第 13 卷 第 4 期 复 合 材 料 学 报 Vol. 13 No. 4
1996 年 10 月 ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA October 1996

# 非连续增强 LY12 复合材料蠕变机制研究

周耀民 陈玉喜 张国定 费铸铭
(上海交通大学复合材料研究所, 上海 200030)

摘 要 研究了应力、温度和热处理对 22vol% 莫来石短纤维增强 LY12 复合材料性能的影响, 实验采用铸态、退火态和 T4 处理复合材料, 三种状态下复合材料的抗蠕变性能均高于基体材料 LY12 铝合金。文中提出一种复合材料的蠕变机制: 在低应力阶段, 复合材料的蠕变受位错的攀移过程所控制; 在高应力阶段, 复合材料的蠕变受增强体与基体的界面所控制。用 TEM 分析了材料的界面。

关键词 莫来石短纤维, 铝基复合材料, 蠕变, 界面

对于长期在较高温度下承受载荷的构件来说, 材料的蠕变行为成为制约构件寿命的重要因素。对金属基复合材料而言, 对其室温性能研究较多, 而随其在许多领域的开拓应用, 特别是在较高温度下的应用, 对其在高温下的许多性能, 特别是蠕变性能的研究, 就显得非常迫切和需要。最早研究金属基复合材料蠕变机制是美国 WESBER[1], 研究发现, 金属基复合材料相对于基体材料, 可大大提高抗蠕变性能。本文中研究了莫来石短纤维增强 LY12 复合材料的蠕变性能、机制以及与微观组织结构的关系。

## 1 材料制备和试验方法

增强剂为晶态莫来石短纤维(72% $Al_2O_3$, 28% $SiO_2$), 基体材料为 LY12 硬铝合金, 采用液体挤压铸造工艺(Squeeze Casting Process) 制造 22vol% 晶态莫来石短纤维增强铝基复合材料。复合材料状态为铸态、退火态和 T4 热处理状态(763K 固溶水淬、自然时效)。蠕变试样直径为 5mm, 蠕变试验采用 B2 型高温持久强度试验机, 用 TEM-2010 型高分辨透射电镜进行界面反应产物和位错组态分析。

## 2 试验结果

不同状态下晶态莫来石短纤维增强 LY12 复合材料在 523K 温度下蠕变性能如图 1 所示, 由图 1 可知, LY12 铝合金中加入 22vol% 的莫来石短纤维后, 不论在任何热处理条件下, 其抗蠕变性能都要高于 T4 处理的基体 LY12 铝合金, 说明莫来石短纤维加入 LY12 铝合金中, 约束了基体的变形, 有效地强化了材料, 并起到一定的承载作用。在三种状态的复合材料中, 又以 T4 处理的复合材料的抗蠕变性能最佳, 铸态复合材料次之, 而退火态复合材料最差。

图 2 所示, LY12 基体合金(T4 状态)、铸态复合材料及 T4 处理复合材料在 55MPa 低应

本文于 1996 年 2 月 6 日收到修改稿, 1995 年 5 月 10 日收到初稿

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://ww

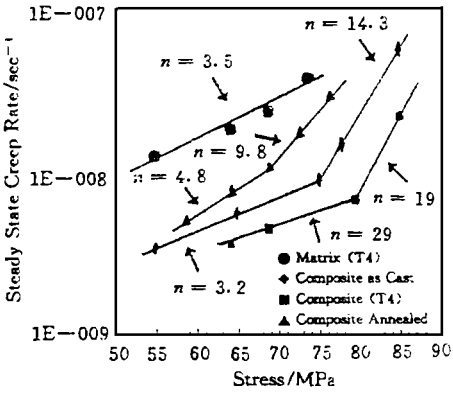


图 1　基体合金和复合材料在 523K 拉伸蠕变速率与应力关系曲线

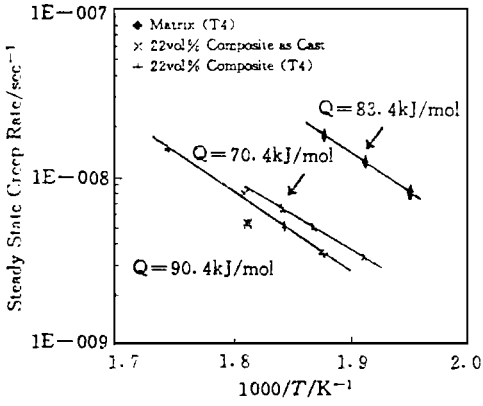


图 2　复合材料在 55MPa 时的蠕变激活能

力时的蠕变激活能是非常相近的, 说明在低应力条件下, 复合材料与基体材料具有相似的蠕变机制, 主要是位错钉扎攀移机制。铸态复合材料在低应力条件下的蠕变激活能为 70.4kJ/mol, 低于基体合金蠕变激活能(83.4kJ/mol)。LY12 硬铝合金经 T4 淬火时效处理后, 组织为 (Al) + (CuAl$_2$) + S(Al$_2$CuMg), LY12 合金的蠕变过程受位错的滑移与攀移控制, LY12 基体上析出的 相和 S 相钉扎位错而硬化了材料, 同时高温下位错的攀移, 形成小角度亚晶又软化了材料, 硬化和软化的平衡就是稳态蠕变。对于铸态复合材料, 尽管存在基体与纤维的界面, 但基体没有发挥固溶强化作用, 所以在低应力下铸态复合材料的激活能低于 T4 状态基体合金, 也由此说明, 在低应力条件下, 复合材料的蠕变受位错机制控制。

图 3　T4 处理复合材料经 79.5MPa、523K、80h 蠕变后界面的位错分布

图 4　铸态复合材料在 74.9MPa、523K、蠕变 80h 后的 TEM 照片

T4 处理后, 复合材料基体中析出大量强化相, 主要是 S 相(Al$_2$CuMg) 和 相(CuAl$_2$), 有效地阻碍了位错的运动, 强化了基体, 从而使复合材料的抗蠕变性能得到提高。另外, 复合材料经 T4 处理, 界面上有镁橄榄石微晶(200nm 左右)[2] 生成, 增强了莫来石短纤维与基体的结合, 纤维可以更有效地承载, 且生成镁橄榄石微晶, 也在阻碍位错的滑移, 从而有效地提高了复合材料的抗蠕变性能。图 3 所示 T4 处理复合材料经 523K、80h 蠕变试验后, 界面上生成物镁

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www

橄榄石微晶周围的位错分布,在界面镁橄榄石微晶附近,位错产生了一定的塞积现象,说明尺寸为 200nm 左右的微晶对位错的运动产生了一定的阻碍作用,细小的生成物微晶对复合材料的抗蠕变性能是有好处的。铸态条件下的复合材料,由于铸态组织中存在着一些沿晶界分布的脆性相、偏析缺陷,另外,基体与纤维的界面结合较弱,其蠕变性能低于 T4 处理的复合材料蠕变性能。图 4 表示铸态复合材料在 74.9MPa,523K 蠕变 80h 后基体的 TEM 位错分布以及基体与纤维的光滑界面。

复合材料经 693K、2h 退火处理,虽可通过原子的扩散而使一些偏析、不平衡共晶等缺陷得到一定程度的改善,但随退火的进行,复合材料的内应力降低,位错密度降低,位错的强化能力减弱。另外,退火的进行,使沿界面析出的 $Al_2Cu$ 和 $Al_2CuMg$ 相长大及粗化,如图 5 所示,增强了界面的脆性,降低了复合材料的抗蠕变性能。

图5 退火态复合材料在 76.4MPa、523K、40h 蠕变后的界面

从以上比较可以看出,莫来石短纤维增强 LY12 复合材料,热处理状态对复合材料抗蠕变性能影响是很大的研究不同热处理条件下复合材料蠕变性能,对于搞清短纤维增强复合材料的蠕变行为是很有意义的。

图 1 中各种热处理条件下复合材料的应力硬化指数 $n$,在低应力和高应力阶段都呈现不同的值,高应力阶段大于低应力阶段的 $n$ 值。在低应力阶段,复合材料的应力硬化指数 $n$(2.9～4.8)与基体 LY12 合金基体一致($n$= 3.5),界面结合良好的情况下,复合材料在低应力阶段的蠕变机制与基体合金相似,主要是位错攀移机制。在高应力阶段,复合材料的蠕变机制发生了变化,复合材料的蠕变断口显示出增强体与基体有脱粘现象,说明在高应力条件下,界面状态控制着复合材料的蠕变行为。

## 3 讨 论

一般典型的淬火时效强化合金的蠕变应力硬化指数 $n$ 为 4,而建立在位错运动基础上的蠕变模型也预测到应力硬化指数为 4 左右[3,4],本实验中基体 LY12 铝合金的应力硬化指数为 3.5,与 4 非常接近,且低应力条件下的复合材料 $n$ 值与 4 也比较接近,可以有理由得出如下结论:在低应力状态下,复合材料的蠕变机制与基体合金是相同的,此时,复合材料中基体与增强体的界面结合良好,如图 6 所示,复合材料的蠕变由基体中位错的钉扎、滑移和攀移所控制,其中对材料蠕变变形量有贡献的是位错的滑移,而蠕变进行的过程,则受位错的攀移所控制。在高应力条件下,复合材料的稳态蠕变速率有迅速增加的趋势,表现在应力硬化指数较低应力阶段的 $n$ 值有较明显提高。且复合材料在高应力条件下的蠕变断口上显示出增强体与基体有脱粘现象,如图 7 所示,说明在高应力条件下,界面的脱粘控制着复合材料的蠕变。在其它文献中,建立了一个长径比较小,且短纤维定向排列的复合材料蠕变模型。根据这个蠕变模型的预测,复合材料的应力硬化指数在高、低应力条件下各呈现一个值。本实验中短纤维在基体中呈

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://ww

三维随机排布, 也与定向排列蠕变模型相吻合。对于非连续短纤维增强金属基复合材料, 短纤维的长径比( $l/d$ ) 在 25～100 之间, 蠕变机制主要受施加的应力所控制。

图 6　T4 状态下复合材料在 55MPa、523K 蠕变断口 SEM 照片

图 7　T4 状态下复合材料在 85MPa、523K 蠕变断口 SEM 照片

## 4　结　　论

22vol% 莫来石短纤维增强 LY12 硬铝合金复合材料可有效地提高基体合金的高温抗蠕变性能, 复合材料经 T4 处理后, 其抗蠕变性能较 LY12 合金提高了 4 倍; 复合材料的应力硬化指数在高、低应力阶段各呈现一个值, 在低应力条件下, 复合材料的蠕变受材料中位错的攀移运动所控制, 在高应力条件下, 复合材料的蠕变受基体与增强体的界面脱粘状态所控制, 复合材料中纤维的断裂, 增强体与基体界面的脱粘, 加速了复合材料的稳定蠕变。

## 参　考　文　献


1　Webster D. Metall Trans, 1982, 13A: 1511

2　Friend C M. Mat Sci Tech, 1989, 5: 1～7

3　Nardone V C, *et al*. Scripta Metall, 1986, 120: 43

4　Friend C M. JOM, 1987, 22: 3005


## CREEP BEHAVIOR OF DISCONTINUOUSLY REINFORCED LY12 COMPOSITES


Zhou Yaomin　Chen Yuxi　Zhang Guoding　Fei Zhuming

(Institute of Composite Materials, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030)



**Abstract**　The effects of stress, temperature and heat-treatment on the steady state creep rate of 22vol% short Mullite fiber reinforced LY12 composites were studied. A creep mechanism of composites was advanced. The creep behavior of composites was controlled by the climb of dislocation at low stress state and by the interface conditions at high stress state. The interface of composites was analysed by TEM.



**Key words**　short Mullite fiber, aluminum matrix composite, creep, interface


© 1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://ww