

挤压 SiCw/LD2 复合材料的疲劳裂纹扩展

哈尔滨工业大学 王德尊 叶枫 姚忠凯
中国科学院金属研究所 王中光 于维成

本文测量了挤压 19% (Vol) SiCw/LD2 复合材料疲劳裂纹扩展的门槛值 ΔK_{th} 和扩展速率 da/dN 。并在扫描电镜下观察了疲劳断口形貌。结果表明, 复合材料在门槛值附近和中速扩展区的疲劳裂纹扩展抗力高于基体材料 LD2 合金。复合材料纵向试样于 170℃ 时效后的疲劳裂纹扩展抗力高于 150℃ 时效。疲劳裂纹扩展过程包括不在一个面内的微裂纹长大和联接这些微裂纹的 (I + II) 复合型裂纹的扩展。与裂纹相垂直的晶须有效地阻碍了微裂纹的长大。

关键词: SiC 晶须, 铝基复合材料, 门槛值, 疲劳裂纹扩展速率

Fatigue Crack Propagation in Squeezed SiCw/LD2 Composite

Wang Dezun Ye Feng Yao Zhongkai
(Harbin Institute of Technology)

Wang Zhongguang Yu Weichen
(Institute of Metal Research, Academia Sinica)

The fatigue crack threshold and fatigue crack propagation rate in 19% Vf-SiCw/LD2 composite have been measured. Fracture surfaces of the composite after fatigue was observed by SEM. The results show that, in near threshold and medium fatigue crack propagation region, the fatigue propagation resistance of the composites are higher than the matrix alloy. The propagation resistance of L-T specimens for the composite aged at 170℃ is higher than that of aged at 150℃. The course of fatigue crack propagation includes that microcrack growth in different plane and (I + II) mixed-mode cracks propagation which are between the microcracks. The whiskers normal to cracks exhibit effective resistance to the cracks growth.

Key words: SiC whisker, Al matrix composites, threshold, fatigue crack propagation rate

前 言

碳化硅晶须增强铝基复合材料表现出许多优良的使用性能。如高的比弹性模量、比强度、耐磨性和尺寸稳定性。而且还具有良好的二次加工性⁽¹⁾, 如热挤压、热轧和切削加工。因而, 它作为一种高性能材料而受到人们极大的重视。对 SiCw/Al 复合材料疲劳行为的研究表明^(2,3,4), 这种材料具有优良的疲劳性能, 推迟了疲劳裂纹的萌生, 具有较高的疲劳裂纹亚临界扩展阻力和较高的疲劳极限。挤压 SiCw/Al 复合材料可以做作为一种结构材料在工程中应用。本文以这种材料为对象, 研究组织状态和热处理工艺与疲劳裂纹扩展行为的关系, 对这类材料的工程应用是很有意义的。

一、材料及试验方法

试验材料为 β -SiC 晶须增强 LD2 复合材料。晶须的直径为 0.1~1 μ m, 长度为 30~100 μ m。材料中晶须的体

积分数为 19%。材料用压力铸造法制造, 而后热挤压成 40mm×4mm 的带材。带材中的晶须沿挤压方向排列。挤压时晶须被折断, 其长度为 8~15 μ m。

材料的热处理制度为: 520℃保温 20min, 淬入室水中, 然后分别于 170℃时效 15h 和 150℃时效 10h。时效后基体中的沉淀相如文献 [5] 所示。170℃时效后的沉淀相为针状 G、P 区, 而 150℃时效后的沉淀相为球状 G、P 区。纵向试样经 170℃和 150℃时效后的屈服强度分别为 420MPa 和 371MPa。

疲劳试样如图 1 所示, 为三点弯曲梁。试样的截取方位分纵向和横向两种。纵向试样与挤压方向一致, 其中裂纹扩展方向与晶须排列方向平行。疲劳试验在 1kN 电液伺服疲劳试验机上进行, 采用应力控制, 正弦波加载, 应力比 $R=0.1$, 频率 $f=50\text{Hz}$ 。用降载法测量门槛值 ΔK_{th} , 而后增加少量载荷, 于恒载荷作用下测量裂纹扩展速率 da/dN 。裂纹长度用放大 80 倍光学显微镜测量。试样断裂后用扫描电镜观察了断口形貌。

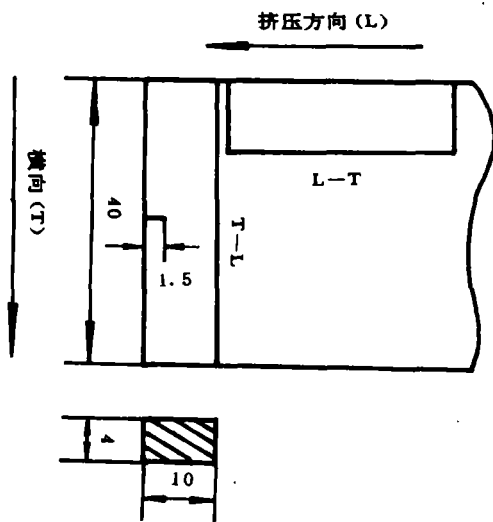


图1 疲劳试样的取样方位和几何形状

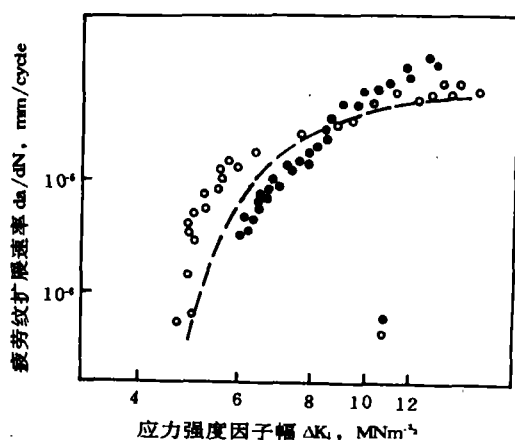


图2 SiCw/LD2和LD2经520℃固溶处理，
150℃时效10h后的 $da/dN-\Delta K_I$ 曲线
●纵向试样 ○横向试样 ----LD2合金

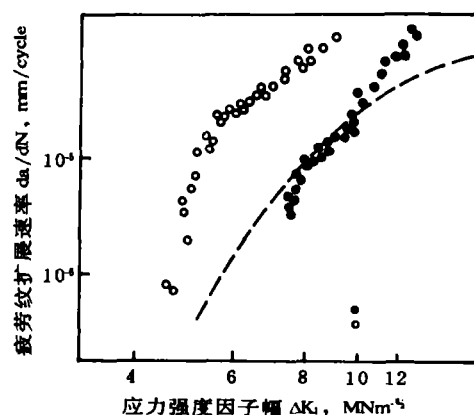


图3 SiCw/LD2和LD2经520℃固溶处理，
170℃时效10h后的 $da/dN-\Delta K_I$ 曲线
●纵向试样 ○横向试样 ----LD2合金

的高。如将170℃时效试样的 da/dN 与150℃时效的比较低，可以发现，纵向试样170℃时效后的门槛值比同种试样150℃时效的高。而近门槛值区和中速区的 da/dN 比150℃时效的低。在LD2合金中也出现了类似情况，170℃时效后的 da/dN 比150℃时效后的低。但复合材料横向试样的情况则不同，两种时效温度下的门槛值基本相同，而且170℃时效后的 da/dN 比150℃时效的高。

表1 SiCw/LD2和LD2合金的疲劳门槛值

材料	试样取向	时效温度 (°C)	门槛值 ΔK_{th} (MPa \sqrt{m})
SiCw/LD2	纵向	170	6.84
		150	6.03
	横向	170	4.60
		150	4.52
LD2		170	4.77
		150	4.50

二、试验结果

图2为SiCw/LD2复合材料和LD2合金经520℃固溶处理并150℃时效10h后的疲劳裂纹扩展速率曲线。由图可知，复合材料纵向试样的疲劳裂纹扩展门槛值较高，而横向试样和LD2合金的门槛值较低，并且相近。在门槛值区和中速区，复合材料纵向试样的疲劳裂纹扩展速率 da/dN 最低，而横向试样的 da/dN 最高。但在高速扩展区，三种试样的 da/dN 相近，而且其中纵向试样的 da/dN 稍高。

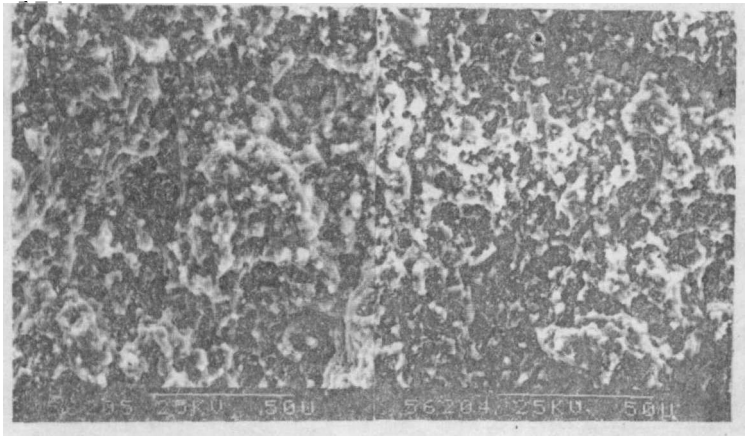
图3为SiCw/LD2复合材料和LD2合金经520℃固溶处理并170℃时效15h后的疲劳裂纹扩展速率曲线。其中三种试样在门槛值附近和中速区的 da/dN 相对变化规律与150℃时效的情况（图2）基本相同。纵向试样的 da/dN 比LD2合金的低，而横向试样的 da/dN 比LD2合金

三种试样经不同热处理后的门槛值如表1所示。

SiCw/LD2复合材料纵向试样经520℃固溶处理并170℃时效后的疲劳断口形貌如图4所示。断口十分粗糙，密集地分布着大量的峰峦和低谷，峰峦和低谷大致呈等轴状，每个峰峦和低谷的大小约为10~30μm不等。这说明一个峰峦和低谷中包含了大量的基体晶粒和晶须。峰峦的坡面大都是比较陡的峭壁，这说明裂纹扩展过程中，连接峰峦和谷底的裂纹的扩展是(I+II)复合型的。仔细观察还可发现，在峭壁上明显地留下了塑性变形的痕迹。此外，在断口上还可看到大量的晶须，它们都与断口垂直。这种断口形貌特征说明，峰顶和谷底可能对应于不在一个面内的微裂纹，这些不同面内的微裂纹通过其间的复合型裂纹联接起来。一个微裂纹的连续长大范围与一个峰峦或一个低谷的范围相对应。而且在长大过程中会遇到大量晶须的阻碍。因此，在断口上显露出大量的晶须。仔细观察与断口轮廓面倾斜的峭壁会发现，壁上呈现出塑性变形痕迹，但极少发现晶须。这

说明, 当连接两个不同平面微裂纹的复合型裂纹扩展时, 有可能避开晶须的阻碍。综上所述, 根据断口形貌特征分析, 复合材料纵向试样中疲劳裂纹的扩展至少应包括以下两个部分: 一是与一个峰峦或低谷相对应的范围内的微裂纹的长大, 一是将这些不在一个面内的微裂

纹连接起来的复合型裂纹的扩展。这样就形成了很粗糙的疲劳断口。此外, 从断口的侧剖面形貌 (图 5) 可知, 随着 ΔK_I 的增大, 从峰顶至谷底的高度差增大, 即相互平行的微裂纹间距增大。这个间距大约为 $20 \sim 50 \mu\text{m}$ 。



(a) $\Delta K_I = 6.83 \text{ MNm}^{-1/2}$ (b) $\Delta K_I = 8.35 \text{ MNm}^{-1/2}$

图 4 SiCw/LD2 纵向试样经 520°C 固溶处理, 170°C 时效后的疲劳断口形貌

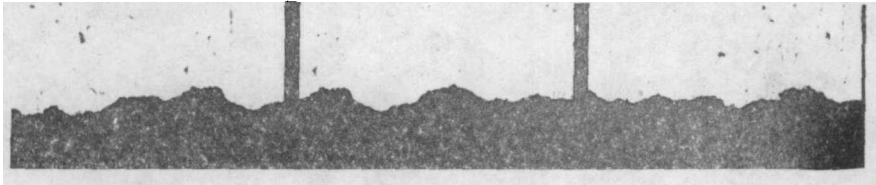
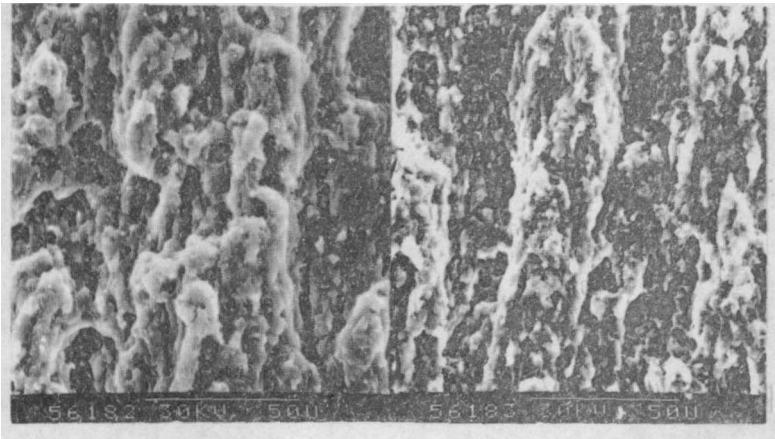


图 5 SiCw/LD2 纵向试样经 520°C 固溶处理, 170°C 时效后的疲劳断口纵剖面轮廓 裂纹扩展方向为从右至左 ($\times 100$)

图 6 为复合材料横向试样经 520°C 固溶处理并 170°C 时效后的疲劳断口形貌。同样, 断口形貌也十分粗糙。但与纵向试样不同的是断口上起伏的峰峦和低谷呈长条状, 平行于试样中的晶须排列方向和裂纹扩展方向。可以认为, 当疲劳裂纹扩展时, 试样中出现了许多

微裂纹, 它们不在一个面内, 而且高度不同。这些微裂纹向前长大成长条状, 而后相互连接, 便形成了长条状的高低起伏的断口形貌。此外, 还发现, 横向试样断口上出现一些晶须, 但其数量比纵向试样断口上的少。这说明在裂纹扩展途经中所遇到的晶须数量少。



(a) $\Delta K_I = 4.82 \text{ MNm}^{-1/2}$ (b) $\Delta K_I = 6.51 \text{ MNm}^{-1/2}$

图 6 SiCw/LD2 复合材料横向试样经 520°C 固溶处理, 170°C 时效后的疲劳断口形貌

三、分析和讨论

向试样与 LD2 合金相比, 具有较好的疲劳性能, 即有较高的门槛值 ΔK_{th} 和较低的中速区 da/dN 。这是两种材料疲劳裂纹扩展方式不同所造成的。LD2 合金疲劳裂纹扩

由上述试验结果可知, 同种处理状态的复合材料纵

展属于典型的塑性金属材料的疲劳裂纹扩展, 断口在宏观上比较平坦, 微观上可观察到清晰的疲劳条带^[5]。而 SiCw/LD2 纵向试样疲劳裂纹扩展, 如上所述, 则包括不同面内的微裂纹的长大及其联接, 断口十分粗糙。微裂纹长大时则会受到 SiC 晶须的阻碍, 这是 SiCw/LD2 纵向试样具有较高 ΔK_{th} 和较低中速区 da/dN 的一个原因。其次, 联接二微裂纹之间的裂纹, 造成了裂纹的偏转。这种偏转裂纹的扩展动力包括 I 型分量 Δk_I 和 II 型分量 Δk_{II} 。因而, 偏转裂纹的有效应力强度因子 ΔK_{eff} 为^[6]:

$$\Delta K_{eff} = (\Delta k_I^2 + \Delta k_{II}^2)^{1/2}$$

其中 $\Delta k_I = \cos^3(\theta/2) \Delta K_I$

$$\Delta k_{II} = \sin(\theta/2) \cos^2(\theta/2) \Delta K_I$$

式中 θ 为复合型裂纹的偏转角。由图 5 可知, 复合材料中的 θ 角约为 $50^\circ \sim 60^\circ$ 。因而, 相应的 ΔK_{eff} 约为 $0.7 \Delta K_I$ 。因此, 裂纹偏转降低了其扩展驱动力, 致使 ΔK_{th} 增高和 da/dN 降低。再次, 粗糙的裂纹面将会引起裂纹闭合效应。锯齿状裂纹所引起的闭合应力强度因子 K_{CL} 为:

$$K_{CL} = K_{max} [x \tan \theta / (1 + x \tan \theta)]^{1/2} \quad (7)$$

式中 $x = U_I / U_{II}$ 。 U_I 和 U_{II} 分别为裂纹闭合时 II 型裂纹面相对位移的 I 型分量和 II 分量。 x 值一般为 $0.1 \sim 0.5$, 如取 $x = 0.3$, 则 $K_{CL} / K_{max} \approx 0.3$ 。由此可见, 显著的闭合效应降低了有效应力强度因子, 从而使 ΔK_{th} 增大和 da/dN 降低。

其次, 由上述试验结果可知, 复合材料纵向试样经 170°C 时效比 150°C 时效具有较高的 ΔK_{th} 和较低的 da/dN 。这因为 170°C 时效后, 复合材料基体中沉淀的第二相为针状 G、P 区; 而 150°C 时效后, 沉淀析出相为球状 G、P 区^[6]。因此, 170°C 时效后具有较高的屈服强度。这样一来, 使得以基体塑性变形为基本过程的微裂纹长大比较困难。因而, 170°C 时效后的试样具有较高的疲劳裂纹扩展阻力。LD2 合金中也出现类似的情况。

再次, 由上述试验结果还可看出, 在两种时效温度下, 复合材料纵向试样的疲劳裂纹扩展阻力均比横向试样的高。这是因为在纵向试样中, 裂纹扩展时遇到较多晶须的阻碍, 在断口上所暴露出的晶须数量较多(图 4)。

而在横向试样中断口呈长条状, 而且暴露出的晶须数量较少(图 6)。这表明, 微裂纹长大的范围较大, 而且所遇到晶须的阻碍较少。于是横向试样表现出较小的裂纹扩展阻力。

由于 SiCw/LD2 复合材料中存在大量的晶须, 而且晶粒尺寸极为细小, 其断裂韧性较低。因此在 $da/dN \sim 4K$ 曲线上, 裂纹的亚临界扩展区较窄, 较快进入快速扩展区。而且, 在快速扩展区, SiCw/LD2 的 da/dN 较 LD2 合金的低。

四、结 论

1. 改变时效温度可以改变 SiCw/LD2 复合材料的疲劳裂纹扩展抗力。 520°C 固溶处理后经 170°C 时效 15h 的纵向试样具有较高的门槛值 ΔK_{th} 和较低的裂纹扩展速率 da/dN 。

2. 在挤压态的 SiCw/LD2 复合材料中, 纵向试样较横向试样具有较高的疲劳裂纹扩展抗力。

3. 在 SiCw/LD2 复合材料中, 疲劳裂纹扩展过程包括不在一个面内的微裂纹的长大和连接其间的复合型裂纹的扩展。

参考文献

1. 姚忠凯, 兵器材料科学与工程, 1989 年 8 月, P65
2. Williams, D. R., Fine, M. E. Proc. ICCM-V, San. Diego, U. S. A., 1985, P639~670
3. Shang, J.-k., Ritchie, R. O., Metall. Trans. 1989, 20A, P897~908
4. 刘钧, 王德尊, 姚忠凯, 兵器材料科学与工程, 1992 年 4 月, P1~11
5. J. Liu, D. Z. Wang, C. K. Yao, W. C. Yu, Z. G. Wang, J. Mater. Sci. Letters, 1992, 11, P970~972
6. Suresh, S., Metall. Trans., 1985, 16A, P241
7. Vasudevan, A. K., Suresh, S., Metall. Trans, 1985, 16A, P475

(上接第 19 页)

2. 500°C 淬火处理可以提高 SiCp/Al 复合材料的强度, 并且随复合材料中氧化铝含量的增加, 淬火处理对强度的影响增大。

3. 采用封闭非真空热压制备 SiCp/2024Al 复合材料可以提高其强度, 但塑性被降低。

4. 封闭非真空热压制备的 SiCp/2024Al 复合材料具有很宽的固溶处理范围($500 \sim 560^\circ\text{C}$), 但其拉伸强度对固溶处理温度没有明显的依赖性。

参 考 文 献

1. P. Niskanen and W. R. Mohn, Adv. Mater. Process., 3 (1988) 材料工程

39

2. M. W. Mahoney and A. K. Chosh, ICCM VI Vol. 2, P372
3. W. R. Mohn and D. Vakolatovich, J. Mater. Eng., 10, 3 (1988) 225
4. 毕敬, 马宗义, 申红伟等, 材料工程, 2 (1992) 21
5. 马宗义, 毕敬, 吕毓雄等, 材料科学进展, 6, 5 (1992) 445
6. Ma Zongyi, Bi Jing, Lu Yuxiong et al, Wear, 148 (1991) 287
7. Z. Y. Ma, J. Bi, Y. X. Lu et al., Scr. Mater, 1993, to be published
8. 毕敬, 马宗义, 吕毓雄等, 第七届全国复合材料学术会议文集, 上册, C-7