

应力时效对 2E12 铝合金的力学性能和微观组织的影响

王宏伟, 易丹青, 蔡金伶, 王 斌

(中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 采用力学性能试验机、透射电子显微镜(TEM)、应力时效炉等手段研究时效拉应力对 2E12 铝合金的力学性能和微观组织的影响, 并分析应力对 2E12 铝合金的作用机理。结果表明: 外加应力能提高 2E12 铝合金的强度, 增大合金各向异性的差异; 外加应力能促进 S 相的析出, 并产生明显的应力位向效应; 应力时效能使 2E12 铝合金的无沉淀析出带变窄, 阻止晶界沉淀相的连续析出; 应力时效为控制高强铝合金的各向异性提供了一种新方法。

关键词: 2E12 铝合金; 应力时效; 力学性能; 应力位向效应; 无沉淀析出带

中图分类号: TG 146.2

文献标志码: A

Effect of stress aging on mechanical properties and microstructures of 2E12 aluminum alloy

WANG Hong-wei, YI Dan-qing, CAI Jin-ling, WANG Bin

(School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The influences of tensile stress aging on the mechanical properties and microstructure of 2E12 aluminum alloy were investigated by means of mechanical tests, transmission electronic microscopy (TEM) and stress aging furnace. The effect mechanic of tensile stress on 2E12 aluminum alloy was analyzed. The results show that the external stress during aging improves the ultimate strength and increases the ultimate strength anisotropy of 2E12 aluminum alloy. The external stress can enhance the precipitation of S phase and induce the preferred orientation of precipitated S phase. Under the external stress aging, the precipitation free zone (PFZ) is narrowed and the distribution of those precipitates changes from chains to non-continuous ones. The stress aging provides a tool to control the anisotropy in high strength aluminum alloys.

Key words: 2E12 aluminum alloy; stress aging; mechanical properties; stress oriented effect; precipitation free zone

2524 铝合金具有优良的断裂韧性、疲劳性能和抗应力腐蚀性能, 已成功应用在波音 777 和空客 A380 大型客机上, 成为新一代航空结构材料, 被认为是目前最理想的飞机蒙皮材料^[1-4]。近年来, 由于大型客机蒙皮时效成型技术的需要^[5-6], 关于铝合金的应力时效又成为材料科学与工程研究领域新的研究热点之一。

应力时效是指在时效过程中引入一小于屈服极限的应力, 在温度和应力的耦合作用下, 使强化相的析出过程产生显著的变化, 从而达到精细调控析出强化相的种类、数量、形貌、大小以及取向的目的。20 世

纪 70 年代, HOSFORD 和 AGRAWAL^[7]首先将应力时效研究应用于铝合金中, 发现在应力的作用下, 合金中沉淀相会产生明显的择优取向效应。随后, ETO 等^[8]采用双级时效工艺, 发现应力对沉淀相择优取向效应的影响来源于形核阶段。ZHU 和 STARKE^[9]对 Al-xCu 二元合金进行了详细的研究, 发现应力位向效应的产生与合金成分、时效温度、外加应力的及时效时间的长短有关。陈大钦等^[10]通过对组织结构敏感的电导率进行测量, 表明外加应力促进原子团簇或 GP 区的形成, 但延缓 θ' 相和 Ω 相的析出和长大。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2005CB623705)

收稿日期: 2010-12-03; **修订日期:** 2011-02-20

通信作者: 易丹青, 教授, 博士; 电话: 0731-88836320; E-mail: yioffice@mail.csu.edu.cn

然而，上述研究者只针对晶内沉淀相进行了研究，却没有考虑应力对晶界析出特征(晶界沉淀相、无沉淀析出带)和铝合金板材力学性能的影响。

国内关于 2524(2E12 合金)合金的研究处于研究开发阶段，不仅针对传统的单一温度场热处理技术进行了研究^[11-13]，还出现新型的电场时效技术^[14-15]，然而，关于应力时效对 2524 铝合金的影响却未见报道。本文作者以 2E12 铝合金为研究对象，研究不同应力水平下合金力学性能、晶内析出相和晶界析出相特征的变化规律，分析讨论应力时效对该合金的力学性能和微观组织的影响机理。

1 实验

实验材料为东北轻合金有限公司提供的 2E12 冷轧薄板，厚度为 1.4 mm，表 1 所列为合金的化学成分。

表 1 2E12 铝合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of 2E12 aluminum alloy(mass fraction, %)

Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Al
4.00-4.23	1.40-1.42	0.56-0.60	≤0.08	≤0.06	Bal.

实验用合金样品采用 500 ℃、30 min 的固溶处理工艺进行处理，盐浴炉加热(误差为±1 ℃)，水淬。淬火后将合金样品快速放入自制应力时效装置中，快速加载到设定的应力水平，然后开始快速升温至指定温度，进行人工时效。时效温度为 220 ℃，应力水平应小于合金固溶态时的屈服强度，本研究分别选取 0、25、50、80 MPa，时效时间为 10 h。

时效后的板材一部分在 CSS244100 电子拉伸试验机上进行力学性能测试，取样方式如图 1 所示，对板

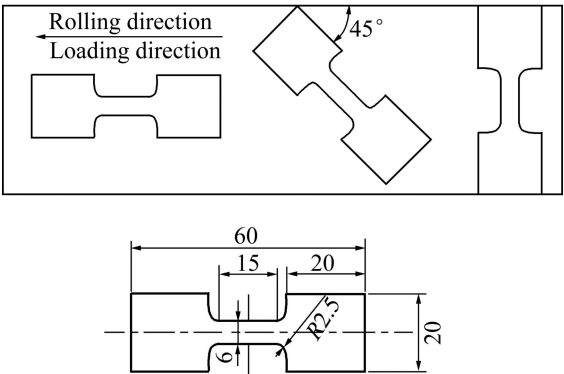


图 1 合金板材拉伸试样取样方向
Fig.1 Tensile specimens with different orientations in rolling plane of alloy sheet (mm)

材的各个方向的力学性能进行比较研究；另一部分样品经打磨和双喷电解减薄(电解液为硝酸和甲醇的混合溶液，其体积比为 1:3)后，在 TECNAI G²20 透射电镜上对其微观组织进行观察，加速电压为 200 kV。

2 实验结果

2.1 应力时效对 2E12 铝合金力学性能的影响

图 2 所示为应力时效后材料的抗拉强度与各个测试方向的关系曲线。板材经自由时效后，3 个方向的抗拉强度差异不大，各向异性表现不明显。当加载应力进行时效后，板材各个方向的抗拉强度都随着外加应力的增大呈现增大的趋势，且强度的各向异性增大。其中当经 80 MPa 应力时效后，板材轧制方向和横向的强度与自由时效态的相比较分别提高了约 19.1%和 17.2%。同时，应力时效对板材性能各向异性的影响也较大，特别是与轧制方向成 45°方向的抗拉强度较其余两个方向的要低。这说明应力时效对材料的强化和各向异性均造成了一定的影响。

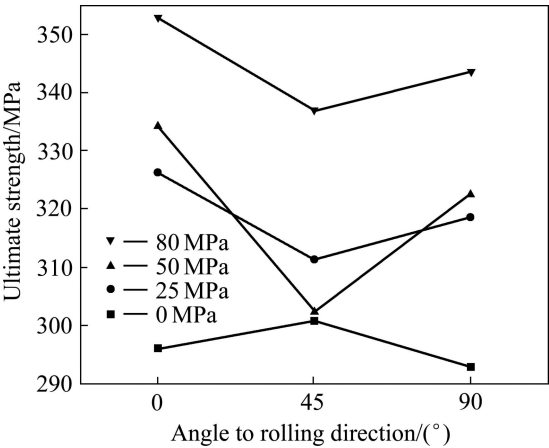


图 2 不同应力时效时 2E12 铝合金板材拉伸抗拉强度和测试方向的关系

Fig.2 Relationship between uniaxial tension and test direction of 2E12 aluminum alloy at different ultimate strengths

2.2 应力时效对微观组织的影响

2.2.1 应力时效对晶内析出相的影响

图 3 所示为 2E12 合金在 220 ℃、10 h 不同应力时效条件下的 TEM 明场像及相应的衍射斑点。从图 3(a)和(b)中可以看出，自由时效态合金中 S 相的 3 个变体在(021)面上是等几率析出的，图中第三个方向的变体不可见是由于它平行于电子束方向[001]。当施加应力为 80 MPa 时，S 相出现了明显的择优取向效应，

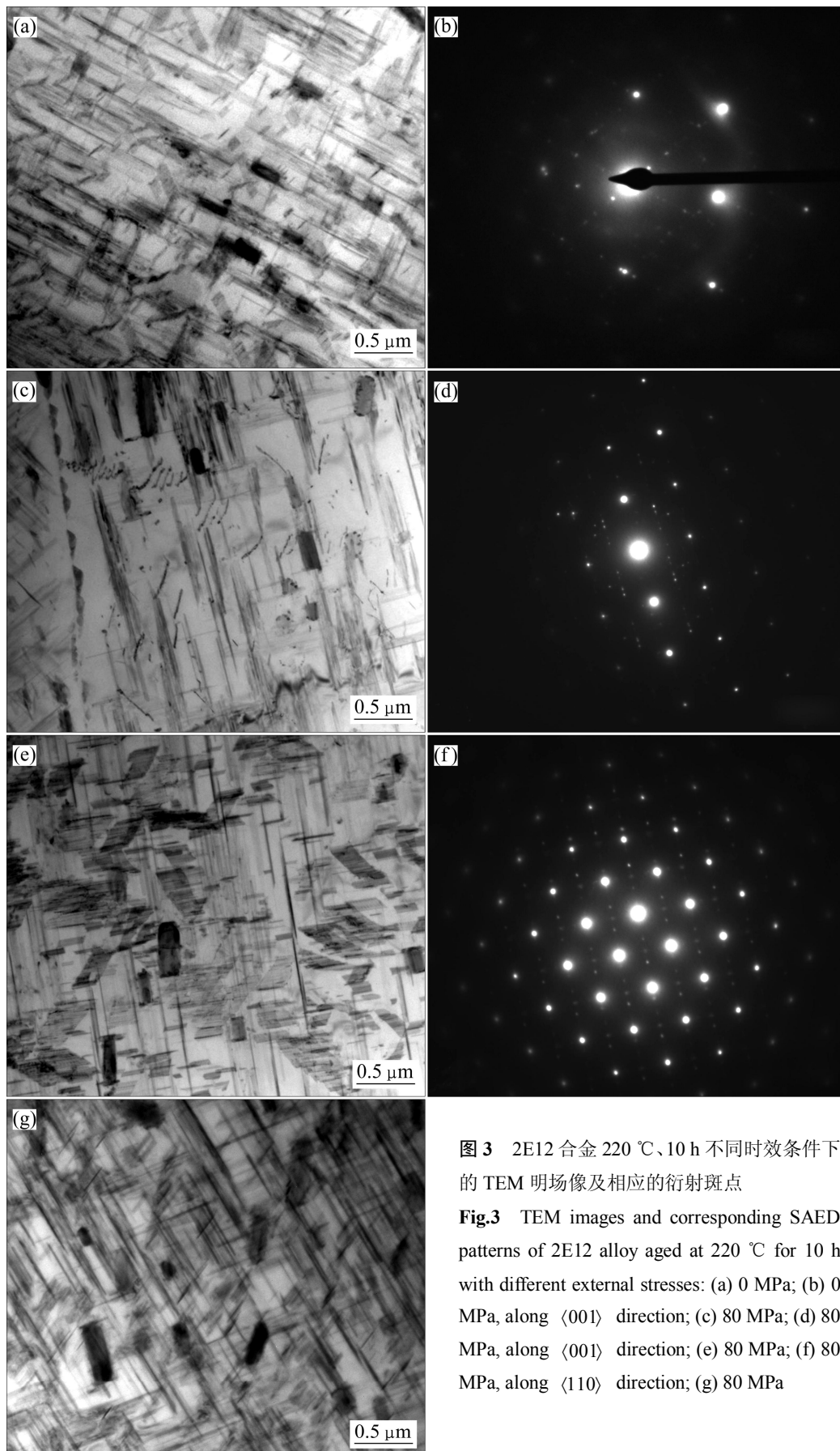


图 3 2E12 合金 220 °C、10 h 不同时效条件下的 TEM 明场像及相应的衍射斑点

Fig.3 TEM images and corresponding SAED patterns of 2E12 alloy aged at 220 °C for 10 h with different external stresses: (a) 0 MPa; (b) 0 MPa, along $\langle 001 \rangle$ direction; (c) 80 MPa; (d) 80 MPa, along $\langle 001 \rangle$ direction; (e) 80 MPa; (f) 80 MPa, along $\langle 110 \rangle$ direction; (g) 80 MPa

从图 3(c)、(d)、(e)、(f)中的 TEM 像以及与之对应的衍射斑点可以看出,相对于自由时效时,应力时效后 S 相的某一个方向的变体不仅数量减少,而且尺寸相对变短。特别是相应的衍射斑点变化很明显,应力时效的衍射斑点中,第二相粒子对应的衍射斑点在某个方向几乎消失,或者衬度很弱,这足以证明在多晶体中的某些晶粒中应力位向效应很明显,导致某个方向的第二相变体优先形核长大,而另一个或两个方向则受到抑制。同时,还应注意到,在多晶体中各个晶粒的取向不同,导致第二相的惯析方向与外加应力成一定的角度,造成每个晶粒对应力的敏感程度也不同,因此可以看到有的晶粒中几乎没有发生 S 相的择优取向分布,如图 3(g)所示。从图中还可以看出,在相同的放大倍数下,与自由时效态合金相比(见图 3(a)),应力时效态的析出相变细,由第二相强化理论可知,合金中的强化相尺寸越小,位错运动受到的阻力就越大,从而提高材料的强度。

2.2.1 应力时效对晶界析出特征的影响

图 4 所示为合金在 220 °C、10 h 不同应力时效条件下的晶界 TEM 明场像。从图 4(a)可以看出,无应力时效态合金的晶界两侧存在明显的无沉淀析出带,且周围的析出相密度较小。当施加 50 MPa 的应力后(见图 4(b)),可以发现晶界的一侧无沉淀析出带变窄,析出相密度有所增大;继续施加到 80 MPa 大小的应力后(见图 4(c)),相对与无应力时效态合金,可以发现在晶界两侧有大量的析出相生成,如图中箭头所示,进一步使无沉淀析出带变窄,甚至有的地方已经消失。根据蠕变的定义可知,应力时效实际相当于蠕变过程,其区别在于蠕变是材料已经经过充分的强化处理,然后在高温高应力下发生缓慢的塑性变形,而应力时效则是材料的时效强化与微量的塑性变形同时进行,因此会在晶界处生成大量的位错,为 S 相提供了足够的形核位置,从而使得无沉淀析出带变窄。无沉淀析出带宽度的减小也有利于提高材料的力学性能。

3 分析与讨论

3.1 应力位向效应的形成机制

对于时效硬化型铝合金,在时效脱溶过程中会形成几种不同的过渡沉淀相,这些过渡相一般与铝基体形成共格或半共格界面,具有较大的应变能,从而提高了合金的力学性能。因此,通过控制时效析出阶段沉淀相的析出序列、分布、形貌、大小、数量以及位向关系可以达到精确调控合金性能的目的。简单的二

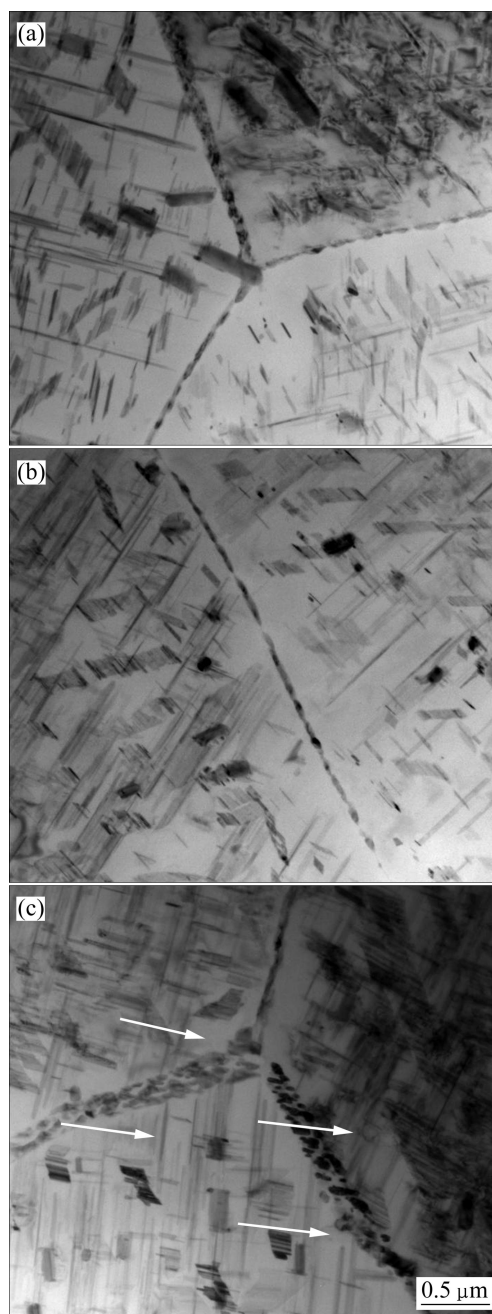


图 4 2E12 合金在 220 °C、10 h 不同应力时效条件下晶界的 TEM 明场像

Fig.4 TEM bright field images of grain boundary of 2E12 alloy aged at 220 °C for 10 h with different external stresses: (a) 0 MPa; (b) 50 MPa; (c) 80 MPa

元合金 Al-Cu 合金的脱溶序列为 $SSSS \rightarrow GP \text{ 区} \rightarrow \theta'' \text{ 相} \rightarrow \theta' \text{ 相} \rightarrow \theta \text{ 相}$ 。ETO 等^[8]利用双级时效工艺证明了应力位向效应来源于 GP 区形核阶段。陈大钦等^[10]采用 Eshelby 夹杂物理论,考虑共格或半共格沉淀相析出时受沉淀相和基体之间的错配度形成的弹性应变场的影响,并将这种弹性应变场与外加应力引起的系统能量

变化进行比较,从能量的角度阐述了应力位向效应的形成机理。Al-Cu合金中的GP区、 θ'' 相、 θ' 相皆为片状相,在外加应力的作用下,系统的应变能增加,但是不同位向的变体增加的程度不同,宽面与外加应力平行的变体应变能增加幅度较大,是宽面与外加应力垂直变体的几十倍,所以两者生长速度的差异比较明显,也即产生了沉淀相的择优生长取向—应力位向效应。然而对于低Cu/Mg比(摩尔比)的Al-Cu-Mg合金而言,其时效析出序列为SSSS $\rightarrow$ 共格团簇/GPB1 $\rightarrow$ 共格GPB2区/共格 S'' 相 $\rightarrow$ 非共格 S 相^[16]。其中的沉淀相为棒状相,采用Eshelby理论将比较繁复,本研究以扩散机制为基础,并结合弹性理论来解释在应力时效过程中 S 相出现的择优取向效应。

图5所示为面心立方金属的排布及原子跃迁距离扩散势垒距离的示意图。当对一立方晶体施加外加应力时,立方晶体将会沿拉伸方向发生一个十分微小的弹性变形,使得晶体变为正方晶体(见图5(a))。那么原子间的相对距离发生变化,使得扩散势垒距离 y 和原子跃迁距离 l 发生变化,这会对扩散过程产生影响(见图5(b))^[17]。

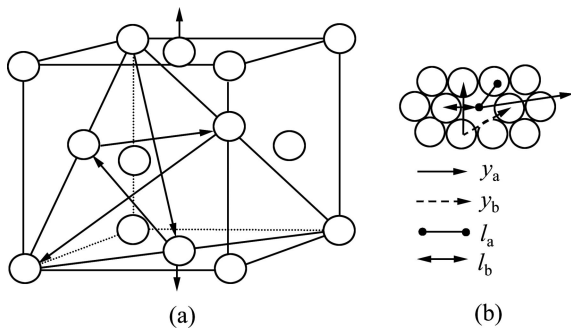


图5 面心立方金属的排布及原子跃迁距离和扩散势垒距离 y 示意图^[17]

Fig.5 Schematic diagrams of FCC stacking sequence and atomic jump distance and diffusion barrier distance (l and y resolve to l_a , l_b and y_a , y_b , respectively, under applied stress)^[17]

根据Flynn的原子迁移动力学理论,原子扩散激活能 Q_M 与弹性常数 C 和弹性应变 δ 之间的关系可以表示为

$$Q_M = 8\pi Cl^3 \delta^3 \quad (1)$$

根据误差理论,可以将式(1)中各个参数之间的变化关系表示为

$$\frac{\Delta Q_M}{Q_M} = \frac{3\Delta l}{l} + \frac{2\Delta \delta}{\delta} \quad (2)$$

由于应变 $\Delta \delta$ 较难估计,因此可将 $\Delta \delta / \delta$ 转换成 $-\Delta y / y$,故式(2)可表示为

$$\frac{\Delta Q_M}{Q_M} = \frac{3\Delta l}{l} - \frac{2\Delta y}{y} \quad (3)$$

由式(3)可知,扩散激活能的变化与跃迁距离 l 和势垒距离 y 有关,而这两者在外力作用下分别有两个不同的值,为 l_a 、 l_b 、 y_a 、 y_b ,如图5(b)所示,因此由式(3)可以分别计算两者的变化得到激活能的变化。利用弹性力学和几何关系,可以得到

$$\begin{cases} y_a \approx y[1 + \sigma(2S_{11} + S_{12})/3] = \\ y[1 + \sigma(2C_{11} + C_{12})/(18KC)] \\ y_b \approx y[1 + \sigma(S_{11} + 5S_{12})/6] = \\ y[1 - \sigma(4C_{12} - C_{11})/(36KC)] \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} l_a \approx l(1 + \sigma S_{12}) = l[1 - \sigma C_{12}/(6KC)] \\ l_b \approx l[1 + \sigma(S_{11} + S_{12})/2] = l[1 + \sigma C_{11}/(12KC)] \end{cases} \quad (5)$$

式中: σ 为外加应力, S_{11} 和 S_{12} 为弹性柔度常数, C_{11} 和 C_{12} 为弹性刚度常数, $K = \frac{C_{11} + 2C_{12}}{3}$,

$C = \frac{C_{11} + C_{12}}{2}$,将其代入式(3),可得:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta Q_{Ma}}{Q_M} &= \frac{\sigma(4C_{11} + 11C_{12})}{18KC}, \\ \frac{\Delta Q_{Mb}}{Q_M} &= -\frac{\sigma(7C_{11} + 8C_{12})}{36KC} \end{aligned} \quad (6)$$

又因为扩散系数分量(D_{ii})的微观表达式如下:

$$D_{ii} = c_v l_i^2 \omega_i \quad (7)$$

$$\omega = \beta \nu_D \exp[-Q_{Mi}/(RT)] \quad (8)$$

式中: c_v 是平衡浓度常数; l_i 是跃迁距离; ω_i 是跃迁频率; β 是常数; ν_D 是德拜频率。

将式(4)、(5)、(6)和(8)代入式(7),可以得到

$$\begin{cases} \frac{D_{11}}{D} \approx \left(1 - \frac{\sigma C_{12}}{6KC}\right)^2 \exp[\sigma(4C_{11} + 11C_{12})Q_M/(18KCRT)] \\ \frac{D_{12}}{D} \approx \left(1 + \frac{\sigma C_{11}}{12KC}\right)^2 \exp[-\sigma(7C_{11} + 8C_{12})Q_M/(36KCRT)] \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)变化可得

$$\begin{aligned} \frac{D_{11}}{D_{12}} &\approx \left(\frac{12KC - 2\sigma C_{12}}{12KC + \sigma C_{11}}\right)^2 \cdot \\ &\exp[15\sigma(C_{11} + 2C_{12})Q_M/(36KCRT)] \end{aligned} \quad (10)$$

将铝的弹性常数: $C_{11}=1.082 \times 10^5$ MPa, $C_{12}=6.13 \times 10^4$ MPa,空位扩散激活能取实验数据

$1.3 \times 10^5 \text{ J/mol}^{[18]}$, 温度为 493 K, 分别代入式(10)作近似估算, 并拟合, 其结果如图 6 所示。由图 6 可以看出: 无外应力时, 扩散系数之比为 1, 说明扩散系数为各向同性; 当有外应力时, $D_{11}/D_{12} > 1$, 扩散系数呈现明显的各向异性, 沿其中某个方向的扩散系数高于另外一个方向的扩散系数, 且随着外力的增加, 两个方向上扩散系数的差异越来越大, 表明外力会使得合金中溶质原子沿不同的方向扩散速度不同, 从而使析出相产生位向效应。

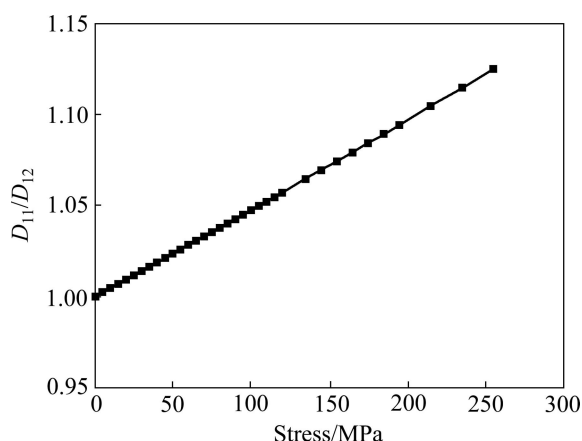


图 6 两个不同方向的扩散系数比值在外力作用下的变化

Fig.6 Variation of diffusion coefficient ratio along two different orientations under applied stress

3.2 外加应力对合金力学性能的影响

影响晶体各向异性的因素主要有织构、析出相的长宽比和晶粒的长宽比, 且织构处于主导地位^[19]。关于应力时效对织构的影响规律有待进一步深入研究, 本研究只针对应力时效对合金造成的性能强化进行讨论。时效过程中, 外加应力并不会改变合金的晶粒尺寸和形貌^[20], 因此, 造成 2E12 铝合金强化的因素主要来自第二相的大小及其体积分数。在应力的作用下, 溶质原子沿应力方向的扩散速率较其他方向快, 因此, 在多晶的合金中, 当某个晶粒中的沉淀相析出方向与外加应力方向接近或一致时, 就会形成细长的棒状 S 相, 如图 3(e)所示。同时, 在长时间的应力作用下, 合金发生类似蠕变的缓慢塑性变形, 会产生大量的细小位错。这些位错为 S 相的非均匀形核提供了有利位置, 从而促进了 S 相的析出。对比图 3 可看出, 施加应力后, 晶内由 S'相转变而来的 S 相不仅细长, 而且体积分数较高。根据金属强化理论, 第二相越弥散, 体积分数越高, 合金的强度也越高。

晶界的形态和微观结构对材料的性能也有较大的影响, 特别是铝合金经时效热处理后经常会在晶界附

近形成一个无脱溶物区域(PFZ), 这种无沉淀带结构屈服强度较低, 塑性变形容易集中在无沉淀带内, 引起晶间断裂。高温时效产生 PFZ 的原因可以用贫溶质机制进行解释, 这种机制认为晶界处脱溶较快, 较早地析出脱溶相, 因而吸收了附近的溶质原子, 使周围基体溶质贫乏而无法析出脱溶相, 造成无沉淀带, 并且无沉淀带中部晶界上存在粗大的脱溶相且连续分布, 因此, 人们通过采取一定的措施努力减小无沉淀带的宽度, 降低其不利影响。在本研究中, 无应力时效时, 合金晶界与晶内的能量差大, S 相形核驱动力大, 故在晶界易形成尺寸较大且连续分布的析出相, 同时无沉淀析出带也较宽(见图 4(a))。而应力时效类似于恒应力作用下的蠕变过程, 在长时间的应力作用下, 会产生大量的位错, 位错促进过饱和固溶体溶解并为 S 相的非均匀形核提供了有利位置, 促进 S 相的析出, 即通过应力时效引入大量位错后, 晶界与晶内的能量差降低, 沉淀相在晶内和晶界处的析出动力相对均匀。因此, 晶界无沉淀析出带的宽度相应变窄, 且晶界沉淀相也呈现不连续分布形态, 尤其是晶界处的析出相由链状分布变为断续分布后, 对合金的抗晶间腐蚀能力也是有利的。

4 结论

- 1) 应力时效可提高 2E12 铝合金的强度, 使板材性能的各向异性增大。
- 2) 应力通过改变晶体各个方向的扩散系数, 使 S 相产生明显的应力位向效应。
- 3) 应力时效引入大量的位错, 为 S 相形核提供了有力位置, 而 S 相体积分数的增大, 同时也降低晶界与晶内的能量差, 使无沉淀析出带变窄, 晶界沉淀相变为不连续析出。

REFERENCES

- [1] GOLDEN P J, GRANDT A F, BRAY G H. A comparison of fatigue crack formation at holes in 2024-T3 and 2524-T3 aluminum alloy specimens[J]. International Journal of Fatigue, 1999, 21(1): S211-S219.
- [2] CASSADA W, LIU J, TALRY J. Aluminum alloys for aircraft structure[J]. Advanced Materials & Processes, 2002, 160(12): 27-29.
- [3] LIU Yan-bin, LIU Zhi-yi, LI Yun-tao, XIA Qing-kun, ZHOU Jie. Enhanced fatigue crack propagation resistance of an Al-Cu-Mg alloy by artificial aging[J]. Materials Science and Engineering A,

- 2008, 492(1/2): 333–336.
- [4] 陈文. 先进铝合金在 A380 上的应用[J]. 航空维修与工程, 2005(2): 40–41.
CHEN Wen. Application of advanced aluminum alloys in A380 structures[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2005(2): 40–41.
- [5] 王俊飙, 刘中凯, 张贤杰. 大型机翼整体壁板时效成形技术[J]. 航空学报, 2008, 29(3): 728–733.
WANG Jun-biao, LIU Zhong-kai, ZHANG Xian-jie. Aging forming of large scale integral aircraft wing panel[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2008, 29(3): 728–733.
- [6] ZHAN Li-hua, LIN Jian-guo, DEAN T A. A review of the development of creep age forming: Experimentation, modelling and applications[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2011, 51: 1–17.
- [7] HOSFORD W F, AGRAWAL S P. Effect of stress aging on the precipitation of θ' in the Al-4wt pct Cu[J]. Metallurgical Transaction A, 1975, 6: 487–491.
- [8] ETO T, STAO A, MORI T. Stress-oriented precipitation of G.P zones and theta prime in an Al-Cu alloy[J]. Acta Metallurgical, 1978, 26: 499–508.
- [9] ZHU A W, STARKE Jr E A. Stress aging of Al-xCu alloys: Experiments[J]. Acta Materialia, 2001, 49: 2285–2295.
- [10] 陈大钦, 郑子樵, 李世晨, 陈志国, 刘祖耀. 外加应力对 Al-Cu 及 Al-Cu-Mg-Ag 合金析出相生长的影响[J]. 金属学报, 2004, 40(8): 799–804.
CHEN Da-qin, ZHENG Zi-qiao, LI Shi-chen, CHEN Zhi-guo, LIU Zu-yao. Effect of external stress on the growth of precipitate in Al-Cu and Al-Cu-Mg-Ag alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2004, 40(8): 799–804.
- [11] 李海, 王芝秀, 魏修宇, 郑子樵. 固溶处理时间对 2E12 铝合金组织和疲劳性能的影响[J]. 航空学报, 2009, 30(1): 148–152.
LI Hai, WAGN Zhi-xiu, WEI Xiu-yu, ZHENG Zi-qiao. Effect of solution treatment time on microstructures and fatigue properties of aluminum alloy 2E12[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2009, 30(1): 148–152.
- [12] 刘志义, 周杰, 刘延斌, 李云涛, 段水亮, 柏松, 邓才智. 高温短时人工时效对 2524 合金疲劳性能的影响[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2009, 40(1): 112–116.
LIU Zhi-yi, ZHOU Jie, LIU Yan-bin, LI Yun-tao, DUAN Shui-liang, BAI Song, DENG Cai-zhi. Effect of artificial ageing on fatigue behavior of 2524 aluminum alloy[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2009, 40(1): 112–116.
- [13] 杨胜, 易丹青, 姚素娟, 钟利. 热处理对 2E12 铝合金耐腐蚀性及力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2007, 32(9): 9–13.
YANG Sheng, YI Dan-qing, YAO Su-juan, ZHONG Li. Effect of heat treatment on corrosion resistance and mechanical properties of 2E12 aluminum alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2007, 32(9): 9–13.
- [14] 李智燕, 易丹青, 周明哲. 电场时效对 2E12 铝合金力学性能和微观组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(8): 1392–1397.
LI Zhi-yan, YI Dan-qing, ZHOU Ming-zhe. Effect of electric field aging on mechanical properties and microstructures of 2E12 aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(8): 1392–1397.
- [15] 周明哲, 易丹青, 尹德燕, 洪天然, 黄道远. 电场对 2E12 铝合金中 S 相析出动力学的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(7): 1290–1295.
ZHOU Ming-zhe, YI Dan-qing, YIN De-yan, HONG Tian-ran, HUANG Dao-yuan. Effect of electric field on kinetics of formation of S phase in 2E12 aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(7): 1290–1295.
- [16] WANG S C, STARINK M J. Precipitates and intermetallic phase in precipitation hardening Al-Cu-Mg-(Li) based alloys[J]. Int Mater Rev, 2005, 50: 193–215.
- [17] 李剑, 郑子樵, 陈大钦, 李世晨, 殷顺高, 刘祖耀. Al-Cu 合金应力时效动力学研究[J]. 稀有金属, 2005, 29(4): 539–543.
LI Jian, ZHENG Zi-qiao, CHEN Da-qin, LI Shi-chen, YIN Shun-gao, LIU Zu-yao. Kinetic study on stress aging of Al-Cu alloy[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2005, 29(3): 539–543.
- [18] ZHU A W, STARKE E A Jr. Stress aging of Al-Cu alloys: Computer modeling[J]. Acta Materialia, 2001, 49(15): 3063–3069.
- [19] HARGARTER H, LYTTLE M T, STARKE E A. Effects of preferentially aligned precipitates on plastic anisotropy in Al-Cu-Mg-Ag and Al-Cu alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 1998, 257(1): 87–99.
- [20] 曹素芳, 潘清林, 刘晓艳, 陆智伦, 何运斌, 李文斌. 外加应力对 Al-Cu-Mg-Ag 合金时效析出行为的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 10(8): 1513–1519.
CAO Su-fang, PAN Qing-lin, LIU Xiao-yan, LU Zhi-lun, HE Yun-bin, LI Wen-bin. Effect of external stress on aging precipitation behavior of Al-Cu-Mg-Ag alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 10(8): 1513–1519.

(编辑 李艳红)