

[文章编号] 1004-0609(2001)04-0626-05

ZL107 合金的高温静态蠕变和循环蠕变^①

王珊玲¹, 沈保罗¹, 高升吉¹, 李 达¹, 涂铭旌¹, 于维成², 姚 戈²

(1. 四川大学 金属材料系, 成都 610065; 2. 中国科学院 金属研究所, 沈阳 110016)

[摘 要] 研究了不同热处理状态的 ZL107 合金在 300 ℃的高温静态蠕变和循环蠕变的行为。结果发现: 峰时效下, 合金的蠕变抗力强于过时效状态下材料的蠕变抗力。循环蠕变时材料表现出蠕变减速现象。经峰时效处理的 ZL107 合金在循环蠕变中表现出较静态蠕变低的激活能, 用非热空位机制进行了解释, 而经过时效处理的 ZL107 合金表现出高的激活能, 滞弹性机制起了重要作用。

[关键词] ZL107 合金; 热处理; 蠕变

[中图分类号] TB 331

[文献标识码] A

近年来, 铝合金越来越多地成为金属基复合材料的基体材料, 在汽车工业中铝合金及其复合材料具有广阔的应用前景。为了提高铝合金的高温性能, 对其蠕变变形和断裂机制的了解显得非常必要。有关这方面的研究近年来已有不少报道^[1~3]。基体材料是影响复合材料高温蠕变性能的因素之一, 然而作为汽车发动机零件的铸造铝合金, 对其高温蠕变性能的系统研究的报道还不多见。而在已有研究中多数研究者^[4, 5]研究了材料进行过时效处理以消除沉淀析出相在蠕变过程中的长大对蠕变速率的影响。实际应用中, 材料多采用峰时效处理, 因而研究材料峰时效状态下的行为更具现实的意义, 但这方面的报道较少, 而 ZL107 既可单独做发动机零件又可作为基体材料使用。因此, 本文作者研究不同热处理状态对 ZL107 合金在 300 ℃的高温蠕变行为的影响。

1 实验

ZL107 合金成分(质量分数)为 Si 6.8%, Cu 3.8%, 余量为 Al。采用液体挤压铸造工艺制备, 其挤压铸造工艺参数见文献[6]。部分材料经峰时效处理(510 ℃水淬, 175 ℃人工时效 17 h), 部分经过过时效处理(510 ℃水淬后, 再经 300 ℃保温 20 h)。蠕变试样直径为 8 mm, 蠕变实验在德国 Schenck 40XKN 电液伺服疲劳试验机上进行。循环蠕变实验在 300 ℃下完成, 采用应力比($\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$)为 0.2

的力控制拉一拉循环, 力的波型为三角波, 频率为 0.5 Hz。由炉外应变规精确测得循环蠕变过程中任意时刻的应变大小, 并有 $x-t$ 记录仪记录, 循环蠕变速率定义为单位时间内循环峰应变的增量。

从经过静态蠕变及循环蠕变的试棒上手锯取样, 机械研磨至 60 μm , 再经离子减薄, 在 JOE-160 kV 透射电镜下观察显微组织。

2 实验结果

2.1 ZL107 合金的高温静态蠕变

2.1.1 应力、温度对 ZL107 稳态蠕变速率的影响

一般认为, 最小蠕变速率可由下式表示:

$$\dot{\epsilon}_{\min} = A \sigma^n \exp(-Q/RT) \quad (1)$$

式中 $\dot{\epsilon}_{\min}$ 为最小蠕变速率, n 为名义应力指数, Q_{app} 为表观激活能, T 为温度, R 为气体常数, A 为材料常数。

图 1 所示为 ZL107 在 300 ℃时稳态蠕变速率与外加应力的关系曲线。图 2 所示为外加恒定应力 $\sigma = 50 \text{ MPa}$ 时, 温度变化对材料稳态蠕变速率的影响, 由式(1)及图 1, 图 2 求得的蠕变应力指数与蠕变激活能列于表 1。

从图 1 及表 1 中数据可知, T6 状态的 ZL107 的稳态蠕变速率在测试应力范围内小于 T8 状态的材料, 同时两者的名义应力指数都高于纯铝的 $n = 5$, 且 T6 状态的 ZL107 的蠕变表观激活能比纯铝的激活能高许多。

① [基金项目] 国家自然科学基金资助项目(59631080)

[收稿日期] 2000-10-16; [修订日期] 2001-02-12

[作者简介] 王珊玲(1969-), 女, 讲师, 博士研究生。

2.2.2 材料的蠕变门槛值应力 σ_0

表 1 的结果与许多有关复合材料高温蠕变的研究报道相似: 与纯铝相比, 合金显示了较高的蠕变应力指数和激活能。为了解释复合材料的应力指数较高这一现象, 很多研究者引入了蠕变门槛应力的概念对式(1)进行了修正^[7, 8], 其形式为:

$$\dot{\epsilon}_{\min}=A'\left[\frac{\sigma-\sigma_0}{E}\right]^{n_0}\exp(-Q/RT)$$

(2)

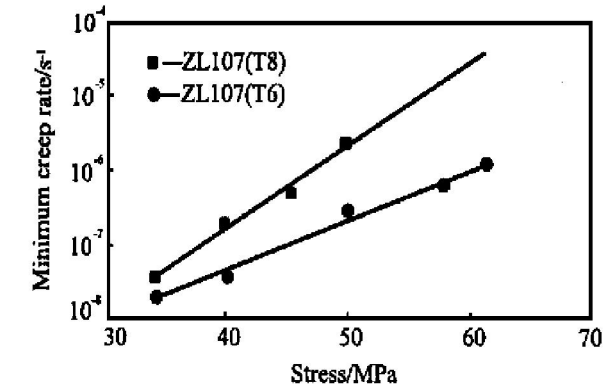


图 1 300 °C 的静态蠕变中应力对 ZL107 合金的稳态蠕变速率的影响

Fig. 1 Effects of stress on static minimum creep rate of ZL107 alloy at 300 °C

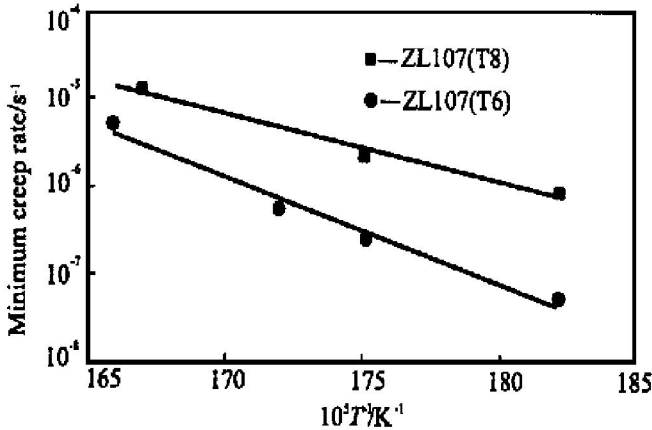


图 2 300 °C 的静态蠕变中温度对 ZL107 合金的稳态蠕变速率的影响

Fig. 2 Effects of temperature on static minimum creep rate of ZL107 alloy at 300 °C

表 1 ZL107 静态及循环蠕变时的名义应力指数和表观激活能

Table 1 Stress exponents and apparent activation energies of ZL107 alloy for static and cyclic creep

Heat treatment	$Q/(kJ\cdot mol^{-1})$	n
T6	235	7
T8	146	10

式中 σ_0 为蠕变门槛值应力, n_0 为 5, A' 为材料常数, 为了求得 σ_0 , 作材料的 $\dot{\epsilon}_{\min}^{1/5}$ 和 σ 的关系图并外推, 作者对 ZL107 合金作相似的处理, 求出其在不同热处理时的门槛应力分别为 $\sigma_0(T6)=14\text{ MPa}$, $\sigma_0(T8)=25\text{ MPa}$ 。

2.3 ZL107 合金的高温循环蠕变

图 3 所示为 ZL107 合金在 300 °C 时外加应力与最小循环蠕变速率的关系, 同时给出在相同温度下稳态蠕变速率与外加应力的关系曲线(循环应力为最大应力值)。由图看到, ZL107 合金在两种热处理状态下都显示出循环蠕变减速现象。在 T6 状态时其循环蠕变速率约为与其循环峰应力相同应力下静态蠕变速率的 1/10, 而在过时效此值为 1/100。此外从图中还可看到材料的循环蠕变速率与应力之间存在较好的名义线性关系, 类似两种材料的稳态蠕变, 其循环蠕变符合蠕变的半经验公式。一般认为, 最小蠕变速率可由式(1)表示。

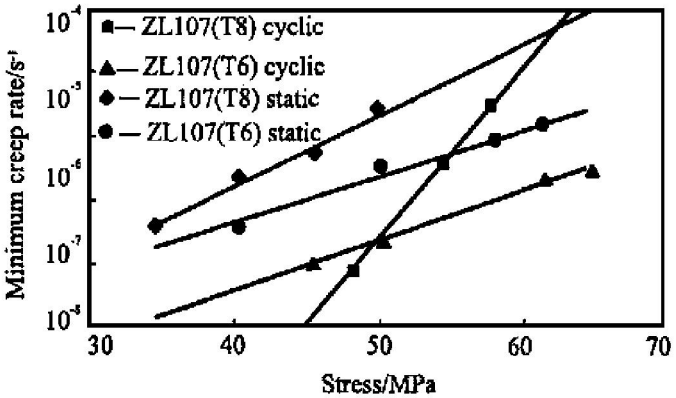


图 3 300 °C 蠕变中应力对 ZL107 合金的稳态蠕变速率的影响

Fig. 3 Effects of stress on minimum creep rate of ZL107 alloy at 300 °C

图 4 所示为外加应力恒定时, 温度变化对材料稳态蠕变速率的影响, 由图 4 及式(1)求得材料的蠕变激活能见表 2。

由表 2 可看到, 循环蠕变时 T6 状态的材料表观激活能较其静态稳态蠕变的低, 而 T8 状态的表观激活能较其静态稳态蠕变的高。

图 5 所示为 ZL107 合金在循环蠕变时卸载量与循环最小蠕变速率的关系。从图中看到, T8 状态的材料随卸载量增加, $\dot{\epsilon}_{\min}$ 减小, 而 T6 状态的 ZL107 合金中有一临界卸载量的存在, 超过 60% 后循环最小蠕变速率反而增加。

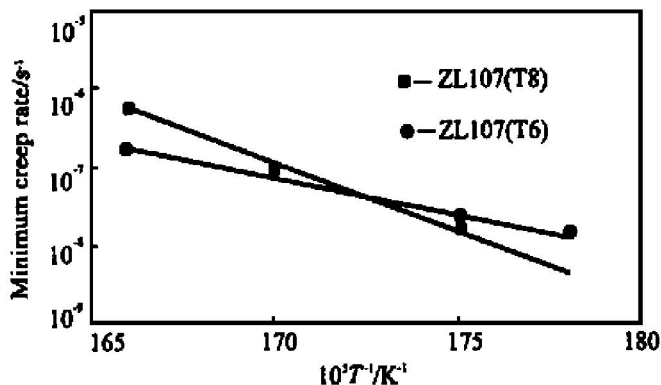


图 4 循环蠕变中应力对 ZL107 合金的
稳态蠕变速率的影响

Fig. 4 Effects of temperature on cyclic minimum
creep rate of ZL107 alloy

表 2 ZL107 静态及循环蠕变时的
名义应力指数和表观激活

Table 2 Stress exponents and apparent activation
energies of ZL107 alloy for static and cyclic creep

Heat treatment	Test mode	$Q/(kJ \cdot mol^{-1})$	n
T8	Static	146	10
	Cyclic	298	25
T6	Static	235	7
	Cyclic	177	8

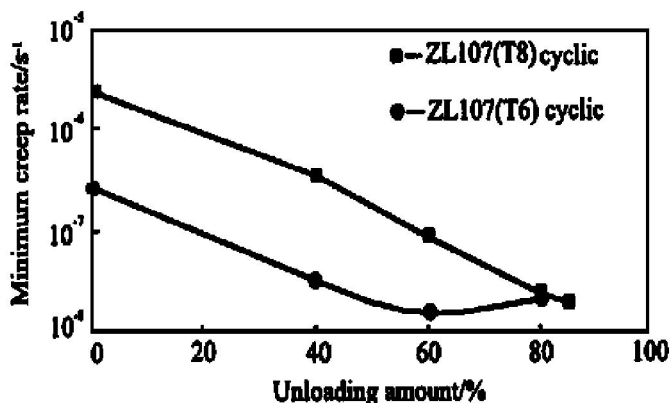


图 5 循环蠕变中卸载量对 ZL107 合金的
稳态蠕变速率的影响

Fig. 5 Relationship of unloading amount and
minimum creep rate of ZL107 alloy

3 分析与讨论

本次实验中, ZL107 合金在 300 °C 的高温下蠕变时, 类似与复合材料存在着门槛应力, 而且 T6 状态的 ZL107 合金的门槛应力值低于 T8 状态的。就门槛应力的来源, 目前仍存在多种观点。对 ZL107 合金来讲, 笔者认为其来自析出强化相与 θ'

组织中位错的交互作用(图 6)。虽然在高温下, 强化相有粗化及向稳定相 θ 转化的趋势, 而促使蠕变的进行, 但这一过程进行得并不显著(图 7), 使 T6 状态的 ZL107 的稳态蠕变速率低于 T8 状态的, 即前者具有较强的抗蠕变能力。

此外, 300 °C 时两种热处理的 ZL107 材料在循环载荷作用下, 表现出循环蠕变减速现象。从循环蠕变平均应力降低这一角度出发, 可粗略得到循环蠕变的平均蠕变速率为^[9]

$$\dot{\epsilon}_{cc} = \frac{4}{5} \frac{1}{n+1} \left[A \sigma_{\max}^n \exp \left(\frac{-Q_{app}}{RT} \right) \right]$$

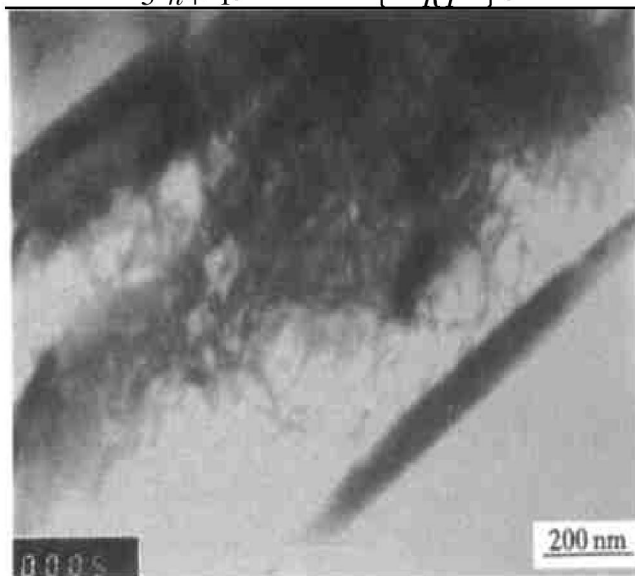


图 6 300 °C 静态蠕变, T6 状态的 ZL107 合金
 θ' 析出相与位错的作用

Fig. 6 Precipitated phase θ' and dislocation
in T6 treated ZL107 alloy crept at 300 °C

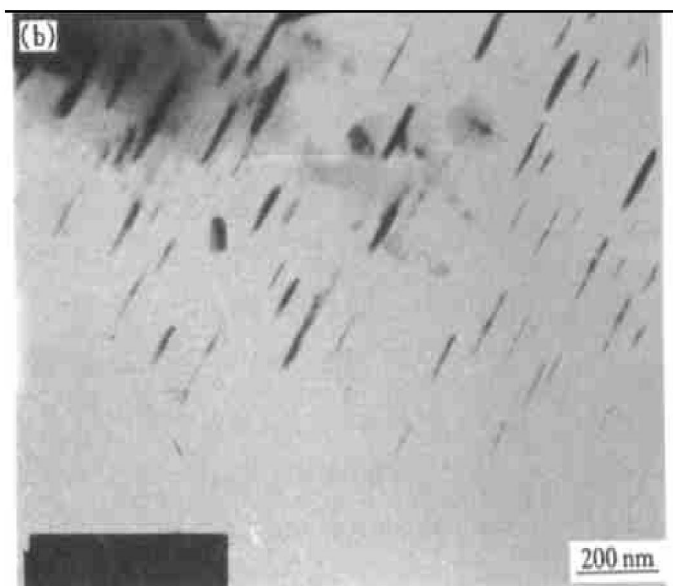


图 7 300 °C 静态蠕变, T6 状态的 ZL107 合金的
 θ' 析出相形貌

Fig. 7 θ' phase in T6 treated ZL107 alloy
crept at 300 °C

式中 $\dot{\epsilon}_c$ 为循环蠕变平均速率, n 为静态蠕变的名义应力指数。根据表 1, 求得两种热处理状态下的循环蠕变平均速率与静态蠕变速率比值分别约为 1/10 及 1/15, T6 状态下这一计算值与实际所测值接近, 而 T8 状态下与实际所测值相差较大。就循环蠕变时的表观激活能与静态蠕变的相比, 前者降低, 后者增加, 因此可认为对不同热处理的 ZL107 合金, 引起循环蠕变减速的机制不一样, 原因分析如下。

已有的报道中多为对基体组织稳定的材料进行循环蠕变研究, 许多研究者^[4, 5, 10, 11]认为是滞弹性机制对材料表现出的蠕变减速起了主要作用。用此机制可较好地解释实验中观察到的 T8 状态的材料在循环蠕变条件下显示的高名义应力指数和高的激活能。材料在过时效状态下, 基体组织在蠕变过程中保持稳定, 并对位错运动起到钉扎作用, 滞弹性机制起了主导作用。而本次实验中的 ZL107 合金在峰时效状态下其基体组织在蠕变过程是不稳定的, 与基体呈半共格状态的 θ' 析出强化相在高温变形过程中会发生向稳定相 θ 的转变, 如图 8 所示。在这种转变中, $\theta' \rightarrow \theta$ 转变归因于高的变形温度和应力的双重作用^[12]。因此基体组织在蠕变过程的不稳定性使得析出相对位错的钉扎作用不显著。

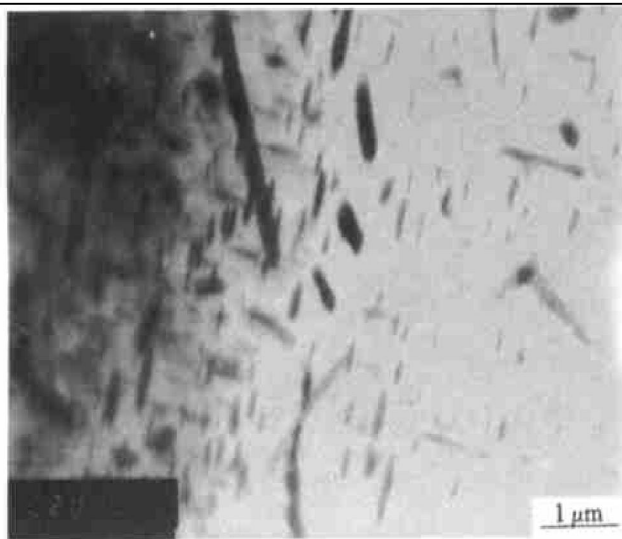


图 8 300 °C 循环蠕变时 T6 状态的 ZL107 合金析出 θ' ($\theta' \rightarrow \theta$)

Fig. 8 θ' phase in T6 treated ZL107 cyclic creep at 300 °C ($\theta' \rightarrow \theta$)

图 5 表明, T6 状态的 ZL107 合金的卸载量与最小循环蠕变速率的关系曲线中存在一个临界卸载量, 对应于这个临界卸载量, 循环蠕变存在最小循环蠕变速率。有研究者认为循环变形时循环应力类似于一个产生空位的泵, 可以不断产生大量的非热

空位^[13], 这些非热空位因促进原子扩散速率而加速 θ' 的转化, 临界应力的存在表明只有循环的峰应力与最小应力的差值达到一定的程度, 产生的非热空位对蠕变的促进作用超过在峰应力不变条件下, 随卸载量的增加使平均应力下降而减小蠕变的作用。而对过时效处理的合金而言, 析出相 θ 稳定, 上述作用不明显, 循环蠕变主要受滞弹性机制的控制。并有研究者认为名义循环蠕变激活能可表示为: $Q_c = Q_d - W Q_d$ 为点缺陷扩散激活能, W 为非热加工所做的功, 由此可较好解释实验中循环蠕变激活能较静态蠕变激活能低的现象。

因此可认为经峰时效处理的 ZL107 合金在循环蠕变中受非热空位和滞弹性机制的共同作用, 且滞弹性机制的作用较弱。

4 结论

- 1) T6 状态的 ZL107 合金蠕变抗力优于 T8 状态的。
- 2) 两种热处理状态的 ZL107 合金在循环蠕变时表现出蠕变减速现象。
- 3) T8 状态的 ZL107 随卸载量增加, $\dot{\epsilon}_m$ 减小, 而 T6 状态的材料存在一临界卸载量。

[REFERENCES]

- [1] FAN Jianzhong(樊建中), YAO Zhongkai(姚忠凯), LI Yichun(李义春), 颗粒增强铝基复合材料研究进展[J]. Mater Rev(材料导报), 1997, 11(3): 48- 51.
- [2] CadeK J, Pahutova M. Is Creep in discontinuous metal matrix composites Lattice diffusion control [J]. Mater Sci Eng, 1994, A174: 141- 147.
- [3] Li Y, Mohamed F A. An investigation of behavior in an SiC/2124 Al composite [J]. Acta Mater, 1997, 45 (11): 4775.
- [4] Vincent C, Nardone, Willam L, et al. Cyclic creep and an elastic relaxation analysis of an ODS superalloy [J]. Metall Trans, 1986, 17A: 1577- 1583.
- [5] Stefani J A, Nardone V C, Tien J K. The effect of high frequencies on the cyclic creep behavior of an ODS superalloy [J]. Script Metall, 1987, 21: 1- 6.
- [6] CHEN RUI(陈睿), ZHAO Ping(赵平), DONG Bin(董斌), et al. ZL109 莫莱石短纤维铝基复合材料的时效行为 [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1998, 8(1): 181- 184.
- [7] Dlouhy A, Merk N, Eggeler G. A microstructural study of creep in short fiber reinforced aluminum alloys [J].

- Acta Metall Mater, 1993, 41: 3245– 3256.
- [8] Mishra R S, Pandey A B. Some observation on the high-temperature creep behavior of 6061 Al-SiC composites [J]. Metall Trans, 1990, 21A: 2089– 2090.
- [9] LIU P L (刘丕林). 非连续体增强铝基复合材料的蠕变、循环蠕变及复合型疲劳门槛行为的研究 [D]. 沈阳: 中国科学院金属研究所, 1997.
- [10] LIU P L, WANG Z G, WANG W L. Static and cyclic behavior of 2024/SiC_p and its matrix alloy at high temperature [J]. Mater Sci Tech, 1997, 13: 667– 672.
- [11] LIU P L, WANG Z G, Toda H, et al. Effect of cyclic stress on the high temperature creep behavior of SiC_w/6069Al composite [J]. Script Metall, 1997, 36: 807– 812.
- [12] Sgobba S, Parriwi, et al. An elastic relaxation in Al-4% Cu-Al₂O₃ fiber reinforced composites [J]. Metall Mater Trans, 1995, 26A: 2745– 2749.
- [13] Shrikant P Bhat, Campbell L. High temperature cyclic deformation of precipitation hardened alloy I partially coherent precipitates [J]. Acta Metall, 1979, 27: 1861.

Static and cyclic creep behavior of ZL107 alloy

WANG Shan-ling¹, SHEN Bao-luo¹, GAO Sheng-ji¹, LI Da¹,
TU Ming-jin¹, YU Wei-cheng², YAO Ge²

(1. Department of Metal Materials, Sichuan University, Chengdu 610065, P. R. China;

2. The Institute of Metal Research, Chinese Academy of Science,
Shenyang 110016, P. R. China)

[Abstract] The elevated temperature static and cyclic creep behavior of ZL107 alloy by different heating treatments at 300 °C were investigated. The results indicate that on the condition of peak aging, the materials show higher resistant to creep than those overaged materials do. During cyclic creep, ZL107 alloy shows cyclic creep retardation in the tested stress range. On the condition of peak aging, ZL107 alloy shows lower apparent activation energy in cyclic creep in comparison with that in static creep and an analysis based on a thermal vacancy is introduced to explain result on the condition of over-aging. ZL107 alloy shows higher apparent energy, anelastic recovery plays a more important role.

[Key words] ZL107 alloy; heating treatment; creep

(编辑 黄劲松)