

LY12 铝合金的再结晶组织及晶界特征分布*

武保林 王轶农 王刚 赵骧 左良 梁志德
(沈阳航空工业学院) (东北大学)

摘 要 利用 X 射线定量结构分析技术和背散射电子衍射花样术,研究了冷轧 LY12 铝合金的再结晶组织及重位 (CSL) 晶界的分布. 结果表明, 高温退火样品的再结晶组织与冷轧样品的组织相似; 预回复低温退火具有增强再结晶立方 $\{001\}\langle 100\rangle$ 组织和降低退火 $S\{123\}\langle 634\rangle$ 、 $C\{112\}\langle 111\rangle$ 及 $B\{110\}\langle 112\rangle$ 组织组分的作用; 高强度的再结晶立方组织和一定强度的 S 组织共存的样品, $\Sigma 7$ 重位晶界具有较高的出现频度.

关键词 LY12 铝合金 再结晶 组织 晶界特征分布

分类号 TG146

文章编号 1005-3093(2000)06-0634-05

STUDIES ON RECRYSTALLIZATION TEXTURES AND GRAIN BOUNDARY CHARACTER DISTRIBUTION IN LY12 ALUMINUM ALLOY

WU Baolin**

(*Dep. of Materials Engineering, Shenyang Institute of Aeronautical Engineering,
Shenyang 110034*)

WANG Yinong WANG Gang ZHAO Xiang ZUO Liang LIANG Zhide
(*Northeastern University*)

ABSTRACT The evolution of recrystallization textures and the CSL grain boundary character distribution in LY12 alloy annealed at different temperatures for different time have been studied by means of ODF analysis and EBSP (electron back scattering pattern) technique. The results showed that the character of recrystallization texture in the sample annealed at higher temperature is similar to the cold rolling texture. There exists the recrystallization cube texture with high orientation intensity in the sample recovered and then annealed at lower temperature, and the $\Sigma 7$ grain boundary occurs with high frequency which corresponds to the sharp cube texture component and S texture component.

KEY WORDS LY12 alloy, recrystallization, texture, GBCD

* 国家自然科学基金资助项目 5974035 及航空部基础科学基金资助项目 98G54011.

2000年2月28日收到初稿; 2000年7月27日收到修改稿.

本文联系人: 武保林, 沈阳市 110034, 沈阳航空工业学院材料工程系

** To whom correspondence should be addressed

Watanabe^[1] 基于重位晶界模型, 提出一个与多晶材料晶界相关的新显微结构参量, 即晶界特征分布 (Grain Boundary Character Distribution, 简称 GBCD), 同时提出了“晶界设计”的概念. 研究表明^[2], GBCD 与材料的织构类型和锐度密切关联. 对于大多数金属及合金, 冷轧织构对 GBCD 无实际意义, 因此, 利用再结晶织构调控 GBCD 是晶界设计的有效途径之一. 晶界设计在解决材料晶间脆性断裂方面已取得了一些成功^[3,4]. 本文研究在不同退火条件下 LY12 铝合金的再结晶织构特征及再结晶织构与重位晶界特征分布之间的关系, 以期为提高该合金的性能提供依据.

1 实验方法

实验材料为 8mm 厚的热轧态 LY12 铝合金板. 热轧板经 350 °C ×120min 初始化退火后, 进行 90% 冷轧变形. 采用到温入炉的方式将形变后的样品在 500 °C 高温退火 10min, 在 380 °C 中温退火 60min, 在 180 °C 预回复低温退火 120min, 再在 320 °C 处理 60min.

在 D_{\max} -3A 型 X 射线衍射仪上测定织构. 按 Schulz 背反射法扫描 {111}, {200} 和 {220} 三张不完整极图 ($\chi_f=70^\circ$). 利用“二步法”^[5] 计算 ODF ($l_{\max}=16$), 结果以一组恒 ϕ_2 截面图表示 (Bunge 符合系统). 借助于背散射电子衍射花样技术, 分别对高温退火和预回复低温退火的 LY12 铝合金样品进行了 EBSP 取向分析. 测试时采用自动方式进行, 选区范围为 0.7mm×0.8mm, 测试步长为 10 μ m, 测试点数为 5600 个. 在该扫描范围内大约有 500~600 个晶粒, 因此, 测试结果在宏观上具有较为可靠的统计性. EBSP 测试系统通过对背散射电子衍射花样 (Kikuchi 线对) 的诠释, 逐点测定单个晶粒的取向.

若令 g_k 、 g_j 为两相邻晶粒的取向矩阵, 则差取向矩阵为 $\Delta g_{kj} = g_k g_j^{-1}$, 考虑到立方晶系的 24 各等效取向的关系, 按 Brandon 判据^[6] $\Delta\theta = 15^\circ/\sqrt{\sum}$, 确定 CSL 重位晶界类型, \sum 值最大取 25.

2 结果与讨论

2.1 LY12 铝合金的再结晶织构特征

由图 1a 可以看出, LY12 铝合金的冷轧织构具有典型的“铜型”织构特征, 即由 S{123}<634> (最大取向密度 $f(g)_{\max} = 6.2$)、C{112}<111> ($f(g)_{\max} = 5.4$)、B{110}<112> ($f(g)_{\max} = 5.2$) 和 G{011}<100> ($f(g)_{\max} = 4.3$) 组分组成, 还存在一定强度的立方 {001}<100> 织构组分 ($f(g)_{\max} = 3$). 此外, 取向在 B{011}<211>→G{011}<100>Cube{001}<100> 之间存在较大的漫散. 高温退火样品的再结晶织构特征与冷轧织构特征相比无明显差别 (图 1b), 只是各织构组分强度略有下降, 立方织构组分未见增强; 中温退火的样品, 冷轧织构组分强度降低较为明显, 同时再结晶立方织构的强度有所增加 ($f(g)_{\max} = 4$) (图 1c); 在预回复低温退火样品中出现了强度较高的再结晶立方织构 ($f(g)_{\max} = 5.3$), 同时冷轧织构组分 (S、C 和 B 织构) 的强度明显下降, 最高取向密度均为 3 级左右 (图 1d). 上述结果表明, 对于 LY12 铝合金, 预回复低温退火具有增强再结晶立方织构组分和降低冷轧织构组分强度的作用.

对于高温退火的样品, 由于退火温度较高, 加热速度相对较快, 再结晶驱动力 (即形变储能) 的释放速率亦较快, 因此再结晶形核率较高, 这样, 各种取向的晶核均有可能长大并发展成为再结晶晶粒^[7]. 在此情况下, 再结晶织构的形成机制主要以定向形核为主, 导致最终的再结晶织构与冷轧织构具有相似的特征 (图 1a 与图 1b).

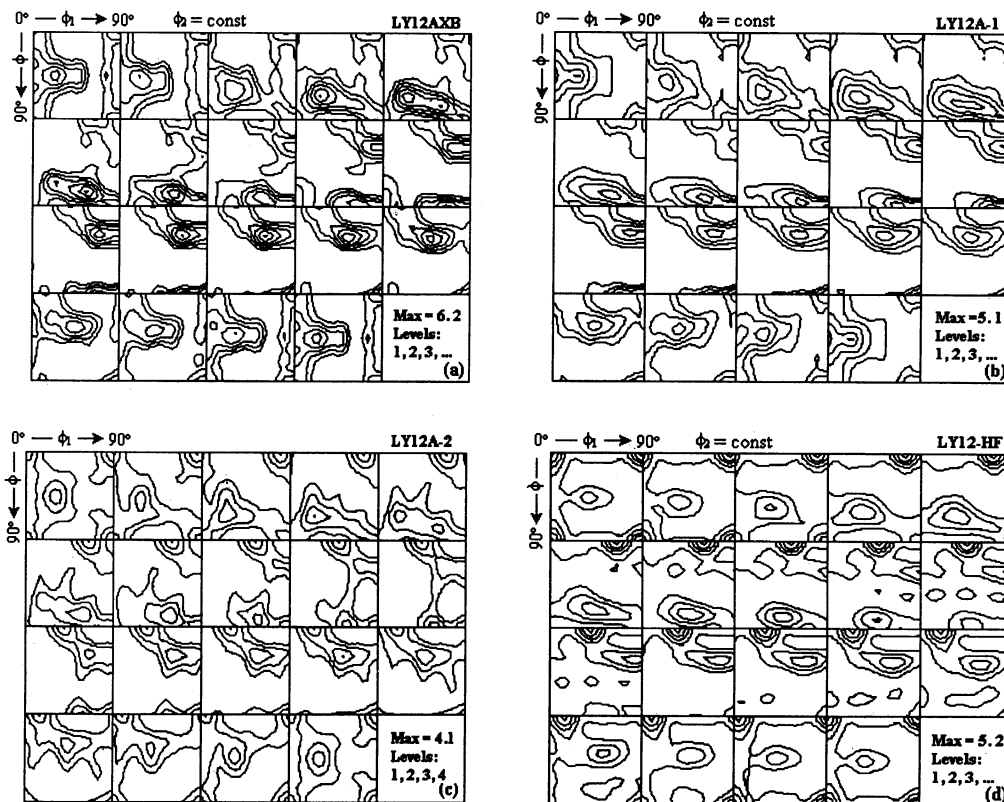


图 1 LY12 铝合金冷轧 (a)、高温退火 (b)、中温退火 (c) 和预回复低温退火 (d) 后的冷轧及再结晶组织的 ODF 恒 ϕ_2 ($\Delta\phi_2 = 5^\circ$) 截面图

Fig.1 The constant ϕ_2 ($\Delta\phi_2 = 5^\circ$) sections of ODF of rolling and recrystallization textures (a) the cold-rolled sample; (b) the sample annealed at higher temperature; (c) the sample annealed at middle temperature (d) the sample recovered and then annealed at lower temperature

对于预回复低温退火的样品, 由于预回复阶段消耗了一部分形变储能, 使得低温退火时再结晶驱动力明显降低, 再结晶驱动力的释放速率也显著减小. 这时再结晶形核的阻力 (即晶界能) 将成为决定各种取向的晶胚能否发展成为再结晶晶核的主要因素. 由 Gibbs-Thomson 关系式 $R_c = 2\gamma/p_d$ 可知, 在再结晶驱动力 p_d 相同的条件下, 晶界能 γ 小, 临界晶核半径 R_c 也小, 就是说具有较低晶界能的晶胚形核时在能量上最具优势^[8]. 由图 1a 可知, 冷轧样品中存在一定强度的立方织构组分, 它们在微观上表现为立方取向的亚晶. 由于立方取向的亚晶与 S 取向的形变基体相邻时具有 $40^\circ \langle 111 \rangle$ 位向关系 (即 $\Sigma 7$ 重位晶界), 故立方取向的亚晶将以“微区择优生长”^[9] 的方式优先形核和长大, 并决定了最终的再结晶织构, 进而形成了较强的再结晶立方织构 (图 1d).

2.2 LY12 铝合金的重位晶界特征分布

由图 2 可见, 高温退火样品的 $\{111\}$ 极点在 $\{001\}\langle 100 \rangle$ 、 $\{123\}\langle 634 \rangle$ 及 $\{112\}\langle 111 \rangle$ 取向位置具有较高密度的分布, 预回复低温退火的样品的 $\{111\}$ 极点的分布与图 2a 的分布趋势相同, 但在 $\{001\}\langle 100 \rangle$ 取向点的分布更为集中, 表明该样品存在较强的 $\{001\}\langle 100 \rangle$ 织构. 可见, EBSP 测得的取向分布 (图 2) 与 X 射线衍射法测得取向分布 (图 1) 基本一致.

利用 EBSP 分析软件计算了相邻晶粒的取向差, 得到了上述两样品的重位晶界特征分布, 如图 3 所示. 可以看出, 预回复低温退火的样品 (图 3b) 比高温退火样品 (图 3a) 含有更高频度的 $\Sigma 7$ 晶界, 其它 CSL 晶界的出现频度前者也略高于后者. 显然, 这与预回复低温退火样品中存在较强的再结晶立方织构组分和一定强度的 S 织构组分有关. 立方织构和 S 织构的强度愈高, 立方取向的晶粒与 S 取向的晶粒相邻的几率也就愈大, 相应出现 $\Sigma 7$ 晶界的频度也就愈高.

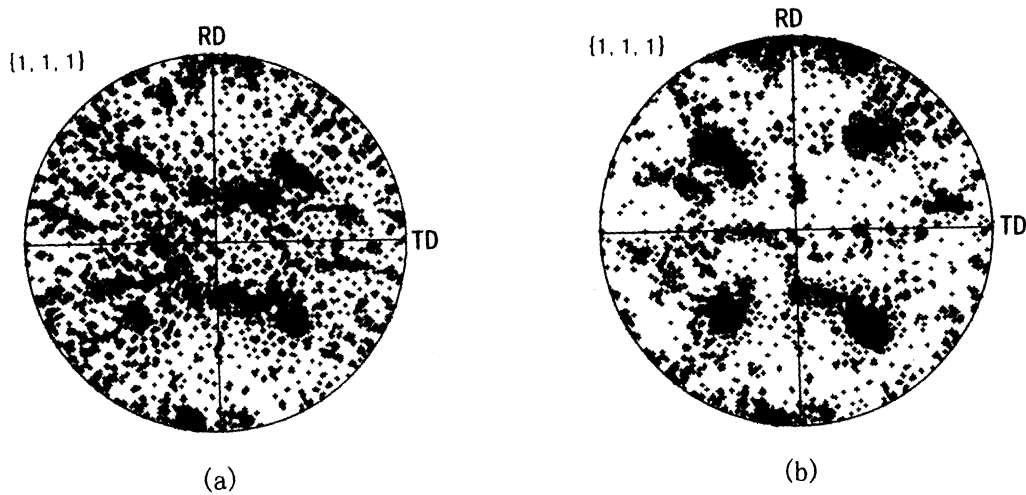


图 2 LY12 铝合金高温退火 (a) 和预回复低温退火 (b) 后的 EBSP $\{111\}$ 极图

Fig.2 EBSP $\{111\}$ pole figures of LY12 alloy samples (a) annealed at 500 °C for 30min; (b) recovered at 180 °C for 120min and then annealed at 320 °C for 60min

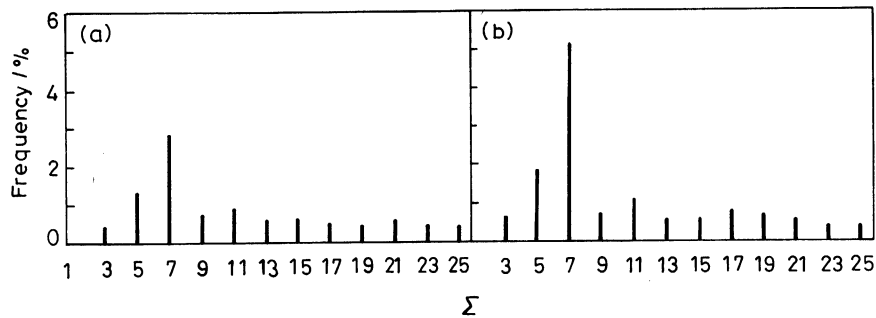


图 3 LY12 铝合金高温退火 (a) 和预回复低温退火 (b) 后的晶界特征分布

Fig.3 Frequencies of CSL grain boundaries in the LY12 alloy samples annealed at 500 °C for 30min(a); recovered at 180 °C for 120min and then annealed at 320 °C for 60min(b)

3 结 论

高温退火样品的再结晶织构特征与冷轧织构特征无明显差别; 预回复 + 低温退火样品中含有较高强度的再结晶立方织构; 中温退火的样品再结晶织构特征介于上述两样品之间. 在预回复低温退火的样品中 $\Sigma 7$ 重位晶界有较高的出现频度, 与高强度的再结晶立方织构和一定强度的 S 织构相对应.

参 考 文 献

- 1 T.Watanabe, Res.Mechanica, **11**, 47(1984)
- 2 L.Zuo, T.Watanabe, C.Esling, Z.Metallkde, **85**, 554(1994)
- 3 T.Watanabe, Mater.Sci.Forum, **126**, 295(1993)
- 4 K.T.Aust, U.Erb, G.Palumbo, Mater.Sci.Eng., **A176**, 329(1994)
- 5 梁志德, 徐家桢, 王 福, 织构材料的三维取向分析术— ODF 分析 (沈阳, 东北工学院出版社, 1986) p.108
- 6 D.G.Brandon, Acta Metall., **14**, 1479(1966)
- 7 武保林, 王沿东, 左 良, 梁志德, 材料研究学报, **12**, 42(1998)
- 8 H.E.Vatne, O.Daaland, E.Nes, in Proc. ICOTOM10, **1087**(1993)
- 9 B.J.Duggan, Acta Mater., **41**, 1929(1993)