

# 2195 铝锂合金的各向异性研究

Study on the Anisotropy of 2195 Al-Li Alloy

李红英, 欧 玲, 郑子樵

(中南大学 有色金属材料科学与

工程教育部重点实验室, 长沙 410083)

LI Hongying, OU Ling, ZHENG Zi-qiao

(The Key Laboratory of Nonferrous Metal Materials

Science and Engineering of Ministry of Education,

Central South University, Changsha 410083, China)

摘要: 通过拉伸力学性能测试和断口形貌分析, 研究了 2195 铝锂合金冷轧薄板的各向异性随时效时间变化的规律。结果发现: 在 150℃时效条件下, 峰值时效前, 随时效时间的增加, 合金的各向异性程度逐渐下降, 过时效时合金的各向异性比峰值时效时有所增加; 延伸率各向异性大于强度各向异性。150℃/24h 时效时, 与轧向成 0°和 45°方向试样的断裂机理不同, 存在断裂方式的各向异性。最后对该合金各向异性的主要形成机理进行了初步探讨。

关键词: 2195 铝锂合金; 时效; 力学性能; 各向异性

中图分类号: TG146 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2005)10-0031-04

**Abstract:** The anisotropy during aging treatment for 2195 Al-Li alloy cold-rolling sheet is studied through tensile mechanical properties and electron fractography. The results show that, before peak-aged, the anisotropy of this alloy reduce with the increase of aging time. When the alloy is over aged, the anisotropy of the alloy increase; the anisotropy of ductility is more serious than that of strength. The fracture mechanisms between the specimens at 0°and 45°to the rolling direction are different when the alloy is aged at 150℃for 24h. The main factors to cause anisotropy are discussed at last.

**Key words:** 2195 Al-Li alloy; aging treatment; mechanical property; anisotropy

铝锂合金具有低密度、高弹性模量、高比强度和高比刚度的性能, 在航空航天领域具有广阔的应用前景。但该合金在未再结晶状态下, 其力学性能具有明显的各向异性, 已成为制约其推广应用的主要障碍之一<sup>[1-3]</sup>。近年来, 有关铝锂合金显微组织、热处理工艺和力学性能各向异性之间关系的问题, 倍受研究工作者的关注。本工作着重研究了时效时间对 2195 铝锂合金冷轧薄板力学性能各向异性的影响, 并从晶粒形态和断口形貌等对该合金各向异性的形成原因进行了初步讨论。

## 1 实验方法

实验所用材料为国内生产的 4mm 厚的 2195 热轧板材, 经 414℃/2h 中间退火, 冷轧至 2mm 厚。500℃固溶 30min, 水淬, 在与板材轧向分别成 0°(纵向), 30°, 45°, 60°和 90°(横向) 上截取试样 (85mm × 16mm), 然后进行形变热处理(T8), 工艺为: 6% 轧制预变形+ 150℃/8, 16, 24(峰时效), 32h。固溶和人工

时效处理分别在盐浴炉和干燥箱中进行。将试样加工成标准拉伸试样, 在 CSS-44100 电子万能材料试验机上进行拉伸实验, 拉伸速度为 2mm/min。金相组织观察在 Ployvar-Met 金相显微镜下进行。断口形貌分析采用 KYKY-2800 扫描电镜, 加速电压为 20kV。

## 2 实验结果

### 2.1 力学性能

表 1 列出了不同时效时间下 5 个取样方向测得的力学性能, 其中力学性能的平面各向异性指标 IPA 值由公式(1)得出:

$$IPA = \frac{2X_{\max} - X_{\text{mid1}} - X_{\text{mid2}} - X_{\text{mid3}} - X_{\min}}{4X_{\max}} \times 100\% \tag{1}$$

式中,  $X$  代表力学性能指标, 即  $\sigma_b$ ,  $\sigma_{0.2}$ ,  $\delta$ 。由 IPA 值可以看出, 合金的延伸率各向异性明显大于强度各向异性。时效 8h 时,  $\sigma_b$ ,  $\sigma_{0.2}$ ,  $\delta$  的 IPA 值都比较大, 说明合金在该状态下存在明显的各向异性。时效 16h 和

24h 时,合金的强度各向异性较小,而延伸率各向异性仍较为严重。峰值时效前,随时效时间的增加,  $\sigma_b$ ,  $\sigma_{0.2}$ ,  $\delta$  的 IPA 值都呈下降的趋势,即其各向异性随时效时间的延长而逐渐下降。比较 8, 16, 24h 还可发现,合金的各向异性减小的幅度随时效时间的延长而减小。时效 32h(过时效)状态下,除  $\sigma_b$  的 IPA 值有所降低外,  $\sigma_{0.2}$ ,  $\delta$  的 IPA 值都比峰值时效时增大了。总体而言,过时效状态合金的各向异性比峰值时效状态有所增加。

图 1 为 150℃时效时力学性能随取样方向和时效时间的变化曲线。由图 1 可见,合金的抗拉强度和屈

服强度变化规律差不多。峰值时效(24h)前,随时效时间的增加,合金在各个方向的  $\sigma_b$  和  $\sigma_{0.2}$  均明显提高。比较不同取样方向的强度可发现,纵向( $0^\circ$ )和横向( $90^\circ$ )的强度最高,且两者差异较小。 $45^\circ$  方向强度最低,  $30^\circ$  和  $60^\circ$  方向强度居中。延伸率的变化规律是:峰值时效(24h)前,随时效时间的增加,延伸率逐渐下降。时效 32h(过时效)时,  $0^\circ$  和  $90^\circ$  方向延伸率比峰值时效时下降,而  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  和  $60^\circ$  方向延伸率和峰值时效时差不多。比较各个取样方向的延伸率,与强度值相对应,  $45^\circ$  方向试样的延伸率最高,  $30^\circ$  和  $60^\circ$  方向居中,横向和纵向最低。

表 1 试样的拉伸力学性能  
Table 1 Mechanical property of tensile specimens

Orientation	Mechanical property											
	8h			16h			24h			32h		
	$\sigma_b$ / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	$\delta$ / %	$\sigma_b$ / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	$\delta$ / %	$\sigma_b$ / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	$\delta$ / %	$\sigma_b$ / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	$\delta$ / %
$0^\circ$	458.3	380.1	16	479.8	420.1	11.9	542.6	508.1	10.1	524.6	496.6	8.6
$30^\circ$	414.1	322.7	18.5	458	397.1	15.5	532.7	497.2	11.6	513.9	483	11.9
$45^\circ$	404.4	311.8	19	447.7	402.3	16.9	518	486	13.1	506.7	475.4	13.1
$60^\circ$	410.1	357.4	17.8	467.7	422.6	16.3	519.6	492.2	12.8	503.8	476.8	12.5
$90^\circ$	446.2	380.5	15.6	475.1	420.5	12.2	537.3	508.9	10	523.5	500.8	8.7
IPA / %	8.6	9.9	23.8	3.6	2.7	17.3	2.9	2.5	15	2.4	3.6	20

2.2 金相组织与断口形貌

图 2 为 150℃/24h 时效态试样的三维显微组织,观察到晶粒沿轧制方向被拉长的条状组织。在轧制平面内,大小晶粒并存,为普遍的流线组织,其内有少量的细小再结晶晶粒,其余均为未再结晶的拉长晶粒,晶粒的空间形貌为薄饼状。

图 3 和图 4 分别为 150℃/24h(峰值时效)时效态  $0^\circ$  方向和  $45^\circ$  方向试样拉伸断口的 SEM 照片。图 3a 低倍下断口形貌呈沿晶分层断裂,裂纹较浅,并有少量韧窝出现,图 3b 可见典型的沿晶分层断裂特征,因此该试样以沿晶分层断裂为主。图 4 断口呈典型的韧性断裂特征,低倍可见许多细小等轴韧窝,韧窝比图 3 更多、更深,可见是按微孔聚集型剪切断裂机制断裂。综上所述,与轧向成  $0^\circ$  和  $45^\circ$  方向试样的断裂机理不同,即合金存在断裂方式的各向异性。

3 讨论

影响各向异性的因素很多,主要有以下三方面:一是存在织构;二是存在伸长的晶粒形状;三是第二相颗

粒的各向异性分布<sup>[4]</sup>。

已有研究表明<sup>[5]</sup>,多晶材料的屈服强度各向异性与晶粒形状有关。由图 2 可知,材料的晶粒为扁平状的非再结晶晶粒,沿轧制方向拉长。与轧向成不同角度的各个方向的晶界密度不同,从而各个方向的强化作用不同,拉伸时必然导致材料宏观力学性能的各向异性。此外,铝锂合金往往具有较高的沿晶断裂倾向,由于各位向晶界密度不同,沿晶断裂所占比例、所起作用不同,引起断裂方式的各向异性。

本工作研究了不同的时效时间下合金的各向异性状况。时效工艺对织构的影响较小<sup>[6]</sup>,合金在时效过程中合金强度及其各向异性的变化主要取决于沉淀相的析出。

2195 合金在时效过程中,随时效时间的增加,显微组织和结构会发生变化。已有研究得出:时效早期,  $T_1$  相与  $\theta'$  相一起为针状。峰值时效,主要析出  $T_1$  相,  $T_1$  相不仅沿晶界析出,而且在晶内有析出。此外,还有少量的  $\theta'$  相,但  $\theta'$  相的数量很少。过时效时,析出相都进一步粗化,分布密度有所降低。由于  $\theta'$  相的析出量很少,其强化效果小于  $T_1$  相,且  $T_1$  相是 T8 状态下

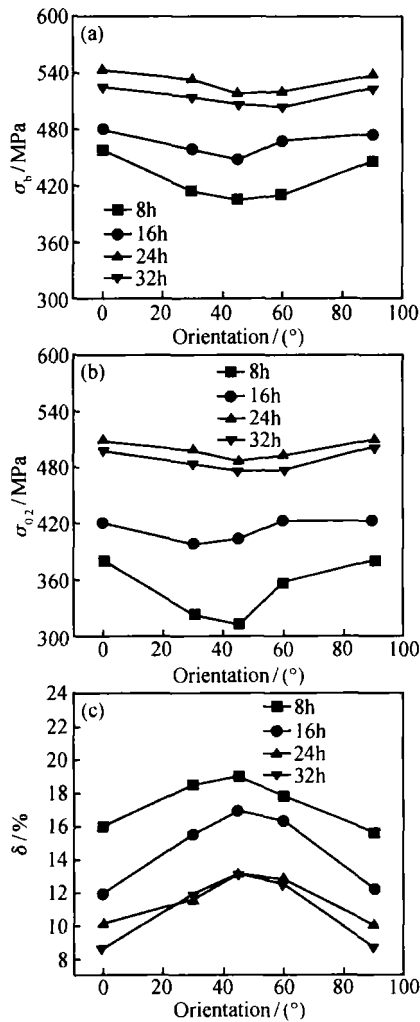


图 1 力学性能随取样方向和时效时间的变化曲线  
(a) 抗拉强度; (b) 屈服强度; (c) 延伸率  
Fig. 1 Mechanical properties curves of the alloy with sampling direction of different aging time  
(a) tensile strength; (b) yield strength; (c) elongation

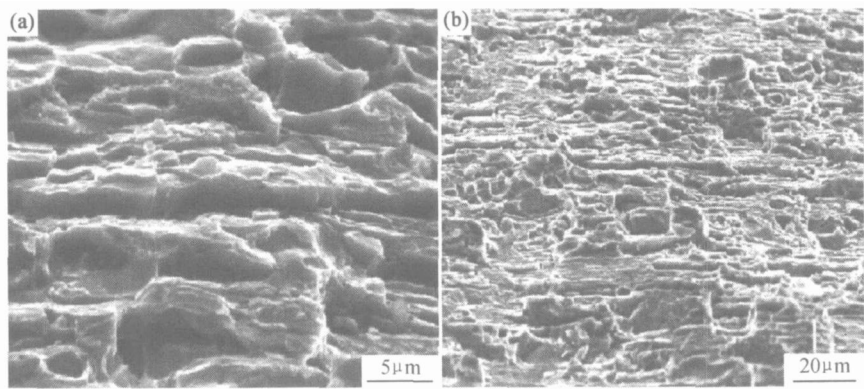


图 3 150℃/24h 时效条件下与轧向成 0° 方向试样的扫描断口照片 (图中水平方向为轧向)  
Fig. 3 Fractograph of alloy at 0° to the rolling direction aged at 150℃ for 24h  
(rolling orientation is horizontal direction in the graph)

4 结论

(1) 峰值时效前, 随时效时间的延长, 2195 铝锂合

金力学性能的各向异性程度逐渐下降, 过时效合金的各向异性有所增加; 延伸率各向异性大于强度各向异性。

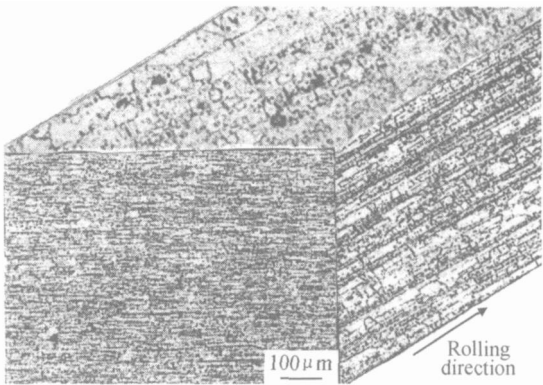


图 2 2195 铝锂合金板材 150℃/24h 时效态的显微组织  
Fig. 2 Optical microstructures of 2195 Al-Li alloy aged at 150℃ for 24h

该合金的主要强化相, 故主要考虑  $T_1$  相的影响。相关文献表明<sup>[7]</sup>,  $T_1$  相的分布特点会影响铝锂合金的各向异性。  $T_1$  相与基体存在如下惯析关系:

$$(0001)_{T_1} \parallel (111)_{Al}, [1010]_{T_1} \parallel [111]_{Al}$$

惯析面为  $(111)_{Al}$ , 形状为盘状或片状。  $T_1$  相强化作用公式为:

$$\tau_{T_1} = \left( \frac{4\gamma_i n_s b}{\Gamma} \right)^{1/2}$$

其中:  $\Gamma$  为位错线张力;  $b$  为柏氏矢量的模,  $\gamma_i$  为位错剪切  $T_1$  相产生新界面的界面能;  $n_s$  为滑移面单位面积上  $T_1$  相颗粒数。  $\gamma_i, b, \Gamma$  与位向无关, 因而  $n_s$  造成了  $T_1$  相强化作用各向异性。合金热轧时存在变形组织, 晶体具有取向性, 预轧时形成的位错在  $T_1$  相  $\{111\}$  四个惯析面上的密度不同, 导致  $T_1$  相形核不均匀, 从而时效时  $T_1$  相在每个惯析面上析出的数量不同。可见,  $T_1$  相的强化贡献在不同取向上存在较大差异, 其析出的大小、数量和分布的变化可能是导致本实验中随时效时间增加合金力学性能各向异性变化的原因。

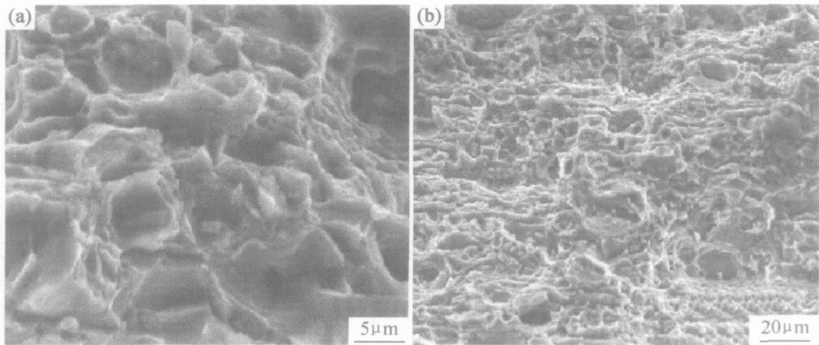


图 4 150℃/24h 时效条件下与轧向成 45° 方向试样的扫描断口照片(图中水平方向为轧向)  
Fig. 4 Fractograph of alloy at 45° to the rolling direction aged at 150℃ for 24h  
(rolling orientation is horizontal direction in the graph)

(2) 平面各向异性的表现规律为: 纵向(0°)和横向(90°)的强度最高, 且两者差异较小。45° 方向强度最低, 30° 和 60° 方向强度居中。与之相对应, 45° 方向试样的延伸率最高, 30° 和 60° 方向居中, 横向和纵向最低。

(3) 150℃/24h 时效时, 与轧向成 0° 和 45° 方向试样的断裂机理不同, 即存在断裂方式的各向异性。

参考文献

[1] HOPKINS A K, JATA K V, RJOJA R J. Isotropic wrought aluminum lithium plate development technology[J]. Mater Sci Forum, 1996, (217- 222): 421- 426.

[2] JATA K V, HOPKINS A K, RJOJA R J. The anisotropy and texture of Al-Li alloys[J]. Mater Sci Forum, 1996, (217- 222): 647- 654.

[3] 孟亮, 郑修麟. 铝锂合金力学性能的各向异性[J]. 有色金属, 1996, 4(48): 82- 88.

[4] RJOJA R J. Fabrication methods to manufacture isotropic Al-Li alloys and products for space and aerospace applications[J]. Mat Sci Eng A, 1998, 257: 100- 107.

[5] CHO K K, CHUNG Y H. Effects of grain shape and texture on the yield strength anisotropy of Al-Li alloy sheet[J]. Scripta Mater, 1996, (40): 651- 657.

[6] VASUDEVAN A K, PRZYSTUPA M A, FRICKE W G. Effect of composition on crystallographic texture in hot rolled Al-Li-Cu alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 1996, 208(2): 172- 180.

[7] KIM NACK J, LEE EUI W. Effect of precipitate on the anisotropy of Al-Li alloy 2090[J]. ACTA Metall Mater, 1993, 41(3): 941 - 948.

收稿日期: 2004-10-18; 修订日期: 2005-03-08  
作者简介: 李红英(1963-), 女, 教授, 博士, 主要从事材料的强韧化研究, 联系地址: 湖南省长沙市中南大学材料科学与工程学院(410083)。

(上接第 8 页)

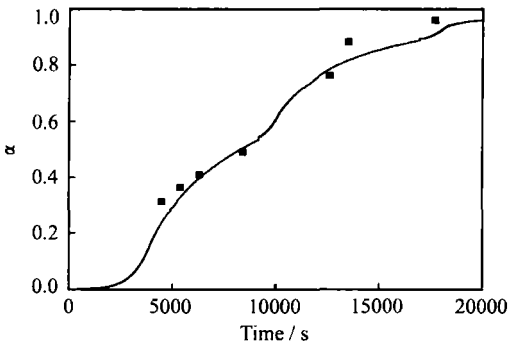


图 2 固化度曲线与样品实测固化度的比较  
Fig 2 Comparison of predictions by the dynamic cure kinetic equation with the experimental results

$$d\alpha/dt = 234000\exp(-76290/RT) \alpha^{-0.437} (1-\alpha)^{1.051}$$

(2) 验证结果表明, 5428 双马树脂体系的动态固化反应动力学方程能反映体系实际固化反应历程。

参考文献

[1] GOODWIN A A. The curing kinetics of a modified bismaleimide[J]. Polymer International, 1993, 32: 87- 92

[2] FREDDY Y C, BOEY X L. Modeling the curing kinetics for a modified bismaleimide resin[J]. Journal of Polymer Science: Part A: Polymer Chemistry, 2000, 38: 907- 913

[3] KISSINGER H E. Reaction kinetics in differential thermal analysis[J]. Analytical Chemistry, 1957, 29(11): 1702- 1706

收稿日期: 2004-02-12; 修订日期: 2005-03-10  
作者简介: 刘天舒(1969-), 男, 工程师, 博士研究生, 现从事树脂基复合材料方面的研究, 联系地址: 北京市 81 信箱 12 分箱(100095)。