

文章编号: 1004-0609(2004)03-0410-08

润滑对 3104 铝合金板变形织构的影响^①

胡卓超, 刘沿东, 张德芬, 吴静婷, 左 良, 王 福

(东北大学 材料与冶金学院, 沈阳 110004)

摘 要: 在无润滑(WOL)和润滑(WL)2种轧制条件下, 分别对 2.3 mm 厚的热轧 3104 铝合金板进行不同压下量的冷轧。应用取向分布函数(ODF)定量计算和分析在不同轧制压下量下润滑对 3104 铝合金板材沿板厚方向织构演变的影响。结果表明: 随着轧制压下量的增加, 样品各层的织构组分强度均逐渐增加; 无润滑轧制时样品表面层主要织构组分取向密度普遍高于相同压下量下润滑轧制时的取向密度。导致表面层织构组分增强的原因是摩擦引起应变状态改变的结果。

关键词: 润滑; 3104 铝合金; 变形织构; 板厚

中图分类号: TG 146.2

文献标识码: A

Effect of lubrication on evolution of through thickness texture in cold rolled 3104 aluminum alloy sheets

HU Zhuo-chao, LIU Yan-dong, ZHANG De-fen, WU Jing-ting, ZUO Liang, WANG Fu

(School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract The samples of 3104 aluminum alloy sheets were deformed by cold rolling with and without application of lubricant. The effects of the different rolling procedures on the evolution of deformation texture during the different reduction rolling and on the development of texture at different layer were studied by means of X-ray texture analysis (ODF). It is found that the main rolling texture components in different layers were similar including Copper {112} <111>, Brass {110} <112>, R/S {124} <211> and S {123} <634> with lubrication and without lubrication. The orientation of texture component varies in orientation density with the cold rolled reduction. The samples rolled without lubrication pronounce stronger textures than the samples rolled with lubrication at the sheet surface layer, the reason that the samples rolled without lubrication contains a much larger amount of shear component is caused by friction. The different evolution of these through thickness texture can be explained in terms of different strain states during the deformation process.

Key words: lubrication; 3104 aluminum alloy; texture; thickness

具有强度高、耐蚀性好以及深冲与减薄拉深性能良好等优点的 3104 铝合金是制作饮料罐体的理想材料, 要求其各向异性越小越好^[1-3]。金属材料各向异性的产生, 主要是在材料加工制作过程中, 形变引起位错的滑移而导致晶格的旋转, 晶体取向的择优形核和生长所致^[4]。织构的形成使材料产生各向异性, 因此, 这种各向异性可通过织构控制来

降低, 从而提高和改善金属材料的冲压成形性^[5, 6]。

在通常的轧制过程中, 应变状态与很多因素有关, 如各轧制道次中样品尺寸的变化, 轧辊和样品之间的摩擦等。而这些因素都与距轧板表面的距离有关, 从而在轧制过程中引起不同的应变状态, 因此在样品的不同厚度层产生不同的织构^[7]。

① 基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G1999064908)

收稿日期: 2003-07-02; 修订日期: 2003-11-18

作者简介: 胡卓超(1976-), 男, 博士研究生。

通讯作者: 胡卓超, 电话: 024-83670655; E-mail: huzhuochao@163.com

本文作者采用 X 射线织构定量分析法, 研究了润滑对 3104 铝合金板材不同厚度层应变状态的影响。揭示了 3104 铝合金在不同润滑条件下冷轧过程中组织的形成和发展规律, 探讨摩擦对样品表层金属微取向流变行为的影响。

1 实验

采用西南铝加工厂生产的 3104 铝合金热轧成品板料(板厚 2.3 mm), 其化学成分(质量分数, %)为: Mn 1.0, Mg 1.28, Cu 0.22, Fe 0.36, Si 0.19, 其余为 Al。将热轧板沿热轧方向分别进行润滑(With lubrication, WL)和不润滑(Without lubrication, WOL)的冷轧, 润滑剂为机油。冷轧压下量分别为 70%, 80%, 90%。为研究不同厚度方向组织的变化, 将不同压下量的冷轧板沿厚度方向分 3 层(表层、1/4 层、中心层)取样, 并用厚度参数 T 来表明相对中心的距离(表层, $T=1$; 1/4 层, $T=0.5$; 中心层, $T=0$)。各层经研磨和浸蚀后制成织构测定样品。

织构测量在 D/max-III A 型 X 射线衍射仪上完成。采用 Schulz 反射法、 $\text{CoK}\alpha$ 辐射, 按同心圆方式以 5° 步进扫描 $\{111\}$ 、 $\{200\}$ 和 $\{220\}$ 3 张不完整极图(最大极角为 70°), 由计算机自动采集数据。织构分析采用东北大学织构研究室的软件, 按“两步法”^[8]计算。结果以恒 φ ($\varphi=45^\circ$) 的 ODF 截面图表示。

2 实验结果

2.1 3104 铝合金典型组织

众所周知, 面心立方金属各主要组织组分包括黄铜 Brass $\{110\} \langle 112 \rangle$, S $\{123\} \langle 634 \rangle$, 铜 Copper $\{112\} \langle 111 \rangle$, 高斯 Goss $\{011\} \langle 001 \rangle$, R/S $\{124\} \langle 211 \rangle$, 立方 Cube $\{001\} \langle 100 \rangle$, 旋转立方 Cube+ND $90^\circ \{001\} \langle 110 \rangle$ 组织。这些组织组分在 Euler 空间的特定位置如图 1 所示。铝合金轧制变形组织主要位于 2 条取向线上: 其一枝在 β 取向线上, 主要有 Brass $\{110\} \langle 112 \rangle$, S $\{123\} \langle 634 \rangle$ 和 Copper $\{112\} \langle 111 \rangle$ 组织组分; 另一枝在 α 取向线上, 主要有 Goss $\{011\} \langle 001 \rangle$ 和 Brass $\{110\} \langle 112 \rangle$ 组织组分。 α 取向线与 β 取向线相交于 Brass $\{110\} \langle 112 \rangle$ 。利用 Roe 符号系统可知, 在恒 $\varphi=45^\circ$ 截面图中, 集中显示了除 S 组织外的其他全部组织组分, 利用此截面图可

清晰看出各主要轧制组织组分的强弱(见图 1)。

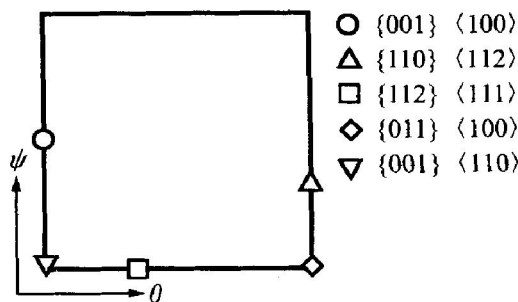


图 1 在 $\varphi=45^\circ$ 截面图中的取向
Fig. 1 Orientation found in section $\varphi=45^\circ$

2.2 WL 与 WOL 样品的 ODF 图

图 2(a) ~ 2(f) 所示为冷轧压下量 70% 的 WL 板材的 ODF 恒 $\varphi=45^\circ$ 截面图。可以看出, 各厚度

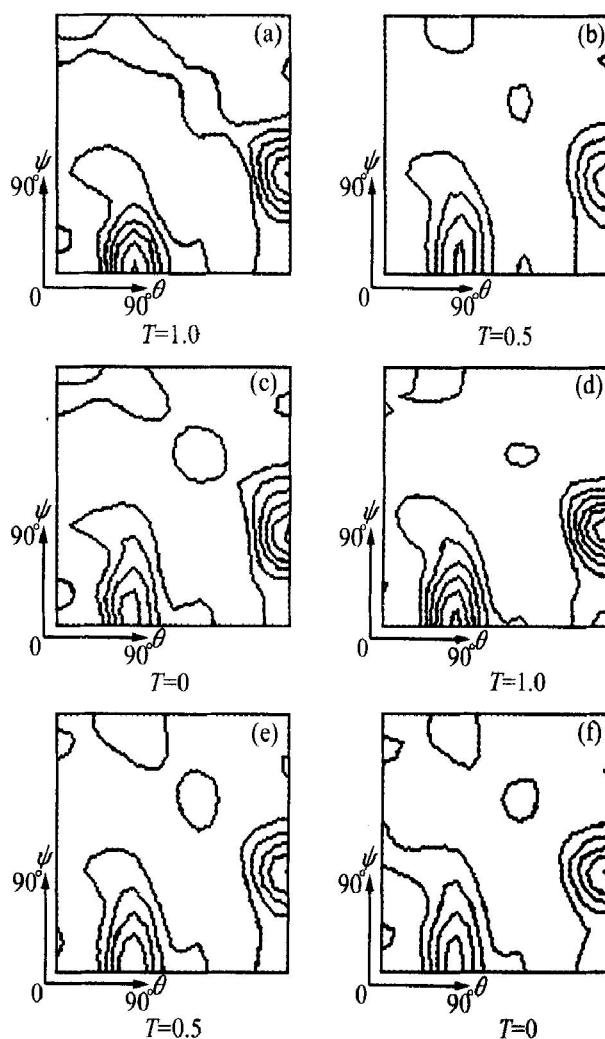


图 2 冷轧压下量为 70% 的 3104 铝合金板材的 ODF 恒 $\varphi=45^\circ$ 截面图

Fig. 2 Constant $\varphi=45^\circ$ section of ODFs in cold-rolled 3104 aluminum alloy sheets with 70% reduction
(a), (b), (c) —WL; (d), (e), (f) —WOL

层织构均主要由 Copper $\{112\} \langle 111 \rangle$ 型、Brass $\{110\} \langle 112 \rangle$ 型等织构组分组成, 其强度随层深变化而变化。相比较而言, 表面层样品的 Copper, Brass, R/S, S 织构组分强度较高, 1/4 层样品与中心层样品的织构组分强度相差很小。图 2(d)~2(f) 给出冷轧压下量为 70% 的 WOL 板材的 ODF 恒 $\varphi = 45^\circ$ 截面图。各层织构变化规律与 WL 样品一致, 但在样品的表面层 Brass 和 S 织构组分的强度级别要略高于 WL 样品表面层的织构组分的强度。对于 1/4 层和中心层 WOL 样品与 WL 样品织构组分强度差别不大。

当冷轧压下量为 80% 和 90% 时(图 3, 4), WL 轧制和 WOL 轧制可得到与压下量为 70% 时同样的规律, 即表面层各织构组分强度级别最高, 中心层次之, 1/4 层织构最弱。对比 80% 压下量下 WL 和 WOL 样品的织构强弱可以看出, WOL 样品表面层

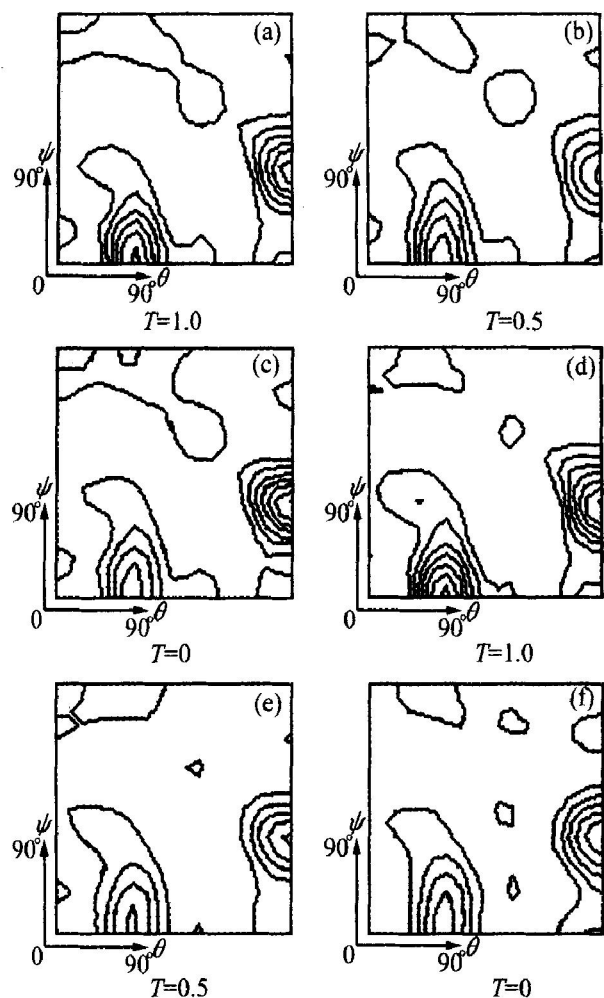


图 3 冷轧压下量为 80% 的 3104 铝合金板材的 ODF 恒 $\varphi = 45^\circ$ 截面图

Fig. 3 Constant $\varphi = 45^\circ$ section of ODFs in cold-rolled 3104 aluminum alloy sheets with 80% reduction (a), (b), (c) —WL; (d), (e), (f) —WOL

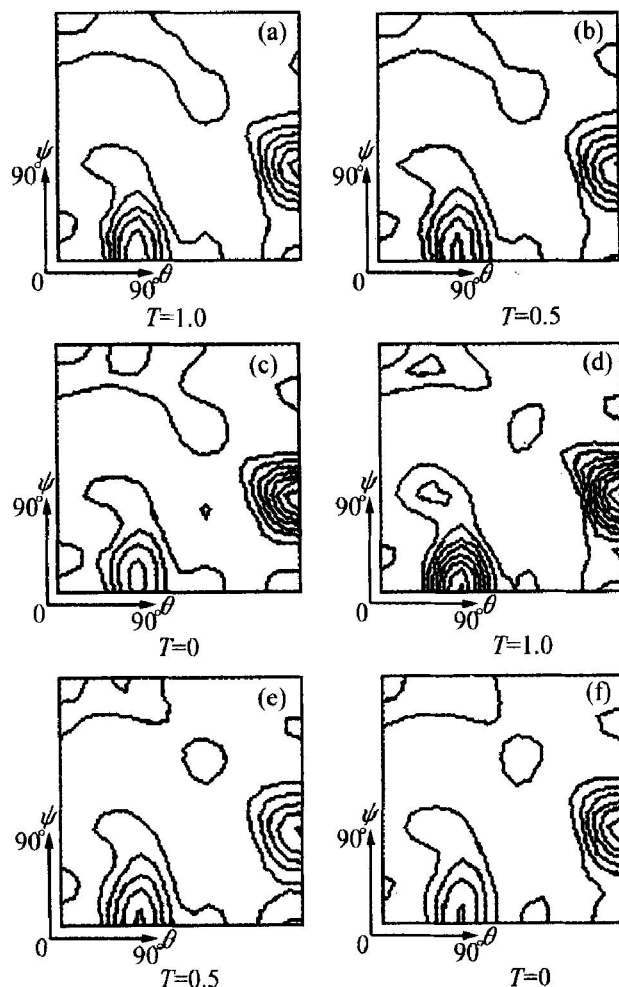


图 4 冷轧压下量为 90% 的 3104 铝合金板材的 ODF 恒 $\varphi = 45^\circ$ 截面图

Fig. 4 Constant $\varphi = 45^\circ$ section of ODFs in cold-rolled 3104 aluminum alloy sheets with 90% reduction (a), (b), (c) —WL; (d), (e), (f) —WOL

各织构组分强度明显高于 WL 样品表面层织构的强度。而中心层则是 WL 样品的织构组分稍强于 WOL 样品的织构组分。1/4 层这种织构组分强弱关系不明显。当压下量为 90% 时可得到与 80% 时相同的结论, 只是在样品的表面层织构组分的强度进一步提高(图 4)。

2.3 WL 与 WOL 样品不同厚度层的织构取向密度

图 5 给出 70% 压下量 WL 与 WOL 的 3104 铝合金板材不同厚度层的主要织构组分的取向密度值 ($\omega(g)$) 的变化规律。可见, 对于 WOL 样品其表面层的各主要织构的取向密度(包括 Brass, S, R/S)均大于 WL 样品表面层的相同织构类型的取向密度。在样品的 1/4 层, WOL 样品与 WL 样品的各取向密度近似相等。在样品的中心层, WOL 样品的各主要取向密度略小于 WL 样品的取向密度。

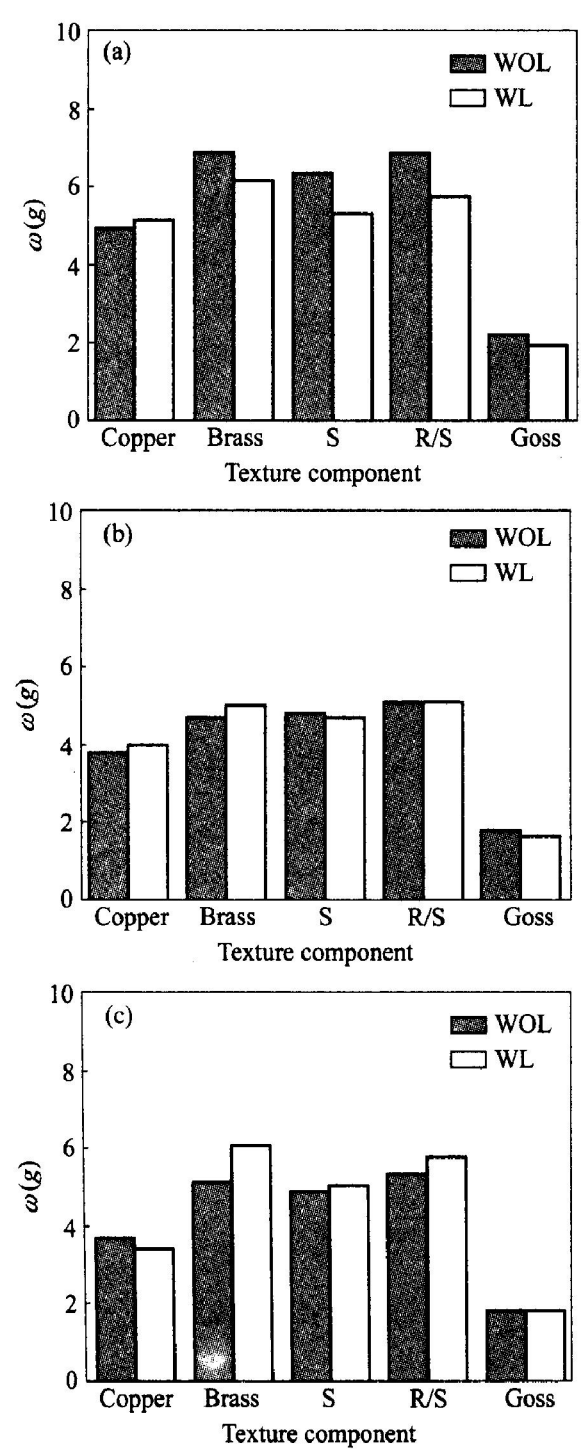


图 5 冷轧压下量为 70% 的 3104 铝合金
板材的各层取向密度

Fig. 5 Orientation densities ($\omega(g)$) of main texture components in cold-rolled 3104 aluminum alloy sheets with 70% reduction (a) —Surface layer; (b) —1/4 layer; (c) —Center layer

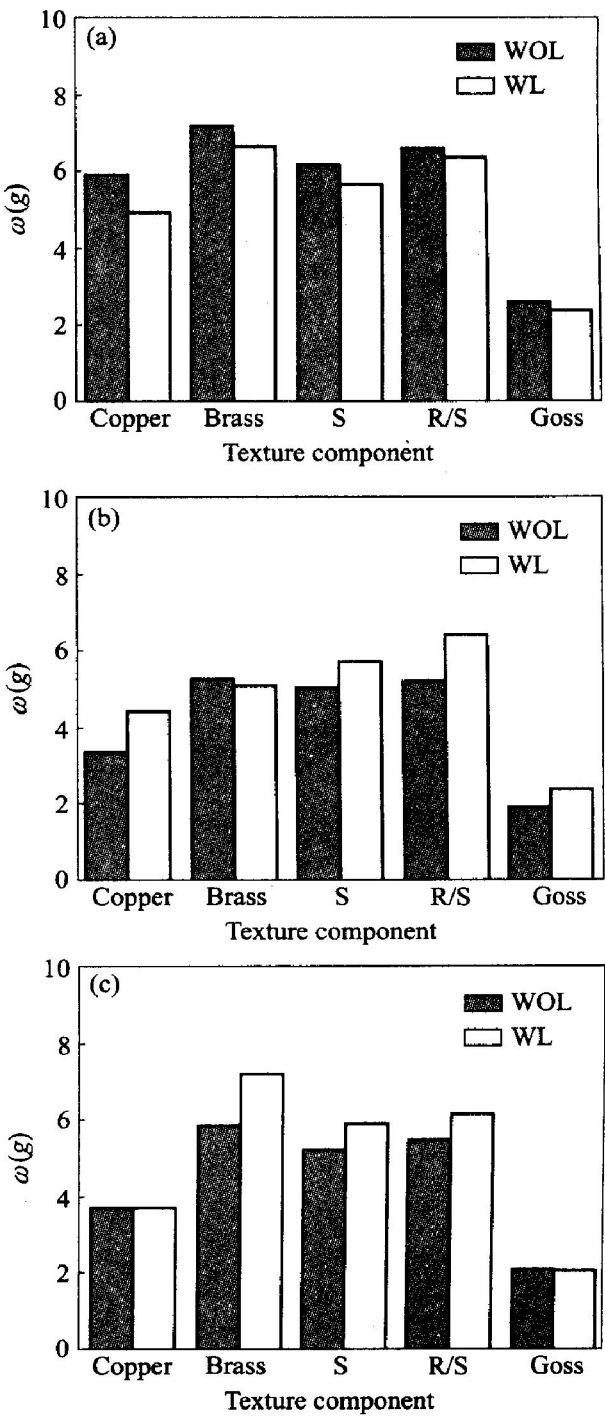


图 6 冷轧压下量为 80% 的 3104 铝合金
板材的各层取向密度

Fig. 6 Orientation densities ($\omega(g)$) of main texture components in cold-rolled 3104 aluminum alloy sheets with 80% reduction (a) —Surface layer; (b) —1/4 layer; (c) —Center layer

图 6 和 7 给出了 80% 和 90% 压下量 WOL 与 WL 样品不同厚度层的主要织构组分的取向密度变化规律。基本上可以得到与 70% 压下量时一致的结果, 只是随着压下量的增加, WOL 样品的表面层取向密度值较 WL 样品提高很大。对于 1/4 层和中心层, WOL 样品各织构组分的取向密度小于 WL 样

品各织构组分的取向密度。

2.4 压下量对 WL 与 WOL 样品表面层织构的影响

图 8 所示为随冷轧变形量的增加, 3104 铝合金板材表面层主要织构组分的取向密度变化。图 8(a)

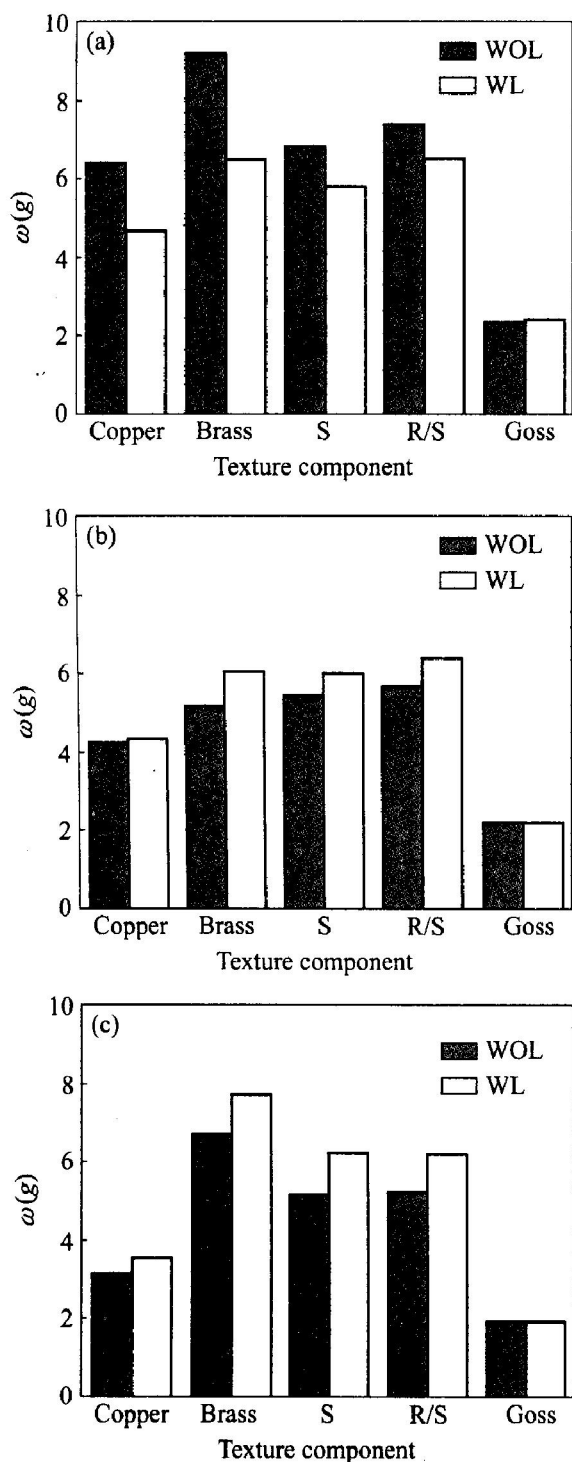


图 7 冷轧压下量为 90% 的 3104 铝合金
板材的各层取向密度

Fig. 7 Orientation densities ($\omega(g)$) of main
texture components in cold-rolled 3104
aluminum alloy sheets with 90% reduction
(a) —Surface layer; (b) —1/4 layer; (c) —Center layer

为 Copper 组织组分随压下量变化时的取向密度值的变化。对于 WL 样品, 随着压下量的增加, 其取向密度略有下降, 由 5.2 降至 4.6。对于 WOL 样品, Copper 组织组分强度提高很大, 由 70% 时的 4.6 提高到了 90% 时的 6.8。从图 8(b) 可见, 随着压下

量的增加, WL 样品表层 Brass 组织取向密度变化很小, 而 WOL 样品表层的 Brass 组织组分取向密度提高很大, 由 70% 时的 6.8 提高到了 90% 时的 9.3, 而对于 R/S, S 组分的取向密度, 在润滑轧制下随变形量的增加略有增加, 而在无润滑轧制下, 其取向密度在 80% 时稍有降低, 而在 90% 时最高, 如图 8(c), 8(d) 所示。由图 8 还可以看出, 在无润滑轧制样品的表面层各主要组织组分的取向密度普遍高于同条件下润滑轧制样品的取向密度。

3 分析与讨论

3.1 厚度方向上的应变状态

在轧制变形过程中, 应变状态通常被简化成平面应变, 即应变 $\epsilon_{11} = -\epsilon_{33}$, ϵ_{22} , ϵ_{12} , ϵ_{13} , ϵ_{23} 为 0, 其中 1, 2, 3 分别表示轧向(RD), 横向(TD), 轧面法线方向(ND)。一般, 在变形过程中应变状态并不是一个恒值, 它随着轧板从轧机入口到出口位置的变化而变化, 也就是随着轧板厚度的变化而变化。通常将轧制只考虑为一个二维问题, 即 $\epsilon_{22} = \epsilon_{12} = \epsilon_{23} = 0$, 而它的应变状态与理想的平面应变之间的差别在于它有一个非 0 的剪切应变 ϵ_{13} 。 ϵ_{13} 由 2 部分因素共同决定, $\epsilon_{13} = 1/2(e_{13} + e_{31})^{[9]}$ 。 e_{13} 和 e_{31} 在轧辊间的变化如图 9, 10 所示。在轧制过程中 e_{31} 的变化由这个道次的厚度压下量、样品总厚度及轧辊尺寸共同决定。它可由下式计算得到:

$$e_{31} = \frac{r}{2 \sqrt{rRT - (\frac{rT}{2})^2}} \quad (1)$$

式中 T 为样品厚度; R 为轧辊直径; r 为道次压下量。 r 被定义为

$$r = (T_0 - T_e) / T_0 \quad (2)$$

式中 T_0 为样品轧前厚度; T_e 为样品轧后厚度。

e_{31} 从轧前到轧后逐渐变小, 但是从样品分层厚度而言, e_{31} 的大小与厚度层 T 无关。 e_{13} 是由于轧辊与板材之间的摩擦所产生, 摩擦力越大, e_{13} 值就越高, 这就导致平面应变状态的偏移。它在轧机的入口处有正的最大值, 在中心面为 0, 而在轧机的出口处有负的最大值。因为摩擦只影响样品的表面层而不影响样品的中心层, 故 e_{13} 影响样品的厚度层 T 的应变状态^[10, 11], 且对样品的表面层影响最大。

实验发现, WOL 轧制和 WL 轧制导致了轧板沿板厚方向组织发生了显著的变化(图 2~4)。而在 2 种轧制过程中样品厚度、轧机尺寸等几何条件完全一致, 所以 2 种轧制下的应变 e_{31} 完全相同, 故对

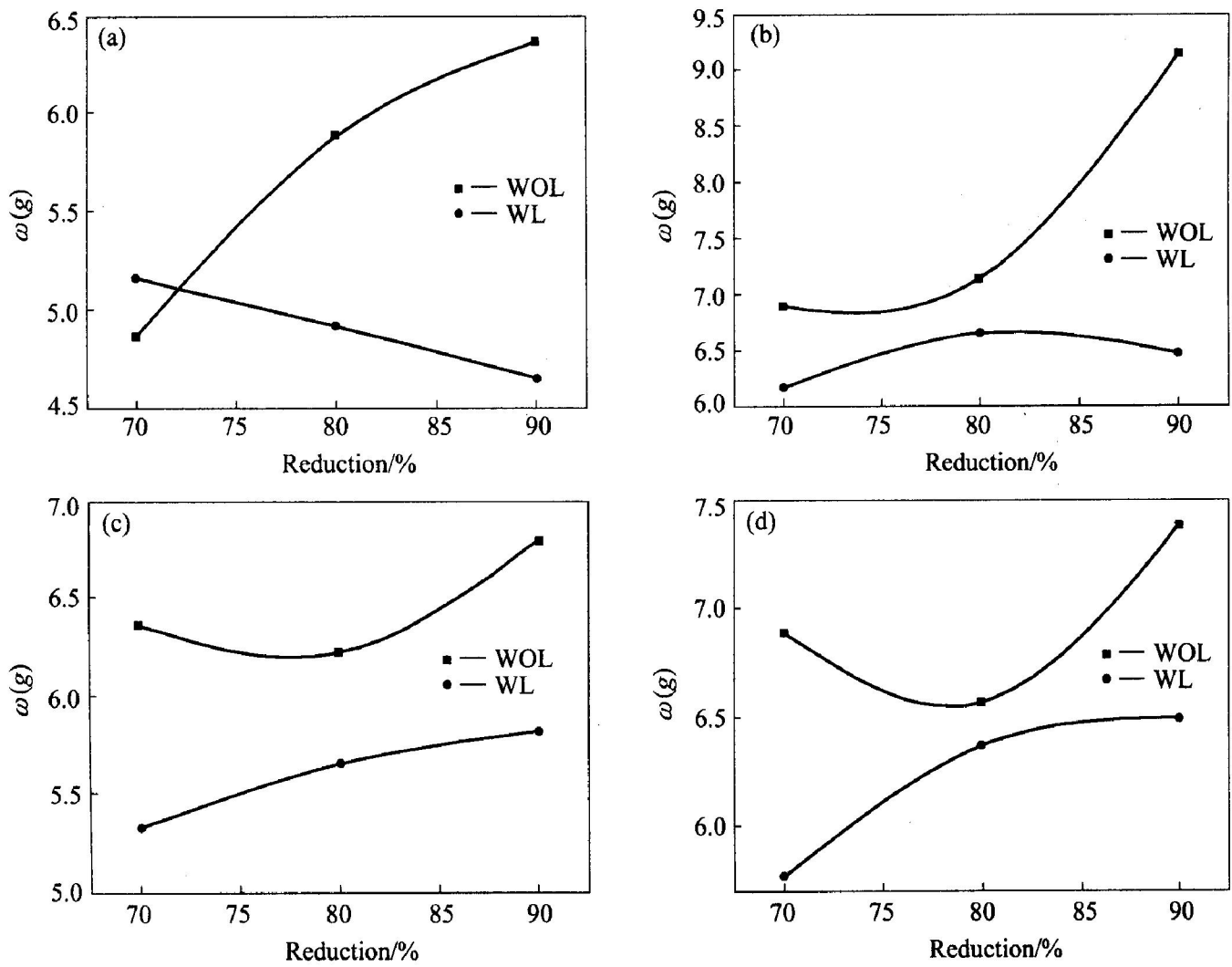


图 8 不同冷轧变形量的 3104 铝合金板材表面层主要织构组分的取向密度

Fig. 8 Orientation densities ($\omega(g)$) of main texture components in surface layer of cold-rolled 3104 aluminum alloy sheets with different reductions

(a) —Copper; (b) —Brass; (c) —S; (d) —R/S

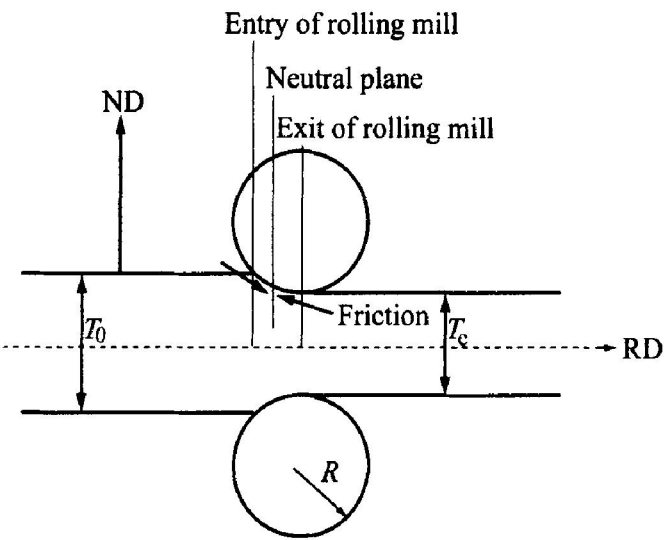


图 9 在一个轧制道次中变形的几何尺寸

Fig. 9 Geometry of deformation during a rolling pass

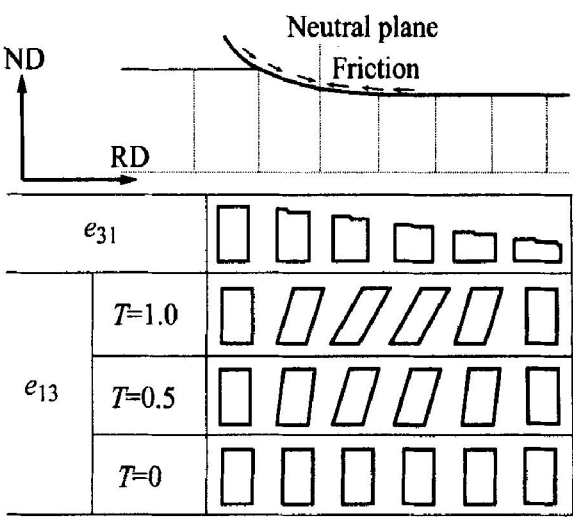


图 10 轧制过程中各层 e_{31} 和 e_{13} 的变化机制

Fig. 10 Schematic representation showing variation of e_{31} and e_{13} in a roll gap

织构产生相同的影响。然而在 WOL 条件下轧制时, 摩擦对样品起到了很大的影响, 所以 WOL 样品的 e_{31} 高于 WL 样品的 e_{31} 值。结果导致了 WOL 样品中微取向应变的差异, 并因此使得 WOL 样品产生厚度方向上与 WL 样品完全不同的织构变化, 并由于摩擦主要作用于样品的表面层, 使得 WOL 样品表面层的主要织构组分强度明显高于 WL 样品表面层的织构。

3.2 样品表面层织构的演变规律

由图 8 可以看出, 尽管不同冷轧变形量的 3104 铝合金板材的主要织构类型相同, 但各织构组分的强度级别有所差异。这种差异主要是由于冷轧压下量和摩擦阻力的不同使得金属流动及晶粒取向发生变化所致。在轧制过程中, 摩擦力和轧制压力的共同作用导致轧制板材沿厚度方向产生不同的剪切应变。

随着冷轧压下量的增加, WL 板材表面层各织构组分的取向密度变化呈不同的变化趋势, 其中 Brass, S, R/S 织构强度逐渐增加, 而 Copper 织构逐渐减弱。这主要是由于 WL 板材表面层受摩擦力等因素的影响较小, 剪切应变可忽略不计, 此时材料的塑性应变接近于对称变形, 随着变形程度的增加, 晶粒取向沿 β 线和 α 线流动, 其中亚稳态的 Goss 织构将随着变形的增加逐渐向 Brass 织构转变, 从而导致 Brass 织构组分的取向密度不断增加。Hirsch 等预测发现^[12], 在轧制变形均匀的情况下, 轧制过程前样品中的 Cube 立方织构将沿取向线向稳态的 Copper 织构转变, 大变形程度下晶粒通过 S 取向位置后, 旋转速度减慢, 大多数晶粒将聚集与 S 取向周围, 使变形后 S 取向密度较大^[13, 14]。

对于 WOL 轧板表面层各织构取向密度而言, 由于轧制摩擦系数较大, 轧辊与轧板之间产生大的摩擦, 轧板不均匀变形严重, 而轧板表面承受较大的摩擦作用, 从而在样品的表面产生一定的剪切织构, 且随着变形量的增加, 剪切织构增强^[15]。但是剪切织构不稳定, 在轧制变形时, 晶粒绕横向 TD 方向旋转。随着变形量的增加, 剪切织构和一定亚稳态的织构将迅速向稳定的 Copper 织构演变。同时由于在剪切变形的作用下, 将激活更多的滑移系参加滑移和交滑移, 使得 S 取向周围的晶粒继续沿着 β 取向线运动, 从而到达 Copper 取向。因此

WOL 样品表面层 Copper 织构随变形量的增加而发生明显强化, 同时也导致 3104 铝合金表面层其他主要织构 Brass, S, R/S 的强度提高。

4 结论

研究了在 3104 铝合金板轧制过程中, 润滑对样品不同层织构演变的影响。在无润滑轧制与润滑轧制下, 样品的各主要织构组分未发生变化, 仍为典型的铜式织构类型, 均主要由 Copper, Brass, R/S, S 组分组成。随压下量的增加, 润滑轧制样品表面层的 R/S, S 组分, 1/4 层和中心层的 Brass, R/S, S 组分增强, 而表面层的 Copper 组分减弱。而对于无润滑轧制样品而言, 各层织构均呈增加趋势, 在样品的表面层, 样品各织构组分取向密度普遍高于相同压下量下润滑轧制样品的取向密度。导致样品表面层织构组分增强的原因可归结为摩擦的作用而导致应变状态的改变。

REFERENCES

- [1] Dillamore I L, Katoh H. The mechanisms of recrystallization in cube metals with particular reference to their orientation-dependence[J]. Metal Science Journal, 1974, 8(3): 73 - 83.
- [2] Hollinshead P A, Sheppard T. Development of rolling textures in aluminum alloy 3004 subjected to varying hot-rolling deformation[J]. Metallurgical Transactions A, 1989, 20(8): 1495 - 1507.
- [3] Merchant H D, Hodgson D S, O'Reilly I, et al. Structure and property evolution during drawing and wall ironing of aluminum alloy 3004[J]. Materials Characterization, 1990, 25(3): 251 - 261.
- [4] Bunge H J. Texture and anisotropy[J]. Z Metallkd, 1979, 70(7): 411 - 418.
- [5] Major B. Texture, microstructure, and stored energy in homogeneity in cold rolled commercial purity aluminum and copper[J]. Mater Sci Technol, 1992, 8(6): 510 - 515.
- [6] Raabe D. Inhomogeneity of the crystallographic texture in a hot-rolled austenitic stainless steel[J]. J Mater Sci, 1995, 30(1): 47 - 52.
- [7] HU Zhuo-chao, LIU Yang-dong, ZHANG De-fen, et al. Textures variation of 3104 aluminum alloy sheets under

- different rolling conditions[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2003, 13(3): 574 - 578.
- [8] 梁志德, 徐家祯, 王 福. 织构材料的三维取向分析技术—ODF 分析[M]. 沈阳: 东北工学院出版社, 1986. 108 - 109.
- LIANG Zhī-de, XU Jiā-zhen, WANG Fu. Three dimensional orientation analysis of textured materials—ODF analysis[M]. Shenyang: Northeast University of Technology Press, 1986. 108 - 109.
- [9] Duggan B J, Lee C S. Deformation banding origin size and recrystallization in FCC intermediate to high SFE metals[J]. Scripta Metall Mater, 1992, 27(11): 1503 - 1507.
- [10] Huh M Y, Cho Y S, Kim J S, et al. Effect of lubrication on the evolution of through thickness texture gradients in cold rolled and recrystallized low carbon steel[J]. Z Metallkd, 1999, 90(2): 124 - 131.
- [11] Huh M Y, Cho Y S, Engler O. Effect of lubrication on the evolution of microstructure and texture during rolling and recrystallization of copper[J]. Material Science and Engineering A, 1998, 247: 152 - 164.
- [12] Hirsch J, Lücke K. Mechanism of deformation and development of rolling texture polycrystalline FCC metals II simulation and interpretation of experiments on the basis of Taylor type theories[J]. Acta Metall, 1988, 36(11): 2883 - 2904.
- [13] 毛为民, 张新明. 晶体材料织构定量分析[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1995. 96 - 102.
- MAO Wei-min, ZHANG Xin-ming. Quantitative Texture Analysis of Crystalline Materials[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1995. 96 - 102.
- [14] 张新明, 蒋红辉, 肖亚庆, 等. 润滑剂对高纯铝形变织构的影响[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(5): 785 - 790.
- ZHANG Xin-ming, JIANG Hong-hui, XIAO Ya-qing, et al. Influence of lubricants on deformation textures in high purity Al[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(5): 785 - 790.
- [15] Lee C S, Duggan B J. Simple theory for the development of inhomogeneous rolling textures[J]. Metall Tran A, 1991, 22(11): 2637 - 2643.

(编辑 陈爱华)