

LY12 铝合金的拉扭复合加载疲劳

刘世民, 艾素华, 王中光

(中国科学院金属研究所 沈阳材料科学国家(联合)实验室, 沈阳 110016)

摘要: 对 LY12 铝合金的拉扭复合加载疲劳性能进行了研究, 并用扫描电镜对疲劳试样的断口进行了观察。试验选用单轴轴向、 0° 同相拉扭复合、 45° 非同相拉扭复合、 90° 非同相拉扭复合和纯扭转五种加载路径, 并使试样在不同加载路径下的最大等效应变值相等。结果表明, LY12 铝合金试样在五种加载条件下, 均出现循环硬化和饱和现象。LY12 铝合金试样在纯扭转加载时的寿命最长, 在 90° 非同相拉扭复合加载时的寿命最短。用 Wang-Brown 模型的损伤参量, 可以较好解释不同加载条件的疲劳寿命差异。单轴轴向加载和 0° 同相拉扭复合加载试样的断口均出现疲劳条纹, 纯扭转加载和 90° 非同相拉扭复合加载断口形貌以裂纹面间相互摩擦的痕迹为主。

关键词: LY12 铝合金; 疲劳; 拉扭复合加载; 实心圆柱试样

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2006)05-0096-05

飞机在起飞、降落和飞行过程中, 其受力构件往往承受多轴载荷的作用, 因此多轴疲劳研究对航空工业具有非常重要的意义。多轴疲劳研究的众多方法中, 拉扭复合加载由于较易实现而得到广泛应用, 许多研究者采用拉扭复合加载对不同材料的疲劳进行了研究^[1-3]。LY12 铝合金是航空工业中常用的材料, 用于制造各种类型飞机的主要受力构件, 如蒙皮、隔框、翼肋、翼梁、骨架零件, 也用来制造一些非主要受力构件^[4]。本文尝试用实心圆柱试样对 LY12 铝合金进行拉扭复合加载疲劳的研究。

1 实验方法

实验所用的 LY12 铝合金的化学成分 (wt%) 为: Cu 3.8~4.9, Mg 1.2~1.8, Mn 0.3~0.9, 其余为 Al 及少量杂质。将 LY12 铝合金机械加工成如图 1 的疲劳试样。试验采用两种不同的热处理制度, 首先 $497 \pm 5^\circ\text{C}$ 固溶 40min, 水冷, 自然时效合金 (以下简称 CZ) 在室温时效 96h 以上, 人工时效合金 (以下简称 CS) 在 $190 \pm 2^\circ\text{C}$ 条件下时效 12h。热处理后, 用砂纸打磨试样表面以消除表面残余应力。

LY12 铝合金的单向拉伸性能列于表 1 中。疲

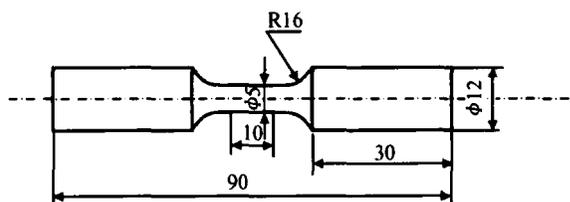


图 1 疲劳试样尺寸

Fig 1 Shape and dimension of the fatigue sample

劳试验在 MTS 拉扭复合疲劳试验机上进行, 选用轴向应变和扭转角同时控制的方式。试验时轴向应变用应变规控制, 扭转由角度控制, 可以通过弹性假设由角度计算出最大剪应变。

表 1 LY12 铝合金的单向拉伸性能

Table 1 Monotonic tensile properties of LY12 aluminum alloy

	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_{uts} /MPa	δ /%
CZ	304	436	20
CS	362	486	7

疲劳试验加载路径如图 2 所示, 其中的剪应变是指表面剪应变, 即最大剪应变。不同加载路径下试样表面微元承受相等的最大等效应变 $\varepsilon_{e, \max} = 0.4\%$ 。单轴轴向加载、 0° 同相拉扭复合加载、 45° 非同相拉扭复合加载和 90° 非同相拉扭复合加载的频率均为 0.2 Hz, 只有纯扭转加载由于疲劳周次太多而使用 5 Hz。已有的试验结果表明^[5], 多轴加载应变速率对应变响应的影响很小, 故不考虑加载频率的影响。疲劳断口观察在扫描电镜下进行。

收稿日期: 2004-03-22 修订日期: 2004-08-26

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (G19990650)

作者简介: 刘世民 (1974-), 男, 博士。

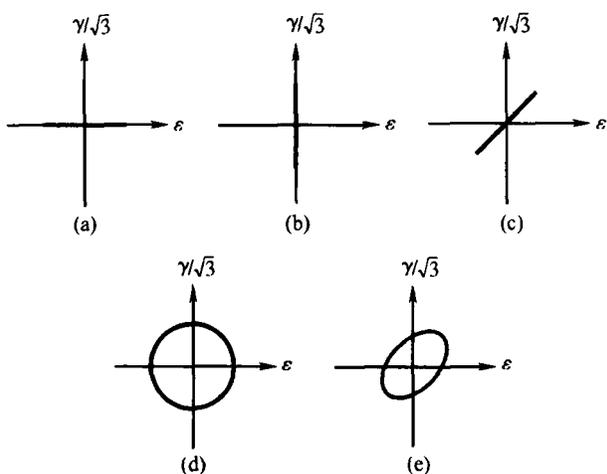


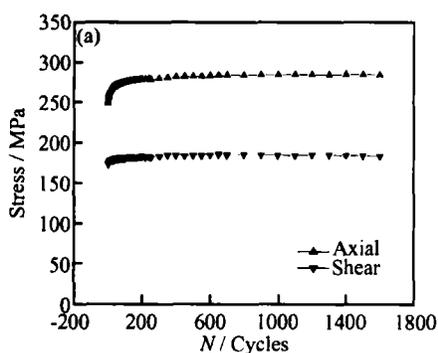
图 2 疲劳试验加载路径

Fig 2 Loading paths of fatigue (a) axial tension-compression (b) fully reversed torsion (c) 0° in-phase combined tension and torsion (d) 90° out-of-phase combined tension and torsion (e) 45° out-of-phase combined tension and torsion

表 2 五种加载路径的疲劳寿命

Table 2 Fatigue lives under five loading paths

	Axial	0°	45°	90°	Torsion
LY 12CZ	15270	25642	10229	1789	62933
LY 12CS	22280	19462	10984	1750	47734



2 实验结果与讨论

2.1 循环应力曲线

用轴向应力幅和最大剪应力幅值对循环周次作图, 得到循环应力响应曲线。其中的轴向应力幅和最大剪应力幅值都是同一周次内最大、最小值的绝对值的算术平均。比较不同加载条件下的循环应力响应曲线, 发现无论 CZ 试样还是 CS 试样, 在循环形变初期均出现循环硬化现象, 这种初始循环硬化是由于位错与沉淀相之间的相互作用增强造成的。剪应力幅增长的幅度明显小于轴向应力幅, 这是由于剪应力幅的增长来自试样表层的硬化, 而轴向应力幅的增长来自整个试样标距段的硬化。试样在单轴轴向加载、0°同相拉扭复合加载、45°非同相拉扭复合加载和 90°非同相拉扭复合加载时, 轴向应力幅和最大剪应力幅值在初始硬化后逐渐达到饱和, 最终突然断裂; 而在纯扭转加载时, 剪应力幅在经历初始增长及饱和后, 出现持续减小直至试样断裂。剪应力幅减小的阶段持续了总循环周次的三分之二左右。很明显, 剪应力幅的减小是由于裂纹萌生和扩展造成的, 纯扭转疲劳的大多数循环周次用于疲劳裂纹扩展。作为一个例子, 图 3 给出了 CZ 试样在 90°非同相拉扭复合加载和纯扭转加载时的循环应力响应曲线。

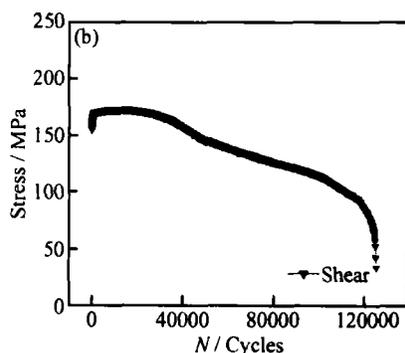


图 3 CZ 试样的循环应力响应曲线

Fig 3 Cyclic stress response curves of CZ samples (a) 90° out-of-phase combined tension and torsion (b) fully reversed torsion

2.2 疲劳寿命

测得的疲劳寿命如表 2 所示。表中纯扭转加载的疲劳寿命定义为载荷下降 20% 时的循环周次, 其余加载方式的疲劳寿命为断裂寿命。

由表可见, 在相同的最大等效应变幅下, 试样在纯扭转加载时的寿命最长, 在 90°非同相拉扭复合加载时的寿命最短, 在单轴轴向加载、0°同相拉扭复合加载和 45°非同相拉扭复合加载的寿命相差不大, 介于纯扭转加载和 90°非同相拉扭复合加载之

间。CS 试样的疲劳寿命与相同加载条件的 CZ 试样的疲劳寿命大体相同。

2.3 多轴疲劳损伤模型对寿命的解释

在多轴低周疲劳研究领域, 人们曾建立最大剪应变法、最大正应变法、能量法等众多损伤模型对多轴疲劳结果进行解释, 然而由于缺乏物理基础及普适性而没有受到普遍承认。临界平面法定义材料的破坏面为临界平面, 基于疲劳裂纹优先萌生与扩展的平面与方向选择损伤参量, 具有一定的物理意义。

Brown和 Miller提出的临界平面模型是目前常用的多轴疲劳损伤模型^[6]。他们分析了大量多轴低周疲劳数据, 特别注意疲劳裂纹的萌生与早期扩展, 认为多轴低周疲劳裂纹扩展主要受最大剪应变 γ_{max} 和最大剪应变平面上的正应变 ϵ_n 控制, 通过在 $\gamma_{max} - \epsilon_n (\Gamma)$ 平面上的相同寿命的等值线来说明二者在疲劳裂纹扩展过程中的作用。

Wang和 Brown^[7]在此基础上提出简化的损伤模型, 即

$$\frac{\Delta \gamma_e}{2} = \frac{\Delta \gamma_{max}}{2} + S \Delta \epsilon_n$$

其中 $\frac{\Delta \gamma_e}{2}$ 为等效剪应变幅, $\frac{\Delta \gamma_{max}}{2}$ 为最大剪应变幅, $\Delta \epsilon_n$ 为最大剪应变平面上的正应变范围, S 是材料常数, 代表正应变对疲劳裂纹扩展的影响。严格讲, Wang-Brown模型中的 S 值会随寿命不同而取不同的值, 为使问题简化, 直接选取 $S = 1$ 。

选择试样标距部分表面微元作为研究对象, 而且只考虑轴向应变和环向应变, 不考虑径向应变的作用。由于拉扭复合加载疲劳的裂纹萌生平面一般垂直于试样表面, 定义 θ 为任意垂直于试样表面的平面与试样横截面夹角。图 4和图 5分别给出了

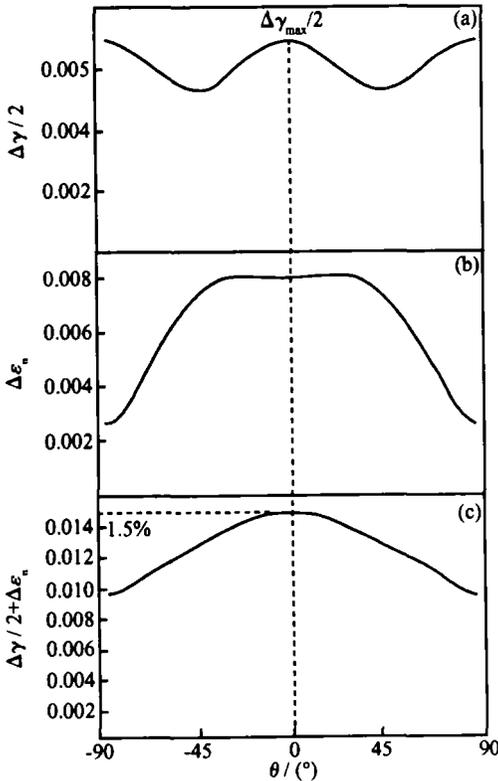


图 4 90°非同相拉扭复合加载应变随 θ 变化

Fig 4 The variation of strain with θ under 90° out-of-phase combined tension and torsion (a) $\Delta \gamma / 2$; (b) $\Delta \epsilon_n$; (c) $\Delta \gamma / 2 + \Delta \epsilon_n$

90°非同相拉扭复合加载和纯扭转加载的剪应变幅、正应变范围及二者线性组合随 θ 的变化。可见 90°非同相拉扭复合加载的最大剪应变幅在 $\theta = 0^\circ$ 平面取得最大值, 而该平面的正应变范围接近最大值, 所以损伤参量很大; 纯扭转加载的最大剪应变幅在 $\theta = 0^\circ$ 和 90° 平面取得最大值, 而该平面的正应变范围为 0, 所以损伤参量很小。

用 Wang-Brown 损伤参量对疲劳寿命做图, 得到与总应变 - 寿命曲线类似的图 6, 其中的损伤参量由试样表面处的应变求得。图中损伤参量与疲劳寿命大体呈现反比关系, 即损伤参量值越大, 疲劳寿命越短。这种方法应用于 LY12 铝合金 CZ 和 CS 实心圆柱试样都比较成功, 用这种方法可以较好解释不同加载条件的疲劳寿命差异。

2.4 断裂特征

CZ 试样和 CS 试样的宏观断口观察发现疲劳裂纹均萌生于试样表面, 裂纹源区呈黑色, 有光泽, 是裂纹面反复接触造成的。纯扭转试样首先萌生轴向裂纹, 然后转为垂直于轴向的裂纹并导致最终的断裂, 其余加载条件看不出规律。前面提到, 纯扭转加载的最大剪应变幅在 $\theta = 0^\circ$ 和 90° 取得最大值, 与观察结果相符。只萌生轴向裂纹而没有萌生横向裂纹, 很可能与材料有关。

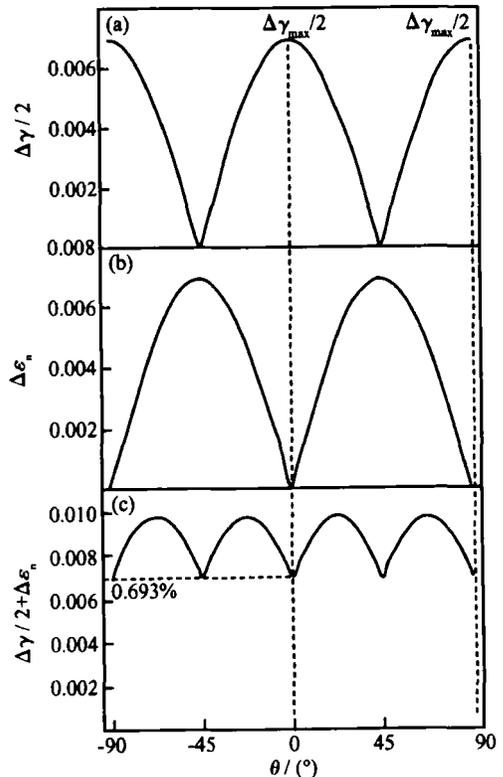


图 5 纯扭转加载应变随 θ 变化

Fig 5 The variation of strain with θ under fully reversed torsion (a) $\Delta \gamma / 2$; (b) $\Delta \epsilon_n$; (c) $\Delta \gamma / 2 + \Delta \epsilon_n$

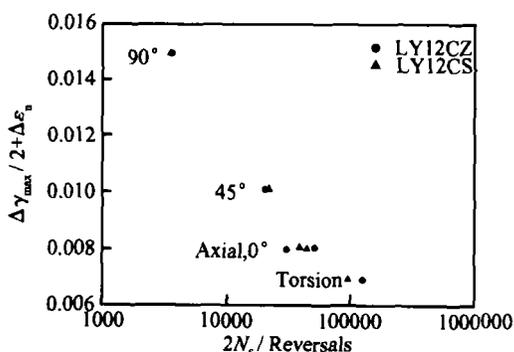


图 6 Wang-Brown 损伤参量与疲劳寿命的关系

Fig. 6 Relationship between Wang-Brown damage parameter and fatigue life

试样在单轴轴向加载和 0°同相拉扭复合加载时的形貌比较相似, 都可以观察到明显的疲劳条纹, 条纹间距大体相等 (图 7a b)。这种疲劳条纹是由于裂纹扩展沿两个滑移系统交替进行产生的。由于疲劳裂纹扩展方向一般垂直于疲劳条纹的方向, 所以容易从疲劳条纹的方向帮助判断裂纹扩展的方向。CZ 试样和 CS 试样在 90°非同相拉扭复合加载和纯扭转加载的疲劳断口主要由一些平行的条纹构成 (图 7c d), 条纹方向与裂纹扩展方向垂直, 条纹界限不象疲劳条纹那样敏锐, 排列也不如疲劳条纹规则。这种痕迹是疲劳过程中垂直于轴向的裂纹面间相互摩擦造成的。这种痕迹是疲劳过程中垂直于轴向的裂纹面间相互摩擦造成的。

疲劳断口的扫描电镜观察表明, CZ 试样和 CS

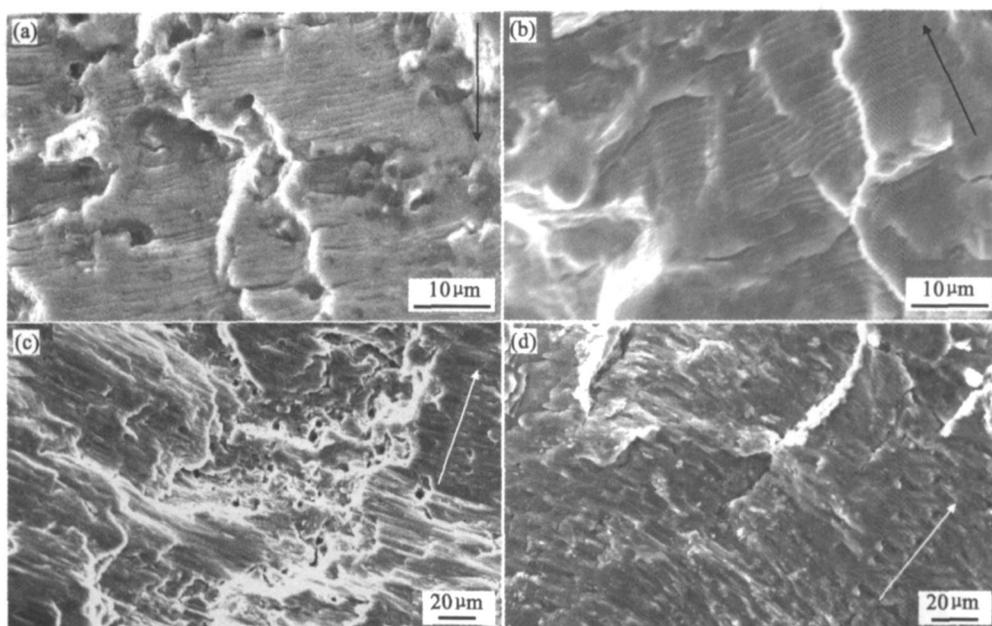


图 7 疲劳断口形貌

Fig. 7 Morphology of fatigue fracture surface (a) fatigue striations of CS sample under axial tension-compression; (b) fatigue striations of CS sample under 0° in-phase combined tension and torsion; (c) wear marks of CZ sample under 90° out-of-phase combined tension and torsion; (d) wear marks of CZ sample under fully reversed torsion

3 结 论

通过对应变控制条件下 LY12 铝合金 CZ 试样和 CS 试样的疲劳行为和微观断裂特征的研究, 可得出如下结论:

(1) LY12 铝合金 CZ 试样和 CS 试样在五种加载条件下, 均出现循环硬化和饱和现象。

(2) 在相同的最大等效应变幅下, 试样在纯扭转加载时的寿命最长, 在 90°非同相拉扭复合加载时的寿命最短。

(3) 用 Wang-Brown 模型的损伤参量, 可以较好地解释实心圆柱试样在不同加载条件的疲劳寿命差异。

(4) LY12 铝合金 CZ 试样和 CS 试样在单轴轴向加载和 0°同相拉扭复合加载的断口均出现疲劳条纹, 纯扭转加载和 90°非同相拉扭复合加载断口形貌以裂纹面间相互摩擦的痕迹为主。

参考文献:

[1] JIAO F, OSTERLEW, PORTELLA P D, ZIEBS J Biaxial

- path-dependence of low-cycle fatigue behaviour and micro-structure of alloy 800 H at room temperature [J]. Mater Sci Eng (A), 1995, 196: 19-24.
- [2] CHEN X, GAO Q, SUN X F. Damage analysis of low cycle fatigue under non-proportional loading [J]. Int J Fatigue, 1994, 16: 221-225.
- [3] SOCE D F. Multiaxial fatigue damage models [J]. ASME J. Engng Mater Tech, 1987, 109: 293-298.
- [4] 中国航空材料手册编委会. 中国航空材料手册第 3 卷 铝合金 镁合金 钛合金 [M]. 北京: 中国标准出版社, 1989.
- [5] KREMPL E, LU H. The hardening and rate-dependent behavior of fully annealed AISI type 304 stainless steel under biaxial in-phase and out-of-phase strain cycling at room temperature [J]. ASME J Engng Mater Tech, 1984, 106: 376-382.
- [6] BROWN M. W, MILLER K J. A theory for fatigue under multiaxial stress-strain conditions [J]. Proc Inst Mech Eng, 1973, 187: 745-756.
- [7] WANG C H, BROWN M W. A path-independent parameter for fatigue under proportional and nonproportional loading [J]. Fatigue Fract Engng Mater Struct, 1993, 16: 1285-1298.

Fatigue Behavior of LY12 Aluminum Alloy under Combined Tension and Torsion Loading

LU Shimin AI Su-hua WANG Zhong-guang

(Shenyang National Laboratory for Materials Science, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract Fatigue properties of LY12 aluminum alloy samples under combined tension and torsion were investigated and the fracture surfaces were observed through scanning electron microscopy. Axial tension-compression, 0° in-phase combined tension and torsion, 45° out-of-phase combined tension and torsion, 90° out-of-phase combined tension and torsion and fully reversed torsion loading paths were selected, and the same maximum effective strain was kept for the five loading paths. Cyclic hardening and saturation were observed under five loading paths. The fatigue life is the longest under fully reversed torsion and the shortest under 90° out-of-phase combined tension and torsion. The difference in fatigue life under five loading paths can be explained through Wang-Brown damage parameter. Fatigue striations can be seen on the fracture surfaces of samples under axial tension-compression and 0° in-phase combined tension and torsion, and extensive rubbing is apparent on the fracture surface of samples under 90° out-of-phase combined tension and torsion and fully reversed torsion.

Key words LY12 aluminum alloy; fatigue; combined tension and torsion; solid cylindrical sample