

# 不同应力水平下 5A06 铝合金的疲劳断口研究

刘乐乐 姜 锋 汪 莹 李致良

(中南大学材料科学与工程学院,长沙 410083)

**文 摘** 通过采用金相显微镜,扫描电镜和能谱分析研究了 5A06 铝合金高周疲劳断口的微观特征。研究表明:该合金在疲劳极限附近发生疲劳断裂时,裂纹主要萌生于杂质粒子与基体的界面结合处,较高应力水平下疲劳裂纹的萌生呈现多源性,并且裂纹主要起源于杂质粒子自身的开裂。随着应力水平的提高,裂纹的偏转路径更加复杂,疲劳辉纹间距不断增大,断口中疲劳裂纹扩展区所占比例减少。疲劳裂纹扩展的初期,疲劳微裂纹的偏转主要取决于相邻晶粒间有利滑移面的方向。

**关键词** 5A06 铝合金,高周疲劳,裂纹偏转,疲劳辉纹

中图分类号: TG111.8;TG146.2

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2015.05.015

## Fatigue Fractography of 5A06 Aluminum Alloy Under Different Stresses

LIU Lele JIANG Feng WANG Ying LI Zhiliang

(School of Material Science and Engineer, Central South University, Changsha 410083)

**Abstract** The high cycle fatigue fractography of 5A06 aluminum alloy was investigated by means of optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectrometer (EDS). The results show that the fatigue cracks mainly initiate at the interface between impurities and matrix when the loading stress is near the fatigue limit. Multi-source fatigue cracks appear with the increase of the stress and the cracks originate mainly from the broken impurities. The crack deflection path becomes more complex, the fatigue striation increases and the fatigue expansion area becomes smaller with the stress increasing. The direction between adjacent grain favored slip planes determines the deflection of the micro-crack in the early stage of the fatigue crack propagation.

**Key words** 5A06 aluminum alloy, High cycle fatigue, Crack deflection, Fatigue striation

### 0 引言

5A06 铝合金以其优异的性能长期在航空航天领域有着广泛的应用。随着我国航天事业的发展,航空器的结构材料需要满足在空间的交变载荷作用下长期可靠使用的要求,因此对 5A06 铝合金疲劳特性的研究显得尤为必要。近年来,国内外学者围绕铝合金的疲劳裂纹的萌生和偏转机制<sup>[1-3]</sup>、裂纹的扩展速率<sup>[4-5]</sup>以及铝合金的疲劳断裂行为<sup>[6-8]</sup>等方面进行了大量的研究。但研究工作主要集中在 Al-Cu 和 Al-Zn-Mg-Cu 两个系列的高强铝合金,对 Al-Mg 系列铝合金的疲劳行为研究尚不够深入和全面。PAO 等人<sup>[9-10]</sup>分别对比研究了制备工艺以及试验环境对超细晶的 Al-Mg 合金裂纹扩展速率的影响。张占峰等

人<sup>[11]</sup>研究发现,该合金中羽毛状晶的存在会降低 5A06 铝合金的疲劳性能,张红霞等人<sup>[12]</sup>考察了 5A06 铝合金母材以及焊接接头的疲劳性能,但以上学者对该合金疲劳裂纹的萌生和偏转机制均未进行深入的研究。

本文采用金相显微镜和扫描电镜并结合能谱分析对 5A06 铝合金在高周疲劳试验过程中,疲劳裂纹的萌生和偏转机制以及疲劳断裂行为进行了研究,重点对比考察了不同应力水平下疲劳裂纹的萌生和偏转特点,为该材料在以后的实际应用提供一定的依据和参考。

### 1 实验

#### 1.1 材料

收稿日期: 2015-04-15

作者简介:刘乐乐,1991 年出生,硕士研究生,主要从事铝合金疲劳性能研究。E-mail:jfeng2@csu.edu.cn

实验采用的是参照国标 GB/T3880—97 制备的 6 mm 厚的 5A06 铝合金板材,材料状态为 H112。疲劳试样沿板材轧向截取,参照国标 GB/T3075—2008 制成光滑的矩形标准疲劳试样。

### 1.2 实验方法

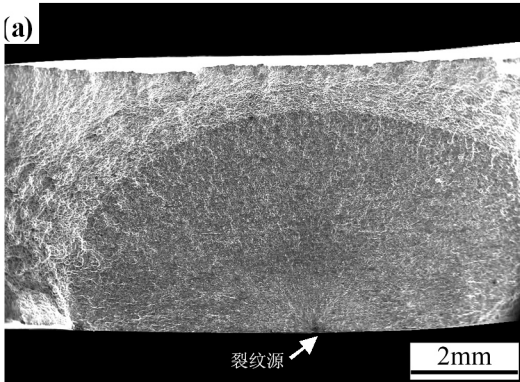
疲劳试验在国产的 GPS100 高频疲劳材料试验机进行,载荷波形是正弦波,循环加载频率为 110 ~ 115 Hz,应力比  $R=0.1$ ,室温,大气环境。分别切取疲劳极限附近和高应力水平下疲劳试样的断口,浸于

酒精在超声波清洗机中清洗 3 ~ 5 min,而后在 Quanta 200 扫描电镜下对断口的典型形貌特征进行观察和分析,并结合扫描电镜配备的能谱仪进行 EDS 能谱分析。

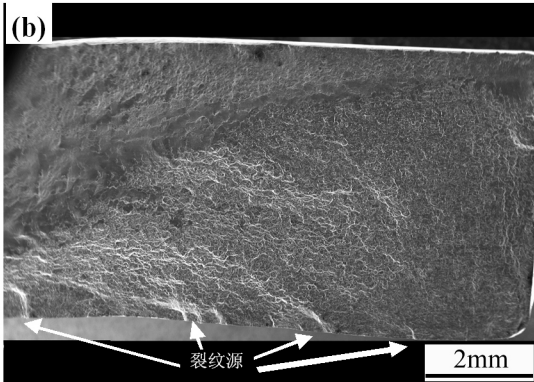
### 2 实验结果

#### 2.1 疲劳裂纹的萌生

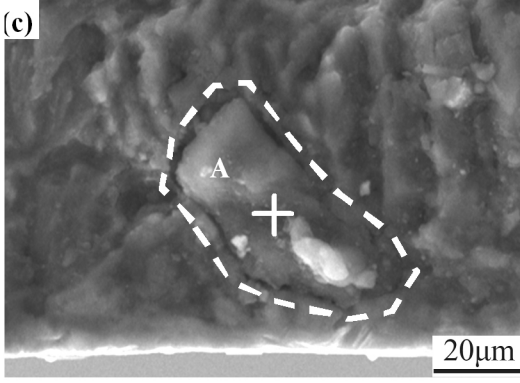
图 1 表示了该合金在疲劳极限附近 ( $\sigma = 170$  MPa) 以及高应力水平下 ( $\sigma = 280$  MPa) 疲劳断口的 SEM 图象。



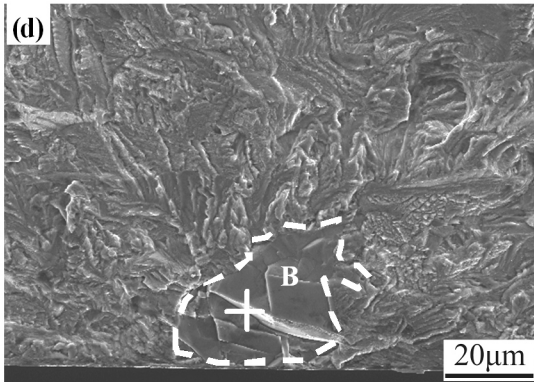
(a)  $\sigma = 170$  MPa 条件下的疲劳断口全貌



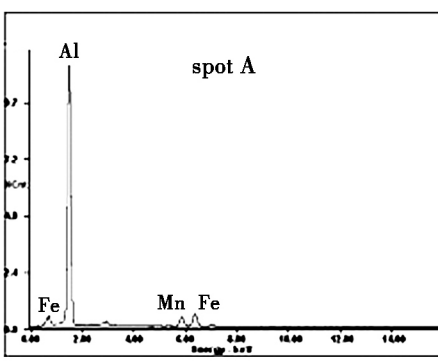
(b)  $\sigma = 280$  MPa 条件下的疲劳断口全貌



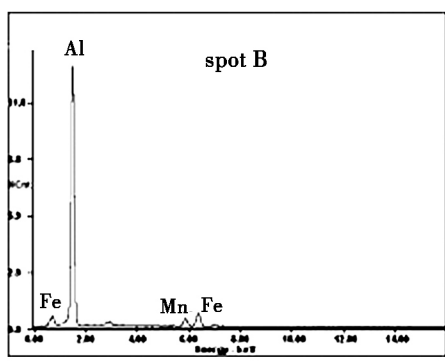
(c) 杂质粒子与基体界面处开裂



(d) 杂质粒子的破碎



(e)



(f)

图 1 不同应力水平下疲劳裂纹萌生位置的 SEM 图像及相应粒子的能谱结果

Fig. 1 SEM images of fatigue initiation under different stress conditions and EDS result of the particle

从断口照片中可以看出,在两种应力条件下,疲劳裂纹均起源于靠近试样表面的部位,如图 1(a)

(b)中箭头所指的位置。在低应力 $\sigma=170$  MPa水平下,断口表面仅有一处疲劳裂纹源,对疲劳裂纹源位置放大如图1(c)所示,该处粒子与基体的分离是导致疲劳裂纹产生的原因,对该处粒子做能谱分析,该粒子主要含Al、Fe、Mn元素,其中Al、Fe、Mn元素原子百分含量分别为82.21%、13.44%、4.35%,根据元素含量分析该粒子属于5A06铝合金中常见的 $Al_6(Fe,Mn)$ 杂质相<sup>[13]</sup>。在高应力 $\sigma=280$  MPa水平下,在断口边缘的多个位置均存在疲劳裂纹源,如图1(b)中箭头所示。对高应力条件下的疲劳裂纹源放大可以看出如图1(d),疲劳裂纹是由于靠近试样表面的粗大粒子自身的破碎导致,粗大粒子首先是自身的发生破碎产生裂纹,在循环载荷作用下,裂纹向基体进行扩展,并最终导致断裂。对该破碎的粒子做能谱分析,粒子同样也均主要含有Al、Fe、Mn元素,其Al、Fe、Mn元素的原子百分含量分别为82.81%、12.40%、4.79%,根据能谱分析结果该粒子也属于铝合金中粗大的 $Al_6(Fe,Mn)$ 杂质相。

## 2.2 疲劳裂纹的扩展

图2为在不同应力条件下,疲劳裂纹早期扩展及稳态扩展区的SEM图像。从图2(a)(b)可以看出在裂纹扩展的初期,在不同的应力水平条件下,裂纹基本都沿“Z”字形的路径进行扩展,同时该阶段的扩展过程无疲劳辉纹出现。在较低应力水平下( $\sigma=170$  MPa),疲劳裂纹在不同晶粒间的扩展有两种典型的模式,一种是裂纹穿过晶界时不发生偏转直接进入下一个晶粒,如图2(a)中虚线1所示;另外一种是在晶界处发生一定角度的偏转后进入下一个晶粒如图2(a)中虚线2所示,形成了断口表面所谓的河流状的花样。在高应力水平下仍可以看到这两种初期疲劳裂纹扩展的模式如图2(b)所示,不同的是在高应力水平下,疲劳裂纹在扩展过程中出现了更多的偏转现象,疲劳裂纹发生偏转的路径更加复杂。

当疲劳裂纹进入到稳定扩展阶段,在不同的应力水平下均可以观察到典型的一系列近似相互平行的疲劳辉纹,如图2(c)(d)所示。

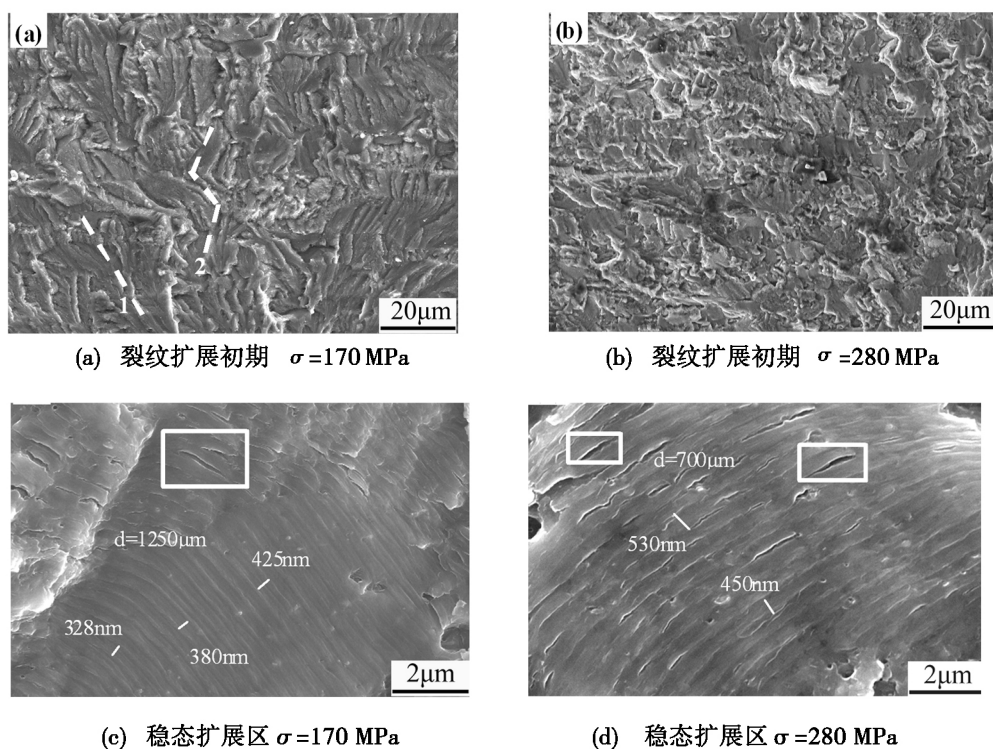


图2 不同应力水平下疲劳裂纹扩展不同区域的SEM图像

Fig. 2 SEM images of fatigue crack propagation zone under different stress conditions

从图2(c)可见,图中所取位置与疲劳源区的大约距离 $d=1250\mu\text{m}$ ,从图中可以该阶段辉纹的宽度在328~425 nm,并且沿着裂纹扩展的方向,疲劳辉纹的宽度在不断增大。在疲劳辉纹中还夹杂了一些二次裂纹,二次裂纹的典型特点是与疲劳裂纹的扩展

方向大致垂直,如图2(c)中的方框所示。和低应力水平下稳态扩展区的断口对比发现,随着应力水平的提高,疲劳辉纹的宽度沿着裂纹扩展的方向也逐渐增大,并且高应力条件下,辉纹宽度也比低应力条件下大,由于疲劳辉纹代表了每个循环过程中,裂纹尖端

前进的距离<sup>[8]</sup>,说明随着应力水平的提高,裂纹的扩展速率在不断增大。同时从图 2(d)中可见,在高应力条件下,稳态扩展区中二次裂纹的数量和尺寸也均有所增加。

### 3 分析讨论

#### 3.1 疲劳裂纹的萌生

铝合金的疲劳断裂取决于疲劳裂纹的形成和裂纹的扩展。研究表明合金中的杂质粒子对疲劳裂纹的萌生起着重要作用<sup>[2-3,14]</sup>。这是由于杂质粒子与基体往往形成的是非共格的界面,在循环载荷的作用下,位错滑移至杂质粒子和基体结合的界面处,杂质粒子会阻碍位错的滑移,位错在界面处不断聚集,长时间的位错塞积导致了界面的结合处产生较大的应力集中,当应力集中程度大于界面处的结合强度时,显微空穴形成,随着进一步循环载荷的作用,显微空穴则聚集成疲劳的微裂纹。另一方面合金在熔炼铸造过程中不可避免的会引入一些含 Fe、Mn 等元素的杂质,在合金的凝固过程易形成粗大的金属间化合物,这些金属间化合物往往较脆,在循环载荷作用下,杂质粒子自身容易破碎形成微裂纹,由于裂纹尖端应力集中的缘故,裂纹极易向基体中扩展,这是另外一种裂纹萌生的机制。

#### 3.2 疲劳裂纹的偏转模型

疲劳裂纹萌生后,在微裂纹扩展的最初阶段,裂纹的扩展主要依靠位错的滑移进行<sup>[15]</sup>,对于面心立方结构的铝合金,其 $\{111\}$ 面属于原子的密排面, $\langle 110 \rangle$ 方向为主要的滑移方向。其常温条件下有利的滑移系是 $\{111\} \langle 110 \rangle$ ,因此在晶粒内部裂纹均沿着主滑移系方向以纯剪切的方式进行扩展。由于断口的表面对应的是轧制的横截面,其金相如图 3 所示从横截面方向看,由于材料已经发生了再结晶,故该方向上的晶粒呈近似的等轴状。根据 Wei 等人<sup>[1,16]</sup>的研究,晶界处相邻裂纹面的扭转和偏转是控制裂纹走向的重要因素。因此对于裂纹在不同晶粒之间的扩展,可以分为如下两种情况:(1)当相邻两晶粒的有利滑移系处于一定的夹角时,裂纹尖端的滑移从一个晶粒的有利滑移面转移至相邻晶粒的有利滑移面不断向前扩展,如图 4 中裂纹 A 所示的扩展路径,形成所谓的“Z”字形的裂纹扩展路径;(2)当相邻两晶粒的有利滑移面一致时,裂纹尖端可以直接进入新的晶粒有利滑移面继续扩展,裂纹不发生偏转如图 4 中裂纹 B 所示的扩展路径,并且由于该种裂纹扩展阻力小,这种条件下的裂纹扩展速率要明显较快。因此在裂纹扩展的初期既可以看到“Z”字形扩展的裂纹路

径,也可以看到直接穿过晶界扩展的裂纹扩展路径。整体来看在疲劳微裂纹在不同晶粒间扩展后便形成了具有一定夹角的晶体学小刻面和类似的河流状花样。

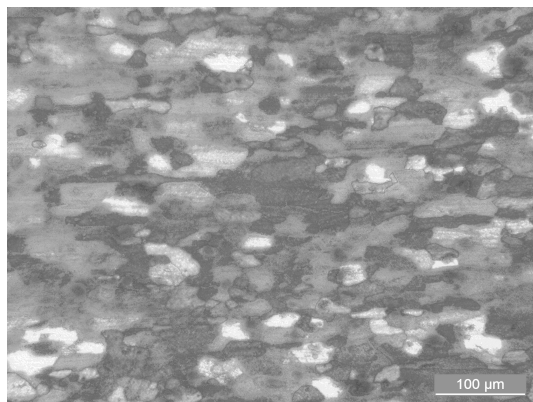


图 3 5A06 板材横截面的金相

Fig. 3 Optical microscopy in the transverse direction of the 5A06-Rolled plate

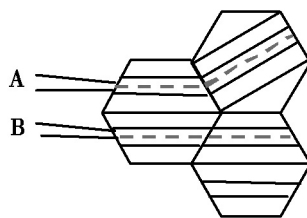


图 4 疲劳小裂纹在不同晶粒间偏转的示意图

Fig. 4 Schematic diagram showing deflection of the fatigue micro crack between different grains

#### 3.3 应力水平对疲劳断口特征的影响

在疲劳加载的过程中随着疲劳加载应力水平的提高,裂纹萌生出现了明显的多源性,这与郑子樵<sup>[17]</sup>等人的研究结果是一致的。这是由于在较高的应力水平下由于循环周次较少,位错往来不及塞积导致杂质粒子与基体的分开,而在高应力条件下,粒子自身破碎的倾向性明显加大,因此多源性的疲劳裂纹大都是由于杂质粒子自身的开裂形成的微裂纹。疲劳裂纹在初始的扩展阶段,随着循环加载应力的提高,裂纹尖端的应力强度因子不断增加,裂纹扩展的驱动力增加,裂纹在晶粒的内部和晶粒之间就更加容易发生偏折,所以裂纹在初期的扩展路径也更加曲折。并且随着裂纹尖端应力强度因子的增大,裂纹扩展过程中遇到的杂质粒子更容易被“拔出”,因此在裂纹的扩展区可以观察到更多的空洞和二次裂纹。同时,这是因为随着裂纹扩展速率的增大,每个循环周期内裂纹尖端向前移动的距离增大,因此疲劳辉纹的宽度也显著增大,相应的裂纹扩展区所占的面积在不断减小。

## 4 结论

(1) 疲劳极限附近, 裂纹起源于杂质粒子与基体的结合处, 较高应力水平下, 裂纹萌生来自于杂质粒子自身的开裂, 并且呈现典型的多源特征。

(2) 随着应力水平的提高, 裂纹的偏转路径更加复杂, 疲劳辉纹间距增大, 裂纹扩展区所占断口比例在不断减少。

(3) 疲劳裂纹在初期呈曲折路径向前扩展, 当相邻晶粒的有利滑移面一致时, 裂纹不发生偏转, 当相邻晶粒的有利滑移面存在一定夹角时, 裂纹发生偏转形成断口的晶体学形貌。

### 参考文献

- [1] Wei L L, Pan Q L, Huang H F, et al. Influence of grain structure and crystallographic orientation on fatigue crack propagation behavior of 7050 alloy thick plate[J]. International Journal of Fatigue, 2014, 66: 55-64
- [2] Chen Y Q, Pan S P, Zhou M Z, et al. Effects of inclusions, grain boundaries and grain orientations on the fatigue crack initiation and propagation behavior of 2524-T3 Al alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 580: 150-158
- [3] Payne J, Welsh G, Christ Jr R J, et al. Observations of fatigue crack initiation in 7075-T651[J]. International Journal of Fatigue, 2010, 32(2): 247-255
- [4] Newman J C, Anagnostou E L, Rusk D. Fatigue and crack-growth analyses on 7075-T651 aluminum alloy coupons under constant- and variable-amplitude loading[J]. International Journal of Fatigue, 2014, 62: 133-143
- [5] Gupta V K, Gangloff R P, Agnew, S R. Diffraction characterization of microstructure scale fatigue crack growth in a modern Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2012, 42: 131-146
- [6] Alexopoulos N D, Migklis Evangelos, Stylianos Antonis, et al. Fatigue behavior of the aeronautical Al-Li (2198) alumi-

num alloy under constant amplitude loading[J]. International Journal of Fatigue, 2013, 56: 95-105

[7] 刘铭, 张坤, 戴圣龙, 等. 航空用 Al-Cu-Mg 铝合金疲劳行为研究[J]. 航空材料学报, 2014(1): 76-81

[8] 蹇海根, 姜锋, 文康, 等. 不同应力下 7B04 铝合金的疲劳断口[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(1): 132-137

[9] PAO P S, Jones H N, Cheng S F, et al. Fatigue crack propagation in ultra-fine grained Al-Mg alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2005, 27(10-12): 1164-1169

[10] PAO P S, Holtz R L, Jones H N. Effect of environment on fatigue crack growth in ultra-fine grain Al-Mg[J]. International Journal of Fatigue, 2009, 31(11-12): 1678-1683

[11] 张占峰, 于国庆, 周德钦. 羽毛状晶组织对 5A06 铝合金疲劳性能的影响[J]. 轻合金加工技术, 2009, 37(12): 39-41

[12] 张红霞, 吴广贺, 闫志峰, 等. 5A06 铝合金及其焊接接头的疲劳断裂行为[J]. 中国有色金属学报, 2013(2): 327-335

[13] 张宇玮, 潘清林, 杜志慧, 等. 退火温度对 Al-Mg 合金拉伸性能和显微组织的影响[J]. 宇航材料工艺, 2012, 42(1): 61-66

[14] 余玲娟, 郑子樵, 钟申, 等. 6156-T62 铝合金的高周疲劳性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(7): 1201-1205

[15] 刘新灵, 张峥, 陶春虎. 疲劳断口定量分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 30-32

[16] Jian Haigen, Jiang Feng, WEI Li li, et al. Crystallographic mechanism for crack propagation in the T7451 Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(21-22): 5879-5882

[17] 郑子樵, 陈圆圆, 钟利萍, 等. 2524-T34 合金疲劳裂纹萌生和扩展行为[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(1): 37-42

(编辑 任涛)