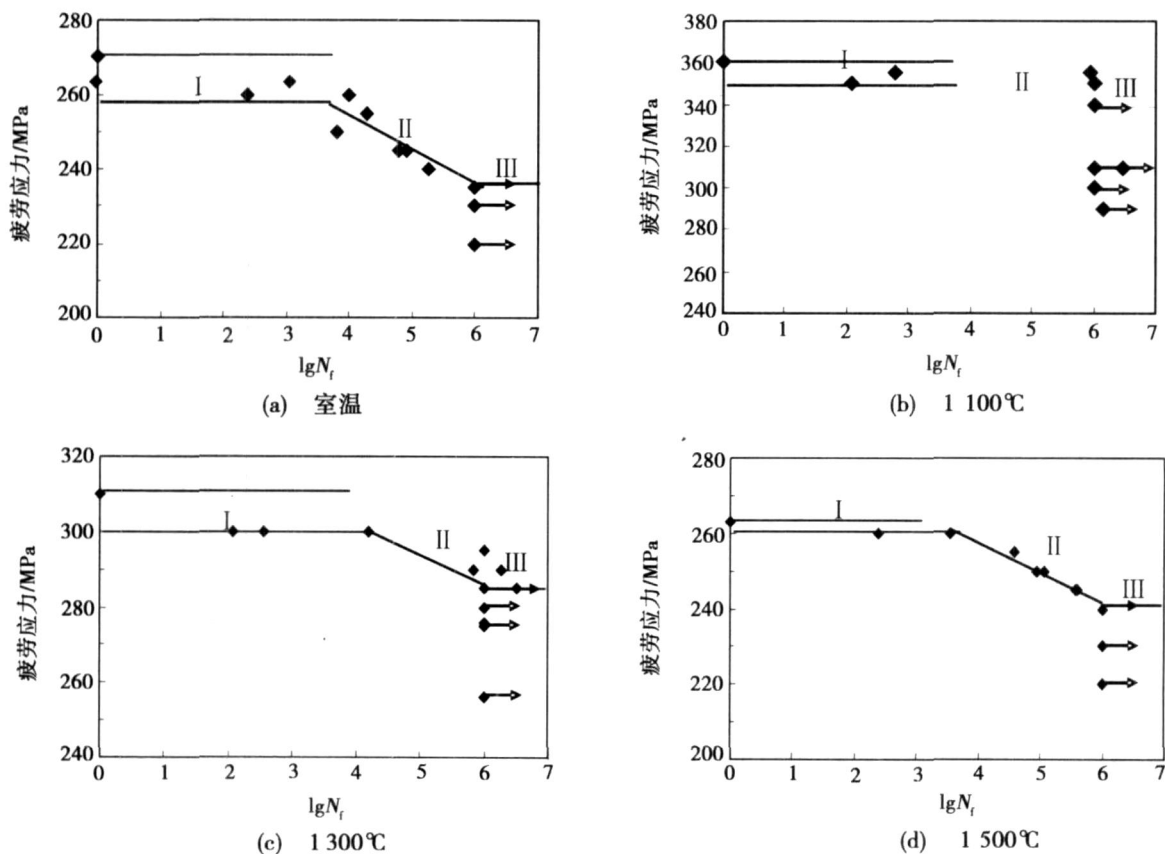


图 2 不同温度下 3D-C/SiC 复合材料的 S-N 曲线

Fig 2 Cyclic stress versus cycles to failure of 3D-C/SiC composite at different temperatures ($f=60$ Hz, $R=0.1$)

由图 2(a)可见, 3D - C/SiC 复合材料在室温下的 $S-N$ 曲线大致可分为短寿命区 (区 I, $N_f < 10^4$ 周)、中寿命区 (区 II, $10^4 < N_f < 10^6$ 周) 和长寿命区 (区 III, $N_f > 10^6$ 周) 三个区域, 最大疲劳应力接近拉伸强度时, 断裂发生在短寿命区, 疲劳寿命与最大疲劳应力的相关性较小; 最大疲劳应力介于 235 ~ 260 MPa 时, 大多数断裂发生在中寿命区, 随着疲劳应力的降低, 疲劳寿命延长, 这表明此区域疲劳损伤具有累加性。应力低于 235 MPa 时, 材料在 10^6 周内不会断裂。可见, 3D - C/SiC 与 2D - CMCs 有类似的 $S-N$ 曲线特征, 但相对 2D - CMCs, 3D - C/SiC 中寿命区的斜率比较小, 疲劳应力范围也较窄, 表现出较强的抗疲劳性能。

温度增加至 1100 时, $S-N$ 曲线 [图 2(b)] 的中寿命区 (区 II) 几乎不存在, 疲劳应力范围变得很窄, 3D - C/SiC 表现出极强的抗疲劳性能。当温度增加至 1300 时, $S-N$ 曲线的中寿命区开始显现, 但与室温相比, 其斜率比较平坦, 疲劳应力范围也较窄 [图 2(c)]。温度升高至 1500 时, $S-N$ 曲线的中寿命区的斜率和疲劳应力范围均增大, 图 2(d), 其特征与室温相似。

取循环基数为 10^6 周, 3D - C/SiC 在室温、1100、1300 和 1500 的疲劳极限分别是 235、350、285 和 240 MPa。与表 1 数据比较不难看出, 在本文实验温度范围内, 疲劳极限与比例极限和拉伸强度随温度有相似的变化规律, 也与比例极限和拉伸强度有较强的关联性, 较高的比例极限、拉伸强度对应于较高的疲劳极限。这预示着 3D - C/SiC 可能具有与一维、二维纤维、2.5D - CMCs 不完全相同的疲劳损伤机制。

为了更直观地比较 3D - C/SiC 复合材料在不同温度下的 $S-N$ 曲线, 图 3 给出了 3D - C/SiC 在不同温度下的疲劳应力 (S) 与拉伸强度 (S_0) 的比值 S/S_0 和 $\lg N_f$ 关系曲线。

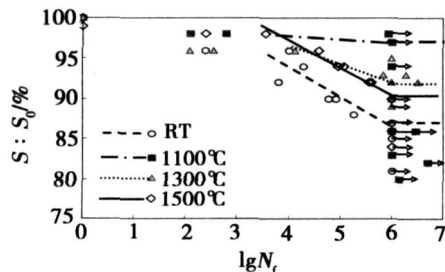


图 3 不同温度下 3D - C/SiC 的 $S/S_0 - \lg N_f$ 曲线

Fig 3 $S/S_0 - \lg N_f$ curves of 3D - C/SiC at different temperatures

从图 3 可以看出, 室温、1100、1300、1500 的疲劳极限分别约为拉伸强度的 87%、97%、94% 和 90%。在室温至 1100 内, $S-N$ 曲线的斜率随着温

度的升高而减小, 10^6 后随温度升高而增加, 该规律与比例极限和拉伸强度随温度的变化规律恰好相反。

3.2 频率和应力比对 $S-N$ 曲线的影响

3D - C/SiC 复合材料在 1500, 应力比为 0.1, 加载频率为 20 Hz 条件下的 $S-N$ 曲线如图 4 所示。从图 4 可以看出, 在中寿命区 (区 II) 内, 当疲劳应力相同时, 20 Hz 的疲劳寿命总是低于 60 Hz 的疲劳寿命。随着疲劳应力的增加, 20 Hz 时疲劳寿命的下降速率要比 60 Hz 时大一些。若疲劳循环基数定为 10^6 周, 20 Hz 的疲劳极限可以认为是 230 MPa, 低于 60 Hz 的疲劳极限。这说明 3D - C/SiC 在 1500 的疲劳寿命主要取决于疲劳应力持续的时间。

图 5 为 3D - C/SiC 复合材料在 1500, 加载频率为 60 Hz, 应力比 0.5 条件下的 $S-N$ 曲线。从图 5 可以看出, 在中寿命区 (区 II) 内, 当疲劳应力相同时, 应力比 0.5 时的疲劳寿命总是低于应力比 0.1。随着疲劳应力的增加, 应力比 0.5 时的疲劳寿命的下降速率要比应力比 0.1 大一些。若疲劳循环基数定为 10^6 周, 应力比 0.5 时的疲劳极限可以认为是 230 MPa, 低于应力比 0.1 时的疲劳极限。当最大疲劳应力一定时, 随应力比的增大, 施加于试样的平均应力相应增大, 循环应力幅相应减小。

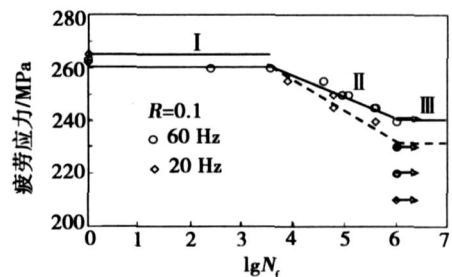


图 4 加载频率对 1500 疲劳寿命的影响

Fig 4 Influence of frequency on fatigue life of 3D - C/SiC at 1500

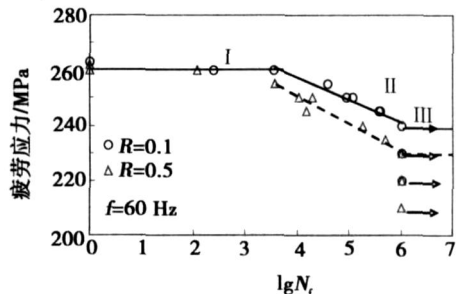


图 5 应力比对 1500 疲劳寿命的影响

Fig 5 Influence of stress ratio on fatigue life of 3D - C/SiC composite at 1500

4 结论

(1) 3D - C/SiC 在室温、1300、1500 的 $S-N$ 曲

线可分为短寿命区、中寿命区和长寿命区,在 1 100 几乎不存在中寿命区。在室温至 1 100 内, S - N 曲线的斜率随着温度的升高而减小, 1 100 后随温度的升高而增加,这与疲劳极限与比例极限随温度的变化规律正好相反。

(2)若取循环基数为 10^6 周, 3D - C/SiC 复合材料在室温、1 100、1 300和 1 500 的疲劳极限分别为 235、350、285和 240 MPa,约为其拉伸强度的 87%、97%、94%和 90%。疲劳极限与比例极限和拉伸强度随温度有相似的变化规律。

(3)在 1 500 ,提高应力比、降低频率,疲劳极限减小。

参考文献

- 1 Ohnabe H, Masaki S, Onozuka M et al Potential application of ceramic matrix composites to aero-engine components Composites, Part A30, 1999: 489 ~ 496
- 2 Nikhilesh Chawla, Yahya K Tur, Holmes J W et al High-frequency fatigue behaviour of woven-fabric-reinforced polymer-derived ceramic matrix composites J. Am. Ceram. Soc., 1998; 81: 1 221 ~ 1 230

3 Holmes J W. Influence of stress ratio on the elevated temperatures fatigue of a silicon carbide fiber-reinforced silicon nitride composite J. Am. Ceram. Soc., 1991; 74 (7): 1 639 ~ 1 645

4 Dalnaz A, Reynaud P, Rouby D et al Mechanical behavior and damage development during cyclic fatigue at high-temperature of a 2.5D C/SiC composite. Comp. Sci Tech., 1998; 58 (2): 693 ~ 699

5 Reynaud P. Cyclic fatigue of ceramic-matrix composites at ambient and elevated temperatures Comp. Sci Tech., 1996; 56 (3): 809 ~ 814

6 Prewo K M. Fatigue and stress rupture of silicon carbide fiber-reinforced glass-ceramic J. Mater Sci., 1987; 22 (10): 2 695 ~ 2 701

7 Zhu S, Mizuno M, Kagawa Y et al Creep and fatigue behavior of SiC-fiber/SiC composites at high temperature Mater Sci Eng., 1997; A225: 69 ~ 77

8 Zhu S, Mizuno M, Kagawa Y et al Creep and fatigue behavior of enhanced SiC-fiber/SiC composites at high temperatures J. Am. Ceram. Soc., 1998; 81 (9): 2 269 ~ 2 277

(编辑 任涛)

2009年《炭素技术》杂志征订启事

《炭素技术》杂志创刊于 1982年,是经国家科委和新闻出版署批准的国内外公开发行的炭素专业科技期刊。国内统一刊号 CN 22 - 1147 - TQ,国际标准刊号 ISSN 1001 - 3741,广告经营许可证号吉工商广字: 220204400009。办刊宗旨是交流技术、传播信息,促进炭素工业及炭材料学科技术进步。主要介绍我国炭素工业及相关行业的生产技术、科学试验、理论研究、经营管理、市场信息,使用设备的开发与更新,产品质量监督、环境保护与综合利用、检测、计算机在炭素生产领域应用等方面的经验成果;报导炭材料学科包括钢铁冶金用炭材料、铝用炭材料、电炭材料、碳纤维及复合材料、活性炭、金刚石及石墨层间化合物、各种新型炭材料、特种炭材料等的新产品、新工艺以及炭材料应用技术研究、有关炭材料领域和炭素工业国外先进技术和发展动态。

《炭素技术》设有专家讲座、实验研究、经验交流、综合述评、计算机应用与控制、技术改造、节能环保、行业信息、消息报导、炭素文摘、专利等栏目。

《炭素技术》杂志目前已成为中国科技核心期刊,已加入《中国期刊网》、《中国学术期刊》(光盘版)全文数据库、万方数据系统数字化期刊群、中文科技期刊数据库,同时还被《美国化学文摘》、《俄罗斯化学文摘》等国外情报机构检索;是《CAJ - CD规范》执行优秀期刊。

《炭素技术》的发行面覆盖了全国的炭素厂家、有关的科研院所、大专院校及生产炭素用原料、机械设备等生产单位。

本刊为大 16开版本,双月刊,单价 15.00元,全年订价 90.00元。国内邮发代号: 12 - 308,全国各地邮局均可订阅,也可与编辑部联系补订。

本刊承接彩色、黑白广告业务,热忱地为国内外企业服务,宣传产品,推广技术,树立企业形象。

地址:吉林市哈达湾和平街 9号《炭素技术》编辑部 邮编: 132002

开户行:工商银行吉林市分行哈达湾办事处

户名:中钢集团吉林炭素股份有限公司

帐号: 080221060900000171

电话: 0432 - 2749715 (传真) 2749271

E - mail: tsjsbjb@126.com