

文章编号: 1004-0609(2006)08-1411-06

预先热处理对 6111 铝合金冷轧及再结晶组织的影响^①

陈 扬^{1,2}, 田 妮¹, 赵 刚¹, 刘春明¹, 左 良¹

(1. 东北大学 材料与冶金学院, 沈阳 110004;

2. 辽宁工学院 材料与化学工程学院, 锦州 121001)

摘 要: 采用取向分布函数(ODF)法研究了预先热处理对 6111 铝合金的冷轧和再结晶组织组态的影响。结果表明: 预先热处理因改变基体的成分和第二相的析出状态而显著影响 6111 铝合金的形变组织和再结晶组织; 热轧板不经预处理而直接冷轧, 其再结晶组织主要由绕法向旋转了 15° 的立方取向(Cube+ ND15)和{011}〈111〉取向构成; 冷轧前进行过时效处理, 其再结晶组织主要由绕法向旋转了 20° 的立方取向(Cube+ ND20)和{011}〈122〉取向构成; 冷轧前进行固溶处理会显著提高冷轧组织中 Brass 和 Goss 组分的取向密度, 再结晶组织明显弱化, 而且 Cube+ ND20 组分绕法方向(ND)产生很大的漫散, 接近于{001}〈UVW〉纤维组织。

关键词: 铝合金; 热处理; 冷轧; 再结晶; 组织

中图分类号: TG 166.3

文献标识码: A

Effect of pre-heat treatments on cold rolling and recrystallization textures in Al alloy 6111

CHEN Yang^{1,2}, TIAN Ni¹, ZHAO Gang¹,

LIU Chun-ming¹, ZUO Liang¹

(1. School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004, China;

2. School of Materials and Chemical Engineering

Liaoning Institute of Technology, Jinzhou 121001, China)

Abstract: The effects of pre-heat treatment on rolling and recrystallization textures were investigated by means of orientation distribute functions (ODFs). The results show that the pre-heat treatments have significant effects on both rolling texture and recrystallization texture. The recrystallization texture of sample hot rolled and then cold rolled consists of cube orientation rotated by 15° round normal direction (ND) and {011}〈111〉orientation. The recrystallization textures consist of cube orientation rotated by 20° round normal direction (ND) and {011}〈122〉orientation for samples overaged and then cold rolled. The orientation intensities of Brass and Goss components of cold rolling texture are raised remarkably for samples solution-treated, and the orientation intensity of the rotated cube orientation of recrystallization texture is obviously lowered. The rotated cube orientation is scattered round normal direction, closing to {001}〈UVW〉fibre texture.

Key words: Al alloy; heat treatment; cold rolling; recrystallization; texture

减轻自重以降低能耗、减少污染、提高效率已成为汽车发展的一个趋势, 这使得可时效强化的 6000 系铝合金作为汽车车身板用材近年来得到了

愈来愈广泛的应用和关注。经热轧和冷轧后, 为了使其具有良好的成型性和烤漆硬化能力, 板材通常在固溶处理状态下进行冲压成型, 而在随后的烤漆

① 基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2002AA331050); 教育部科学技术研究重大项目(0208); 国家教育部高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划资助项目

收稿日期: 2005-08-09; 修订日期: 2006-04-03

通讯作者: 赵 刚, 教授; 电话: 024-83681685; 传真: 024-83686455; E-mail: zhaog@mail.neu.edu.cn

过程中产生时效强化。固溶处理时所形成的再结晶组织对冲压成型性及表面质量起着至关重要的作用^[1~4], 因此控制固溶处理后的再结晶组织组态是 6000 系铝合金板材生产过程中的关键环节。在以往的研究工作中, 一些学者曾对 6000 系铝合金的铸态组织、再结晶组织的形成及在加工过程中组织的演变等进行了研究, 而关于如何控制其固溶处理后的再结晶组织组态方面的研究却鲜见报道。研究表明^[5~7], 第二相粒子的析出状态对铝合金的再结晶组织组态有明显的影响, 而 6000 系铝合金中 Mg_2Si 相的形态、数量及大小对热处理十分敏感, 这有可能成为调控固溶处理后再结晶组织组态的有效途径。为此, 本文作者研究冷轧前的预先热处理对形变组织及固溶处理后的再结晶组织组态的影响, 以期控制再结晶组织组态从而提高板材成型性及冲压件的表面质量奠定基础。

1 实验

实验所用材料是用 99.9% 的纯铝、电解铜、工业纯镁、工业纯铁以及 Al-9.5% Si、Al-9% Mn 等中间合金, 将材料按一定顺序放入电阻坩埚炉溶化, 在水冷铜模中浇铸成 220 mm × 120 mm × 30 mm 的铸锭, 其化学成分见表 1。

表 1 实验材料的化学成分

Table 1 Chemical composition of material tested (mass fraction, %)

Si	Mg	Cu	Mn	Fe
1.15	0.72	0.70	0.27	0.26
Zn	Cr	Ti	Al	
0.16	0.11	0.15	Bal.	

将铸锭进行 470 °C、5 h + 540 °C、16 h 的双级均匀化处理后, 切头铣面, 加热至 450 °C 并保温 1 h 后热轧, 将其厚度由 28 mm 轧至 4.6 mm, 终轧温度约为 200 °C。

为研究冷轧前的预先热处理对冷轧及再结晶组织的影响, 将热轧板进行如下 3 种不同的处理。

1) 不经热处理而直接进行 90% 的冷轧, 称为 1[#] 样品。

2) 先进行固溶处理 (550 °C 保温 30 min 后水淬) 及 380 °C、2 h 的过时效处理, 然后再进行形变量为 90% 的冷轧, 称为 2[#] 样品。

3) 进行固溶处理 (在 550 °C 保温 30 min 后水

淬), 然后再进行形变量为 90% 的冷轧, 称为 3[#] 样品。

最终将 3 种冷轧样品均在 550 °C 进行再结晶退火并水淬, 然后进行组织测定。

将待测样品轧面用金相砂纸磨光, 在 D/max-III A 型 X 射线衍射仪上测定其表面组织, 管电压为 35 kV, 管电流为 20 mA, 发散狭缝 DS: 2°, 并加 2 mm 限高光阑, 防散射狭缝 RS: 7 mm, 接收狭缝 SS: 7 mm。用 Schulz 背反射法测量 {111}、{200} 和 {220} 3 张不完整极图, 采用二步法计算 $l_{max} = 16$ 时的 ODF, 结果用 Bunge 符号系统的恒 φ 截面图表示。

2 结果与分析

2.1 冷轧组织

热轧板经 3 种不同处理再进行形变量为 90% 的冷轧后, 其冷轧组织均为典型的面心立方轧制组织, 主要由分布在 β 取向线上的组分构成。另外在 α 取向线上除 Brass 组分外还有一定程度的 Goss 组分。3 种样品 α 取向线组织组分的取向密度最大值 ($f(g)$) 及 β 取向线组织组分的取向密度最大值 ($f(g)$) 和 β 取向线在欧拉空间中的位置如图 1 所示。由图 1(a) 可见, 热轧板直接进行冷轧后 (即 1[#] 样品), 冷轧组织中 Goss 组分的取向密度较低, 而冷轧前经过时效处理 (2[#] 样品) 和固溶处理 (3[#] 样品), 则冷轧组织中 Goss 组分的取向密度较高。Goss 取向是一个亚稳定取向, 随变形程度的增加会沿 α 取向线逐渐流向 Brass 取向。1[#] 样品在热轧的后期由于形变温度低于再结晶温度而有一定程度的冷变形, 再加上随后的冷轧, 其实际冷变形量大于 2[#] 和 3[#] 样品的冷变形量, 较多的 Goss 取向转变为 Brass 取向, 因此其 Goss 组分的取向密度较低。另外, 2[#] 样品与 3[#] 样品的冷变形量完全相同, 但 3[#] 样品中 Goss 组分的取向密度明显高于 2[#] 样品, 这显然是由于 3[#] 样品冷轧前经固溶处理, 从而使 α (Al) 基体内合金元素含量较高的缘故。

由图 1(b) 可见, 1[#] 样品 (即热轧板直接进行 90% 的冷轧) 冷轧组织的最大取向密度在 Copper 处, 而 2[#] (即冷轧前进行退火处理) 和 3[#] 样品 (即冷轧前进行固溶处理) 冷轧组织的最大取向密度位置向 S 取向处偏移。1[#] 样品与 2[#] 样品间 β 取向线的主要差异是由实际冷变形量 (或冷轧前的原始组织) 不同所造成的。S 取向也是亚稳定的, 随着变形程度的增加, S 取向将沿 β 取向线逐渐向稳定的

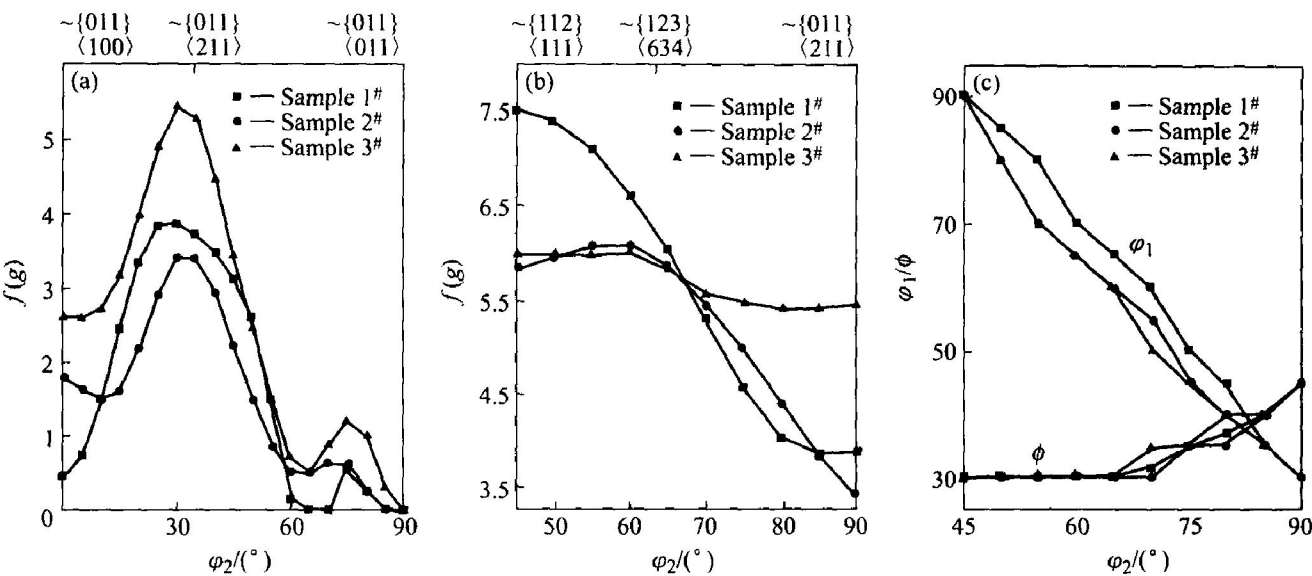


图 1 冷轧组织的取向线分析

Fig. 1 Skeleton lines of cold rolling textures

(a) — α fibre; (b) — β fibre; (c) —Positions in Euler space of β fibre

Copper 取向转变。所以, 如果变形量进一步增加, 2[#] 和 3[#] 样品冷轧组织中 S 组分将减弱而 Copper 组分将加强, 使最大取向密度位置向 Copper 取向处移动。此外由图 1(b) 还可看出 2[#] 和 3[#] 样品的 Copper 和 S 组分的取向密度值很接近, 但 3[#] 样品 Brass 组分的取向密度却明显更高, 使 β 取向线比较平坦。这同样是由于冷轧前的固溶处理使 α (Al) 基体内合金元素含量较高的缘故。分析与研究表明^[8], 随面心立方金属层错能的降低, 塑性变形中机械孪生的成分加大, 从而使形变组织中 Copper 组分的取向密度降低而 Brass 组分的取向密度增加。

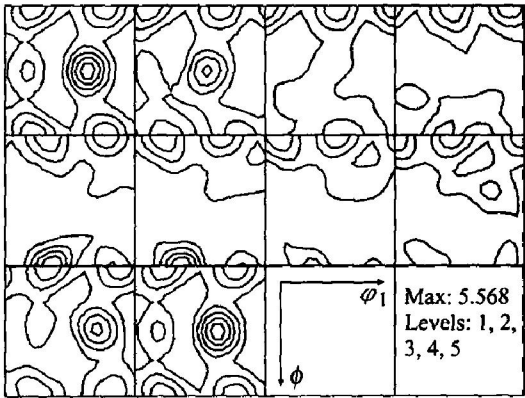


图 2 1[#] 样品再结晶后的 ODF 图

Fig. 2 ODFs of recrystallized sample 1[#]

2.2 热轧后直接冷轧样品的再结晶组织

图 2 所示为 1[#] 样品经 550 ℃、5 min 再结晶退火后的 ODF 图。分析对比不同保温时间退火试样的 ODF 图得知, 在基本完成再结晶的情况下, 经不同保温时间退火样品的主要再结晶组织组分均相同, 再结晶组织主要由两种取向构成: 一种是绕法向(ND) 旋转约 15° 的立方取向, 在此记为 Cube+ ND15, 其在欧拉角空间中的位置为 $\varphi_1 = 15^\circ$ 、 $\varphi_2 = 0^\circ$ 、 $\varphi_3 = 0^\circ$; 另一种则为 {011} <111> 取向, 其在欧拉角空间中的位置为 $\varphi_1 = 55^\circ$ 、 $\varphi_2 = 45^\circ$ 、 $\varphi_3 = 0^\circ$ 。

Cube+ ND15 取向的形成与再结晶时的粒子激发形核 (particle stimulated nucleation, 即 PSN) 密切相关, 并与主要轧制组织组分 (S 和 Copper 取向) 具有近似的 40° <111> 取向关系^[9]。

除 Cube+ ND15 外, 另一种主要再结晶组织组分是 {011} <111> 取向。该取向与以往所报道的其他铝合金再结晶组织中的 P 取向 {011} <122> ($\varphi_1 = 65^\circ$ 、 $\varphi_2 = 45^\circ$ 、 $\varphi_3 = 0^\circ$)^[10, 11] 很接近, 但二者间有两点主要不同之处: 首先 P 取向与主要形变组织组分间没有 <111> 型取向关系, 而本实验中出现的 {110} <111> 取向显然与形变组织中的 Copper 取向间有 <111> 型取向关系 (经计算, 为 33.3° <111> 关系), 接近于 40° <111> 取向关系, 这可能就是导致下一区别的主要原因; 其次是 P 取向只出现在较大冷轧形变量的条件下, 而在本实验中, 冷轧形变量在 10% ~ 90% 范围内的退火样品均出现了明显的 {011} <111> 取向。

2.3 过时效处理+ 冷轧样品的再结晶组织

图 3 所示为 2[#] 样品经 550 °C、2 min 再结晶退火后的 ODF 图。同样, 经不同保温时间退火样品的主要再结晶组织组分均相同。将图 3 与图 2 对比可发现二者极为相似, 但经仔细分析便可进一步发现二者间存在两点不同之处: 1) 图 2 中的 Cube+ ND15 组织组分的最大取向密度位于 $\varphi_1 = 15^\circ$ 、 $\varphi_2 = 0^\circ$ 、 $\varphi_3 = 0^\circ$ 处, 即绕法向旋转了 15° 的立方取向, 而图 3 中类似组织组分的最大取向密度位于 $\varphi_1 = 20^\circ$ 、 $\varphi_2 = 0^\circ$ 、 $\varphi_3 = 0^\circ$ 处, 即绕法向旋转了 20° 的立方取向, 在此记为 Cube+ ND20; 2) 图 2 中的 {011} <111> 组织组分的最大取向密度位于 $\varphi_1 = 55^\circ$ 、 $\varphi_2 = 45^\circ$ 、 $\varphi_3 = 0^\circ$ 处, 而图 3 中类似组织组分的最大取向密度则位于 $\varphi_1 = 65^\circ$ 、 $\varphi_2 = 45^\circ$ 、 $\varphi_3 = 0^\circ$ 处, 即该组织组分就是 P 取向。所以, 在冷轧前经固溶+ 过时效处理, 其主要再结晶组织组分为 Cube+ ND20 和 P (即 {011} <122>) 取向。

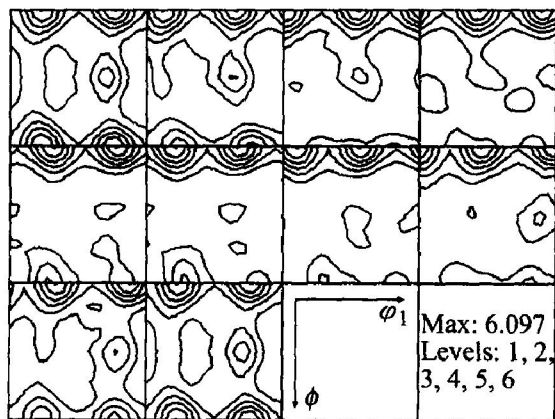


图 3 2[#] 样品再结晶后的 ODF 图

Fig. 3 ODFs of recrystallized sample 1[#]

此外, 由图 3 可知, 在完成再结晶之后, 2[#] 样品再结晶组织中 Cube+ ND20 组分的取向密度明显高于 P 组分的取向密度, 而在 1[#] 样品中则是与 P 组分很接近的 {011} <111> 组分的取向密度高于 Cube+ ND15 组分的取向密度。

2.4 固溶处理+ 冷轧样品的再结晶组织

将 3[#] 样品在 550 °C 进行再结晶退火, 经不同退火保温时间处理后的 ODF 图所显示的组织特征均相同, 而且最大取向密度值也非常相近 (最高为 2.325, 最低为 2.170)。图 4 所示为 3[#] 样品经 550 °C、5 min 再结晶退火后的 ODF 图。与 1[#] 和 2[#] 样品相比, 其再结晶组织组分的取向密度明显低得多, 最大值仅为 2.325, 表明随机组分占很大比例。但由图 4 仍可看出, 再结晶组织中具有较为明显的

Cube+ ND20 组分, 但其绕法向的漫散程度很大, 接近于 {001} <U V W> 纤维组织。目前, 关于组织组态对铝合金板材成型性和表面质量的影响方面的报道所见不多, 尚需做更多的研究, 但可以肯定的是, 3[#] 样品的组织组态将有利于消除或降低由组织造成的板材塑性各向异性^[12-14]。

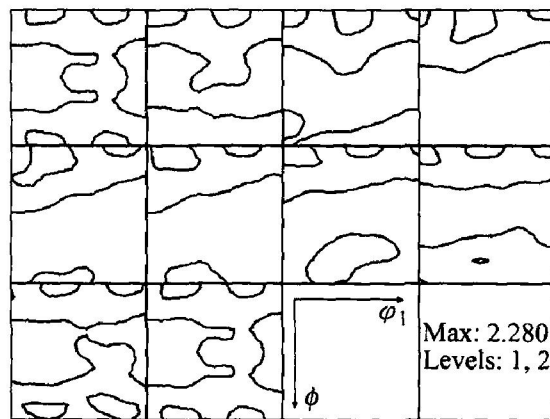


图 4 3[#] 样品再结晶后的 ODF 图

Fig. 3 ODFs of recrystallized sample 3[#]

3 讨论

Al 合金中第二相粒子的析出状态会显著影响再结晶组织, 而冷轧前的预先热处理对第二相粒子的析出状态有明显的影响, 这可能就是其影响再结晶组织的原因。图 5 所示为经 3 种不同预先热处理样品冷轧后的金相组织。由图 5 可看出, 经 3 种不同的预先热处理后, α (Al) 基体上细小第二相粒子的数量明显不同。固溶处理导致基体中第二相粒子数量明显减少, PSN 作用减弱; 另外冷轧前的固溶处理导致冷轧后的变形组织中 Brass 组分明显加强, 而在 Brass 组分中 PSN 作用非常微弱^[9], 因此 3[#] 样品中由 PSN 导致的 Cube+ ND20 和 P 组分的取向密度降低, 再结晶组织较弱。冷轧前进行过时效处理后, 在基体上析出大量 Mg_2Si 粒子^[15], PSN 效应显著加强, 因此导致 2[#] 样品再结晶组织中的 Cube+ ND20 组分明显加强。1[#] 样品为热轧后不经中间处理而直接冷轧, 然后进行再结晶退火。在热轧及随后的冷却过程中, 除粒状的第二相外, 还会析出极为细小弥散的针状 Mg_2Si ^[16], 这就使基体中能发生 PSN 的较大尺寸粒状第二相的数量减少, PSN 效应减弱, 所以 Cube+ ND15 组织组分较 2[#] 样品再结晶组织中的 Cube+ ND20 组分弱。由此可知, 预先热处理是通过改变第二相的析出状态及冷轧组织组态而影响再结晶组织的。

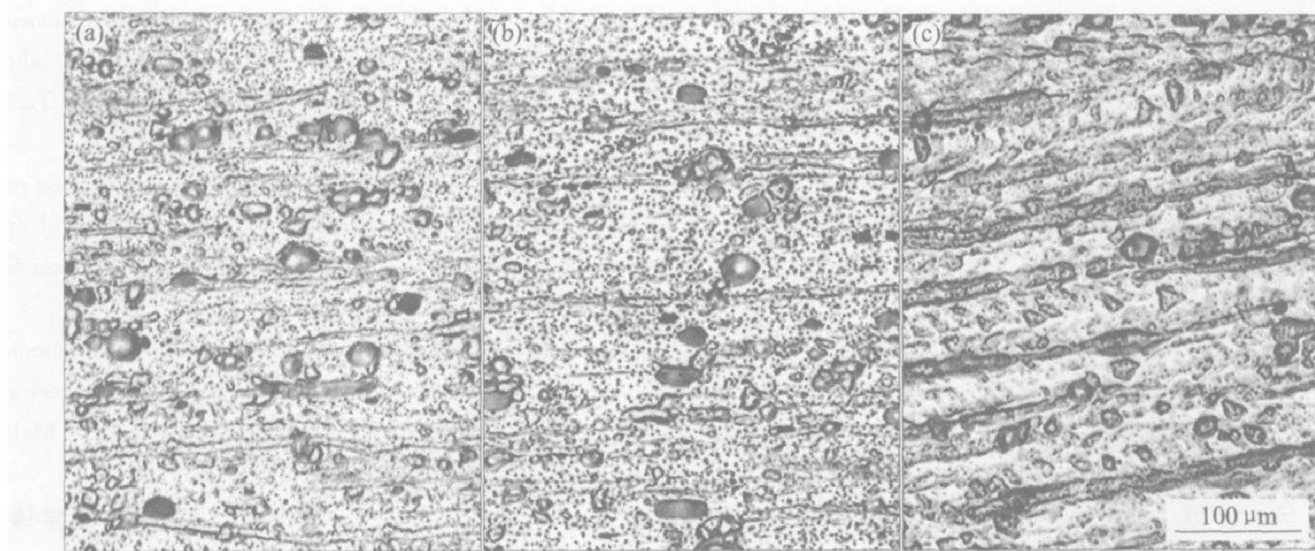


图 5 经 3 种不同预先热处理样品冷轧后的显微组织

Fig. 5 Microstructures after cold rolling of samples pre-heat treated differently

(a) —Sample 1[#]; (b) —Sample 2[#]; (c) —Sample 3[#]

4 结论

1) 冷轧前进行固溶处理因提高基体合金元素含量而使 6111 铝合金冷轧织构中 Brass 组分明显增强, 其取向密度与 Copper 和 S 组分几乎相同, 另外还有明显的 Goss 组分; 同时, 在冷轧前分别对热轧板进行固溶处理和固溶+ 过时效处理因改变冷轧前的原始织构而使冷轧织构(主要是 Copper 组分)的取向密度降低。

2) 热轧后直接冷轧 6111 铝合金的再结晶织构主要由 Cube+ ND15 及{011}〈111〉组分构成, 而且{011}〈111〉组分的取向密度较高; 而冷轧前经固溶+ 过时效处理样品的再结晶织构则主要由 Cube+ ND20 及{011}〈122〉组分(即 P 取向)构成, 而且 Cube+ ND20 组分的取向密度显著高于{011}〈122〉的取向密度。

3) 冷轧前进行固溶处理能显著弱化并漫散 6111 铝合金的再结晶织构, 其主要组分为接近于{001}〈U V W〉的 Cube+ ND20 组分。

4) 冷轧前的预先热处理对 6111 铝合金的再结晶织构有明显的影响, 为调控 6111 铝合金固溶处理后的最终织构组态进而改善其冲压成形性及表面质量提供了可能的途径。

REFERENCES

[1] Baczynski G J, Guzzo R, Ball M D, et al. Develop-

ment of roping in an aluminum automotive alloy AA6111[J]. Acta Mater, 2000, 48: 3361 - 3376.

[2] Raabe D, Sachtleber M. Grain-scale micromechanics of polycrystal surfaces during plastic straining[J]. Acta Mater, 2003, 51: 1536 - 1560.

[3] Wu P D, Lloyd D J, Bosland A, et al. Analysis of roping in AA6111 automotive sheet[J]. Acta Mater, 2003, 51: 1945 - 1957.

[4] Engler O, Hirsch J. Recrystallization textures and plastic anisotropy in Al-Mg-Si sheet alloys[J]. Materials Science Forum, 1996, 217 - 222: 479 - 486.

[5] Ferry M, Humphreys F J. The deformation and recrystallization of particle-containing {011}〈100〉aluminium crystals[J]. Acta Mater, 1996, 44: 3089 - 3103.

[6] Benum S, Nes E. Effect of precipitation on the evolution of cube recrystallization texture[J]. Acta Mater, 1997, 45: 4593 - 4602.

[7] Engler O, Kong X W, Lücke K. Recrystallization textures of particle-containing Al-Cu and Al-Mn single crystals[J]. Acta Mater, 2001, 49: 1701 - 1715.

[8] Hirsch J, Lücke K. Mechanism of deformation and development of rolling texture in polycrystalline FCC metals[J]. Acta Metal, 1988, 36: 2863 - 2927.

[9] 陈 扬, 赵 刚, 刘春明, 等. 冷轧 6111 铝合金板材固溶处理后的再结晶织构[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(2): 333 - 338.

CHEN Yang, ZHAO Gang, LIU Chur-ming, et al. Recrystallization texture in cold rolled sheet of Al alloy 6111 after solution treatment[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(2): 333 - 338.

