

# 退火处理对 $\text{SiC}_w/\text{Al}$ 复合材料应力腐蚀开裂行为的影响\*

胡 津<sup>1,2</sup> 罗仁胜<sup>1</sup> 费维栋<sup>1</sup> 姚忠凯<sup>1</sup> 赵连成<sup>1</sup>

1. (哈尔滨工业大学材料科学与工程学院 哈尔滨 150001)

2. (中国科学院金属腐蚀与防护研究所 沈阳 110015)

**摘要** 采用双悬臂梁试验方法,研究了不同温度的退火处理对纯铝基复合材料及LY12铝基复合材料应力腐蚀开裂行为的影响。应力测试及透射电镜观察结果表明,不同温度的退火处理通过松弛复合材料的残余应力及改变基体的位错组态改善了复合材料的应力腐蚀性能。随退火温度的升高,两种复合材料的应力腐蚀裂纹稳态扩展速率降低;临界应力场强度因子  $K_{ISCC}$  增高;复合材料的应力腐蚀敏感性显著改善。

**关键词** 复合材料, 应力腐蚀开裂, 退火处理, 稳态扩展速率, 临界应力场强度因子

## 1 前言

近年来,对SiC晶须增强铝基复合材料的应力腐蚀开裂(SCC)行为虽已有一些研究<sup>[1-4]</sup>,但就其应力腐蚀开裂行为影响因素及如何改善其应力腐蚀开裂行为的研究报道却很少见。鉴于 $\text{SiC}_w/\text{Al}$ 复合材料在许多领域的应用越来越重要,深入研究该种复合材料的应力腐蚀开裂行为极为必要。

一般来讲,材料的组织及内应力状态可通过热处理的方式加以改变,从而改善材料的抗应力腐蚀性能。本工作采用双悬臂梁试验方法研究退火处理对SiC晶须增强铝基复合材料应力腐蚀开裂行为的影响规律及影响机制。

## 2 材料制备及试验方法

所用的SiC晶须增强纯铝基复合材料及LY12铝基复合材料采用挤压铸造法制备,晶须的体积分数为20%。用线切割制取尺寸为 $17 \times 17 \times 70\text{mm}$ 的双悬臂梁试样(DCB),如图1所示。将含缺口的两侧表面经抛光后进行热处理。其工艺如表1。用10%HF溶液腐蚀掉DCB试样表面层,加载后浸入3.5%NaCl溶液中,进行腐蚀试验。

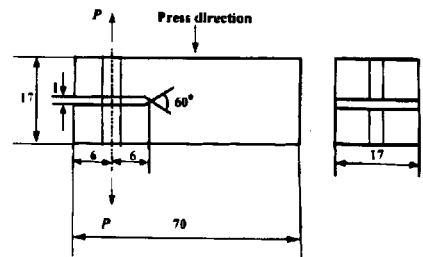


Fig.1 Dimension of DCB specimen (in mm)

\* 国家自然科学基金资助项目

1998-11-05 收到 1999-03-15 收到修改稿

定期更换腐蚀溶液, 用读数显微镜测量裂纹长度。采用 X2001 型 X 射线应力测定仪测定材料宏观残余应力 ( $\sin^2\phi$  法), CrK $\alpha$  特征 X 射线, 衍射面为 {311}, 测定残余应力的试样即为 DCB 试样。在 Philips CM-12 透射电镜上观察复合材料中基体的位错组态及微观结构。操作电压 120kV, 透射电镜试样用离子减薄方法进行最终减薄。

Table 1 Annealing of specimens of the composites under study

Composites	Annealing temperature( $^{\circ}$ C)		Annealing time (h)
	Middle temperature	High temperature	
SiC <sub>w</sub> /Al	200	600	4
SiC <sub>w</sub> /LY12	200	440	4

### 3 试验结果

图 2 示出了 SiC<sub>w</sub>/Al 及 SiC<sub>w</sub>/LY12 复合材料宏观残余应力与退火温度的关系曲线。采用挤压铸造法制备的 SiC 晶须增强铝复合材料中存在较大的残余应力, 表面为压应力, 心部为拉应力。由图可见, 退火处理能显著消除宏观残余应力。中温退火可将半数宏观残余应力消除, 高温退火后, 材料中的宏观残余应力几乎消失殆尽。

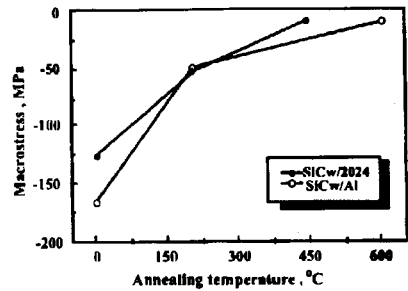


Fig.2 Relationship between macrostress in SiC<sub>w</sub>/Al composite and annealing temperature

图 3a 是两种复合材料典型的裂纹扩展速率与应力场强度因子关系曲线的示意图, 图中的平台即为裂纹稳态扩展速率。图 3b 是两种复合材料的裂纹稳态扩展速率与退火温度的关系曲线。图中表明, 两种复合材料铸态时的稳态扩展速率最高, 随退火温度的提高, 相应的稳态扩展速率明显降低。

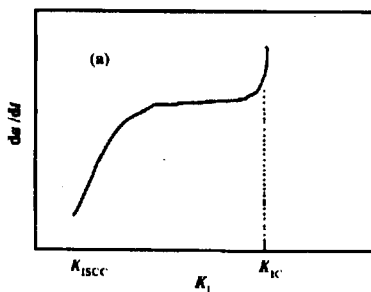


Fig.3a Schematic of crack propagation rate versus stress intensity

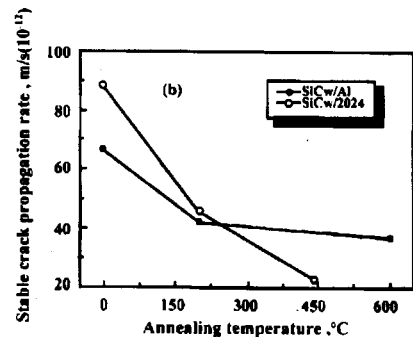


Fig.3b Dependence of stable crack propagation rate of SiC<sub>w</sub>/Al composite on annealing temperature

图 4 是临界应力场强度因子  $K_{ISCC}$  与退火温度的关系曲线, 可见两种复合材料的临界应力场强度因子均随退火温度的升高而增大, 由此表明退火处理有效地提高了复合材料的应力腐蚀抗力。

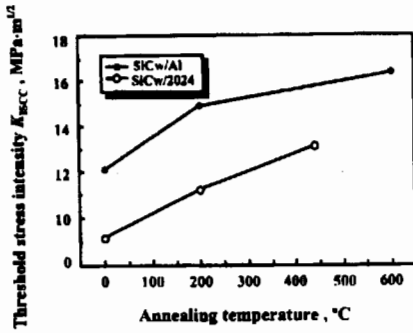


Fig.4 Relationship between threshold stress intensity  $K_{I SCC}$  and annealing temperature

中可见因回复而形成的清晰的位错网络(图6b)。此时两种复合材料基体中的位错密度明显低于铸态空冷复合材料基体中的位错密度,这表明在退火冷却过程中基体塑性变形程度很小。高温退火后,复合材料基体中的位错密度更低,这与在较高温度下位错的湮灭有关。

图5、图6分别是经不同温度退火处理后  $SiC_w/LY12$  复合材料的 TEM 照片。由图可见,铸态复合材料中基体的位错密度最高,且成缠结状(图5a,6a)。众所周知,  $SiC$  晶须的热膨胀系数仅为铝合金的  $1/6$ ,所以当复合材料从较高温度冷却时,两者收缩不一致,必然会引起残余应力<sup>[5]</sup>。中温退火后,在纯铝基复合材料中可以看到基体不仅发生了回复而且发生了再结晶(图5b)。对  $LY12$  基复合材料而言,基体主要发生回复,在基体

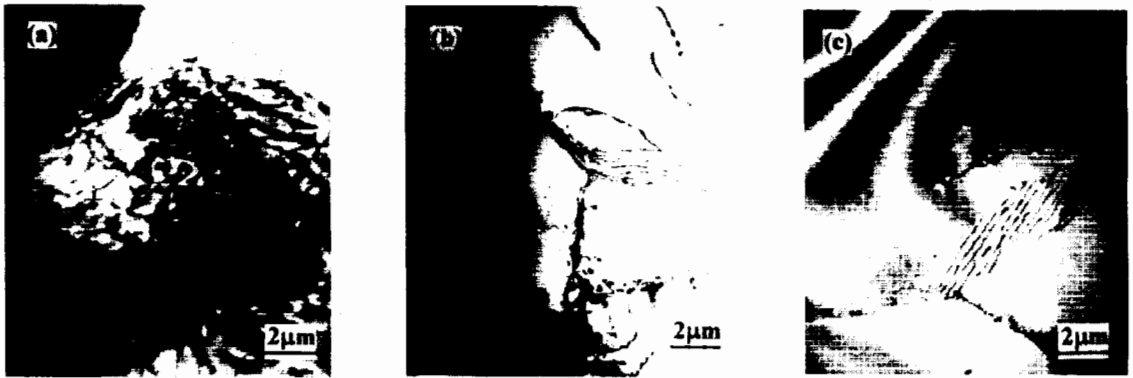


Fig.5 TEM photos of dislocation states of pure aluminum matrix composite ( $[g=111]$ ) (a) as-cast, (b) annealed at  $200^{\circ}C$ , (c) annealed at  $600^{\circ}C$



Fig.6 TEM photos of dislocation states of  $SiC_w/LY12$  composite ( $[g=111]$ ) (a) as-cast, (b) annealed at  $200^{\circ}C$ , (c) annealed at  $440^{\circ}C$

## 4 分析与讨论

以上结果表明: 退火处理主要从两个方面来影响复合材料的应力腐蚀行为, 即降低残余应力和改善基体组织结构。退火处理不仅能有效地松弛宏观残余应力, 还能通过基体局部塑性变形来松弛微观残余应力。不同的退火温度通过改变基体的位错组态, 影响基体的组织结构。

晶须同基体铝之间存在较大的热膨胀系数差异, 当复合材料从较高温度冷至室温时, 由于 SiC 晶须与基体铝收缩的不一致性, 使得 SiC 晶须产生压缩弹性变形, 其附近基体产生拉伸弹性变形, 造成该区基体偏离平衡电位, 基体相对于附近的 SiC 晶须成为阳极区。在腐蚀介质中, SiC 晶须作为阴极与其附近的基体构成微电池, 基体金属作为阳极相被溶解掉, 从而在晶须附近形成显微裂纹。很显然, 如果微电池的电动势增大, 将会加速阳极的溶解速度和程度。对复合材料在 200°C 进行退火处理后, 由于在保温过程中发生了局部塑性变形, 松弛了部分残余应力, 使得基体微观弹性变形程度减小, 在腐蚀介质中, 微电池电动势减小, 从而该区基体金属溶解的程度和速度都减小, SiC 晶须周围形成显微裂纹的速度和尺寸也都减小, 复合材料的应力腐蚀抗力提高。退火温度升高, 残余应力松弛程度增大, SiC 晶须附近基体弹性变形程度更小, 从而进一步提高复合材料的应力腐蚀抗力。

阳极溶解首先发生在那些能量密度和化学位较高的地方, 如位错缠结和露头处。压铸态复合材料中 SiC 晶须附近基体中高密度位错和位错缠结将加速和提高该区域基体溶解速度和程度。位错密度增加, 晶格的弹性畸变程度增大, 导致该区阳极电位降低, 加速了基体金属的溶解。而对应的 200°C 退火态及 600°C 退火态复合材料中位错的这种作用将明显减小。退火温度的升高, 使得 SiC 晶须本身及其附近基体的弹性应变程度降低, 在腐蚀介质中, SiC 晶须及其附近基体构成的微电池电动势减小, 从而使得复合材料显微裂纹形成速度及程度都降低, 并最终导致 SiC<sub>w</sub>/Al 复合材料应力腐蚀临界应力场强度因子  $K_{ISCC}$  提高, 应力腐蚀裂纹扩散速率降低。

综上所述, 退火处理不仅降低了复合材料的宏观残余应力, 而且有效地降低了位错密度及晶须周围基体的弹性畸变程度, 所以使复合材料的 SCC 抗力大为改善。

## 5 结论

1) 退火处理能有效消除复合材料的宏观残余应力和微观残余应力, 中温退火后, 宏观残余应力消除近半, 高温退火后, 宏观残余应力消除殆尽。

2) 退火处理导致复合材料基体的位错组态发生明显的变化。

3) 退火处理能有效地改善 SiC 晶须增强铝基复合材料的应力腐蚀抗力, 随退火温度的升高, 两种复合材料应力腐蚀开裂裂纹稳定扩散速率明显降低, 应力腐蚀临界应力场强度因子  $K_{ISCC}$  显著提高。

4) 高温退火处理比中温退火处理能更有效地改善复合材料的应力腐蚀抗力。

## 参 考 文 献

- 1 曹 利, 李光福, 姚忠凯. 中国腐蚀与防护学报, 1990,10(3):269
- 2 清水义明, 西村俊弥, 田村学. 材料与环境, 1991,40(6):406
- 3 Yoshiaki shimizu, Toshiyasu Nishimura, Iwao Matsushima. Materials Science & Engineering, 1995, 198A:113
- 4 姚红宇, 花迎春, 宋余九, 涂名旌. 中国腐蚀与防护学报, 1996,16(2):206
- 5 Davis L C, Alliwon J E. Metall. Trans., 1993, 24A(11):2487

## EFFECT OF ANNEALING TREATMENT ON STRESS CORROSION CRACKING BEHAVIOR OF SiC WHISKER REINFORCED ALUMINUM COMPOSITE

HU Jin<sup>1,2</sup> LUO Ren-sheng<sup>1</sup> FEI Wei-dong<sup>1</sup> YAO Zhong-kai<sup>1</sup> ZHAO Lian-cheng<sup>1</sup>

1. (School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

2. (Institute of Corrosion and Protection of Metals, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110015)

### ABSTRACT

The aluminum matrix composite reinforced by SiC whisker have been extensively studied because of their excellent properties. But little was known about the stress corrosion cracking (SCC) behavior of SiC<sub>w</sub>/Al composite. In the present research, the effect of annealing treatment on the SCC behavior of SiC<sub>w</sub>/Al and SiC<sub>w</sub>/2024 composites was investigated using Double-Cantilever-Beam (DCB) specimen in 3.5% NaCl solution. The results indicated that annealing treatment improved the SCC behavior of the two composites by relaxing residual stress and changing matrix microstructure. With the increase in annealing temperature, the SCC propagation rate of the two composites decreased and the  $K_{ISCC}$  increased. The TEM observation showed that dislocation density in matrix of the composites decreased greatly after annealing treatment. As a result, the sensibility to SCC of the composites was improved.

**KEY WORDS** SiC<sub>w</sub>/Al composite, Stress corrosion cracking, Annealing treatment