

工艺因素对 TC4 合金应力松弛行为的影响

Influence of Processing Factors on Stress Relaxation Behavior of TC4 Alloy

刘 勇, 尹钟大, 朱景川, 姜 越
(哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)
LIU Yong, YIN Zhong-da, ZHU Jing-chuan, JIANG Yue
(School of Materials Science and Engineering,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

摘要: 研究了 TC4 合金应力松弛行为的特征和工艺因素的影响。结果表明, TC4 合金应力松弛行为可以分为两个阶段: 第一阶段, 应力松弛非常快, 第二阶段应力松弛缓慢, 但长时间应力松弛后剩余应力趋向于一极限值; 应力松弛行为可以用应力松弛极限和应力松弛速率两个参量进行表征; 温度升高时, 松弛速率加快, 应力松弛极限降低; 同一温度不同初应力作用的应力松弛, 应力松弛极限相同。
关键词: TC4 合金; 应力松弛; 应力松弛极限; 应力松弛速率; 温度; 初应力
中图分类号: TG131.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381 (2005) 04-0038-04

Abstract: The stress relaxation behavior characters of TC4 alloy and influence of processing factors were studied. The results showed that the stress relaxed very fast at the first stage, while slowly at the second stage, and the residual stress approached a limit after a long relaxation time. Stress relaxation was characterized with stress relaxation limit and stress relaxation rate. The higher temperature resulted in higher stress relaxation rate and lower relaxation limit. Different initial stress gave the same relaxation limit at same temperature.
Key words: TC4 alloy; stress relaxation; stress relaxation limit; stress relaxation rate; temperature; initial stress

TC4 合金是在航空、航天、化工等领域广泛应用的一种钛合金^[1,2], 但该合金加工时弹性回弹严重, 成型稳定性差^[3], 因此钛合金的热校形是非常重要的^[4-5]。作为热校形的理论基础, 钛合金的应力松弛行为已得到广泛研究, 但从工程应用及松弛机理上看, 都有进一步深入研究的必要。本课题以 TC4 合金为研究对象, 研究该合金应力松弛行为特点和温度、初应力等工艺因素对应力松弛的影响。

1 实验

实验材料为 TC4 合金热轧棒材, 化学成分 (质量分数/%) 如下: 5.89Al, 3.84V, 0.27Fe, 0.10Si, 0.04N, 0.09C, 0.03O, 0.011H, 余量为 Ti。TC4 合金的热处理制度为: 540 /4h, 空冷。热处理后合金在 200, 400, 600 下常规力学性能如表 1 所示。应力松弛实验采用国家标准 GB10120 规定的弯曲应力松弛实验法。为了比较温度对应力松弛的影响, 选用 200, 400, 600 三个温度在同一初应力作用下进行实验。在 600 下选用两个不同的初应力, 以比较初应力

对应力松弛的影响。保温实验均在真空气氛下进行。TC4 钛合金金相组织由等轴状 α 相和转变 β 相组成。

表 1 TC4 合金的力学性能
Table 1 Mechanical properties of TC4 alloy

Temperature/	σ_b / MPa	δ / %	E / GPa
RT	967	16.2	117.92
200	741	17.3	109.88
400	645	17.4	98.64
600	470	47.9	88.96

2 结果及分析

2.1 应力松弛的一般特点

图 1 为同一初应力 (450MPa) 作用下 TC4 合金在 200, 400, 600 的应力松弛 $\sigma-t$ 曲线。由图 1 可以看出, 三个不同的温度下, 应力松弛具有相同的特点: 应力松弛可以分为两个阶段, 在第一个阶段, 试样承受的应力 σ 下降很快, 但随时间的增加, 松弛速度逐渐减慢; 在第二个阶段, 剩余应力下降非常慢。剩余

应力的下降有一个限度, 无限趋近于某一个值, 这个值就是应力松弛极限。这是应力松弛所具有的共同特点^[6]。应力松弛速率和应力松弛极限是描述应力松弛性能的两个基本参量。应力松弛极限为 σ , 在应力松弛曲线上为应力松弛时间趋近于无穷大时的剩余应力值, 如果外加应力低于此值, 则不会发生松弛; 应力松弛速率为 $d\sigma/dt$, 体现于应力松弛曲线上, 为任一点所对应的斜率。

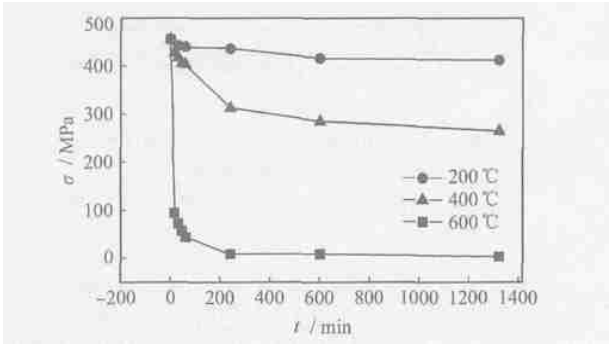


图1 不同温度下 TC 4 合金应力松弛曲线
Fig. 1 Stress relaxation curves of TC4 alloy at different temperatures

塑性应变速率是材料热变形中一个重要的参量, 它和应力的关系是材料热变形中最基本的关系式。应力松弛实验可以给出塑性应变速率和应力的关系。在应力松弛实验条件中, 有:

$$\epsilon_{\text{ot}} = \epsilon_e + \epsilon_p \tag{1}$$

$$\frac{d\epsilon_{\text{ot}}}{dt} = 0 \tag{2}$$

式中: ϵ_{ot} 为总应变, ϵ_p 为塑性应变, ϵ_e 为弹性应变。
由 (1), (2) 式得到:

$$\frac{d\epsilon_p}{dt} = - \frac{d\sigma}{E dt} \tag{3}$$

图 2 为 200, 400, 600 时应力松弛中塑性应变速率与应力的关系, 由图 2 可见, 在不同的温度下, 曲线的形状基本相同, 证明存在一个固态变形方程^[7]。塑性应变速率与应力的关系曲线, 可以用两条直线表示, 分别对应高低应力两个领域。两阶段的交点对应一门槛应力。低于此门槛应力, 塑性应变速率降低几个数量级。关于门槛应力, 文献 [8] 认为, 在应变速率与应力的关系上, 存在一个门槛应力, 即外加应力超过门槛应力时, 才有明显塑性变形发生, 塑性应变速率和应力具有如下关系:

$$\frac{d\epsilon_p}{dt} = A (\sigma - \sigma_i)^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \tag{4}$$

式中: t 为时间, σ 为外加应力, Q 为激活能, T 为温度,

R 为普适常数, σ_i 为门槛应力, 在位错运动为主要变形机理的变形中, 包括晶体点阵对位错运动的阻力以及固溶原子、弥散第二相、多相韧性合金中的相界等对位错的阻碍作用, n 为速率应力指数。

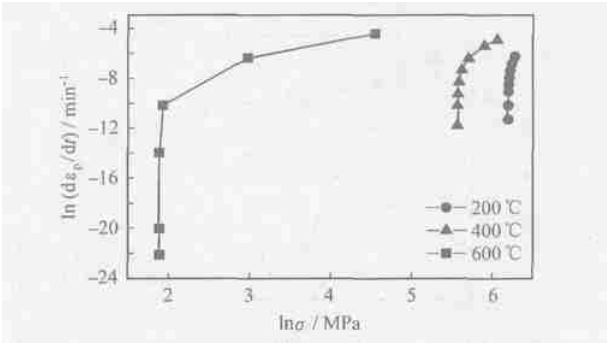


图 2 不同温度下 TC 4 合金塑性应变速率与应力关系曲线
Fig. 2 Plastic strain rate vs stress curves of TC4 alloy at different temperatures

2.2 温度对合金应力松弛的影响

对图 1 曲线进行拟合, 并推算无限长应力松弛时间后的剩余应力, 可以得到合金在该温度下的松弛极限。将 200, 400 和 600 的应力松弛极限绘制于图 3 中。由图 3 可见, 温度升高, 应力松弛极限显著降低。对图 3 曲线进行拟合, 得到应力松弛极限和温度的经验关系式:

$$\sigma = 464 + 0.33T - 0.0009875T^2 \tag{5}$$

式中: T 为温度 (K), σ 为应力松弛极限。

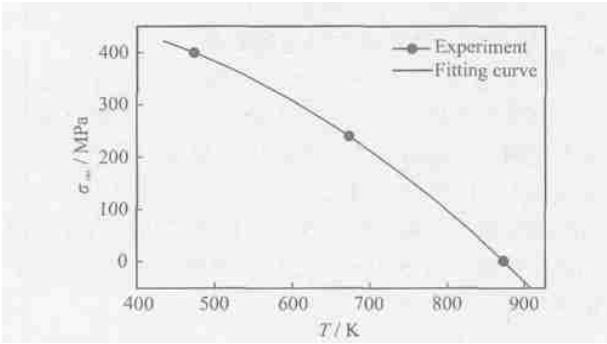


图 3 应力松弛极限与温度的关系
Fig. 3 The relationship between stress relaxation limit and temperature

图 4 给出了不同温度下应力松弛速率与时间的关系曲线。可以看出, 温度高, 则起始的应力松弛速率也大, 随应力松弛时间的延长, 应力下降较快, 可松弛的剩余应力减少, 应力松弛速率降低幅度也大, 经过一段时间后, 温度高时的应力松弛速率反而小于温度低的情况。由 (3), (4) 式可以得到温度对应力

松弛速率的影响关系式:

$$\frac{d\sigma}{dt} = - EA (\sigma - \sigma_i)^n \exp(-\frac{Q}{RT}) \tag{6}$$

式中: E 为弹性模量。

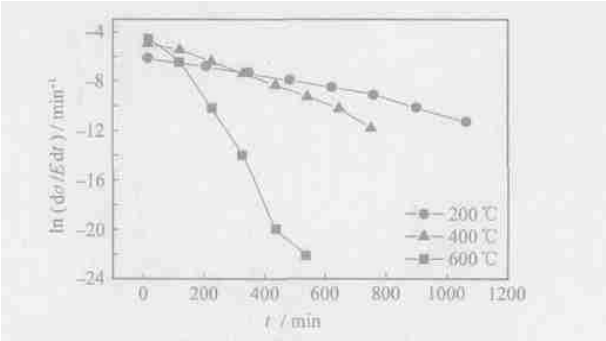


图 4 不同温度下应力松弛速率与时间的关系
Fig. 4 The relationship between stress relaxation rate and time during stress relaxation at different temperatures

由图 2 可见, 温度对应力松弛变形中塑性应变速率和应力关系曲线具有重要的影响。温度升高, 曲线向应力小的方向移动。体现在门槛应力上表现为: 200 的门槛应力要高于 400 , 而 400 时要高于 600 , 即随温度的升高, 门槛应力降低。经计算, 600 时, 速率应力指数为 1.587, 400 时为 4。由文献 [9- 11] 可以知道, 600 应力松弛变形机理在于原子扩散和位错攀移、滑移机制的共同作用, 而 400 时应力松弛变形在于位错的滑移。

2.3 初应力对合金应力松弛的影响

图 5 为 600 不同初应力作用下的应力松弛行为。由图 5 可见, 长时间应力松弛后, 应力松弛极限基本相同。这说明应力松弛极限与初应力无关, 只与温度有关。但初应力高, 对应应力松弛过程中同一时刻的瞬时应力则高。设两种应力松弛的初应力分别为 σ_1, σ_2 , 则对应这两次应力松弛中的同一时刻, 有如下规律^[12]:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma}{\sigma_2 - \sigma} = \frac{\sigma_1 - \sigma_i}{\sigma_2 - \sigma_i} \tag{7}$$

本实验中 σ_1, σ_2 分别为 300MPa 和 450MPa。 σ_1 为初应力 σ_1 时应力松弛中某一时刻的瞬时应力, σ_2 为初应力 σ_2 时应力松弛中某一时刻的瞬时应力, σ 为应力松弛温度决定的应力松弛极限。

实验表明, 当初应力 σ_1, σ_2 分别为 300MPa 和 450MPa 时, 在应力松弛过程中, 15, 600min 和 1320min 时的 $(\sigma_1 - \sigma) / (\sigma_2 - \sigma)$ 分别为 0.514, 0.561, 和 0.587, 而 $(\sigma_1 - \sigma_i) / (\sigma_2 - \sigma_i) = 0.583$ 。说明本实验数据结果基本符合公式 (7) 的规律。

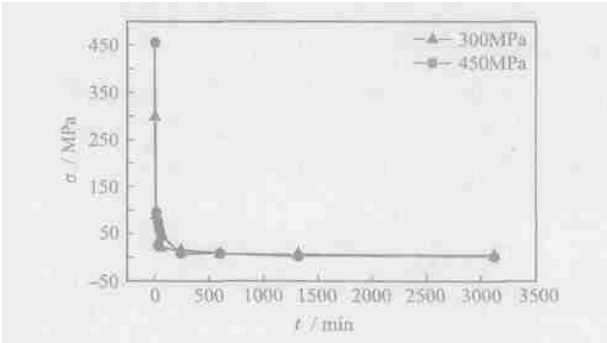


图 5 600 不同初应力作用下应力松弛行为
Fig. 5 Stress relaxation behavior in various initial stress at 600

图 6 给出了不同初应力下 600 应力松弛速率与时间的关系曲线。比较两种不同初应力条件下的应力松弛速率可以看出, 初始应力大, 则起始的应力松弛速率也大, 随应力松弛时间的延长, 应力松弛速率降低幅度也大, 长时间后应力松弛速率相对差值缩小。在任一实验时刻, 对不同初应力 σ_1, σ_2 条件下的应力松弛速率 V_1, V_2 , 则有如下应力松弛规律^[13]:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\sigma_1 - \sigma}{\sigma_2 - \sigma} \tag{8}$$

实验和计算结果表明, 当初应力 σ_1, σ_2 分别为 300MPa 和 450MPa 时, 在应力松弛过程中, 15, 600min 和 1320min 时刻的 V_1 / V_2 分别为 0.518, 0.557 和 0.592, 而 $(\sigma_1 - \sigma) / (\sigma_2 - \sigma) = 0.583$ 。说明本实验数据基本符合公式 (8) 的规律。

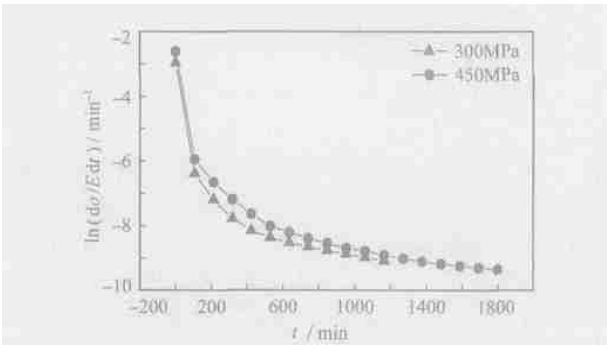


图 6 不同初应力下 600 应力松弛速率与时间的关系
Fig. 6 The relationship between stress relaxation rate and time during stress relaxation in various initial stress at 600

图 7 为不同初应力作用下 600 塑性应变速率与应力的关系曲线。两者均有相似的形态, 可以用 (5) 式进行描述。初应力大, 则曲线向应力大的方向移动。即对应应力松弛中任意时刻相同应力作用下, 大的初应力对应较小的塑性应变速率。

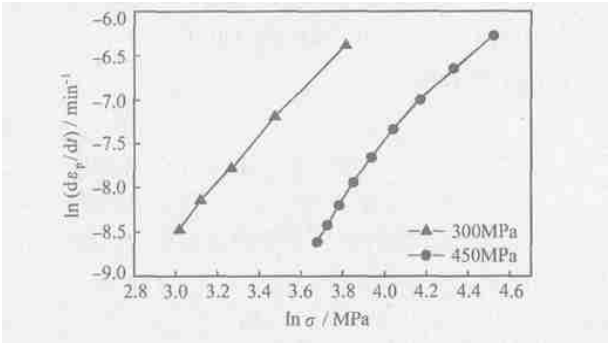


图 7 不同初应力下 600 °C 塑性应变速率与应力的关系
Fig. 7 The relationship between plastic strain rate and stress during stress relaxation in various initial stress at 600 °C

3 结论

- (1) TC4 合金应力松弛行为可以分为两个阶段，在第一个阶段，试样承受的应力 σ 下降很快，但随着时间的增加，松弛速度逐渐减慢；在第二个阶段，剩余应力下降非常慢。应力松弛行为可以用应力松弛极限和应力松弛速率两个参量进行表征。
- (2) 温度升高，TC4 合金应力松弛极限降低，应力松弛速率加快。
- (3) 不同初应力作用下，TC4 合金的应力松弛极限基本相同；但初应力高，应力松弛速率加快。

参考文献

[1] FROES F H. Titanium products and applications [J]. Journal of Metals, 1994, (3): 12- 14.

[2] 萧今声, 许国栋. 提高高温钛合金性能的途径 [J]. 中国有色金属学报, 1997, 7 (4): 97- 104.

[3] 陈春奎, 黄永坚, 王以王番, 等. 钛和钛合金钣金零件的热校形 [J]. 金属科学与工艺, 1985, 4 (2): 89- 100.

[4] 郝树本, 翟树森. 复杂形体钛合金叶片等温热校形工艺研究 [J]. 材料工程, 1996, (4): 40- 43.

[5] 陈明和, 高霖, 翟建军, 等. TC4 合金飞行器蒙皮零件热校形研究 [J]. 航空精密制造技术, 1999, 35 (5): 19- 21.

[6] 苏德达. 弹簧 (材料) 应力松弛及预防 [M]. 天津: 天津大学出版社, 2002. 17- 19.

[7] POVOLO F. Load relaxation of stainless steel type AISI 304 near 563K [J]. J Mater Sci, 1984, 19: 2373- 2377.

[8] 米格兰比 H. 材料的塑性变形与断裂 [M]. 颜鸣皋, 等译. 北京: 科学出版社, 1998. 350- 352.

[9] COBLER L. A model for boundary diffusion controlled creep in polycrystalline materials [J]. J Appl Phys, 1963, 34 (6): 1679 - 1681.

[10] MOHAMED FA, LANGDONT G. The transition from dislocation climb to viscous glide in creep of solid solution alloys [J]. Acta Metal, 1974, 22: 779- 788.

[11] WEETMAN J. Steady-state creep through dislocation climb [J]. J Appl Phys, 1957, 28 (3): 362- 364.

[12] 金尧, 孙训方. 螺栓材料的应力松弛特性研究 [J]. 西南交通大学学报, 1999, 33 (1): 46- 50.

[13] 金尧, 魏楠. 金属高温应力松弛行为研究 [J]. 机械强度, 1997, 19 (3): 57- 60.

收稿日期: 2003-12-16; 修订日期: 2004-12-20

作者简介: 刘勇 (1975-), 男, 博士, 研究方向为钛合金性能和成形控制, 联系地址: 哈尔滨工业大学 433# (150001)。

* * * * *

(上接第 17 页)

- (3) 不同含量定型剂的树脂浇铸体玻璃化转变温度 T_g 和吸水率未有大的变化。
- (4) 定型剂与树脂的相容性基本满足要求。不过由于定型剂主要集中分布于纤维和树脂的界面处，它对界面相的影响值得研究；另一个问题是定型剂的加入可能影响树脂对纤维的浸润和流动，进而影响制品的内部质量，因此需要对其作进一步全面评估。

参考文献

[1] KRUCKENBERG T M, PATON R. Resin transfer moulding for aerospace structures [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998.

[2] 张国利, 李嘉禄, 李学明. 增粘纺织预成型工艺优化设计 [A]. 第十二届全国复合材料学术会议论文集 [C]. 天津: 天津大学出版社, 2002. 1100- 1103.

[3] SHIH C H, LEE L J. Tackification of textile fiber preforms in resin transfer molding [J]. Journal of Composite Materials, 2001, 35 (21): 1954- 1981.

[4] BYRNE K. Development of EB6- a binder for use in novel processing techniques [A]. Proceeding of the 46th International SAMPE Symposium [C]. Covina: SAMPE, 2001. 804- 813.

[5] MCKILLEN JOHN M. Process tolerant resin transfer molding products [A]. Proceeding of the 26th International SAMPE Technical Conference [C]. Atlanta: SAMPE, 1994. 423- 429.

[6] HECK, HENRY G, WHITE, et al. Preform for molding process [P]. USA Patent: 5071711, 1991- 01- 25.

[7] KITTELSON J L, HACKETT S C. Tackifier/resin compatibility is essential for aerospace grade resin transfer molding [A]. Proceeding of the 39th International SAMPE Symposium [C]. Anaheim: SAMPE, 1994. 83- 96.

[8] WHITE, WARREN D, COOK, et al. Process for resin transfer molding using a partially cured tackifier [P]. USA Patent: 5427726, 1994- 12- 02.

收稿日期: 2004-11-08; 修订日期: 2004-01-12

作者简介: 梁子青 (1972-), 男, 博士, 工程师, 从事复合材料预成型体制备及成型工艺研究, 联系地址: 北京 81 信箱 3 分箱 (100095)。