

# 微量 Sc 和 Zr 对 2524SZ 合金薄板疲劳裂纹扩展特性的影响

郭加林<sup>1</sup>, 尹志民<sup>1</sup>, 王 华<sup>1</sup>, 何振波<sup>1,2</sup>, 商宝川<sup>1</sup>

(1. 中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083;

2. 东北轻合金有限责任公司, 哈尔滨 150060)

**摘 要:** 采用拉伸和疲劳力学性能测试、金相和透射电子显微分析, 研究 2524 和用微量 Sc 和 Zr 合金化的 2524SZ 合金 T3 态薄板的组织和性能, 考察微量 Sc 和 Zr 合金化对 2524SZ 合金 T3 态薄板疲劳裂纹扩展特性的影响。结果表明: 微量 Sc 和 Zr 在 2524SZ 合金中主要以次生的  $Al_3(Sc, Zr)$  粒子形式存在, 这种粒子与基体共格, 固溶处理过程中能部分抑制合金的再结晶, 基体晶粒组织主要由细小的亚晶组成; 在相近的应力强度因子  $\Delta K$  条件下, 2524 和 2524SZ 合金 T3 态薄板的疲劳裂纹扩展速率分别为 4.50 和 2.35  $\mu m/cycle$ , 表明添加微量 Sc 和 Zr 能显著降低 2524SZ 合金抵抗疲劳裂纹扩展速率; 亚晶强化和  $Al_3(Sc, Zr)$  相析出强化是微量 Sc 和 Zr 使 2524SZ 合金疲劳裂纹扩展速率降低的主要原因。

**关键词:** 2524SZ 合金; Sc; Zr; 亚晶;  $Al_3(Sc, Zr)$  析出相; 疲劳裂纹; 扩展特性

中图分类号: TG146.2 文献标志码: A

## Effects of minor Sc and Zr on fatigue crack development characteristics of 2524SZ alloy sheet

GUO Jia-lin<sup>1</sup>, YIN Zhi-min<sup>1</sup>, WANG Hua<sup>1</sup>, HE Zhen-bo<sup>1,2</sup>, SHANG Bao-chuan<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Northeast Light Alloy Co. Ltd, Harbin 150060, China)

**Abstract:** The microstructures and properties of 2524-T3 alloy sheet and 2524SZ-T3 alloy sheet with minor Sc and Zr, were investigated by tensile test, OM and TEM analysis. The effects of minor Sc and Zr on the fatigue crack development characteristics of 2524SZ alloy sheet were studied. The results show that in 2524SZ aluminum alloy, minor Sc and Zr exist as secondary  $Al_3(Sc, Zr)$  precipitates, which can partly prohibit recrystallization, and the matrix mainly consists of subgrain. At the similar  $\Delta K$  value, the fatigue crack propagation rates of 2524 and 2524SZ alloy sheets are 4.50 and 2.35  $\mu m/cycle$ , respectively, showing that minor Sc and Zr can obviously decrease the fatigue crack propagation velocity. Subgrain structure and  $Al_3(Sc, Zr)$  precipitates are responsible for the decrease of the fatigue crack propagation velocity of 2524SZ alloy.

**Key words:** 2524SZ alloy; scandium; zirconium; subgrain structure;  $Al_3(Sc, Zr)$  precipitate; fatigue crack; propagation characteristics

2524 合金是继 2024 合金和 2124 合金之后开发出来的综合性能较好的高强高韧高损伤容限的 Al-Cu-Mg 系合金<sup>[1-2]</sup>, 其中 2524-T3 态铝合金薄板主

要用作飞机的蒙皮。国外 2524 铝合金的研究开发比较成熟<sup>[3-5]</sup>, 并已成功应用于波音 777 飞机和 A380 大型客机上<sup>[6]</sup>, 而国内还处于研制和试用阶段<sup>[7-9]</sup>。为了进

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(G2005CB623705)

收稿日期: 2009-07-15; 修订日期: 2009-11-19

通信作者: 尹志民, 教授, 博士; 电话: 0731-88830262; Email: yin-grp@csu.edu.cn

一步提高 2524 合金薄板的疲劳强度和降低疲劳裂纹扩展速率,近年来国外科研人员采用微合金化方法对 2524 合金进行改性<sup>[10-12]</sup>, TACK 等<sup>[10]</sup> 比较研究了微量 Sc、Zr+Li、Mn+Zr、Sc+Zr 等对 Al-Cu-Mg 系 2X24 合金组织和性能的影响,认为在他们的专利指定的成分和加工热处理条件下,添加微量 Sc+Zr 可以使得合金板材获得非再结晶组织而不会形成有害的 W(AlCuSc)相,与此同时合金板材抗疲劳性能显著改善。WARNER<sup>[12]</sup>比较了 Mn、Zr、Zr+Sc 对 2X24 合金组织和性能的影响,指出复合添加微量 Sc+Zr 可以使得合金板材的抗拉强度、屈服强度和断裂韧性得到同步提高。但是上述专利对于合金的制备没有具体的描述,微合金化对这种合金疲劳裂纹扩展特性的影响也鲜见报道。尹志民等<sup>[13]</sup>研制成功了用微量钪和钼合金化的 2524 铝合金薄板(简称 2524SZ 合金)。本文作者侧重研究 2524 和 2524SZ 两种合金 T3 态的薄板疲劳裂纹扩展特性,探讨 2524SZ 铝合金薄板疲劳裂纹扩展与微观组织结构的关系,旨在探索进一步提高航空用 2524 合金薄板的抗疲劳特性的途径。

## 1 实验

### 1.1 材料制备

采用半连续铸造方法制备出合金锭,铸锭经均匀化处理、热轧、冷轧成厚度为 2.14 mm 薄板。薄板经 498 ℃ 盐浴固溶水淬后,再压光矫直至 2.0 mm,之后进行 96 h 以上的自然时效(即 T3 态处理)。合金化学成分见表 1,考虑到 Cu 含量(质量分数)超过 4%时,合金中可能形成有害的铜钪化合物<sup>[14]</sup>,因此,合金设计时将合金中的铜含量控制在 4%以下。

表1 研究合金的化学成分

Alloy	Cu	Mg	Mn	Fe	Si
2524	4.23	1.41	0.56	0.08	0.06
2524SZ	3.80	1.40	0.29	0.03	0.03
Alloy	Ti	Cr	Zr	Sc	Al
2524	0.02	0.004	-	-	Bal.
2524SZ	0.05	-	0.06	0.05	Bal.

### 1.2 力学性能测试与显微组织观察

拉伸力学性能试验和疲劳裂纹扩展速率试验的样品均沿着两种合金 T3 态薄板的纵向截取。拉伸力学性能试验在 CSS-44100 型材料实验机上进行,拉伸速

度为 2 mm/min。疲劳裂纹扩展速率试验在 MTS-810 型试验机上进行,测试出一系列的  $\Delta K$  及相应的  $(da/dN)$  数据,之后绘制成疲劳裂纹扩展速率与  $\Delta K$  的关系曲线。金相样品采用 Keller 试剂腐蚀,金相分析在 POLYVER-MET 显微镜上进行。电镜薄膜样品经机械预减薄后双喷穿孔而成,电解液为硝酸与甲醇混合液(体积比为 1:3),电解减薄温度低于 -20 ℃,透射电子显微组织观察在 TECNAI G<sup>2</sup> 20 电镜上进行,加速电压为 200 kV。

## 2 实验结果

### 2.1 两种合金薄板的拉伸力学性能和疲劳力学性能

两种合金 T3 态薄板的拉伸力学性能见表 2。结果表明,在 T3 状态下,与 2524 合金相比,2524SZ 合金在 Cu 含量降低 0.43%的情况下,添加微量 Sc 和 Zr 后,2524SZ 合金的抗拉强度和伸长率分别降低了 24 MPa 和 5%,但屈服强度提高了 21 MPa。

两种合金 T3 态薄板的疲劳裂纹扩展速率与  $\Delta K$  的关系曲线见图 1。由图 1 可知, 2524SZ 合金的疲劳

表 2 两种合金 T3 态薄板的拉伸力学性能

Table 2 Tensile properties of two alloy sheets at T3 condition

Alloy	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\delta_5$ /%
2524	488	359	20.3
2524SZ	464	380	15.3

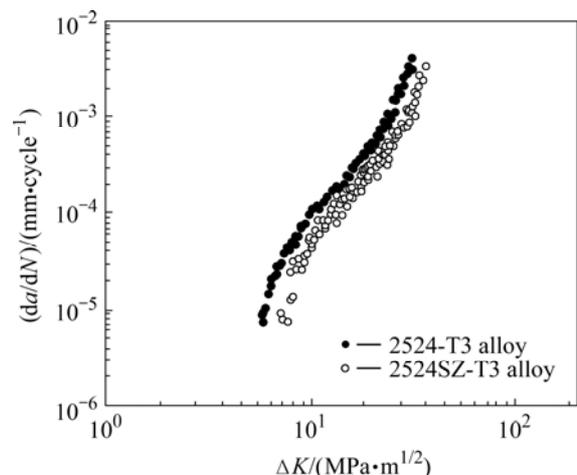


图 1 两种合金 T3 态薄板疲劳裂纹扩展速率与应力强度因子  $\Delta K$  关系

Fig.1 Relationship between fatigue crack growth rate and  $\Delta K$  for two alloy sheets at T3 condition

裂纹扩展速率较慢, 门槛应力值 $\Delta K_{th}$ 较高。在应力强度因子 $\Delta K=30 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 时, 2524 和 2524SZ 合金 T3 态薄板的疲劳裂纹扩展速率均值分别为 4.50 和 2.35

表 3 两种合金 T3 态薄板在应力强度因子 $\Delta K=30 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 左右的疲劳裂纹扩展速率  $da/dN$

Table 3 Fatigue crack growth rate  $da/dN$  of two alloy sheets at T3 condition when stress intensity factor range  $\Delta K=30 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$

Alloy	Condition	$\Delta K/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$	$(da/dN)/(\mu\text{m}\cdot\text{cycle}^{-1})$
2524	T3	30.05	4.50
2524SZ	T3	30.00	2.35

$\mu\text{m}/\text{cycle}$ (见表 3), 说明微量 Sc 和 Zr 的添加能显著提高 2524 合金抵抗疲劳裂纹扩展的能力。

## 2.2 两种合金薄板的显微组织结构

两种合金 T3 态薄板的金相组织和透射电子显微组织见图 2。由图 2(a)和(c)可知, T3 状态下 2524 合金为再结晶组织, 含 Sc 和 Zr 的 2524SZ 合金仍有沿轧制方向延展的迹象。由图 2(b)、(d)和(e)可知, 两种合金晶粒内部分布有大量短棒状的微米级析出相。2524 合金中短棒状析出相密度相对较大, 微区能谱成分表明短棒状析出相是  $\text{Al}_6\text{Mn}$ , 2524 合金大角度三叉

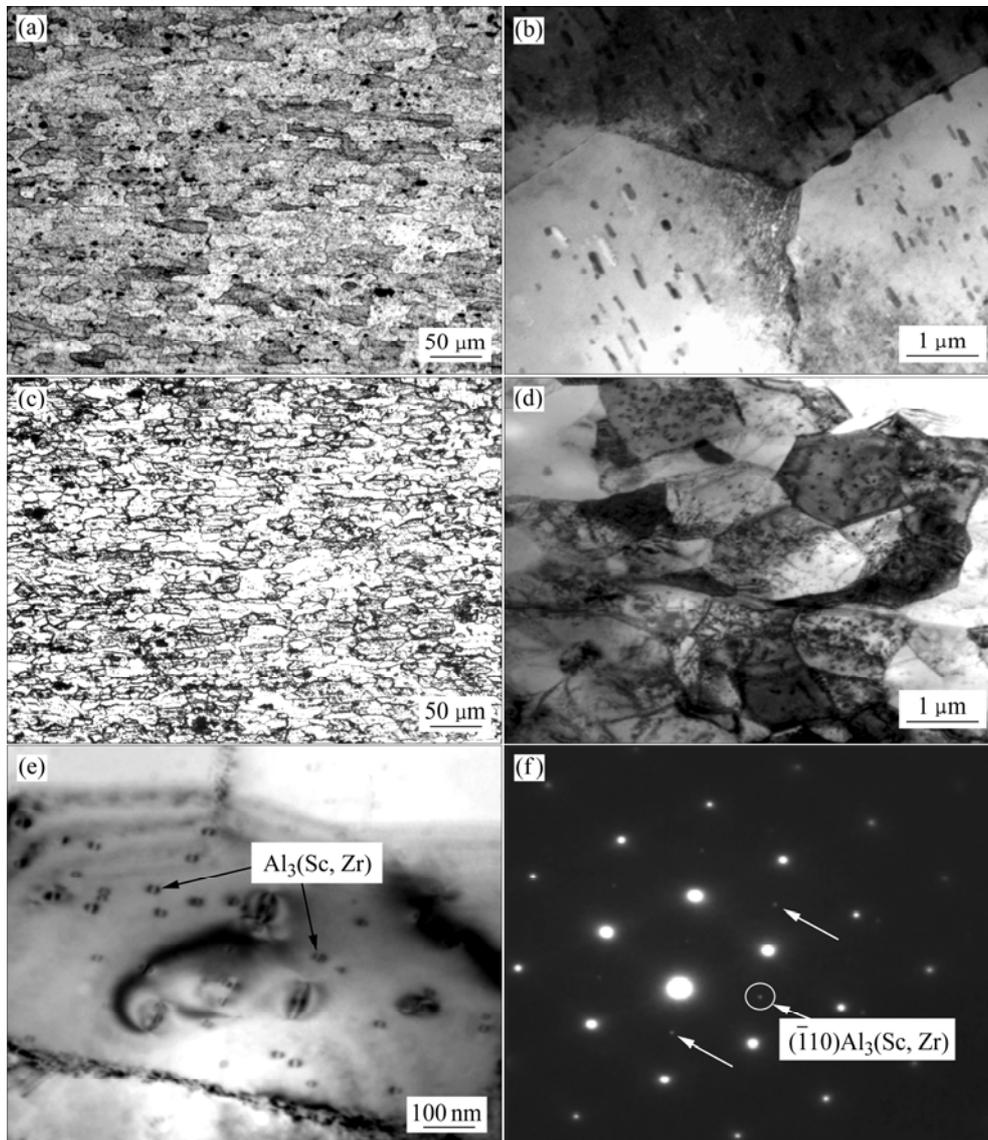


图 2 两种合金 T3 态薄板的金相组织和 TEM 组织

Fig.2 OM and TEM images of two alloy sheets at T3 condition (metallographic microstructure at lengthwise direction): (a) 2524-T3 alloy, OM; (b) 2524-T3 alloy, TEM; (c) 2524SZ-T3 alloy, OM; (d), (e) 2524SZ-T3 alloy, TEM; (f) 2524SZ-T3 alloy, electron diffraction pattern

晶界也表明这种合金再结晶程度大。而 2524SZ 合金基体主要由细小的亚晶组成, 2524SZ 合金基体内还存在一种与基体共格的蹄印形粒子, 电子衍射分析(见图 2(f))表明, 它们是  $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$  粒子。

### 2.3 两种合金薄板的疲劳裂纹扩展断口特征

在应力强度因子  $\Delta K$  相近的力学条件下, 两种合金板材疲劳裂纹扩展在不同裂纹宏观扩展区的微观形貌见图 3。从图 3 可以看出, 疲劳裂纹扩展断口均可

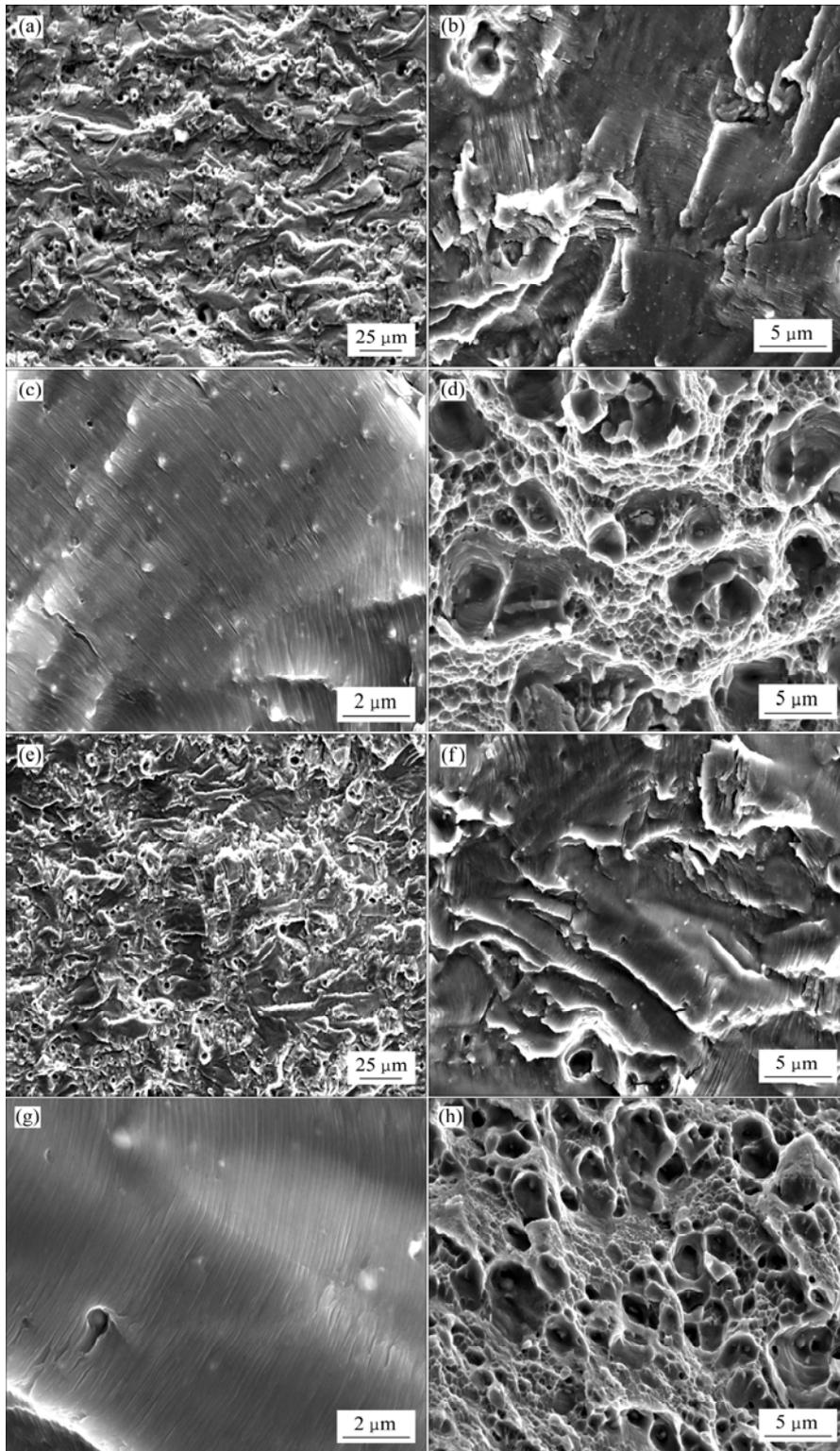


图 3 两种合金 T3 态薄板疲劳裂纹扩展断口特征

**Fig.3** Fracture characteristics of fatigue crack growth of two alloy sheets at T3 condition: (a) Low rate expansion zone, 2524-T3 alloy; (b), (c) Steady state expansion zone, 2524-T3 alloy; (d) Fast rate expansion zone, 2524-T3 alloy; (e) Low rate expansion zone, 2524SZ-T3 alloy; (f), (g) Steady state expansion zone, 2524SZ-T3 alloy; (h) Fast rate expansion zone, 2524SZ-T3 alloy

明显的分为低速率区(近门槛值区)、稳定扩展区和瞬断区。在低速率区,晶粒组织的形状大小导致了2524合金断口粗糙,高低起伏较明显(见图3(a)),而2524SZ合金断口在此区域内较平坦(见图3(e));在稳定扩展区,两种合金样品断面上均可见明显的疲劳辉纹(见图3(b),(c),(f)和(g)),2524和2524SZ样品断面上疲劳辉纹间距分别为200和100nm左右,疲劳辉纹宽度与宏观裂纹扩展速率有关。在瞬断区,两种合金样品断面上均呈典型的韧性断裂(见图3(d)和(h)),相比之下2524SZ合金韧窝尺寸较小。

### 3 分析和讨论

#### 3.1 微量Sc、Zr对合金显微组织的影响

将微量Sc和Zr添加到2524铝合金中时,由于添加量没有达到细化铸态晶粒的临界含量,因此合金铸态晶粒组织没有细化,微量Sc和Zr主要以与基体共格的次生 $Al_3(Sc, Zr)$ 粒子形式存在(见图2(e))。这种粒子在铸锭均匀化过程中析出,具有较高的热稳定性,在热轧和固溶过程中,它们能够钉扎位错和晶界,从而起到稳定合金亚结构并部分抑制合金再结晶和晶粒长大的作用<sup>[14]</sup>。如图2(d)所示,2524SZ合金基体晶粒组织主要由细小的亚晶组成,充分说明了这一点。

#### 3.2 微量Sc和Zr对合金拉伸力学性能的影响

合金的抗拉强度主要取决于原子之间的结合力,由于2524SZ合金中的Cu含量比2524合金中的低,因此抗拉强度也稍低。合金屈服强度主要与第二相的粒度、粒形、物相结构以及位错亚结构等有关。添加的Sc和Zr没有固溶到铝基固溶体中,主要是以弥散的、次生的纳米级 $Al_3(Sc, Zr)$ 粒子形式存在。这些粒子钉扎位错和亚晶界,对形变组织中的亚结构具有强烈的稳定化作用,固溶处理后,2524SZ合金晶粒组织为部分再结晶组织。亚晶强化和 $Al_3(Sc, Zr)$ 相析出强化是微量Sc和Zr使2524SZ合金屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 提高的主要原因。与此同时,2524SZ合金的塑性则有所降低。

#### 3.3 微量Sc和Zr对合金疲劳裂纹扩展速率的影响

如图1所示,两种合金T3态薄板疲劳裂纹扩展速率表明,添加微量Sc和Zr使2524合金疲劳裂纹扩展速率从4.50 $\mu\text{m}/\text{cycle}$ 下降到2.35 $\mu\text{m}/\text{cycle}$ ,这个结果与2524SZ合金晶粒组织的亚晶结构和基体中存在的 $Al_3(Sc, Zr)$ 共格粒子有关。

按照NEUMANN<sup>[15]</sup>提出的疲劳裂纹的裂纹尖端

滑移模型,裂纹的每一次扩展都可以看成是裂纹体尖端的一次小范围的小量屈服变形。在2524SZ合金中,当疲劳裂纹扩展遇到与基体共格的 $Al_3(Sc, Zr)$ 粒子时,在裂纹尖端的屈服变形过程中,位错必须切割 $Al_3(Sc, Zr)$ 粒子,屈服变形的阻力大,疲劳裂纹向前扩展的速率会降低,这一点从两种合金疲劳辉纹间距的差别可以得到证实。

在疲劳裂纹扩展样品上离裂纹距离相近的部位,2524SZ合金疲劳辉纹间距比2524合金的小。由于疲劳辉纹间距是每一次应力循环下屈服变形留下的痕迹,这就间接说明,2524SZ合金基体中的 $Al_3(Sc, Zr)$ 粒子阻碍了裂纹体尖端的屈服变形,减缓了疲劳裂纹向前扩展的速率。此外,我们还可以看到,疲劳裂纹在不同的晶粒中扩展时,疲劳辉纹的走向不同,同一晶粒不同亚晶粒内,疲劳裂纹的走向虽然大体一致,但也有所差别;晶界和亚晶界能阻碍疲劳裂纹的扩展<sup>[16]</sup>,说明图2(d)所示亚晶结构是一种能有效阻止微裂纹扩展的特征微结构。

### 4 结论

1) 微量Sc和Zr在2524SZ合金中主要以次生的 $Al_3(Sc, Zr)$ 粒子形式存在,这种粒子与基体共格,钉扎位错和亚晶界,在固溶处理过程中仍然能够部分抑制合金的再结晶。亚晶强化和 $Al_3(Sc, Zr)$ 相析出强化是微量Sc和Zr使2524SZ合金屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 增高的主要原因。

2) 在应力强度因子相近( $\Delta K=30\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ )的条件下,2524和2524SZ合金T3态薄板的疲劳裂纹扩展速率分别为4.50和2.35 $\mu\text{m}/\text{cycle}$ ,表明微量Sc和Zr的添加能显著提高2524合金抵抗疲劳裂纹扩展的能力。

3) 2524SZ合金中亚晶组织和与基体共格的 $Al_3(Sc, Zr)$ 粒子是2524SZ合金疲劳裂纹扩展速率降低的主要原因。

### REFERENCES

- [1] WARNER T. Recently-developed Aluminum solutions for aerospace applications[J]. Materials Science Forum, 2006, 519/521(2): 1271-1278.
- [2] 杨守杰, 戴圣龙. 航空铝合金的发展回顾和展望[J]. 材料导报, 2005 19(2): 76-80.  
YANG Shou-jie, DAI Sheng-long. A glimpse at the development and application aluminium alloys in aviation industry[J]. Materials Review, 2005 19(2): 76-80.

- [3] SRIVATSANA T S, KOLAR D, MAGNUSEN P. The cyclic fatigue and final fracture behavior of aluminum alloy 2524[J]. *Materials and Design*, 2002, 23(2): 129-139.
- [4] NESTERENKO G I, NESTERENKO B G. Ensuring structural damage tolerance of Russian aircraft[J]. *International Journal of Fatigue*, 2009, 31: 1054-1061.
- [5] SUTTON M A, REYNOLDS A P, YAN J H, YANG B C, YUAN N. Microstructure and mixed mode I/II fracture of AA2524-T351 base material and friction stir welds[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2006, 73: 391-407.
- [6] 陈文. 先进铝合金在 A380 上的应用[J]. *航空维修与工程*, 2005(2): 41-42.  
CHEN Wen. Application of advanced aluminum alloys in A380 structures[J]. *Aviation Maintenance and Engineering*, 2005(2): 41-42.
- [7] 李海, 郑子樵, 魏修宇, 王芝秀. 时效析出对铝合金疲劳断裂纹行为的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2008, 18(4): 589-594.  
LI Hai, ZHENG Zi-qiao, WEI Xiu-yu, WANG Zhi-xiu. Effect of aging precipitation characteristics on fracture behavior of 2E12 aluminium alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2008, 18(4): 589-594.
- [8] YI Dan-qing, YANG Sheng, DENG Bin, ZHOU Ming-zhe. Effect of pre-strain on fatigue crack growth of 2E12 aluminum alloy[J]. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2007, 17(Special 1): s141-s144.
- [9] 郭加林, 尹志民, 商宝川, 聂波, 何振波. 2524 铝合金薄板平面各向异性研究[J]. *航空材料学报*, 2009, 29(1): 1-6.  
GUO Jia-lin, YIN Zhi-min, SHANG Bao-chuan, NIE Bo, HE Zhen-bo. Study on in-plane anisotropy of 2524 aluminum alloy sheet[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2009, 29(1): 1-6.
- [10] TACK W T, HANSSON I L H. Aluminum alloys containing scandium with zirconium additions. US5620652[P]. 1997-04-15.
- [11] RIOJA R J, WESTERLUND R W, ROBERTS A E, et al. Aluminum sheet products having improved fatigue crack growth resistance and methods of making same. US Patent Application No.20070000583[P]. 2007-07-04.
- [12] WARNER T. Recently-developed Aluminum solutions for aerospace applications[J]. *Materials Science Forum*, 2006, 519/521(2): 1271-1278.
- [13] 尹志民, 姜锋, 潘清林, 王华. 一种采用微量钪和锆微合金化的铝铜镁合金薄板及其制备. 中国专利申请号: 200910303565.6[P]. 2009-10-30.  
YIN Zhi-min, JIANG Feng, PAN Qing-lin, WANG Hua. An Al-Cu-Mg alloy Sheet using Sc and Zr micro-alloying and its manufacture[J]. Chinese Patent Application: No. 200910303565.6[P]. 2009-10-30.
- [14] 尹志民, 潘青林, 姜锋, 李广汉. 钪和含钪合金[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2007.  
YIN Zhi-min, PAN Qing-lin, JIANG Feng, LI Guang-han. Scadium and its alloys[M]. Changsha: Central South University Press, 2007.
- [15] NEUMANN P. Coarse slip model of fatigue[J]. *Acta Metallurgica*, 1969, 17: 1219-1225.
- [16] RODER O T, WIRTZ T, GYSLER A. Fatigue properties of Al-Mg alloys with and without scandium[J]. *Mater Sci Eng A*, 1997, 234/236: 181-184.

(编辑 何学锋)