

# Al-Zn-Mg-Cu 合金应变疲劳行为及 位错结构演变<sup>①</sup>

周 昆 李云卿

(中国有色金属工业总公司科技部, 北京 100814)

**摘 要** 研究了  $\epsilon_a = 0.8512\%$  总应变幅下 7075-RRA 铝合金的低周疲劳行为。讨论了应变疲劳位错结构与累积形变之间的关系, 进而初步分析了疲劳裂纹的萌生机理, 并用循环显微软化/硬化的竞争机制解释了 7075-RRA 铝合金的宏观循环稳定化行为。

**关键词** 铝合金 应变疲劳 位错 裂纹

7075 铝合金是工业上使用较为广泛的 Al-Zn-Mg-Cu 系超硬铝合金。合金元素 Zn、Mg 可使固溶处理后时效过程中形成  $\eta'$  过渡相和  $\eta$ -MgZn<sub>2</sub> 平衡相, 具有显著的强化效果; Cu 可改善合金的应力腐蚀抗力 (SCCR), 并可促进合金的时效析出过程, 使其最终强度水平可高达 500~700 MPa, 该合金通用的热处理工艺为:

T6——466 °C 淬水 + 120 °C, 24 h 时效;  
T73——466 °C 淬水 + 107 °C, 6 h + 170 °C, 24 h 二级时效。

7075-T6 铝合金具有峰值强度, 但应力腐蚀抗力较差, 因而限制了强度的发挥, T73 是过时效处理, 虽然应力腐蚀抗力得以改善, 但强度却大幅度下降。1974 年, Cina<sup>[1]</sup> 提出了一种回复再时效的热处理工艺 (Retrogression and Reaging: RRA), 使 7075 合金在具有 T6 处理后强度的同时, 又具备了良好的应力腐蚀抗力。随后, Wallace<sup>[2]</sup> 进一步研究发现: 回复过程中晶界沉淀物迅速长大, 减少了氢离子的致脆作用。在此基础上, Welpman 等<sup>[3]</sup> 及 Ludtka<sup>[4]</sup> 对铝合金的断裂方式进行了总结。但是, 对 7075-RRA 铝合金的疲劳性能及疲劳过程中

微观亚结构的变化却少有研究, 而这一问题对面心立方材料疲劳失效机理的探讨及疲劳过程中的组织行为都有直接的理论及实际意义, 值得深入探讨。

## 1 实验方法

实验所用 7075 合金的化学成分为: Al-6.32Zr-2.5Mg-1.56Cu (质量分数, %), 热处理工艺为 RRA: 466 ± 5.6 °C、30 min 硝酸盐淬水, 120 ± 1 °C 空气炉时效 24 h, 200 °C 硝酸盐浴回复 7.5 min 水冷, 120 ± 1 °C 空气炉 24 h 再时效。

曾经对 RRA 处理后材料的显微组织进行了详细分析<sup>[5]</sup>。本文的应变疲劳试验选取总应变幅  $\epsilon_a = 0.8512\%$ , 应力比  $r = -1$ , 实验方法同文献<sup>[5]</sup>, 并对应变疲劳不同阶段的组织及位错亚结构进行了 TEM 分析。

## 2 试验结果

图 1 为该应变幅下材料的应变疲劳性能试验结果, 从中可以发现, 7075-RRA 铝合金具

① 收稿日期: 1997-09-10 周 昆, 男, 58 岁, 高级工程师

有良好的循环稳定性。

不同应变疲劳阶段的位错亚结构 TEM 分析表明: 经 105 次疲劳后, 析出物粒子与原始组织相比有所变化, 粒子数目减少, 尺寸增大, 并且形成了大量位错带及位错塞积现象, 位错开始以 F-R 源形式增殖(图 2a、b)。经 150 次疲劳后, 位错大量缠结, 粒子周围形成大量几何必需位错, 而粒子之间的基体出现棱柱形位错环, 粒子与基体的界面成为新的位错源(图 3)。随着形变的累积, 经 180 次疲劳循环后, 基体中形成了大量的束状位错结构, 位错密度更高, 如图 4。经 227 周循环后, 基体中形成了大量的易滑移带, 这些易滑移带细而且直, 是位错多次切过粒子的特征, 也是循环显微软化的标志(图 5)。

### 3 分析与讨论

对位错亚结构的演变分析后认为, 经 105 次疲劳循环后, 形成了大量的疲劳位错带及平行的长直位错, 位错带沿两个方向呈交叉分布, 相互交叉的带在(001)<sub>Al</sub>面上的投影几乎垂直, 带间的位错源有 F-R 源及晶界位错源, 见图 2(a)。位错塞积群穿带而过, 这些塞积群的位错源仍是两相互交叉的位错带夹角处的 F-R 源, 如图 2(a)所示。此时, 位错不断增殖是一个循环显微硬化的证据。同时异号平行刃型位

错与滑移面成 45° 形成偶极子的稳定组态, 大量偶极子的形成是异号位错的滑移面上的系列交叉滑移的结果, 也就是该滑移位错在滑移面上的相互羁留形成了刃型的多极子群, 见图 2(b)。位错多极子群的存在是驻留滑移带形成的前奏, 也是滑移带萌生裂纹的必备条件。经 150 周疲劳循环后, 位错的缠结已表现得较为突出, 造成了大量的位错环。强烈的位错在粒子周围的积聚及位错间的纠集, 造成了极大的应力应变场, 使过渡相粒子向 η 相转化或聚集长大, 并在粒子周围形成大量的几何必需位错。而且, 由于粒子与基体之间的错配, 可能导致了棱柱形位错环的形成, 粒子与基体界面成为位错源, 向四周发射位错(如图 3 箭头所

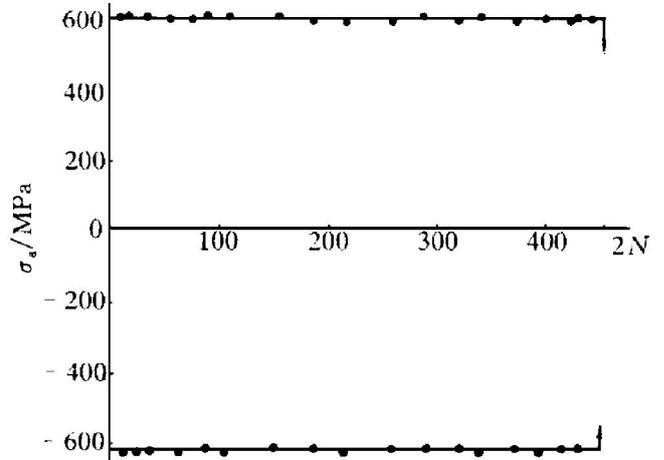


图 1 7075-RRA 铝合金 0.8512% 应变幅下的疲劳行为

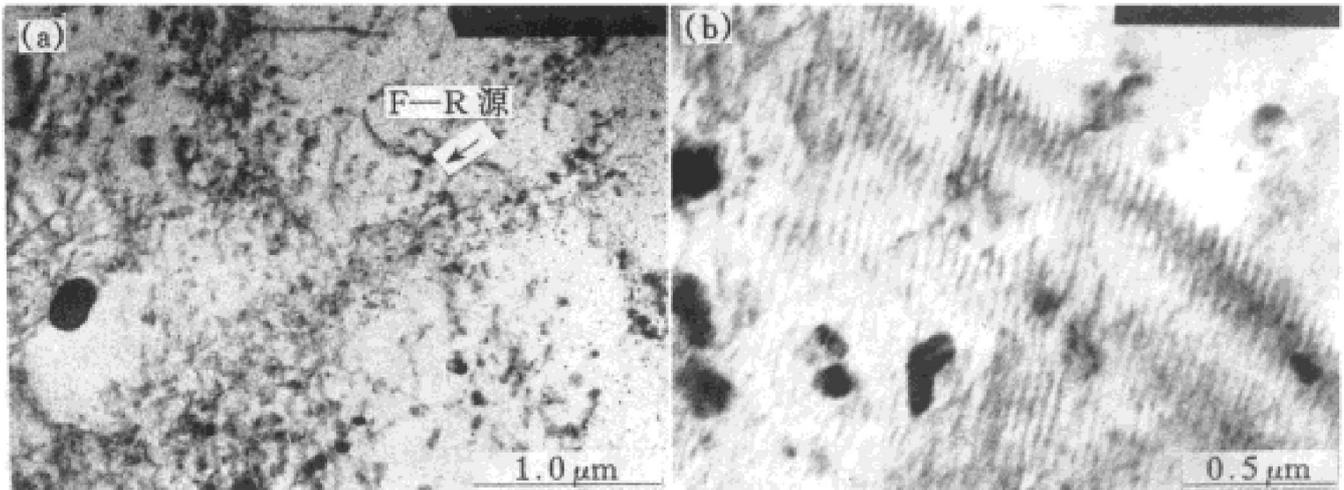


图 2 N = 105 次疲劳位错带及位错塞积  $B = [001]_{Al}$  (a) 及疲劳位错多极子群  $B = [112]_{Al}$  (b)

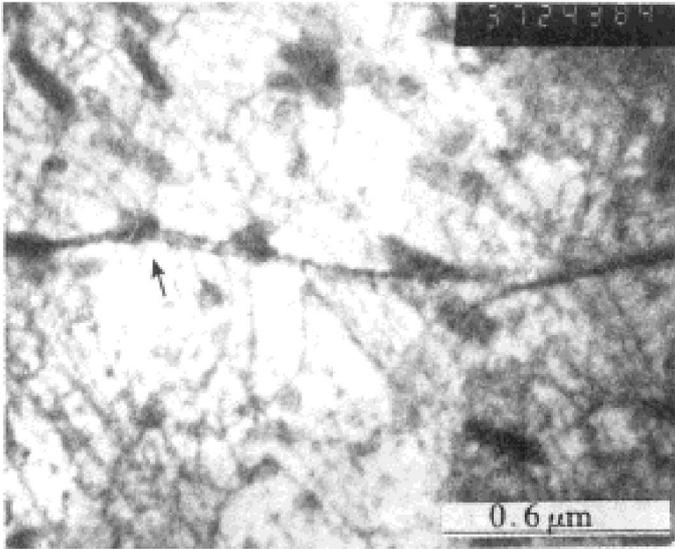


图3  $N = 150$  次后粒子周围几何必需位错  $B = [\bar{1}12]_{Al}$

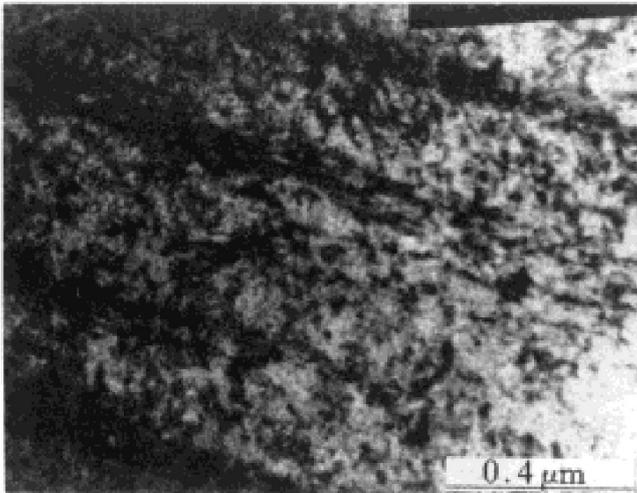


图4  $N = 180$  次应变疲劳位错束结构  $B = [\bar{1}11]_{Al}$

示)。经过180周疲劳后,基体组织中位错密度更高,位错束大量存在,密集位错的束间仍然是与束相平行的长直位错或与束斜交的位错网络、位错环碎片。经过227周循环后,形成了许多易滑移带位错结构,滑移带之间有粒子存在。作者认为,易滑移带从广义上讲就是一种形式的PSBs结构,尽管其形貌与一般所讲的PSBs不同,但它们的位错亚结构组态及所起的作用都有一定程度的相似性。该PSBs结构较窄,细而且直,图6中清楚地表明了滑移对晶界的穿越。滑移穿越的晶界平直且两边均有相同的滑移方向。

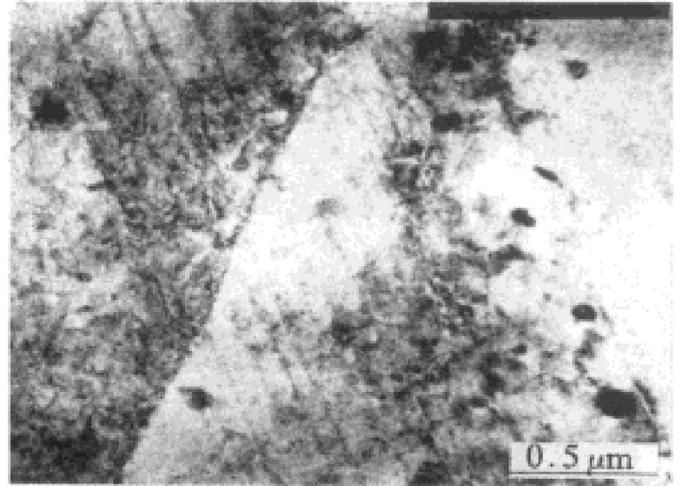


图5  $N = 227$  次应变疲劳易滑移带结构  $B = [\bar{1}11]_{Al}$

与位错结构的变化相对应,疲劳性能表现为循环稳定化趋势。作者认为,循环稳定化是循环显微硬化/软化两种因素竞争的结果。随循环周数增加,在充分回复再时效、位错密度较低的区域,基体发生形变,形成高密度的位错缠结,导致循环显微硬化。而对于处于峰值时效的区域,其粒子为过渡相粒子,该粒子在循环过程中受到两方面的作用,其一是尺寸较小的 $\eta'$ 相粒子被运动位错反复剪切,当一次剪切过后,粒子的有效截面积减小,更有利于滑移位错的切过;后来,位错便择优滑移,不断地剪切该过渡相粒子,使其最终回溶,并导致择优滑移带形成,造成微观的循环软化。其二是尺寸较大的 $\eta'$ 相粒子不易被剪切,但在循环应力、应变的激活作用下,加上过渡相在 $\eta'$ 粒子与基体界面的应力集中为 $\eta'$ 相粒子提供的驱动力,使 $\eta'$ 相粒子逐渐地向平衡相 $\eta$ - $MgZn_2$ 粒子转化,导致循环显微软化,其原理可参阅文献[5]。在应变疲劳的初始阶段, $\eta'$ 相向 $\eta$ 相的转化以及 $\eta$ 相的长大,细小 $\eta'$ 相的剪切回溶所造成的循环显微软化作用与由于高密度位错带形成位错缠结、塞积所引起的循环显微硬化作用相当,使材料宏观上表现为循环稳定化行为;循环的后期,循环显微软化主要是由于滑移带的形成与发展。而循环显微硬化则主要是由于位错缠结、塞积及新位错源的开动所导致的位错密度的升高,这是因为位错的

出现及运动导致塑性形变，引起加工硬化，其流变应力与位错密度的平方根成正比，且使 F-R 源开动的应力为

$$\tau_{F-R} = \frac{Gb(1-\nu/2)}{2\pi(1-\nu)l_s} \ln\left(\frac{l_s}{b}\right)$$

式中  $l_s$  为向前弯曲的位错线长度<sup>[6]</sup>。

对于 7075-RRA 铝合金疲劳裂纹萌生，可以从两方面考虑。

裂纹萌生于择优滑移带，即在 PSBs 内应变集中处形成挤出脊和挤入沟，挤入沟的应力集中逐渐克服 PSBs 栅栏阻力，使挤出脊形成微裂纹，这类裂纹一般为主裂纹。图 6 为 PSBs 的形成及应变集中处萌生疲劳裂纹的示意图。显然，PSBs 形成的前奏是形成位错多极子层(图 2(b))，而当循环塑性变形导致应变累积超过某一临界值后，试样表面突然出现的粗滑移台阶是沿一激活的滑移带同号位错塞积而成。如果一滑移平面的同号位错过剩，那么，在一些相邻的滑移平面就有反号过剩位错，这样的滑移对能够由位错崩而形成隆起。在应变循环的第一个半周期，第一个滑移系动作后仍由第二个滑移系跟着动作，一个形成凹进而另一个形成凸起，进而形成裂纹。形成凹进与凸起对的 PSBs 软化基体，在其内将发生沉淀物的回

溶或过时效。

裂纹萌生于析出物与基体的界面。对于不可变形质点，如粗大的  $\eta'$  相及  $\eta$  相，在其周围形成高密度的棱柱形位错环。在质点的压应力区，将产生间隙环；在拉应力区，将产生空位环。当这些位错环的密度达到一定值之后，便会使第二相与基体界面分离，导致疲劳裂纹沿第二相与基体界面萌生。

### 4 结论

7075-RRA 铝合金应变疲劳宏观特征是循环稳定化。宏观的循环稳定化可由循环显微硬化/软化竞争机制加以解释：在循环初期，循环显微软化是由于过渡相  $\eta'$  的剪切回溶，向稳定相  $\eta$  的转化及  $\eta$  相的粗化；在循环后期，循环显微软化主要是由于滑移带的形成。相反，循环显微硬化则主要是由于位错源开动所导致的位错密度的升高及位错与粒子的强烈交互作用。裂纹的萌生是由于裂纹源处变形的聚集，它与位错行为密切相关。首先，主裂纹萌生于滑移带，然后，次裂纹萌生于析出物与基体组织界面。

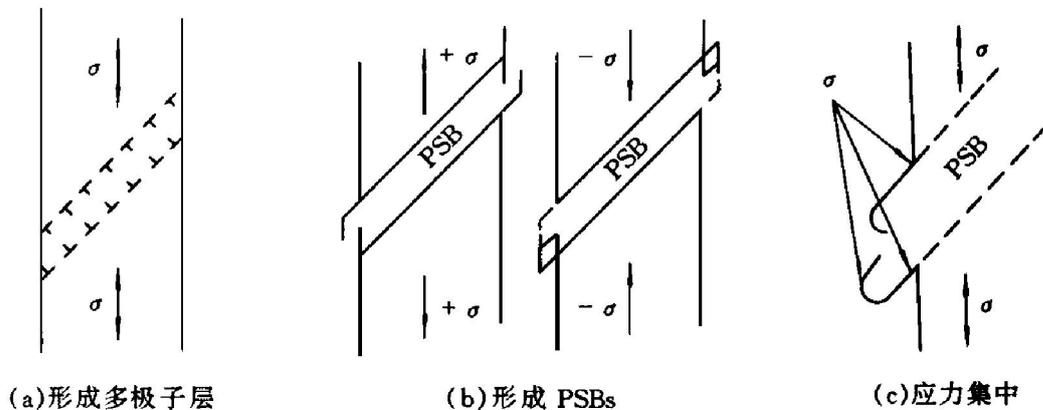


图 6 PSBs 的形成及应变集中处萌生的疲劳裂纹  
 (a) 形成多极子层; (b) 形成 PSBs; (c) 应力集中

## 参考文献

- 1 Cina B M. Aluminium Industrial Products, ASM, 1974.
- 2 Wallace W *et al.* Aeronaut Space J, 1981, 27: 222.
- 3 Wipmann K *et al.* Z Metallk, 1980, 71: 7.
- 4 Ludtka G M. Metall Trans, 1982, 13A: 411.
- 5 Li Yunqing. In: Proc of the IV Conference of Asiarr Pacific Congress on Strength Evolution, Vol. 1, IAP, Beijing, 1991: 103.
- 6 Kuhlmann Wilsdorf D. Mater Sci Eng, 1989, 113: 1.

## STRAIN-FATIGUE BEHAVIOR AND EVOLUTION OF DISLOCATION SUBSTRUCTURE OF Al-Zn-Mg-Cu ALLOY

Zhou Kun, Li Yunqing

*Department of Science and Technology Development,  
China National Nonferrous Metals Industry Corporation, Beijing 100814*

**ABSTRACT** The low-cycle fatigue behavior of 7075-RRA alloy with a total strain amplitude of  $\varepsilon_{ta} = 0.8512\%$  was studied, the relationship between the dislocation substructure of strain fatigue and the accumulated deformation was discussed, consequently the initiation mechanism of fatigue cracks was preliminarily analysed. In addition, the macro cyclic stabilization behavior of 7075-RRA alloy was explained using the cyclic micro softening/hardening competitive mechanism.

**Key words** 7075-RRA aluminium alloy strain fatigue dislocation substructure crack

(编辑 彭超群)