

# 时效对 $\text{SiC}_w/\text{Al-Li-Cu-Mg-Zr}$ 复合材料组织和性能的影响\*

Influence of Ageing on Microstructure and Tensile Properties  
of a  $\text{SiC}_w/\text{Al-Li-Cu-Mg-Zr}$  Composite

董尚利 姜龙涛 茅建富 崔约贤 杨德庄 (哈尔滨工业大学材料科学与工程学院)

Dong Shangli Jiang Longtao Mao Jianfu Cui Yuexian Yang Dezhuang

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

**[摘要]** 对挤压铸造法制备的  $\text{SiC}_w/\text{Al-Li-Cu-Mg-Zr}$  复合材料经  $190^\circ\text{C}$  时效不同时间的微观组织和性能进行了研究。结果表明, 复合材料在该时效温度下的主要沉淀强化相为  $\delta'$  相, 第二强化相为  $S'$  相, 复合材料中的高密度位错促进了  $\delta'$  相的长大和  $S'$  相的沉淀析出过程。时效对复合材料具有明显的强化作用, 而对复合材料拉伸断口的影响甚微。

**关键词:** 铝锂基复合材料 碳化硅晶须 时效 微观组织 拉伸性能

**[Abstract]** Microstructure and tensile properties of a  $\text{SiC}_w/\text{Al-Li-Cu-Mg-Zr}$  composite, fabricated by squeeze casting method and then aged at  $190^\circ\text{C}$ , were investigated by use of hardness measurement, SEM, TEM and tensile test. The results indicate that the major and secondary strengthen precipitates in the composite are  $\delta'$  ( $\text{Al}_3\text{Li}$ ) and  $S'$  ( $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ) phase, respectively. Confirming from the TEM observations, the growth rate of  $\delta'$  phase and nucleation of  $S'$  phase are accelerated by the high density dislocations in the composite matrix. Aging treatment has obvious influence on strength of the composite, while little effect on fractographs.

**Keywords:** aluminum-lithium matrix composite  $\text{SiC}$  whisker aging microstructure tensile property

## 1 前言

碳化硅晶须或颗粒增强铝锂基复合材料 ( $\text{SiC}/\text{Al-Li}$ ) 是最近引起人们广泛关注的一种新型铝基复合材料, 该复合材料充分利用铝锂合金与  $\text{SiC}$  晶须增强铝基复合材料的性能优势, 其比刚度、比强度、抗热冲击能力、微屈服强度和压缩微蠕变抗力均优于普通铝基复合材料, 显示出良好的作为航空航天材料应用的性能潜力<sup>[1,2]</sup>。同以往采用的许多基体合金相类似, 该种复合材料的铝锂基体合金亦为典型的时效硬化型合金, 故可以借时效处理进一步优化其性能。对  $\text{SiC}_w/\text{Al}$  复合材料时效行为的研究表明,  $\text{SiC}_w/\text{Al}$  复合材料的时效工艺不能简单借用基体合金的处理制度, 对某一特定的  $\text{SiC}_w/\text{Al}$

复合材料必须充分考虑材料制备工艺、基体合金种类及时效条件对其时效特性的影响<sup>[3,4]</sup>。因此, 本文在采用挤压铸造法成功制备  $\text{SiC}$  晶须增强五元  $\text{Al-Li-Cu-Mg-Zr}$  合金基复合材料的前提下, 研究了  $190^\circ\text{C}$  各种时效条件下复合材料的微观组织和性能, 以期为合理制定该复合材料的热处理工艺奠定基础。

## 2 材料与试验方法

$\text{SiC}_w/\text{Al-Li-Cu-Mg-Zr}$  复合材料采用挤压铸造法制备<sup>[5]</sup>, 热挤压二次加工<sup>[6]</sup>后获得  $\phi 12.5\text{mm}$  的棒材。复合材料中晶须体积分数及各合金元素的含量如表 1 所示。试验材料经线切割制成硬度和拉伸试样。试样的热处理工艺为:  $530^\circ\text{C}$  盐浴固溶处理 40min, 水淬后在  $190^\circ\text{C}$  时效, 时间 0~100h, 然后于  $-20^\circ\text{C}$  保存。用于对比试验

\* 国家自然科学基金资助项目

的基体合金，其制备和处理工艺同上（见表2）。

表1 试验用复合材料的化学成分

成分	SiC <sub>w</sub>	Li	Cu	Mg	Zr	Fe, Si	Al
含量, wt%	22 (Vol%)	2.12	2.18	1.09	0.13	<0.10	余

表2 拉伸试样的时效处理工艺

时效状态	A. Q.	U. A.	P. A.	O. A.
复合材料	530℃/40min	5h	12h	75h
基体合金	530℃/40min	5h	22h	75h

硬度试样为垂直挤压方向切取的2mm厚的圆片。圆片端面最终经600#砂纸仔细打磨。硬度测试在HV-200型硬度计上进行，所用载荷为10kg，加载时间15s。拉伸试验采用片状试样（标距为12.5mm），在Instron-1186万能电子拉伸机上进行，十字头恒位速度为0.5mm/min。TEM分析在Philips CM-12透射电镜上进行，加速电压为120kV，试样的最终减薄方式为低温离子减薄。拉伸断口观察采用S-570扫描电镜。

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 时效硬化行为

根据对SiC<sub>w</sub>/Al-Li-Cu-Mg-Zr复合材料及其基体合金的时效硬化动力学过程（见图1）的分析，可将复合材料的时效硬化特性描述如下：

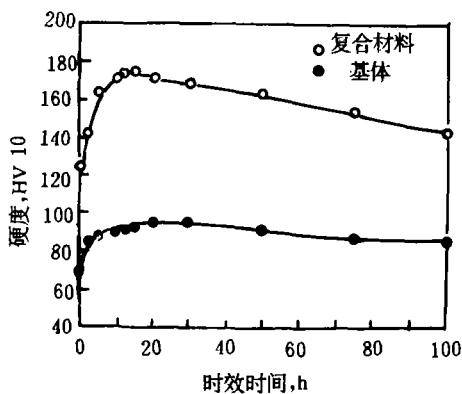


图1 复合材料及基体合金的时效硬化曲线

(1) 在所观察的时效时间内，复合材料的硬度水平明显高于基体合金，表明SiC晶须对基体合金具有良好的强化作用，晶须在基体中已有效承载；

(2) 复合材料的峰值硬度出现在12.5h至15h之间，基体合金则为20~25h，说明晶须加入后使基体合金的时效峰提前；

(3) 时效初期复合材料硬度上升的幅度明显高于基体合金，可能是在此段时间内复合材料中沉淀相的析

出速度快于、或沉淀相的数量多于基体合金所致；

(4) 峰时效过后，复合材料的硬度在50h之前变化较为平缓，之后迅速下降；而基体合金硬度下降的速度则相对小得多，显示出复合材料在连续时效50h后进入到严重过时效阶段。

#### 3.2 时效过程中微观组织的变化

在复合材料的固溶与时效样品中，用TEM可观察到大量的位错，这是由于晶须与基体热膨胀性能的差别所致<sup>[3,4]</sup>。对固溶试样的分析结果显示，复合材料及基体合金的选区电子衍射花样中，存在有 $\delta'$ 相( $\text{Al}_3\text{Li}$ )微弱的超点阵斑点，但用暗场难以观察到 $\delta'$ 相。说明 $\delta'$ 相在淬火过程中就有析出，只因尺寸太小，在透射电镜下尚不能清楚观察到其形貌。随时效的进行， $\delta'$ 相长大，达到一定尺寸时，在暗场下可见。复合材料及基体合金190℃短时间(2.5h)时效的样品中，可观察到大量球形 $\delta'$ 相且均匀分布在晶内。随时效时间的延长，复合材料中的 $\delta'$ 相长大速度高于基体合金。在相同时效时间内，复合材料与基体合金中的 $\delta'$ 形态与分布无明显差别。图2a和b便为复合材料与基体合金20h时效样品中 $\delta'$ 相的典型形貌。结果说明，晶须对 $\delta'$ 相沉淀前期，即形核阶段影响较小，其影响作用主要表现为对 $\delta'$ 相长大过程的促进。

在复合材料短时间时效的样品中，还可发现 $S'$ 相( $\text{Al}_2\text{CuMg}$ )首先在晶须附近的基体中以针状或片状析出，随时效时间的延长，析出数量增多并发生长大，远离晶须的基体中也可观察到 $S'$ 相存在。大量的观察结果表明，接近峰时效时， $S'$ 相在复合材料中的分布状态已趋于均匀。而基体合金在其峰时效以前只在亚晶界上析出 $S'$ 相，峰时效过后，随时效时间的增加而在晶内开始析出。图2c与d分别为复合材料时效10h样品中 $S'$ 相的典型形貌。表明，SiC晶须的加入促进了 $S'$ 相优先析出。这与复合材料中所存在的大量位错有关<sup>[4]</sup>。

此外，在复合材料固溶和时效态试样中还可观察到少量的 $\beta'$ 相( $\text{Al}_3\text{Zr}$ )，其形貌(球形)与大小几乎不受时效的影响，并常常为 $\delta'$ 相所包围，形成( $\beta' + \delta'$ )复合相，如图2a中箭头所指。这说明， $\beta'$ 在淬火过程中就可产生。

#### 3.3 时效对拉伸性能的影响

在考察复合材料190℃时效硬化规律的基础上，选取典型状态对SiC<sub>w</sub>/Al-Li-Cu-Mg-Zr复合材料及其基体合金的室温拉伸性能进行了测试与分析。拉伸试样的时效处理工艺如表2所示。复合材料与基体合金的屈服强度、断裂强度以及断裂应变由图3给出，可见复合材料在欠时效和峰时效状态下的综合拉伸性能较好。由图

3a 和 b 可以看出,随着时效时间的延长,复合材料强度的变化规律与硬度相同。复合材料在固溶处理状态下的硬度最低,峰时效则达到最高,尔后降低。时效初期,固溶体中析出细小的  $\delta'$  相, $\delta'$  相与母体相共格,对基体具有很好的强化作用,随时效时间的延长, $\delta'$  相发生长

大,强化作用增强。另一方面,复合材料中会发生  $S'$  相的优先析出和长大,使复合材料的强度与硬度进一步增加。当  $\delta'$  相和  $S'$  相长大到一定程度时,位错与强化相的作用机制发生变化,硬度与强度达到峰值,之后减小。

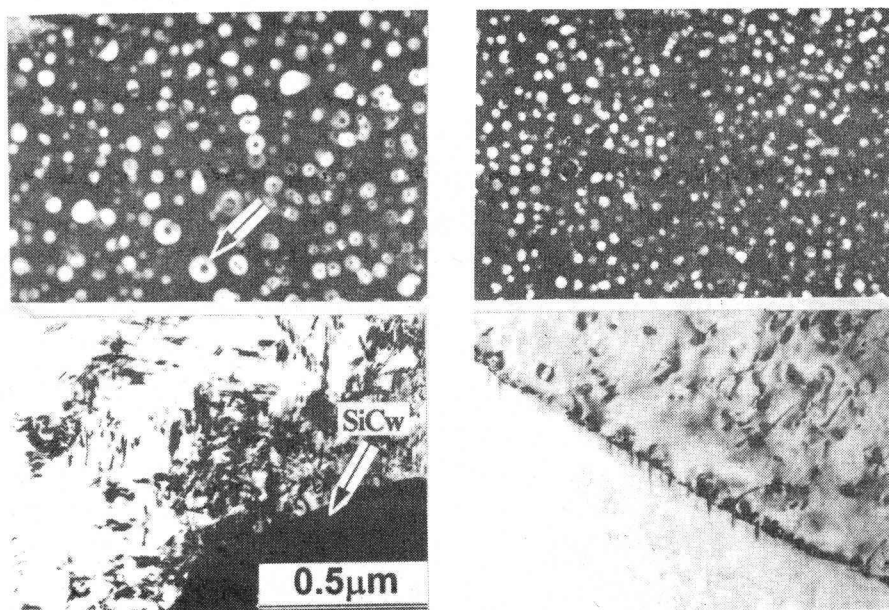


图 2 复合材料与基体合金中  $\delta'$  和  $S'$  沉淀相的典型形貌

(a) 复合材料,  $\delta'$  相, 20h; (b) 基体合金,  $\delta'$  相, 20h;  
(c) 复合材料,  $S'$  相, 10h; (d) 基体合金,  $S'$  相, 10h

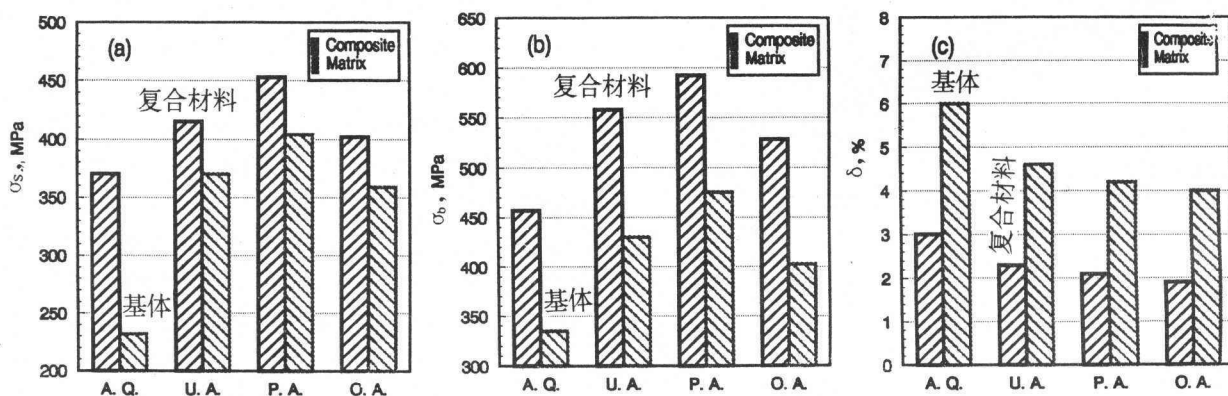


图 3 不同时效状态下复合材料与基体合金的拉伸性能

(a) 屈服强度; (b) 断裂强度; (c) 延伸率

各种时效条件下,复合材料的强度均较基体合金高,除晶须的承载作用外,还有以下两个原因:其一,复合材料中存在高密度的位错,对运动的位错产生林位错阻力,是复合材料强化的一个重要原因;其二,沉淀相的强化作用,复合材料中的高密度位错在加速  $\delta'$  相

长大过程的同时,又可促进  $S'$  相的析出,从而使沉淀相的强化作用更显著。但当复合材料进入到严重过时效阶段,其中的沉淀相 ( $\delta'$  和  $S'$  相) 粗化剧烈,使沉淀强化作用减弱,宏观上表现为硬度和强度下降幅度的增大。

至于时效对复合材料断裂应变的变化影响不大(见

图 3c), 则是由于晶须加入后, 复合材料中基体的微观变形不均匀, 应变集中严重, 造成复合材料整体塑变能力降低所致。这种现象是晶须增强铝基复合材料普遍现象。图 4 给出了复合材料三种时效状态下的拉伸断口。固溶处理状态下, 拉伸断口呈穿晶断裂, 在基体中有较多的小韧窝, 同时可看到晶须拉断和少量被拔出的迹象。在随后时效过程中, 复合材料的断裂方式似乎没有

发生根本的变化, 欠时效 (图 4a)、峰时效 (图 4b) 和过时效 (图 4c) 状态下的拉伸断口均呈穿晶形式, 每种状态下复合材料基体中的韧窝形貌也没有发生根本的改变, 可见, 复合材料的拉伸断口形貌受时效状态的影响较小, 这与 SiC 晶须加入后使材料的断裂过程与本质发生改变有关。

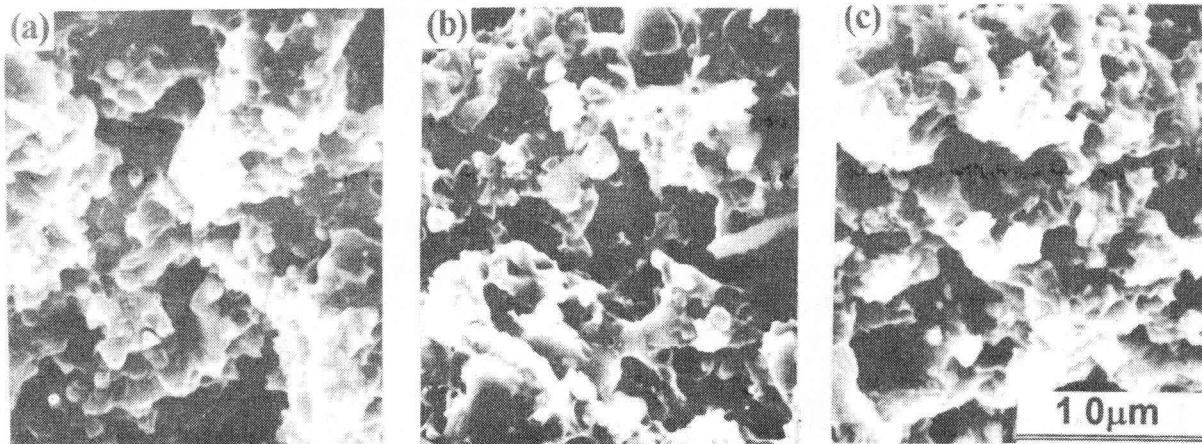


图 4 复合材料拉伸断口 SEM 观察  
(a) 欠时效; (b) 峰时效; (c) 过时效

#### 4 结论

(1) SiC<sub>w</sub>/Al-Li-Cu-Mg-Zr 复合材料具有显著的时效硬化效应, 晶须的加入加速了基体合金的时效过程, 使时效峰提前。

(2) 复合材料在 190℃ 时效的主要强化相是 δ' 相, SiC 晶须的加入并未使 δ' 相的形貌发生根本的改变, 但促进了其长大过程。复合材料中的第二强化相为 S' 相, 它的优先析出与复合材料内部所存在的高密度位错有关。

(3) 时效对复合材料具有明显的强化作用, 但对复合材料拉伸断口的影响很小。复合材料在 190℃ 欠时效状态下的综合拉伸性能较好。

#### 参考文献

- 1 赵伯良. 宇航材料工艺. 1994, 25 (6): 18
- 2 洪性吉, 神尾彰彦. 轻金属. 1993, 43 (6): 328
- 3 J. M. Papazian, P. N. Adler. Metall. Trans., 1990, 21A: 401
- 4 T. Christman, S. Suresh. Acta Metall., 1988, 36 (7): 1691
- 5 董尚利, 茅建富, 崔约贤, 杨德庄. 材料工程, 1994, (6): 15
- 6 董尚利, 茅建富, 姜龙涛, 崔约贤, 杨德庄. 材料科学与

工艺, 1994, 2 (4): 1

\*\*\*\*\*

### 带浇注温度监控器的全面 质量检测系统

英国 Hepworth Heating 公司在其一条自动铸造生产线上安装了一套自动红外“智能浇注”温度监测系统。该系统包括 Ircon Mirage “OR” 红外两色比例测温仪, 监测铸造生产线。在距离较远的一面, 安装着信号处理/输入-输出的工作柜, 并带有打印机和报警器。“智能浇注”监控着每一个铸型的浇注温度, 其上限和下限可以在前置板上由人工设定。比例温度测量头内置于一个大的铝合金零件中, 安置在铸型上方, 该精密光电仪器的比例信号达 2 个辐射强度。信号通过导线成对地送到远处检测处理器。通过后面板上的远距离目镜可以瞄准目标。其“OR”传感器可以精确测量目标区域内 100 个点的温度, 该传感器“视线”平行于铸型顶部, 这样铸型移动时仍能捕捉到目标。当信号送到处理器时, 同时记录浇注时间和浇注温度。浇注数量记录自动进行。通常, 如果金属液温度超出限度, 便会打印出结果。

(张宏伟)