

TC21 合金应力控制和应变控制的低周疲劳行为

虞忠良^{1,2}, 赵永庆¹, 周廉¹, 孙军²

(1. 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

(2. 西安交通大学, 陕西 西安 710049)

摘要: 研究 TC21 合金应变控制和应力控制的低周疲劳行为。实验温度为室温, 循环应变比和应力比均为 0.1, 载荷波形为三角波。结果表明, 在应变疲劳的最初阶段, TC21 合金循环拉应力时快速软化, 循环压应力时快速硬化, 随着循环进行软化和硬化速度降低。在整个循环阶段, 软化速度与应变有关; 背应力影响较小, 摩擦应力一直在变化, 循环应力的变化与摩擦应力有关。应力控制的低周疲劳结果表明, TC21 合金循环蠕变明显, 循环蠕变与应力大小有关, 摩擦应力是影响循环蠕变的主要因素。

关键词: TC21 合金; 低周疲劳; 摩擦应力; 背应力; 循环蠕变

中图分类号: TG 146.2⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)02-0224-05

工程上构件不可避免有缺口存在, 常采用低周疲劳模拟缺口根部由于塑性变形而导致的疲劳破坏。同时, 低周疲劳也是材料疲劳变形机制性研究的主要方式^[1~8]。低周疲劳可采用应变控制和应力控制 2 种方式, 应变控制可采用较多的实验方法。

在选择支撑机械结构的材料时, 材料的力学性能是最重要的指标, 在漫长的疲劳过程中其稳定性对服役的可靠性有重要影响。已有的研究表明^[9~11], 在非对称载荷条件下, 应变控制低周疲劳的平均应力会发生松弛, 而在应力控制疲劳条件下, 循环应力较高材料将有循环蠕变变形(棘轮效应), 循环蠕变变形的累积可导致构件尺寸超标失效并加速失效。有关钛合金低周疲劳行为研究并不多, 多为应变控制, 循环应变比为-1。

材料的宏观变形应力可分为摩擦应力和背应力。摩擦应力为晶格阻力, 为短程应力范畴, 背应力为位错间相互作用力, 属于长程应力范畴。确定摩擦应力和背应力的方法有多种, 可以采用低周疲劳的循环滞后环来确定其摩擦应力和背应力^[12~14]。Kuhlmann-Wilsdorf 等人用铜单晶应变控制的低周疲劳循环滞后环得到疲劳过程摩擦应力和背应力, Feaugas 等人由 Ti-6246 合金循环滞后环得到摩擦应力和背应力分量, 这些都是在循环应变比为-1 的条件下。

TC21 合金是我国自主研发的新一代高强高韧高损伤容限钛合金, 将主要应用于航空工业领域, 为了

使合金更安全可靠应用, 对合金不同条件下的低周疲劳行为的研究十分必要。本实验采用应变控制和应力控制 2 种方式, 研究在循环应变比为 0.1 时 TC21 合金的低周疲劳的循环应力响应以及摩擦应力和背应力随循环的变化, 研究应变比为 0.1 合金的循环蠕变行为。

1 实验方法

所选用的材料为 TC21, 是一种两相钛合金。材料经如下热处理: 910 °C, 1 h, AC + 550 °C, 6 h, AC, 所得到的组织为双态组织。对材料的室温力学进行测量, 结果示于表 1。

表 1 TC21 合金室温下的力学性能

Table 1 The mechanical properties of TC21 alloy at room temperature

σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%
1240	1100	18

低周疲劳在 Instron 疲劳试验机上进行。应变疲劳采用 1.2%, 2%, 2.4%, 2.8% 4 个应变, 循环应变比为 0.1, 波形为三角波, 频率为 0.17 Hz。应力疲劳的最大循环应力分别为 1100, 1140, 1180 MPa, 循环应力比为 0.1, 波形为三角波, 频率也是 0.17 Hz。疲劳试样的标距处截面尺寸均为 $\Phi 5$ mm, 具体尺寸根据 GB3075 的推荐尺寸及试验机夹头确定。

收到初稿日期: 2008-01-23; 收到修改稿日期: 2008-11-28

基金项目: 国家“973”计划项目(2007CB613807)

作者简介: 虞忠良, 男, 1971 年生, 博士后, 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016, 电话: 029-86231078, E-mail: zhyu163@163.com

2 结果与讨论

2.1 应变控制的低周疲劳

图 1 是合金在 4 个应变条件下第一周疲劳的应力-应变循环滞后环。由图可以看到, 随着循环应变升高, 应力升高, 应力-应变循环滞后环拉得更开。由于材料普遍存在的包辛格效应, 合金反向屈服强度降低, 4 个应变下合金反向变形材料已经屈服, 每一周循环都含有一定塑性应变的分量, 即使是最大循环应变在 1.2% 的疲劳条件下。

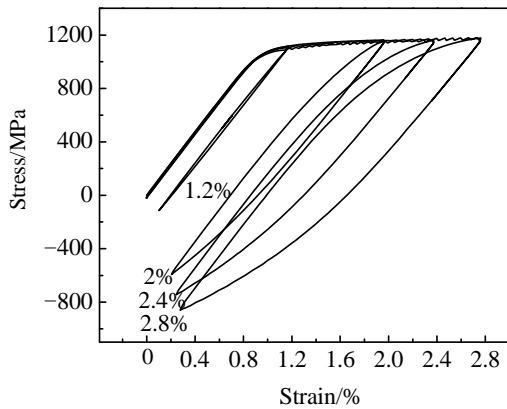


图 1 TC21 合金第一周循环应力-应变滞后环

Fig.1 The cyclic stress-strain hysteresis loop of first cycle

将循环滞后环每一周的最大拉应力和最大压应力记录, 得到 TC21 合金循环应力响应曲线, 见图 2 所示。由图可见, 在循环的初始阶段, 合金在循环拉应力时明显软化, 而且直至疲劳试样断裂一直软化。循环软化的速度与试样所受的应变有关, 应变越高, 循环应力软化的速度越快。对于循环压应力, 其变化特征与拉应力完全相反, 在整个循环阶段表现出的是循环硬化, 在循环初始对应循环拉应力快速软化阶段, 循环压应力为快速硬化, 而对应循环拉应力缓慢软化阶段, 循环压应力缓慢硬化, 循环后期压应力的硬化速度低于拉应力的软化速度。这与对称循环状态(循环应变比 $R=-1$)的循环压应力变化不同^[1], 在对称循环状态下, 循环压应力也是一直软化。

非对称的轴向应变控制低周疲劳, 会出现平均应力的弛豫^[12], 对于本研究的 TC21 合金, 由图 2 可以看到, 由于循环拉应力软化和循环压应力硬化, 所以平均应力一直降低, 即表现出平均应力的松弛。尽管在整个疲劳过程中, 循环拉伸应力时软化, 循环压应力时硬化, 但总的循环应力一直在减小, 材料总体在软化, 如图 3 所示。可以看到, 总的应力与应变有关。

对材料的宏观应力, 可将其分解为摩擦应力和背应

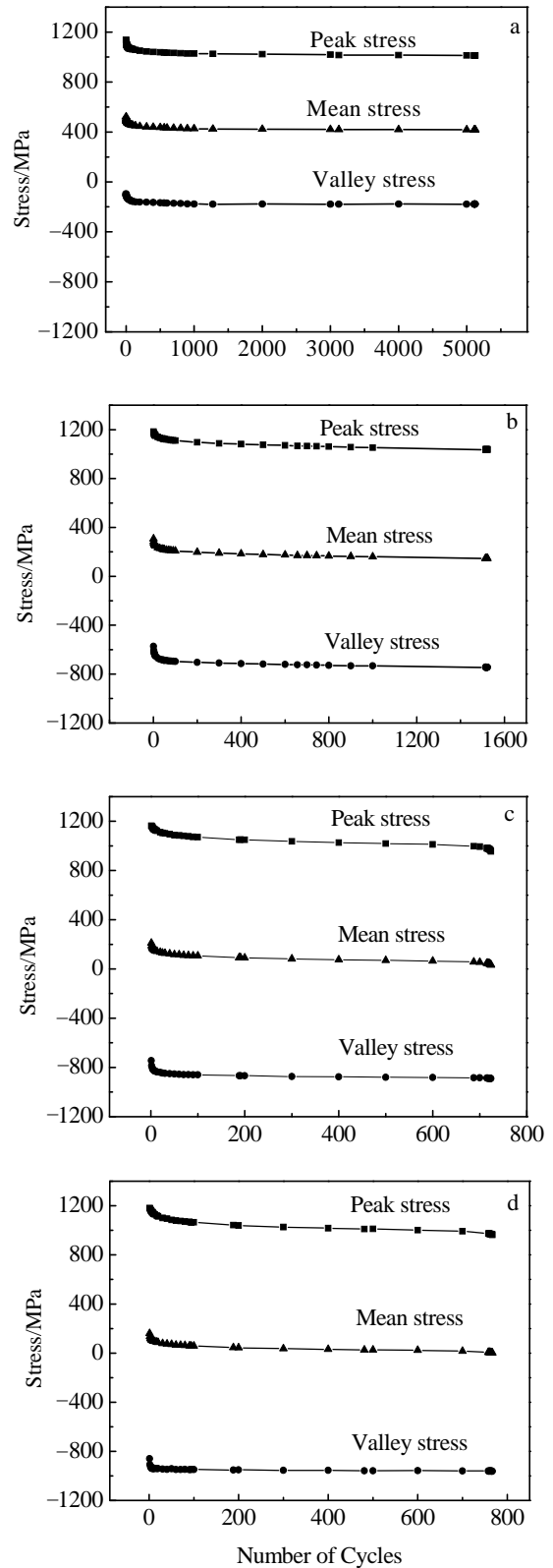


图 2 合金在不同应变下循环应力响应曲线

Fig.2 The cyclic stress response curves with different strain amplitudes: (a) $\Delta\epsilon/2=1.2\%$; (b) $\Delta\epsilon/2=2\%$; (c) $\Delta\epsilon/2=2.4\%$; and (d) $\Delta\epsilon/2=2.8\%$

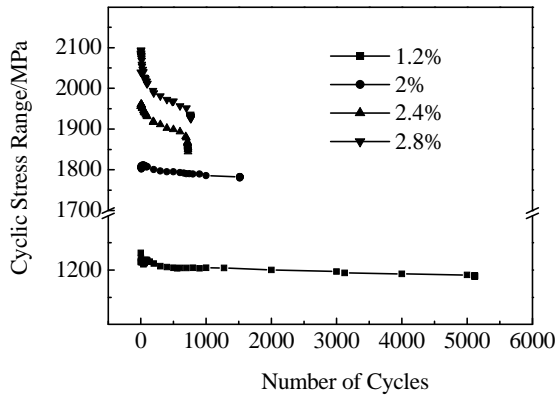


图 3 合金在不同应变下循环应力的变化

Fig.3 The overall stress range at different cyclic strain

力。采用 Kuhlmann 的方法，利用循环应力-应变滞后环来区分循环变形时每周的摩擦应力和背应力的变化。首先在循环滞后环上确定每半周开始屈服的应力 τ_s ，每周变形的峰值应力和谷值应力可以由实验记录数据得到 (τ_c)，然后得到循环摩擦应力和背应力的大小^[9-11]。

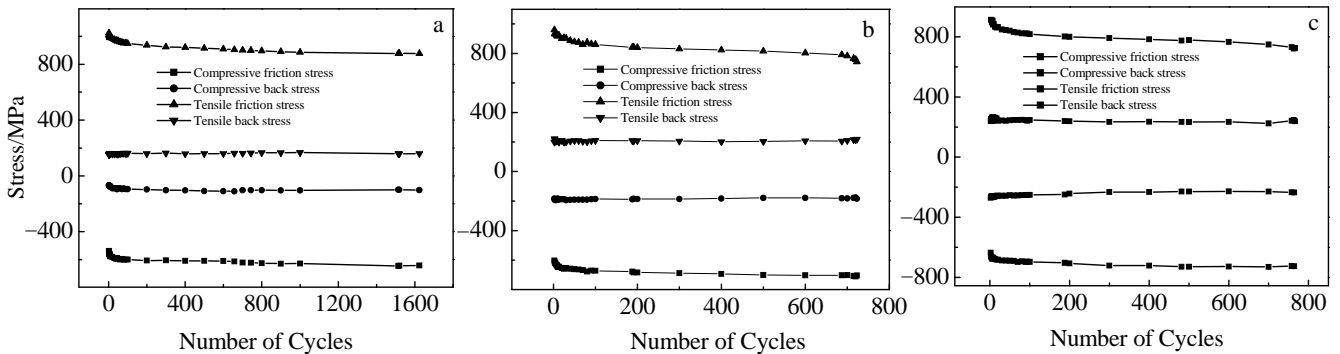


图 4 合金在不同应变下压缩半周和拉伸半周摩擦应力和背应力变化

Fig.4 The friction stress and back stress of tensile and compressive half cycle: (a) $\Delta\epsilon/2=2\%$; (b) $\Delta\epsilon/2=2.4\%$; and (c) $\Delta\epsilon/2=2.8\%$

2.2 应力控制的低周疲劳

图 5 是 TC21 合金不同应力下每周的最大和最小应变随疲劳周数的变化曲线。可以看到，不同应力下，材料都发生明显的循环蠕变。循环蠕变的速度与应力的关系是应力越高，循环蠕变越明显。循环蠕变早期的变形速度很快，随着循环进行，循环蠕变速度降低。

如同在应变控制的循环应力响应曲线，试样在最初的几周循环拉应力时快速软化，对应的应力控制的低周疲劳曲线上，循环蠕变应变快速增大，对应应变

图 4 是合金在不同应变下的疲劳滞后环得到的摩擦应力和背应力的变化曲线。由于拉伸半周和压缩半周不同，对宏观应力的分解分别采用拉伸半周和压缩半周的实验数据。由图可以看到，在室温条件下，摩擦应力一直变化，而背应力的变化不大。在室温条件下，钛合金的位错主要以平面滑移方式运动，交滑移不明显，热效应也不明显，滑移可逆性好，因而在一定应变下，位错密度变化不大，因而背应力变化不大。而高铝当量的钛合金中必含有有序的 α_2 相(Ti_3Al)，位错容易以切过 α_2 相的方式运动，位错首次切过 α_2 相后，再次切过 α_2 相更容易，钛合金的软化被认为与 α_2 相的剪切有关^[7]。

不同应变条件下，背应力大小并不相等，应变越大背应力越高。2 个半周背应力并不一定相等，相差值与应变有关，在最大应变为 2% 时拉伸半周的背应力大于压缩半周的背应力，在应变为 2.4% 和 2.8% 2 个半周的背应力相差不大。由于不同应变下背应力不同，而且背应力影响合金反向的屈服，所以不同应变下的摩擦应力也不相等。拉伸半周的摩擦应力随着循环进行在减小，而压缩半周摩擦应力随着循环进行一直增大，循环应力的软化和硬化是内部摩擦应力变化的结果。

控制疲劳循环应力缓慢软化阶段，循环蠕变速度也在降低。在应力控制条件下，每一周的循环蠕变变形量很小。

应变控制和应力控制疲劳材料的软化和硬化的本质是一致的。由应变控制的低周疲劳知，室温疲劳时，钛合金的循环摩擦应力在一直降低，摩擦应力降低表明，材料屈服强度降低，因而恒定的外加应力条件下，摩擦应力降低，材料必然有进一步屈服，因而每周有一定微量的塑性变形。循环蠕变与材料的循环软化-硬化效应有关，循环软化的材料容

易产生循环蠕变, 而对于循环硬化的材料, 循环蠕变效应减少。

循环蠕变的大小与疲劳的平均应力和最大循环应力有关^[13, 14]。最大循环应力导致每周微量塑性应变, 而平均应力导致恒应力的蠕变。钛合金容易在室温条

件下发生蠕变, 即使最大应力在 80% 的屈服应力。然而, 在本实验条件下, 即使最大应力为 1180 MPa, 其平均应力只为屈服强度的 60%, 循环蠕变主要是最大应力的作用。

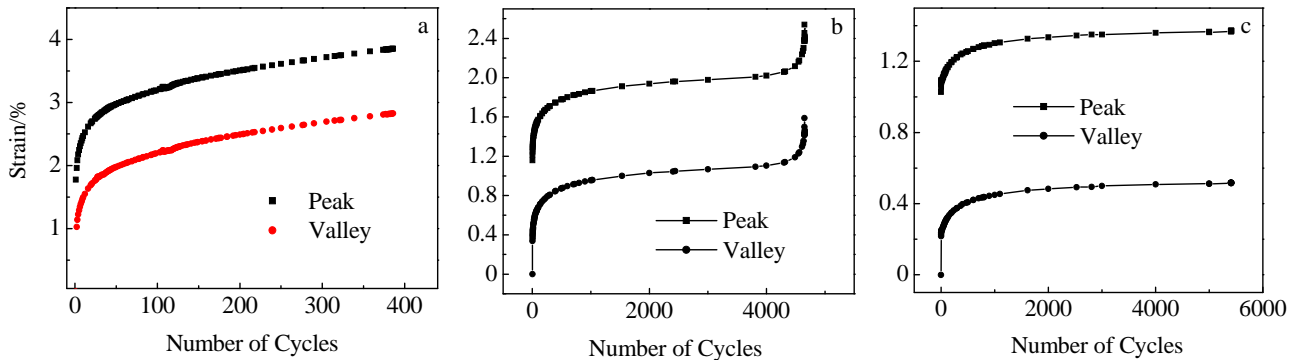


图5 合金循环应力-应变及循环蠕变曲线

Fig.5 The cyclic stress-strain and cyclic creep curves at: (a) 1180 MPa; (b) 1140 MPa; and (c) 1100 MPa

3 结 论

1) 在应力控制的低周疲劳条件下, 不同应变下 TC21 合金在循环拉应力时软化, 循环压应力时硬化, 尤其是在循环初始阶段, 循环拉应力时快速软化, 循环压应力时快速硬化, 而随着循环的进行, 软化和硬化的速度降低。所有的软化和硬化均随应变增大而加快。

2) 利用循环应力-应变滞后环, 分别对拉伸半周和压缩半周的宏观应力划分, 得到摩擦应力和背应力分量。在每一周循环中, 拉伸半周和压缩半周的背应力差与应变有关。不同应变下, 摩擦应力和背应力大小均随应变增大而变化。在整个循环变形期间, 拉伸半周的摩擦应力使材料软化, 压缩半周的摩擦应力使材料硬化, 背应力的影响不大, 循环应力的软化和硬化主要是摩擦应力的变化造成。

3) 在应力控制的低周疲劳条件下, TC21 合金有明显的循环蠕变变形, 循环蠕变的大小与合金的循环应力有关。摩擦应力是影响钛合金的循环蠕变变形的主要因素。

参考文献 References

[1] Yu Z L, Li S X, Liu Y Y *et al.* *J Mater Sci*[J], 2005, 40(22): 6049
 [2] Potozky P, Maier H J, Christ H J. *Metall Trans*[J], 1998, A29:

2995

[3] Mahajan Y, Margolin H. *Metall Trans*[J], 1982, 13A: 269
 [4] Mahajan Y, Margolin H. *Metall Trans*[J], 1982, 13A: 257
 [5] Nanjundaswamy G S, Ramchandra C, Sungupta P K *et al.* *J Mater Sci Lett*[J], 1998, 17: 993
 [6] Helbert A L, Feaugas X, Clavel M. *Metall Trans*[J], 1999, 30A: 2853
 [7] Feaugas X, Clavel M. *Acta Mater*[J], 1997, 45(7): 2685
 [8] Feaugas X, Pilvin P, Clavel M. *Acta Mater*[J], 1997, 45(7): 2703
 [9] Suresh S, Translated by Wang Zhongguang(王中光) *et al.* *Fatigue of Materials*(材料疲劳)[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1993: 277
 [10] Cai Lixun(蔡力勋), Liu Yujie(刘宇杰), Ye Yuming(叶裕明) *et al.* *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2004, 40(11): 1155
 [11] Yang Xianjie(杨显杰). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2004, 40(8): 851
 [12] Kuhlmann-Wilsdorf D, Laird C. *Mater Sci Eng*[J], 1979, 37: 111
 [13] Dickson J I, Boutin J, Handfield L. *Mater Sci Eng*[J], 1984, 64: L7
 [14] Dickson J I, Handfield L, L'Esperance G. *Mater Sci Eng*[J], 1984, 64: L3

Strain and Stress Controlled Low Cycle Fatigue Behaviors of TC21 alloy

Yu Zhongliang^{1,2}, Zhao Yongqing¹, Zhou Lian¹, Sun Jun²

(1. Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

(2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In this article the strain controlled and stress controlled low cycle fatigue behaviors of TC21 titanium alloy were investigated. The fatigue tests were performed at room temperature and cyclic strain and stress ratio of 0.1 with triangle load wave. During the initial stage of strain controlled fatigue, the cyclic tensile stresses soften rapidly and the cyclic compressive stresses harden rapidly at the same time, the rates of cyclic softening and cyclic hardening decrease with the fatigue progress. During the overall fatigue progress, the soften rate is related to the cyclic strain but little to the cyclic stress, which is related to the macro friction stresses. Obvious cyclic creep occurs under the stress controlled low cycle fatigue conditions, and the magnitude of cyclic creep strain is related to the maximum cyclic stress. The softening of tensile friction stresses is the main factor of cyclic creep.

Key word: TC21 alloy; low cycle fatigue; friction stress; back stress; cyclic creep

Biography: Yu Zhongliang, Post Doctor, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, P. R. China, Tel: 0086-29-86231078, E-mail: zhyu163@163.com。