

循环变形提高 SiC 纤维增强铝基复合材料强度及塑性*

I. 实验现象

柳永宁 楚丽平 何家文

杨盛良

(西安交通大学金属材料强度国家重点实验室, 西安 710049) (国防科学技术大学化学与材料系, 长沙 410073)

摘要 对 SiC 纤维增强铝基复合材料经不同周次循环变形载荷后强度与塑性的测试表明, 循环变形可使其强度、塑性均有所提高, 经循环变形载荷作用 10 周次, 抗拉强度提高 20%; 作用 100 周次, 强度提高 30%, 塑性也有类似的变化。这一现象与传统疲劳理论不一致, 通过对基体材料、SiC 纤维体以及复合材料的各自独立循环变形实验可知, 这一现象同循环变形过程中纤维与基体的界面结合强度适度降低有关。这种降低有助于复合材料的强度与塑性的配合。

关键词 SiC 纤维增强铝基复合材料 循环变形, 界面结合强度

中图法分类号 TB331, TG113.25 文献标识码 A 文章编号 0412-1961(2002)04-0376-05

CYCLE LOADING INCREASING THE STRENGTH AND PLASTICITY OF SiC FIBER REINFORCED ALUMINUM COMPOSITES

I. Experimental Phenomenon

LIU Yongning, CHU Leping, HE Jiawen

State Key Laboratory of Mechanical Behavior of Metallic Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049

YANG Shengliang

Department of Chemistry and Materials Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073

Correspondent: LIU Yongning, professor, Tel: (029)2669071, Fax: (029)3237918,

E-mail: ynliu@xjtu.edu.cn

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.59731020)

Manuscript received 2001-07-23, in revised form 2001-10-08

ABSTRACT It was found that the strength and plasticity of SiC fiber reinforced composites can be increased by a certain cycle fatigue loading. The tensile strength was increased by 20% after 10 cycles fatigue loading and by 30% after 100 cycles loading. The plasticity showed the similar phenomenon. This phenomenon contradicts traditional fatigue and damage theory. Through a series of specially designed experiments, it can be concluded that the phenomenon does not result from cycling hardening of aluminum matrix, fiber reinforcement and the composite itself, but from the strength change of the interface between the matrix and fiber. The fatigue makes the interfacial strength decrease to an appropriate level, which is favorable to combination of the strength and plasticity of the composite.

KEY WORDS SiC fiber reinforced aluminum matrix composite, cyclic deformation, interfacial shear strength

SiC、B、C 等纤维增强的铝基及镁基复合材料由于具有高强度、高模量、低密度、导电导热性能良好以及疲劳

裂纹扩展抗力高等优点, 成为航空航天领域的重要材料。与短纤维以及颗粒增强复合材料相比, 长纤维增强复合材料的成本昂贵、制造工艺复杂, 故对该系统的研究相对较少^[1]。通常, 界面在复合材料中起传递载荷的作用, 故界面结合好坏对复合材料的性能有重要影响。实验与理论计算的结果表明存在一个适当的结合强度, 过高和过低的结合强度都不能获得性能优良的复合材料^[2]。由于此类材料主要用于航空航天领域, 疲劳载荷对材料性能的影响显

* 国家自然科学基金重点项目 59731020 和上海交通大学访问学者基金资助

收到初稿日期: 2001-07-23, 收到修改稿日期: 2001-10-08

作者简介: 柳永宁, 男, 1956 年生, 教授

得尤为重要。采用顶出法^[3]和碎断法^[4]的研究结果都表明,界面剪切强度随疲劳载荷与周次的增加而降低,这种变化对复合材料整体性能的影响尚未见报道。本文将在前期工作^[4]的基础上,系统研究疲劳对复合材料整体性能的影响

1 实验方法

实验采用铝基复合材料丝状试样,由超声波浸渍法制成,丝的直径为 0.5 mm,每根丝中包含有数百根无芯 SiC 纤维,纤维的直径为 9.15 μm ,体积分数为 42.9%。

拉伸实验与疲劳实验在 SANSI 电子拉伸实验机上进行,拉伸速率为 1 mm/min。疲劳预载荷实验采用位置控制模式,由于试样是柔性的,不能承受压缩载荷,所以应力比取 $\sigma_{\text{min}}/\sigma_{\text{max}}=0$ 。加载频率为 2 Hz,载荷在一个范围变化,但最大值不超过试样的屈服应力

丝状试样的标距长度为 20 mm,两端用胶固定在钢的托板上,实验机夹头夹持在托板部分,以保证不伤害试样。实验过程的数据采集以及拉伸曲线分析处理都采用计算机处理,以保证数据的准确性。

2 实验结果

图 1 为丝试样横截面的金相照片。

图 2 为经 10 和 100 周次不同循环变形预载荷处理后,复合材料丝试样抗拉强度与疲劳载荷的关系曲线。结果显示,经轻微循环变形处理,抗拉强度较原始态均有提高。经 10 周次疲劳(图 2a)抗拉强度约提高 20%;经 100 周次疲劳(图 2b)抗拉强度提高了 30%。线性拟合结果(见图 2 中拟合线)表明这种变化是显著的。图 2a 中拟合线斜率为 0.283(MPa/MPa),图 2b 中的拟合线斜率为 0.301(MPa/MPa)。

图 3 为在两种周次下断裂应变随循环变形载荷的变化曲线。从图可见,随循环变形周次与载荷的增加,断裂应变与抗拉强度变化类似也随之增加。循环变形 10 周次

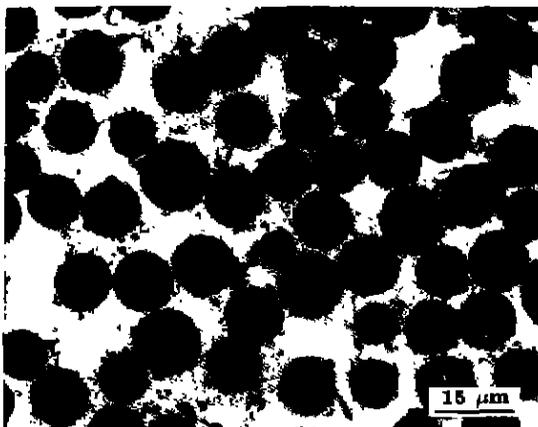


图 1 SiC 纤维增强铝基复合材料丝状试样横断面金相照片

Fig.1 Cross sectional metallograph of SiC fiber reinforced Al-base composite

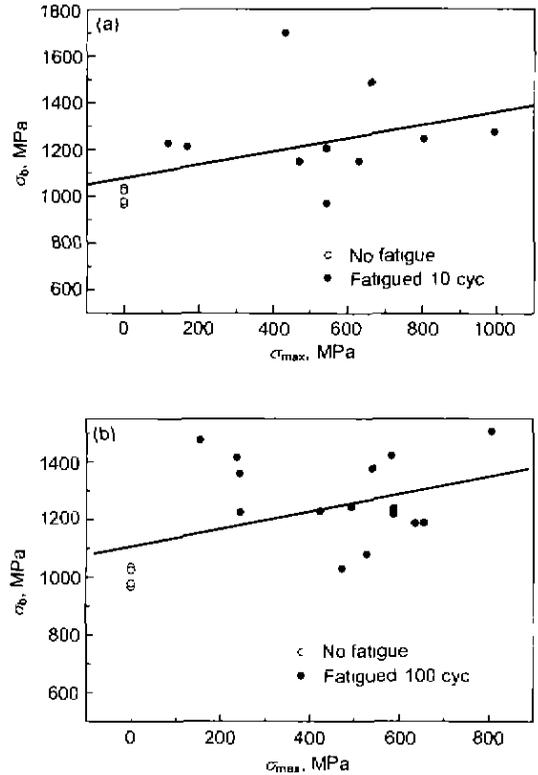


图 2 复合材料丝试样的抗拉强度与最大循环变形应力以及循环变形周次的关系

Fig.2 Relationships of tensile strength (σ_b) and maximum cycle deformation stress (σ_{max}) for the composite fatigued by 10 cyc (a) and 100 cyc (b) (\bullet , \circ tested, — linear fitting)

(图 3a),应变约增加 15%;循环变形 100 周次(图 3b),应变约增加 30%。图 3 中断裂应变数据比图 2 中强度数据少,原因是部分试样在拉伸时,在试样与钢托板粘接部位有局部滑脱现象,但试样最终还是被拉断,所以强度数据是有效的,而延性数据无效,因为延性数据是从拉伸曲线上残留应变部分获得的

图 4 为复合材料丝试样断口的 SEM 照片。从图可见:未经循环变形的断口中纤维相对较圆整,纤维断面相对较规则平整(图 4a);而经 500 MPa 最大应力作用下循环 100 周次后,断口纤维处产生了较多的碎片(图 4b),说明纤维在断裂前吸收了较多的功,在断裂时产生碎化,纤维端头碎化产生体积膨胀,使得端头尺寸远大于纤维的原始直径。

3 分析与讨论

以上结果表明,短期循环变形载荷预处理对复合材料产生了强韧化效果,这与传统材料的疲劳现象不一致,通常情况下,循环变形会导致材料内部损伤,使材料的强度、塑性以及疲劳寿命降低。根据材料疲劳损伤理论^[5,6],

$$D = 1 - \frac{W_f^n}{W_f^n} \quad (1)$$

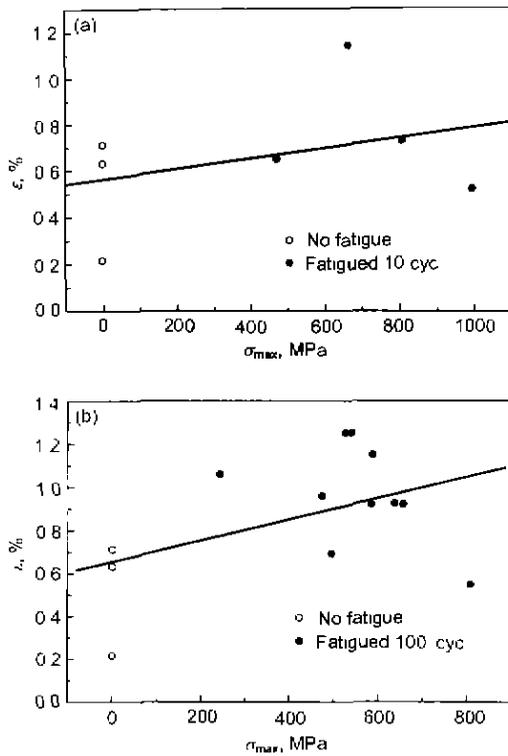


图3 两种循环变形周次下复合材料丝试样的断裂应变与最大循环变形应力的关系

Fig.3 Relationships of fracture strain (ϵ_f) and maximum cycle deformation stress (σ_{max}) for the composite fatigued by 10 cyc (a) and 100 cyc (b) (•, ○ tested, — linear fitting)

式中, D 为材料损伤因子, $D=1$ 表明材料无损伤, $D < 1$ 表明材料有损伤; W_f 为材料的静态延性, W_f^n 为材料循环变形 n 周次后的静态延性, W_f 可以表达为

$$W_f = \frac{1}{1 + n'} \sigma_f \epsilon_f \quad (2)$$

式中, n' 为材料循环硬化指数, σ_f 和 ϵ_f 分别为材料的静态断裂强度与断裂应变, 通常 $W_f^n < W_f$, 即 $D \leq 1$, 表明材料有损伤. 如果将图2与图3的实验数据代入式(1, 2), 由于循环变形后断裂应变与断裂强度均有明显提高, 将会得到 $W_f^n > W_f$, 由式(1)则得到 $D > 1$, 这与疲劳损伤理论产生矛盾.

由于复合材料是由纤维与基体两类材料组成, 基体、纤维、界面以及复合材料整体都会在循环变形过程发生变化. 对上述诸因素进行独立研究将有助于理解循环变形使复合材料产生强韧化的原因.

3.1 SiC 纤维的循环变形

图5为SiC纤维循环变形的实验结果. 在不同载荷下循环变形10周次后再测其断裂强度, 结果显示一定周次的循环变形对随后的断裂强度没有影响, 线性拟合结果显示斜率等于零. 这表明复合材料经循环变形产生的强韧

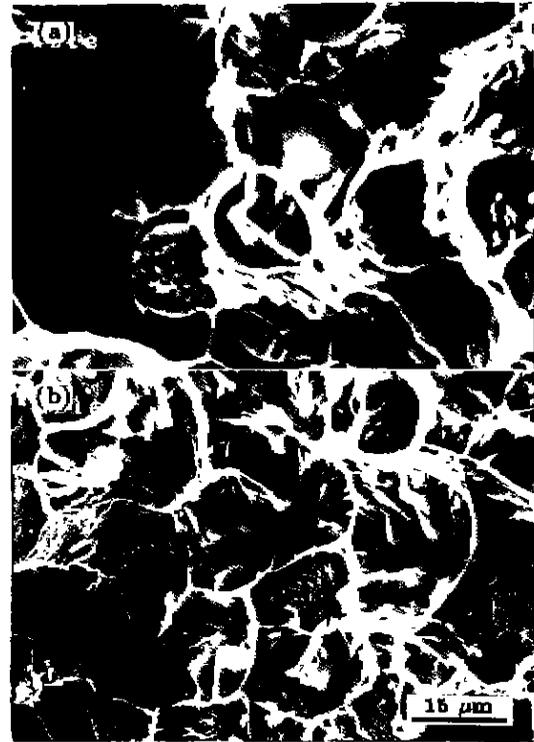


图4 复合材料试样非循环变形与循环变形后断面 SEM 照片

Fig.4 SEM photographs of fracture surface of composite wire (a) non-cycle deformation (b) cycle deformation at stress of 500 MPa for 100 cyc

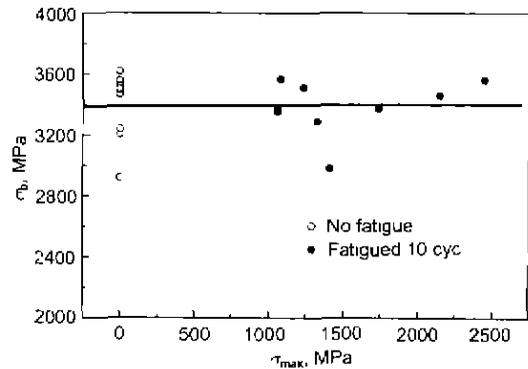


图5 SiC 纤维断裂强度与最大循环变形应力的关系

Fig.5 Relationship of fracture strength (σ_b) and maximum cycle deformation stress (σ_{max}) of SiC fiber fatigued by 10 cyc (•, ○ tested; — linear fitting)

化现象不是由于纤维本身引起的.

3.2 铝基体的循环变形

图6为铝基体材料在不同循环变形条件下屈服强度(图6a)与抗拉强度(图6b)的变化. 从图可见, 经10周

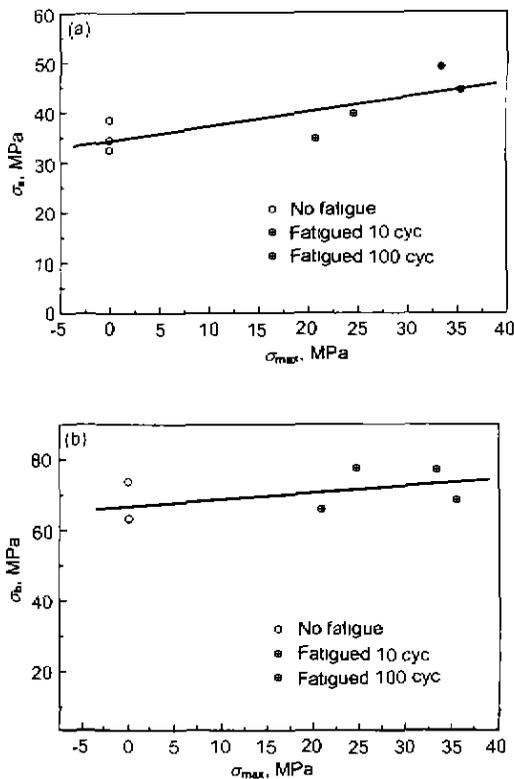


图6 铝基体的屈服强度、断裂强度与最大循环变形的关系

Fig.6 Relationships of yield strength σ_y (a) and fracture strength σ_b (b) with maximum fatigue stress σ_{max} of aluminum matrix at different cyclic numbers (\bullet , \circ tested, — linear fitting)

次与 100 周次的疲劳, 铝基材料的屈服强度与抗拉强度均发生了变化, 但两者的增加值均未超过 15 MPa。由混合定理可知

$$\sigma_c = (1 - \varphi_f)\sigma_m + \varphi_f\sigma_f \quad (3)$$

式中, σ_c 为复合材料的强度, σ_m 为基体材料的强度, σ_f 为纤维或增强相的强度, φ_f 为纤维或增强相的体积分数。由图 5 可见, SiC 纤维经循环变形后强度没有变化, 即 $\Delta\sigma_f=0$, 有

$$\Delta\sigma_c = (1 - \varphi_f)\Delta\sigma_m \quad (4)$$

即复合材料的强度变化必须由基体的强度升高来完成。图 2 测量的结果表明 $\Delta\sigma_c=200-300$ MPa, 而铝基体经循环变形后强度只增加 15 MPa 左右, 此种增加应和形变强化有关, 其数值与图 2 测试结果相差一个数量级, 因而铝基体的变化不是复合材料强度变化的原因。

3.3 复合材料本身的循环硬化

传统材料在疲劳过程中会产生循环硬化与循环软化现象, 为了研究 SiC 纤维增强铝基复合材料本身是否也存在这一现象, 本工作制作了 SiC 纤维单向排列的复合材料

板, 纤维沿板的实验拉伸方向排列, 板的厚度为 5 mm, 纤维体积分数为 40%, 试样标距为 30 mm。在 MTS 800 实验机上进行拉压对称循环实验, 采用应变控制模式, 观察载荷的变化情况, 应变幅 $\varepsilon_1/2$ 从 1.00×10^{-3} 到 4.00×10^{-3} 变化, 即从弹性范围到屈服直至断裂, 没有发现载荷随循环周次增加而增加的现象, 即没有循环硬化现象。图 7 给出了几个不同应变幅下记录的载荷时间曲线, 可以看出, 载荷不随循环周次变化。这一实验说明, 图 2 的实验结果不是由于复合材料本身在循环变形过程中产生的循环硬化现象导致的。

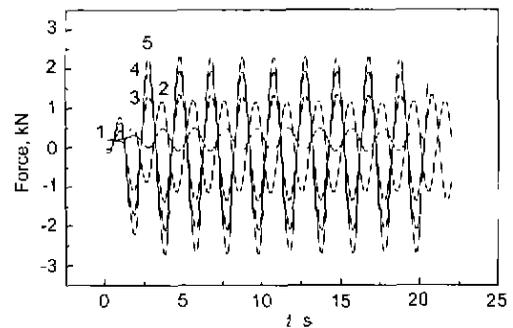


图7 复合材料板试样应变波载荷与时间的关系曲线

Fig.7 Curves of load and time ($L-t$) for thick plate specimens at strain controlling mode (strain amplitude: 1 - 2.05×10^{-3} , 2 - 1.00×10^{-3} , 3 - 1.20×10^{-3} , 4 - 2.00×10^{-3} , 5 - 2.60×10^{-3})

3.4 界面在循环变形过程中的变化

界面在复合材料中起着传递载荷的作用, 因而界面结合状况对复合材料性能有重要的影响, 在疲劳过程中, 界面结合强度将发生变化^[3,4]。图 8 是采用碎断法测量铝基 SiC 单纤维试样界面剪切强度随疲劳周次变化的结果^[4], 随疲劳周次增加, 界面剪切强度降低, 关于界面对纤维增强金属基复合材料性能的影响, 目前只有一些定性的理论与解释^[7], 较强与较弱的结合都会导致复合材料强度降低, 显然, 循环变形使得界面的结合强度向一个适中的水平过渡, 故经一定周次循环变形后, 复合材料的整体性能

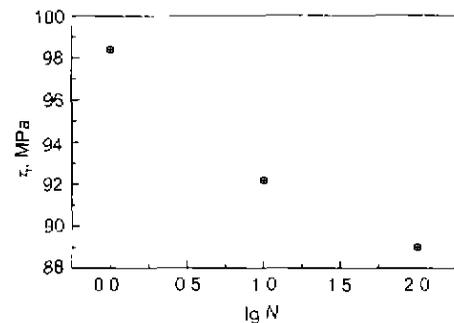


图8 疲劳周次与界面剪切强度的关系^[4]

Fig.8 Relationship of interfacial shear strength (τ) and cyclic fatigue number (N)^[4]

有所提高.

4 结论

(1) 经一定循环变形周次和不同循环变形载荷预处理后, 丝状 SiC 纤维增强铝基复合材料的强度与延性约提高 15%~30%. 这一现象与传统疲劳损伤理论相矛盾.

(2) 对复合体各组成单元力学性能测试表明, 这一现象与复合材料界面结合强度在疲劳过程中的变化有关.

参考文献

- [1] Wu R J. *Acta Metall Sin.* 1997, 33: 78
(吴人洁. 金属学报. 1997, 33: 78)
- [2] Goda K. *Compos Sci Technol*, 1999; 59: 1871
- [3] Guo S Q, Kagawa Y. *Acta Mater*, 1997; 45: 2257
- [4] Liu Y N, Kang W, He J W, Zhu Z M. *Acta Mater Compos Sci*, 2001; 18(4): 42
(柳永宁, 康伟, 何家文, 朱祖铭. 复合材料学报. 2001; 18(4): 42)
- [5] Shander B L. *Fundamentals of Cyclic Stress and Strain*. Wisconsin: The University of Wisconsin Press, 1992: 157
- [6] Shang D G, Yao W X. *Int J Fatigue*, 1999; 21: 187
- [7] Clyue T W, Withers P J. *An Introduction to Metal Matrix Composites*. Cambridge: Cambridge University Press, 1993: 166