



保载时间和应力比对Ti6242合金 应力应变响应影响

张明达¹, 曹京霞¹, 翟战江², 杨泽南¹, 张彪², 隋楠¹, 黄旭¹

(1. 中国航发北京航空材料研究院 先进钛合金航空科技重点实验室, 北京 100095;

2. 中国钢研科技集团有限公司 钢研纳克检测技术股份有限公司, 北京 100081)

摘要: Ti6242等一些近 α 和 $\alpha+\beta$ 型钛合金存在保载疲劳行为, 研究结果显示其保载疲劳失效内在机制主要与周期载荷作用下材料内部微区不均匀变形行为密切相关。本研究在对钛合金保载疲劳现有软-硬取向模型的理解基础上, 通过设计Ti6242合金在不同保载时间和应力比载荷作用下的保载疲劳试验, 验证保载时间和应力比对保载疲劳寿命影响规律, 更长的保载时间引起Ti6242合金保载疲劳寿命单调衰减并趋于稳定, 更高的应力比则引起其保载疲劳寿命呈指数增长。从应力-应变曲线分析角度表征Ti6242合金在保载疲劳载荷下的应力、应变响应特征, 分析显示保载时间主要影响材料内部局部应力、应变的重新分布和累积变形协调过程, 应力比则主要加剧材料在循环载荷中内部软相和硬相的微区应变差别。

关键词: 钛合金; 保载时间; 应力比; 保载疲劳; 应力; 应变

文章编号: 1004-0609(2022)-06-1685-10

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

引文格式: 张明达, 曹京霞, 翟战江, 等. 保载时间和应力比对Ti6242合金应力应变响应影响[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(6): 1685-1694. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-36743

ZHANG Ming-da, CAO Jing-xia, ZHAI Zhan-jiang, et al. Effects of dwell time and stress ratio on stress and strain responses of Ti6242 alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(6): 1685-1694. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-36743

钛合金是航空制造领域的重要金属结构材料之一, 其优异的综合力学性能及较低的合金密度可以满足航空装备对更高的性能、更优的经济性和严苛的安全性等多方面实际需求。高温钛合金作为钛合金体系的重要分支之一, 主要用于制备航空发动机的盘、叶片、整体叶盘、机匣等零部件。这些零部件在实际服役环境中, 通常需要承受较高温度、循环载荷、意外冲击等复杂的工况服役环境, 因此, 对于此类零部件的制备需要严格执行制备工艺和质量控制要求, 并结合各工序步骤的检验和评估保证其质量和性能满足要求。但即使是在严格的制备工

艺要求和全面的检验评估下, 仍有一些航空发动机内钛合金零部件异常失效事件发生。钛合金保载疲劳失效就是引起设计人员和研究人员关注的一种非常规钛合金失效行为。国内外的航空发动机设计人员发现在选用钛合金制备风扇和压气机等零部件的过程中, 某些种类的近 α 和 $\alpha+\beta$ 型钛合金在近室温度区间表现出保载疲劳提前失效的力学性能特点, 即此类钛合金材料在进行连续周期循环载荷测试时, 在最大载荷停留一段时间会引起疲劳寿命明显降低的现象。对于保载疲劳这种非常规疲劳失效行为, 使用一般的三角波或正弦波低周疲劳测试不

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(91860106)

收稿日期: 2021-06-15; 修订日期: 2021-10-09

通信作者: 张明达, 高级工程师, 博士; 电话: 15901022010; E-mail: 15901022010@139.com

能真实地反映钛合金材料的疲劳寿命,因此,在真实服役环境中容易发生低于设计使用寿命的提前失效,甚至引发严重的航空事故^[1]。

钛合金近室温保载疲劳失效寿命一般受到载荷大小、波型、温度和环境等测试因素的影响。对于钛合金保载疲劳的测试和分析,研究人员多使用梯形波与三角波疲劳失效寿命相比的方法评价其保载疲劳敏感性。一般随着保载载荷的增加,钛合金通常表现出更高的保载疲劳敏感性;随着疲劳测试温度的降低,钛合金的保载疲劳敏感性增加。ZHENG等^[2]认为Ti6242合金和Ti6246合金存在保载疲劳高敏感温度区间,Ti6242合金的敏感温度峰值在120℃左右,Ti6246合金的敏感温度峰值在300℃左右。张明达等^[3]分析了高载荷引起Ti6242合金表现出更高的保载疲劳敏感性。XI等^[4]讨论了初始应变参数对Ti-6Al-4V和Ti-6Al-3Mo-2Sn-X两种钛合金保载疲劳寿命的影响。PRASAD等^[5]比较了疲劳载荷波形加载速度快慢对Timetal 834钛合金疲劳寿命的影响,认为与动态应变的响应相关。保载疲劳载荷的保载时间和应力比是影响钛合金疲劳失效寿命的重要参数。对于钛合金保载疲劳测试,目前尚没有统一的测试要求和标准,研究人员使用梯形波的加载方式时,通常采用120 s的保载时间参数,也有部分研究人员使用30 s或60 s等时间参数;应力比参数多选用 $R=0$,部分研究人员使用 $R=0.1$ 或 0.05 等。一些研究工作介绍了这两个重要测试参数对保载疲劳性能的影响。例如EVANS等^[6]研究了保载时间、载荷大小和温度等因素对IMI 685钛合金累积塑性变形及裂纹扩展行为的影响,认为冷蠕变行为最终引起基面裂纹萌生及扩展,加速了疲劳失效行为。杨丽娜等^[7]研究了高应力水平下波形对Ti60合金疲劳损伤行为的影响,保载波形引起疲劳寿命明显降低,裂纹源多萌生于材料内部。DING等^[8]研究应力比和温度对TC4钛合金在疲劳载荷作用下裂纹扩展行为的影响,研究结果在高应力比条件下,提高测试温度会促进裂纹扩展(室温 \rightarrow 350℃),而在较低应力比条件下,高温仅在初始临界阶段显示出高裂纹扩展速率特征。WANG等^[9]分析不同峰值载荷和保载时间对TC4 ELI钛合金的疲劳失效行为影响,发现更高疲劳载

荷和更长保载时间会降低疲劳失效寿命,更高的载荷引起累积塑性应变明显增加。RAO等^[10]测试了拉-压载荷方式和保载时间对IMI 834钛合金在873 K温度下疲劳性能的影响,保载疲劳的加载时间增加和压缩载荷形式对疲劳失效寿命有不利影响。

不同于钛合金常规疲劳失效行为,保载疲劳的内在失效机制通常被认为与材料内部组织的种类、形态和比例等因素密切相关^[11-12]。由于 α 相的密排六方晶体结构各向异性,保载疲劳载荷使钛合金产生持续的冷蠕变变形行为,加剧了材料内部的不均匀微区塑性变形行为和局部应力集中现象。这种晶粒尺度的微区应力应变不均匀分布最终演变为难变形晶粒的裂纹萌生和持续扩展直至失效断裂。基于晶体塑性有限元模拟的软-硬取向模型可形象地展现保载疲劳载荷作用下的局部应力应变分布和演变过程^[13-15]。保载疲劳失效的过程是外界载荷条件和环境因素与材料内部演变的共同作用结果,载荷、保载时间、温度等外在测试参数可以通过影响材料内部的不均匀微区塑性变形程度进一步增加或者降低疲劳失效寿命。目前,更多的学者开始从位错、取向、应变等角度进一步对钛合金保载疲劳内在机制开展深入研究^[16-21]。

本研究基于对钛合金保载疲劳失效软-硬取向模型内在机制的理解,通过设计钛合金在不同保载时间和应力比载荷作用下的保载疲劳测试试验,验证保载时间和应力比对保载疲劳寿命的影响规律,并侧重从应力-应变曲线分析的角度系统表征Ti6242合金在保载疲劳载荷下的响应特征,进一步理解和探索保载疲劳失效的内在机制。

1 实验

本研究使用Ti6242合金(Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo)制备的盘锻件,合金 $\beta\rightarrow\alpha$ 相相变点温度评估为1015~1020℃,热处理制度采用固溶+时效热处理。为保证测试样品一致性,沿盘件径向相同厚度位置取室温拉伸和疲劳试样。拉伸试样为中间平行段部分直径为6 mm、两端固定端部分螺纹直径为12 mm的圆棒试样;疲劳试样采用中间平行段部分直径为6 mm、两端固定端部分螺纹直径为14 mm的

圆棒试样。拉伸测试参照 ASTM-E8/EM 标准, 在 MTS 万能试验机进行室温拉伸测试。应力控制疲劳测试参照 ASTM-E466 标准, 使用 MTS landmark 疲劳试验机测试。疲劳测试参数采用梯形波型控制, 保载载荷 869 MPa, 加载和卸载各 1 s, 保载时间 t 选取 0 s、1 s、5 s、20 s、60 s、120 s 和 240 s, 应力比 R 选取 -1、-0.75、-0.5、-0.25、0 和 0.5。同时取力学试样圆棒轴向垂面的组织试样观察微观形貌, 使用 Zeiss 光学显微镜采集金相组织, 使用 FEI Nova nano 450 场发射扫描电镜进行高倍微观组织形貌分析。

2 实验结果

2.1 Ti6242 合金微观组织形貌

本研究所用 Ti6242 合金的微观组织形貌如图 1 所示, 为典型的双态组织, 微观组织由等轴初生 α 相和 β 转变相构成, 其中等轴初生 α 相相比例约为 23%, 大部分等轴初生 α 相晶粒直径范围 10~25 μm 。 β 转变相由层片状次生 α_s 相和 β 相构成, 图 1(b) 更清晰地显示 β 转变相的精细微观形貌, 经固溶+时效处理后的 β 转变组织中显示出明显的区域集束特征, 相同层片排列的区域尺寸范围略大于等轴初生 α 相尺寸, 次生 α_s 相层片厚度约为数微米, β 相层片厚度仅为 0.2 μm 左右, 一般不超过 0.5 μm 。

2.2 Ti6242 合金拉伸和疲劳性能

与上述微观组织所对应的 Ti6242 合金室温拉伸力学性能结果显示, 其屈服强度 $\sigma_{p0.2}$ 和抗拉强度 σ_m 分别为 880 MPa 和 970 MPa, 塑性伸长率 A 和面缩率 Z 分别为 20% 和 39%。保载疲劳测试包括不同保载时间和应力比两个系列, 不同保载时间系列(t 选取 0 s、1 s、5 s、20 s、60 s、120 s 和 240 s) 采用 869 MPa 保载载荷, 应力比 $R=0$, 加载和卸载各 1 s; 不同应力比系列(R 选取 -1、-0.75、-0.5、-0.25、0 和 0.5) 采用 869 MPa 保载载荷, 保载时间 120 s, 加载和卸载同样为各 1 s。

图 2 所示为保载疲劳失效寿命随保载时间的变化示意图, 结果显示, 随着保载时间由 0 s 逐渐增加至 240 s, Ti6242 合金保载疲劳失效寿命呈现快

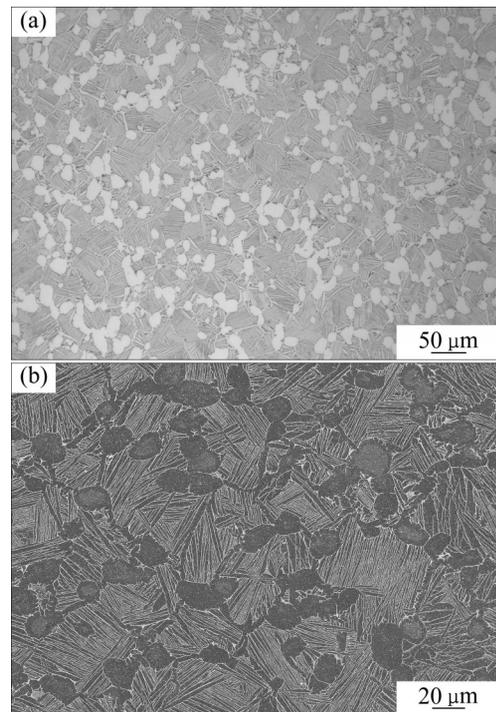


图 1 Ti6242 合金显微组织

Fig. 1 Microstructures of Ti6242 alloy: (a) OM; (b) SEM

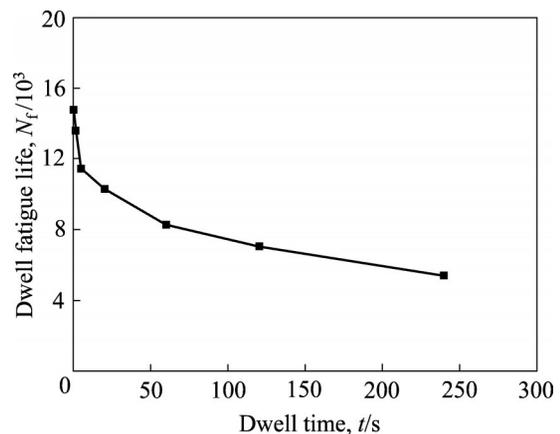


图 2 Ti6242 合金保载疲劳失效寿命与保载时间关系

Fig. 2 Relationship between dwell fatigue failure life and dwell time of Ti6242 alloy

速下降后逐渐趋缓的变化过程。这种单调衰减规律与文献[6]中描述的规律一致, 文献[6]中选用了跨度更大的保载时间参数差别, 结果显示超过 2 min 的保载时间可使 TC4 ELI 钛合金疲劳失效寿命下降至数百周次。

图 3 所示为保载疲劳失效寿命随应力比的变化示意图, 结果显示随着应力比由 -1 增加至 0 (应力比 $R=0.5$ 试样 10000 周次未断提前终止), Ti6242 合金

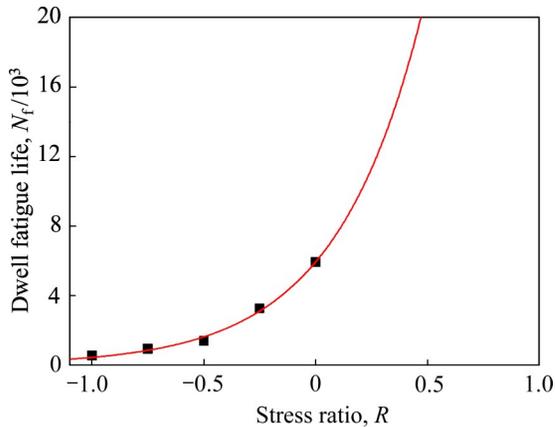


图3 Ti6242合金保载疲劳失效寿命与应力比关系

Fig. 3 Relationship between dwell fatigue failure life and stress ratio of Ti6242 alloy

保载疲劳失效寿命呈现指数增长的变化规律, 使用 $y=a \cdot e^{bx}$ 公式较好拟合, 拟合相关系数为0.9938。

3 分析与讨论

3.1 应力-应变曲线响应分析

进行不同保载时间和应力比的保载疲劳测试时, 使用轴向引伸计全程实时记录工程应力和工程应变, 并根据工程应力-工程应变($\sigma_e-\varepsilon_e$)与真应力-真应变($\sigma_t-\varepsilon_t$)的换算关系, 得到其真应力-真应变曲线如图4所示。应力-应变曲线显示, 由于试样沿轴向持续累积塑性变形, 随着疲劳周次数增加, 其真应力峰值略有上升; 同时, 在初始循环阶段和临近失效循环阶段, 载荷引起单周次应变变化幅度较大, 而中间阶段相比应变变化幅度较小且应力-应变曲线相互叠加, 这种现象在图5所示的累积应变随疲劳周次变化示意图中得到印证。累积塑性变形变化经历三个主要阶段: 1) 施加载荷初期累积塑性应变急剧增加, 每周次的应变范围逐渐增加; 2) 随后累积塑性应变达到稳定增长阶段, 单周次累积塑性应变增幅较小, 单周次载荷最大应变和卸载应变之差也保持恒定; 3) 在临近疲劳失效末期, 累积塑性应变再次快速增加, 试样快速失稳并断裂失效。

Ti6242合金单个循环周应力-应变曲线如图6所示。由图6可见, 在869 MPa载荷保载疲劳测试过程的每个循环周期中, Ti6242合金未表现出完全

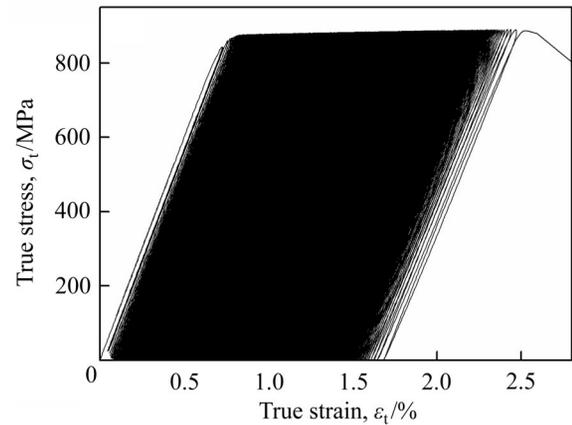


图4 Ti6242合金保载疲劳真应力-真应变曲线

Fig. 4 True stress-true strain curves of dwell fatigue of Ti6242 alloy

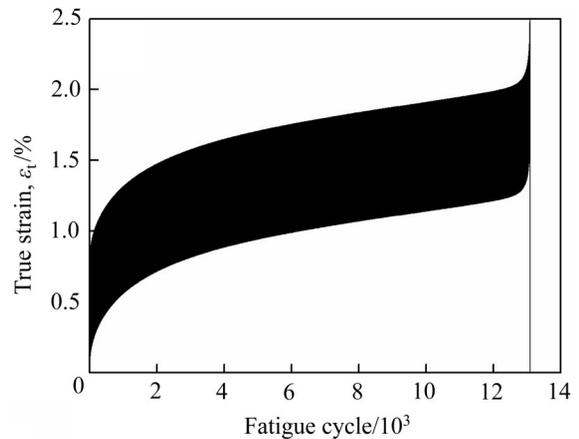


图5 Ti6242合金累积塑性应变随疲劳周次变化曲线

Fig. 5 Change curves of cumulative plastic strain ε_t with fatigue cycles of Ti6242 alloy

弹性的加载和卸载过程, 仅在每个循环周期的加载和卸载初期符合完全线性的弹性变形, 其斜率分别为加载弹性模量 E_l 和卸载弹性模量 E_u ; 在加载阶段和卸载阶段的末期均出现偏离弹性变形的低程度塑性变形, 这种较低程度偏离弹性变形的塑性变形远低于常规标准拉伸测试中定义屈服强度时的塑性变形程度。本研究使用0.002%应变界定发生低程度塑性变形, 规定加载时的屈服应力值 $\sigma_{p0.002}$ 和卸载时的逆转变应力值 $\sigma_{r0.002}$; 同时, 计算每个循环周期卸载时弹性阶段延长至零载荷的应变值与完全卸载的实际应变值的差值作为附加逆应变 ε_i , 测量每个循环周期保载阶段末期应变值与起始应变值的差值作为保载应变 ε_d 。结合不同保载时间和应力比

的保载疲劳测试中这些关键参数的变化和规律, 进一步讨论 Ti6242 合金材料内部应力应变的响应和演变过程。

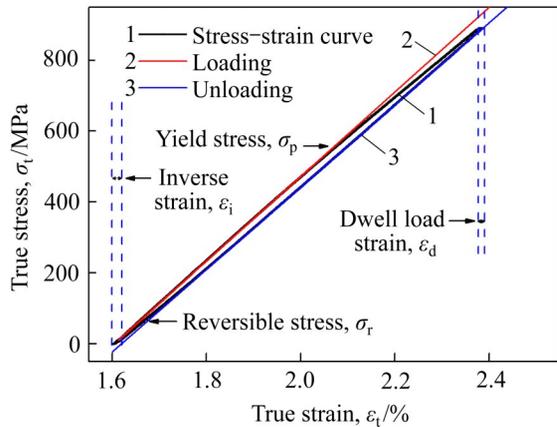


图 6 Ti6242 合金单个循环周应力-应变曲线
Fig. 6 True stress-true strain curves of Ti6242 alloy in one cycle period

3.2 不同保载时间对 Ti6242 合金应力-应变曲线响应的影响

图 7 所示为不同保载时间条件下 Ti6242 合金加载和卸载时弹性模量 E 随疲劳周次变化示意图。弹性模量存在一些初始差异性, 推断与不同位置切取试样的微观组织存在少量差异有关。由图 7 可见, 弹性模量数值范围在 1.19×10^{11} Pa 左右, 加载弹性模量 E_l 稍高于卸载弹性模量 E_u , 加载弹性模量 E_l 和卸载弹性模量 E_u 随着疲劳周次的增加均呈现单调下降的变化, 且保载时间的增加对弹性模量下降有促进作用。

保载时间对应力-应变曲线的应变参数变化影响如图 8 所示, 疲劳载荷初期较高的保载时间引起单周次保载应变 ϵ_d 明显增大, 但是单周次保载应变 ϵ_d 随着疲劳周次的增加逐渐减小; 经过数百个循环载荷后, 保载时间差别引起的单周次保载应变 ϵ_d 明显趋于近似。附加逆应变 ϵ_i 则呈现相反的变化规律, 附加逆应变 ϵ_i 随着疲劳周次的增加而逐渐增大, 高保载时间更早地并且更大程度地引起附加逆应变 ϵ_i 明显增大。

保载时间对应力-应变曲线的应力参数影响如图 9 所示, 在保载疲劳载荷测试初期, 材料屈服应力 $\sigma_{p0.002}$ 较高, 随着疲劳周次的增加, 屈服应力

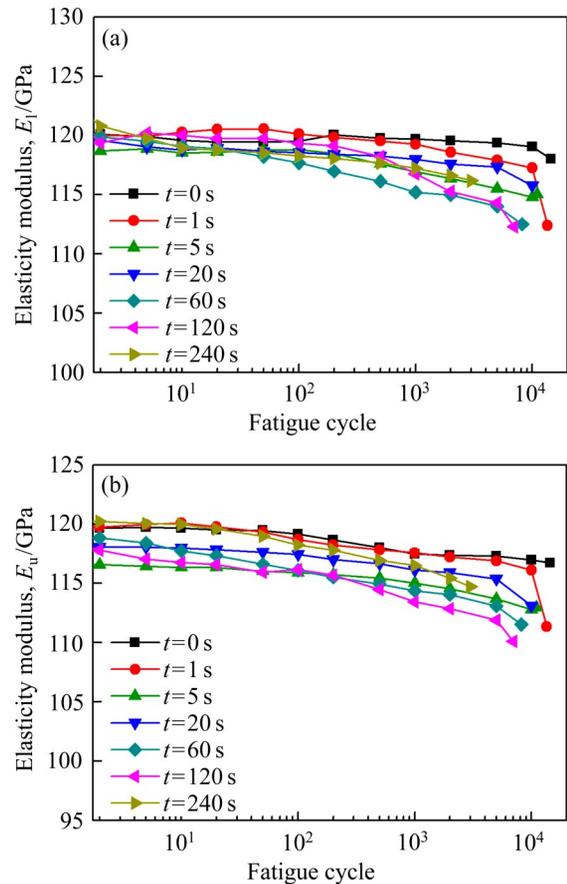


图 7 不同保载时间条件下 Ti6242 合金弹性模量随着疲劳周次的变化曲线

Fig. 7 Change curves of elasticity modulus with dwell fatigue cycles of Ti6242 alloy at different dwell time: (a) Loading process; (b) Unloading process

$\sigma_{p0.002}$ 快速下降并趋近稳定值约为 400~500 MPa; 不同保载时间对屈服应力 $\sigma_{p0.002}$ 下降程度的影响不明显。在保载疲劳载荷测试初期, 逆转变应力 $\sigma_{r0.002}$ 随着疲劳周次的增加而快速增大, 随着疲劳载荷周次的增加, 逆转变应力 $\sigma_{r0.002}$ 逐渐趋于稳定。较长的保载时间引起逆转变应力 $\sigma_{r0.002}$ 提升速度和幅度明显增大, 保载 240 s 试样的逆转变应力 $\sigma_{r0.002}$ 在数百周次内即达到 300 MPa, 并最终趋近于 400 MPa; 保载 0 s 试样的逆转变应力 $\sigma_{r0.002}$ 在 2000 周次才达到 200 MPa, 最终趋近于 300 MPa。

3.3 不同应力比对 Ti6242 合金应力-应变曲线响应的的影响

使用不同应力比进行保载疲劳测试时, Ti6242 合金加载和卸载时弹性模量 E 随应力比变化如图 10

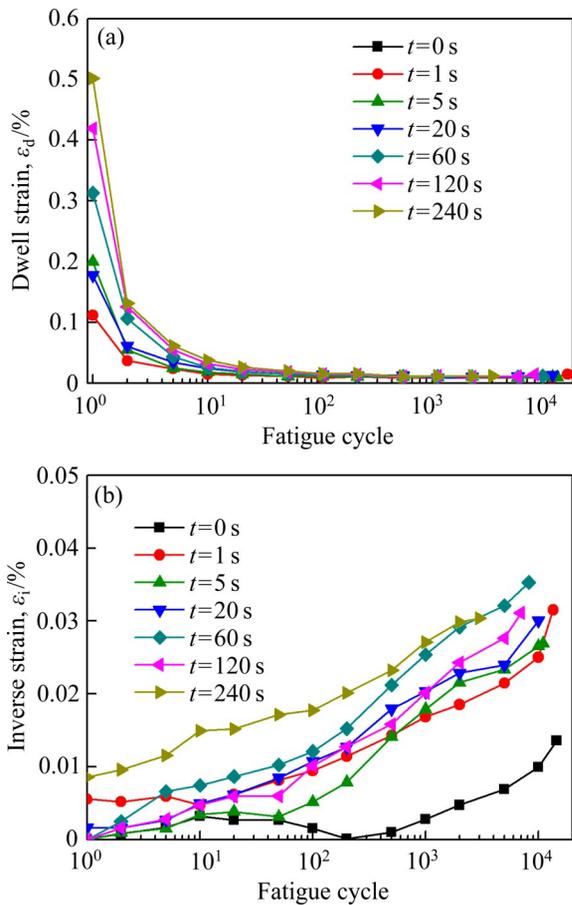


图8 不同保载时间条件下Ti6242合金应变参数随着疲劳周次的变化曲线

Fig. 8 Change curves of strain parameters with dwell fatigue cycles of Ti6242 alloy at different dwell time: (a) Dwell strain ϵ_d ; (b) Inverse strain ϵ_i

所示。由图10可见,弹性模量范围在 1.18×10^{11} Pa附近,加载弹性模量 E_1 和卸载弹性模量 E_0 随着疲劳周次的增加均呈现下降的变化,且应力比降低引起弹性模量下降幅度进一步增加,尤其在临界疲劳失效的测试后期,弹性模量下降速度增加且下降幅度进一步扩大。加载弹性模量 E_1 和卸载弹性模量 E_0 同样存在初始值的差异性。

图11所示为不同应力比条件下保载应变 ϵ_d 和附加逆应变 ϵ_i 随疲劳周次变化示意图。由图11可见,不同应力比的保载应变 ϵ_d 曲线呈现首尾高且中间低的特征,经历了前期数个循环载荷后,保载应变 ϵ_d 开始显现规律变化;较低的应力比引起单周次保载应变 ϵ_d 增大,较高的应力比引起保载应变 ϵ_d 趋于较低的稳定值,仅在临近失效的末期有少量翘尾提

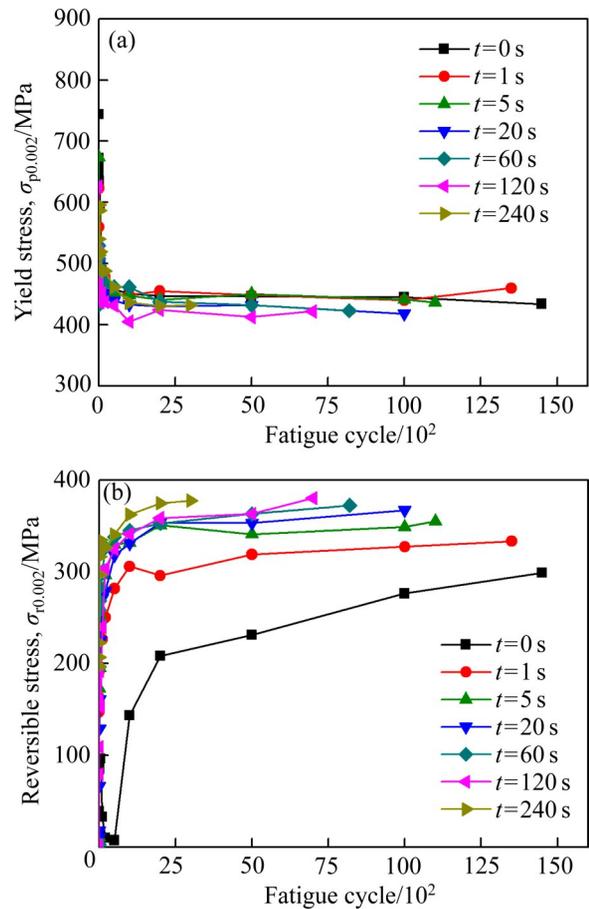


图9 不同保载时间条件下Ti6242合金应力参数随着疲劳周次的变化曲线

Fig. 9 Change curves of stress parameters with dwell fatigue cycles of Ti6242 alloy at different dwell time: (a) Yield stress $\sigma_{p0.002}$; (b) Reversible stress $\sigma_{r0.002}$

升。附加逆应变 ϵ_i 同样显示出应力比参数的明显作用,附加逆应变 ϵ_i 随着循环周期的增加而逐渐增大,较低的应力比引起附加逆应变 ϵ_i 明显增大;应力比为正值时,材料受到拉-拉循环载荷,附加逆应变 ϵ_i 缓慢增大;应力比为负值时,材料受到拉-压循环载荷,在反向压缩载荷作用下,试样更快地发生压缩屈服变形,引起附加逆应变 ϵ_i 急剧增大。

不同应力比还引起Ti6242合金在不同疲劳周次下的屈服应力 $\sigma_{p0.002}$ 和逆转应力 $\sigma_{r0.002}$ 产生明显差异,如图12所示。由图12可见,屈服应力 $\sigma_{p0.002}$ 与应力比有明显相关性,除第一个循环周期(初次由无载荷开始首次正向加载)有比较相似的屈服应力 $\sigma_{p0.002}$ 外,后续周次由于反向压缩加载的峰值应力差别,引起再次正向加载时屈服应力 $\sigma_{p0.002}$ 产生对

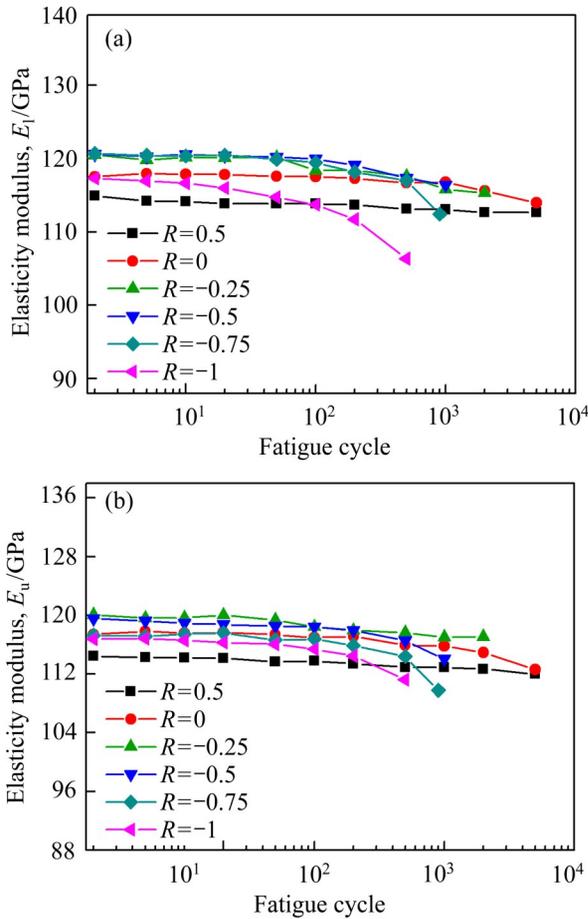


图 10 不同应力比条件下 Ti6242 合金弹性模量随着疲劳周次的变化曲线

Fig. 10 Change curves of elasticity modulus with dwell fatigue cycles of Ti6242 alloy at different stress ratios: (a) Loading process; (b) Unloading process

应变化: 应力比为 0.5 时, 屈服应力 $\sigma_{p0.002}$ 上升; 应力比为负值时, 屈服应力 $\sigma_{p0.002}$ 下降; 应力比 R 为 -1、-0.75、-0.5、-0.25 和 0 时, 对应的稳定屈服应力 $\sigma_{p0.002}$ 平均值分别约为 -112 MPa、-95 MPa、205 MPa、335 MPa 和 460 MPa。应力比为 0.5 的拉-拉疲劳载荷引起疲劳试样屈服应力 $\sigma_{p0.002}$ 上升, 接近或达到保载载荷应力值, 其逆转变应力 $\sigma_{r0.002}$ 上升不明显, 仅在接近疲劳失效后期有少量增加, 其应力-应变曲线几乎为完全弹性变形特征。较低应力比的拉-压循环载荷引起应力-应变曲线在卸载时出现偏离弹性变形的附加塑性变形, 逆转变应力 $\sigma_{r0.002}$ 随疲劳周次呈现上升趋势, 在接近失效末期最高可达约 400 MPa。

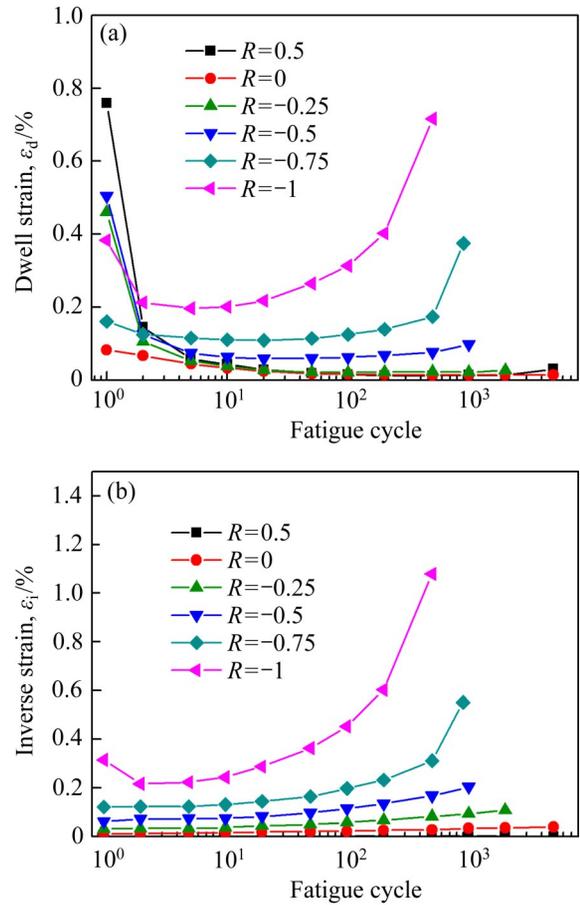


图 11 不同应力比条件下 Ti6242 合金应变参数随着疲劳周次的变化曲线

Fig. 11 Change curves of strain parameters with dwell fatigue cycles of Ti6242 alloy at different stress ratios: (a) Dwell strain ϵ_d ; (b) Inverse strain ϵ_i

3.4 应力应变响应差别与软硬相模型的讨论

钛合金保载疲劳分析中常用的晶体有限元软-硬取向模型认为, 由于密排六方 α 相的各向异性, 在外界载荷作用下 Ti6242 合金的软硬取向发生不同程度的冷蠕变变形行为, 同时发生局部应力的转移和配分。这种不均匀塑性变形和应力分布引起疲劳裂纹的萌生, 并通过裂纹扩展直至失效断裂。本研究中关于疲劳载荷作用下的应力-应变曲线放大局部特征显示, 在保载疲劳测试过程的每个循环周期内, Ti6242 合金未表现出完全弹性的加载和卸载过程; 在加载阶段和卸载阶段的末期 Ti6242 合金出现偏离弹性变形的低程度塑性变形, 显示材料内部出现局部屈服现象, 属于材料内部应力应变响应差别在宏观试样的整体显现。材料内部的局部塑性变形

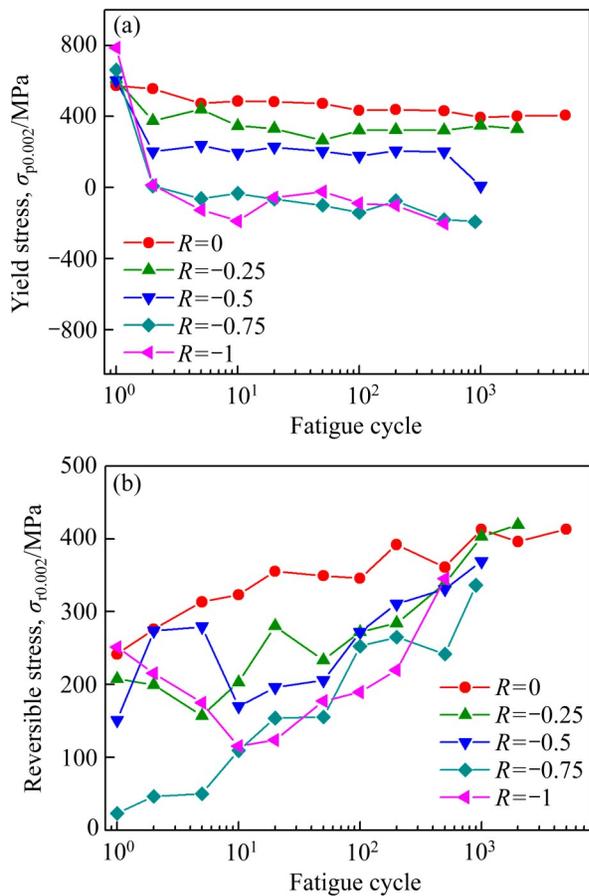


图12 不同应力比Ti6242合金应力参数随着疲劳周次的变化曲线

Fig. 12 Change curves of stress parameters with dwell fatigue cycles of Ti6242 alloy at different stress ratios: (a) Yield stress $\sigma_{p0.002}$; (b) Reversible stress $\sigma_{r0.002}$

逐渐累积和相互协同,发生应力应变的配分行为,与现有晶体有限元软-硬取向模型的结果表现一致。

在不同保载时间疲劳载荷初期,较高的保载时间引起单周次保载应变明显增大,但是单周次保载应变 ε_d 随着疲劳周次的增加逐渐减小;在数百个循环载荷后,保载时间差别引起的单周次保载应变 ε_d 明显趋于近似,显示出在相同载荷和应力比条件下,材料由于少量塑性变形而产生位错增殖强化作用,材料整体抵抗外界载荷作用下塑性变形的能力增强。附加逆应变 ε_i 和逆转变应力 $\sigma_{r0.002}$ 随着疲劳周次的增加而逐渐增大,这一变化规律则更多反映出已产生的少量塑性变形在软-硬相中的协调过程;较长保载时间更早地并且更大程度地引起附加逆应变 ε_i 和逆转变应力 $\sigma_{r0.002}$ 明显增大,表明保载时间增

强了外界载荷保持过程中材料内部局部应力应变的重新分布和累积变形协调作用。

在不同应力比条件下进行保载疲劳测试时,较低应力比同时引起保载应变 ε_d 和附加逆应变 ε_i 的增大,压缩载荷引起材料的包辛格效应,表现在反向加载屈服强度的降低,进行反向拉伸载荷保载时也更容易发生塑性变形。由于Ti6242合金中存在软硬取向差别,在周期反向加载时软相相对于硬相更早发生包辛格效应,增强了材料内部软-硬相更为剧烈的局部变形差别,促进了裂纹的萌生和扩展。应力对附加逆应变 ε_i 和逆转变应力 $\sigma_{r0.002}$ 的变化影响度超过保载时间对它们的影响,从疲劳寿命的变化规律可以看出,降低应力比比增加保载时间更能引起保载疲劳寿命的降低。

4 结论

1) 不同保载时间和应力比的保载疲劳测试结果显示,更长的保载时间引起双态组织Ti6242合金保载疲劳寿命单调衰减,更高的应力比则引起其保载疲劳寿命呈指数增长。

2) 应力-应变曲线分析结果显示,保载疲劳测试过程中,Ti6242合金在循环初期和末期累积塑性变形呈现快速增长,在循环中间阶段累积塑性变形相对稳定和缓慢。单个循环周期内在加载阶段和卸载阶段的末期,Ti6242合金均出现偏离弹性变形的低程度塑性变形。

3) 不同保载时间保载疲劳应力-应变曲线分析显示,更长的保载时间增加了疲劳循环载荷初期每个周期的累积塑性变形,而在累积塑性变形稳定阶段,材料表现出稳定的屈服应力 $\sigma_{p0.002}$;材料内部的演变过程主要为局部应力应变的重新分布和累积协调过程,表现为逆转变应力 $\sigma_{r0.002}$ 和附加逆应变 ε_i 的增长幅度产生差别。

4) 不同应力比保载疲劳应力-应变曲线分析显示,降低应力比将疲劳载荷由拉-拉转变为拉-压,试样反复的拉伸变形和压缩变形加剧材料内部软相和硬相在循环载荷中的应变差别,表现为保载应变 ε_d 和附加逆应变 ε_i 的大跨度变化,而屈服应力 $\sigma_{p0.002}$ 与应力比的对应关系进一步表明,反向加载对多相

材料或不均匀组织的微区应力应变响应有显著影响。

REFERENCES

- [1] 史栋刚, 徐小严, 吴雨, 等. 钛合金保载疲劳的影响因素与研究进展[J]. 中国材料进展, 2019, 38(7): 722–728.
SHI Dong-gang, XU Xiao-yan, WU Yu, et al. Influence factors and research progress of dwell fatigue for titanium alloy[J]. Materials China, 2019, 38(7): 722–728.
- [2] ZHENG Z B, BALINT D S, DUNNE F P E. Mechanistic basis of temperature-dependent dwell fatigue in titanium alloys[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2017, 107: 185–203.
- [3] 张明达, 曹京霞, 隋楠, 等. 高载荷作用下 Ti6242 钛合金低周疲劳和保载疲劳损伤行为分析[J]. 航空材料学报, 2019, 39(1): 55–61.
ZHANG Ming-da, CAO Jing-xia, SUI Nan, et al. Fracture behavior of low cycle fatigue and dwell fatigue of Ti6242 titanium alloy under high load[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2019, 39(1): 55–61.
- [4] XI Guo-qiang, LEI Jia-feng, QIU Jian-ke, et al. A semi-quantitative explanation of the cold dwell effect in titanium alloys[J]. Materials and Design, 2020, 194: 108909.
- [5] PRASAD K, SARKAR R, GHOSAL P, et al. Effects of strain waveform on low cycle fatigue behaviour of near α Timetal 834 titanium alloy[J]. Materials and Design, 2011, 32(3): 1710–1715.
- [6] EVANS W J, GOSTELOW C R. The effect of hold time on the fatigue properties of a β -processed titanium alloy[J]. Metallurgical Transactions A, 1979, 10A: 1837–1846.
- [7] 杨丽娜, 刘建荣, 陈志勇, 等. 加载波形对 Ti-60 合金疲劳损伤行为的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): 487–490.
YANG Li-na, LIU Jian-rong, CHEN Zhi-yong, et al. Effect of loading waveform on fatigue damage behavior of Ti-60 alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(S1): 487–490.
- [8] DING J, HALL R, BYRNE J. Effects of stress ratio and temperature on fatigue crack growth in a Ti-6Al-4V alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2005, 27(10/11/12): 1551–1558.
- [9] WANG Fang, CUI Wei-cheng. Experimental investigation on dwell-fatigue property of Ti-6Al-4V ELI used in deep-sea manned cabin[J]. Materials Science and Engineering A, 2015, 642: 136–141.
- [10] SRINZVASA R K, PRASAD K, VARMA V K, et al. Influence of hold time on low cycle fatigue behaviour of near alpha titanium alloy IMI 834 at 873 K[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2008, 61(5): 407–414.
- [11] 王珂, 谢晓波, 李永正, 等. 钛合金 Ti-6Al-4V 室温保载-疲劳寿命预报方法研究[J]. 中国造船, 2018, 59(2): 123–128.
WANG Ke, XIE Xiao-bo, LI Yong-zheng, et al. Prediction method of the dwell-fatigue life for titanium alloys Ti-6Al-4V at room temperature[J]. Shipbuilding of China, 2018, 59(2): 123–128.
- [12] 王珂, 王哲, 王芳, 等. 过载保载对金属材料疲劳裂纹扩展速率影响研究[J]. 船舶力学, 2017, 21(7): 895–906.
WANG Ke, WANG Zhe, WANG Fang, et al. Effect of overload and dwell time on fatigue crack growth rate of metal materials[J]. Journal of Ship Mechanics, 2017, 21(7): 895–906.
- [13] KIRANE K, GHOSH S. A cold dwell fatigue crack nucleation criterion for polycrystalline Ti-6242 using grain-level crystal plasticity FE model[J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30(12): 2127–2139.
- [14] DUNNE F P E, WALKER A, RUGG D. A systematic study of hcp crystal orientation and morphology effects in polycrystal deformation and fatigue[J]. Proceedings of the Royal Society A, 2007, 463(2082): 1467–1489.
- [15] ZHENG Ze-bang, BALINT D S, DUNNE F P E. Dwell fatigue in two Ti alloys: An integrated crystal plasticity and discrete dislocation study[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2016, 96: 411–427.
- [16] LAVOGIEZ C, HÉMERY S, VILLECHAISE P. On the mechanism of fatigue and dwell-fatigue crack initiation in Ti-6Al-4V[J]. Scripta Materialia, 2020, 183: 117–121.
- [17] TYMPEL P O, LINDLEY T C, SAUNDERS E A, et al. Influence of complex LCF and dwell load regimes on fatigue of Ti-6Al-4V[J]. Acta Materialia, 2016, 103: 77–88.
- [18] LAVOGIEZ C, HÉMERY S, VILLECHAISE P. Analysis of deformation mechanisms operating under fatigue and dwell fatigue loadings in an α/β titanium alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 131: 105341.
- [19] ZHANG Zhen. Micromechanistic study of textured multiphase polycrystals for resisting cold dwell fatigue[J]. Acta Materialia, 2018, 156: 254–265.
- [20] WANG Qing-hua, RI Shi-en, MAENOSONO A, et al. 1-second-resolved strain mapping in Ti-6Al-4V alloys during

dwell fatigue in SEM by video sampling moiré[J].
Mechanics of Materials, 2019, 133: 63–70.
[21] JOSEPH S, JOSEPH K, LINDLEY T C, et al. The role of

dwell hold on the dislocation mechanisms of fatigue in a
near alpha titanium alloy[J]. International Journal of
Plasticity, 2020, 131: 102743.

Effects of dwell time and stress ratio on stress and strain responses of Ti6242 alloy

ZHANG Ming-da¹, CAO Jing-xia¹, ZHAI Zhan-jiang², YANG Ze-nan¹, ZHANG Biao², SUI Nan¹, HUANG Xu¹

(1. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Advanced Titanium Alloys,

AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;

2. NCS Testing Technology Co., Ltd., China Iron and Steel Research Institute Group, Beijing 100081, China)

Abstract: These near α and $\alpha+\beta$ titanium alloys, such as Ti6242 alloy, usually exhibit dwell fatigue failure characteristic. The investigation results show that the dwell fatigue failure internal mechanism of these titanium alloy is mainly related to the inhomogeneous plastic deformation and local stress concentration under the dwell fatigue load. In this study, the dwell fatigue tests with different dwell time and stress ratio were designed to verify their influences on dwell fatigue life based on the understanding of the soft-hard orientation models. It is found that the dwell fatigue life of Ti6242 titanium alloy decreases monotonously with the increase of dwell time and tends to stabilize, but increases exponentially with stress ratio. According to the detailed analysis of stress and strain curves of Ti6242 alloy under dwell fatigue load, the dwell time mainly affects the redistribution and accumulative coordination processes of local stress and strain, while the stress ratio can intensify the local strain difference between the soft phase and the hard phase in the material.

Key words: titanium alloy; dwell time; stress ratio; dwell fatigue; stress; strain

Foundation item: Project(91860106) supported by the National Natural Science Foundation of China

Received date: 2021-06-15; **Accepted date:** 2021-10-09

Corresponding author: ZHANG Ming-Da; Tel: +86-15901022010; E-mail: 15901022010@139.com

(编辑 李艳红)