

[文章编号] 1004- 0609(2001) 05- 0785- 06

润滑剂对高纯铝形变织构的影响^①

张新明, 蒋红辉, 肖亚庆, 陈志永, 刘楚明, 周卓平
(中南大学 材料科学与工程系, 长沙 410083)

[摘 要] 采用 ODF 法研究和分析了润滑剂对高纯铝冷轧形变织构的影响, 揭示了两种润滑条件下形变织构的演变规律。结果表明: 大冷轧变形程度下, 采用机油润滑, 形变织构为典型的面心立方金属的轧制织构, 即由强的 B^- 、 Cu^- 及 S^- 织构组分构成, 而且取向分布的密度峰值处在 S^- 取向位置; 煤油润滑时轧制织构相对较弱, 但 Cu^- 织构最强, 同时产生了明显的剪切织构 $\{001\}\langle 110 \rangle$ (Rot. Cube 织构)。采用机油润滑时, 轧制变形比较均匀。低变形轧制时晶粒取向聚集于 α 线, 随变形量增加, 向 β 线取向聚集, 最终形成铜型轧制织构; 而煤油粘度小, 轧制过程中接触表面摩擦系数较大, 不均匀变形严重, 低轧制程度时发现表面剪切 Rot. Cube 织构, 随着塑性变形增加, Rot. Cube 织构逐渐向 Cu^- 取向转化; 变形至 95% 后, 随着变形程度增加, S^- 织构减弱。

[关键词] 高纯铝; 形变织构; 剪切织构; 润滑

[中图分类号] TG 113. 2

[文献标识码] A

高纯铝冷轧过程中晶体取向发生变化, 不同的轧制条件, 如轧制变形量、轧制区几何因素、润滑条件等会导致形变织构的变化。面心立方金属平面变形轧制织构的研究已有文献报道^[1~4]。研究表明, 铝在轧制过程中存在着不同程度的变形不均匀性^[2, 5]。Kamijo 等^[6]作过不同几何因素 l/d 对单晶体铝立方织构的影响研究, 涉及到了不均匀变形的问题。作者研究了机油及煤油两种不同的冷轧润滑剂对高纯铝轧制织构的影响, 通过分析金属宏观变形特性和晶体取向的变化, 揭示了铝箔在不同润滑条件下冷轧过程中织构的形成和发展规律, 对织构的演变过程进行了分析和讨论。

1 实验

1.1 试样制备

将 3 组高纯铝在真空中频感应炉中熔炼, 在氧化锌涂层铁模中铸成 $19\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 的长方体锭, 其化学成分见表 1。

3 组铸锭均在箱式电阻炉中进行 $610\text{ }^\circ\text{C}$, 10 h 均匀化, 在 $520\text{ }^\circ\text{C}$ 下热轧至 4.5 mm 和 2.2 mm , 终轧温度 $290\text{ }^\circ\text{C}$, 热轧板经 $190\text{ }^\circ\text{C}$, 1 h + $540\text{ }^\circ\text{C}$, 2 h 中间退火。取各组热轧退火板在 $d130\text{ mm} \times 260\text{ mm}$ 二辊不可逆冷轧机上冷轧至 0.11 mm

表 1 高纯铝锭的化学成分

Table 1 Chemical compositions of studied high purity aluminum ingots ($10^{-4}\%$)

Ingot No.	Chemical compositions						
	Fe	Si	Cu	Mg	Mn	Y addition	Al
1 [#]	37	7	26	18	< 10	0	Bal.
2 [#]	35	7	27	16	< 10	15	Bal.
3 [#]	39	19	46	29	< 10	30	Bal.

厚。冷轧时分别使用 N46 型号机油及煤油作润滑剂。样品最终冷轧的变形量、润滑条件及其编号以及轧制道次各变形参数分别见表 2, 3。

1.2 织构检测

取各组 0.11 mm 厚冷轧箔以及 1[#] 试样的各中间道次样品, 经腐蚀去表层, 检测织构。织构检测在德国亚琛 (Aachen) 工业大学 Ltr-2 型全自动 X 射线衍射仪上进行。采用 Schulz 反射法测定 $\{111\}$, $\{220\}$, $\{200\}$, $\{311\}$ 4 个不完整极图 ($\alpha = 0 \sim 85^\circ$, $\beta = 0 \sim 360^\circ$), 测试电压 $V = 35\text{ kV}$, 管电流 $I = 30\text{ mA}$, Cu 靶。利用 Bunge 级数展开法^[7]计算晶体取向分布函数 (ODF) ($l_{\text{max}} = 22$)。为了消除鬼峰效应, 采用高斯正态分布函数模型^[8]计算真 ODF ($l_{\text{max}} = 23$)。

① [基金项目] 国家重点基础研究发展规划项目 (G1999064908); 国家自然科学基金资助项目 (59971067)

[收稿日期] 2001- 01- 11; [修订日期] 2001- 04- 02

[作者简介] 张新明 (1946-), 男, 教授, 博士生导师, 博士。

表 2 冷轧变形量及润滑条件

Table 2 Cold-rolled reduction and lubrication condition

Sample	Ingots No.	Reduction/ %	Lubricant	Sample	Ingots No.	Reduction/ %	Lubricant
I A1	1 [#]	97.6	Machine oil	II A1	1 [#]	95	Machine oil
I B1	1 [#]	97.6	Kerosene	II B1	1 [#]	95	Kerosene
I A2	2 [#]	97.6	Machine oil	II A2	2 [#]	95	Machine oil
I B2	2 [#]	97.6	Kerosene	II B2	2 [#]	95	Kerosene
I A3	3 [#]	97.6	Machine oil	II A3	3 [#]	95	Machine oil
I B3	3 [#]	97.6	Kerosene	II B3	3 [#]	95	Kerosene

Notes: 97.6% and 95% reduction symbolized as I and II respectively; machine oil and kerosene symbolized as A and B respectively.

表 3 4.5 及 2.2 mm 试样分别轧到 0.11 mm 时的
道次变形量及几何因素 l/d

Table 3 Draught and geometry factor
(l/d) of samples cold rolled from
4.5 and 2.2 mm to 0.11 mm

Pass, n	Thickness, H/mm	Draught, $\varepsilon_n/\%$	Geometry faction, l/d
0	4.50		
1	3.30	26.70	2.0
2	2.20	33.3	2.6
3	1.30	40.9	3.5
4	0.60	53.8	5.2
5	0.33	45	7.0
6	0.13	60.7	11.0
7	0.11	15.4	8.8

Pass, n	Thickness, H/mm	Draught, $\varepsilon_n/\%$	Geometry faction, l/d
0	2.2		
1	1.25	43.2	3.6
2	0.55	56	5.4
3	0.33	40	6.9
4	0.125	62.1	11.1
5	0.11	12	7.9

2 实验结果

图 1, 2 所示为 0.11 mm 厚铝箔冷轧织构的 α , β 取向线及 $Cube_{ND}$ 取向线分析图, 表示了成分相近的 3 个试样(1[#], 2[#] 及 3[#]) 在机油(A) 和煤油(B) 润滑条件下经 97.6%(图 1) 和 95%(图 2) 轧制变形后晶粒取向密度 $f(g)$ 沿三取向线的分布。由图 1 可见, 3 个试样经机油润滑 97.6% 冷轧变形后, B^- , $Cu\bar{r}$ 及 S^- 组分取向密度值都很高, $f(g)$ 的最大值位于 S^- 位置。 G^- 组分的 $f(g)$ 值很低, $Rot. Cube$ 组分的 $f(g)$ 值几乎为 0, 如图中 I A1, I A2 及 I A3 所示。然而, 3 个试样经煤油润滑冷轧变形后, $Cu\bar{r}$ 组分的 $f(g)$ 值很高, B^- 及 S^- 组分的 $f(g)$

值低, 后者无极值点; 而且, 3 个试样中都发现有较强的 $Rot. Cube$ 剪切织构组分 $\{001\}\langle 110 \rangle$, 如图中 I B1, I B2 及 I B3 所示。

图 2 所示试样的织构类型与图 1 的相同。3 个试样经机油润滑 95% 冷轧变形后, B^- , $Cu\bar{r}$ 及 S^- 组分取向密度值都高, $f(g)$ 的最大值处于 S^- 位置。 G^- 及 $Rot. Cube$ 组分也都非常弱, 其 $f(g)$ 值几乎为 0, 如图中 II A1, II A2 及 II A3 所示。同样, 3 个试样经煤油润滑 95% 冷轧变形后, $f(g)$ 的最大值处于 $Cu\bar{r}$ 位置, 也发现有较强的 $\{001\}\langle 110 \rangle$ 织构组分, 如图中 II B1, II B2 及 II B3 所示。与图 1 相比, 95% 煤油润滑冷轧试样中, $Cu\bar{r}$, $Rot. Cube$ 及 B^- 织构较弱, 机油润滑的试样 S^- 组分较强。

从图 1, 2 还可以看出, 随着 Y 加入量的增加, $Rot. Cube$ 织构变强。

图 3 为 1[#] 试样两种变形程度下冷轧成品箔的取向线分析图。由图可见, 同一润滑条件下, 95% 变形程度下的 S^- 织构组分比 97.6% 变形程度下的 S^- 组分强, 而 $Cu\bar{r}$ 组分在 97.6% 变形程度下强。

3 分析与讨论

3 种样品的冷轧初始织构都是以 $\{001\}\langle 100 \rangle$ 织构为主, 且冷轧开始和终了的试样为同一种样品, 这就排除了原始状态对同一试样的影响。N46 机油和煤油是粘度不同的两种矿物油润滑剂, 常温下 N46 机油粘度比煤油粘度大得多(40℃时, $\eta_{N46m} = (41.4 \sim 50.8) \times 10^{-6} Pa \cdot s$, $\eta_k = 1.90 \times 10^{-6} Pa \cdot s$)。冷轧过程中轧辊与轧件间的接触表面摩擦系数 f 随润滑剂粘度的增大而减小^[9]。图 4 表示 1[#] 试样冷轧 95% 时两种润滑条件下各中间道次的 ODF 图, 其中(a), (b), (c) 为机油润滑的情况。由图 4(a) 可以看出 43.2% 压下量时立方取向沿轧向旋转分布形成 $\{0kl\}\langle 100 \rangle$ 织构, 并且晶粒又转向 α 取向线上的 G^- 取向(取向密度为 5.35) 附近; 变形量为 75% 时, β 线上 $Cu\bar{r}$ (取向密度为 8.2) 、 S^- (取向密

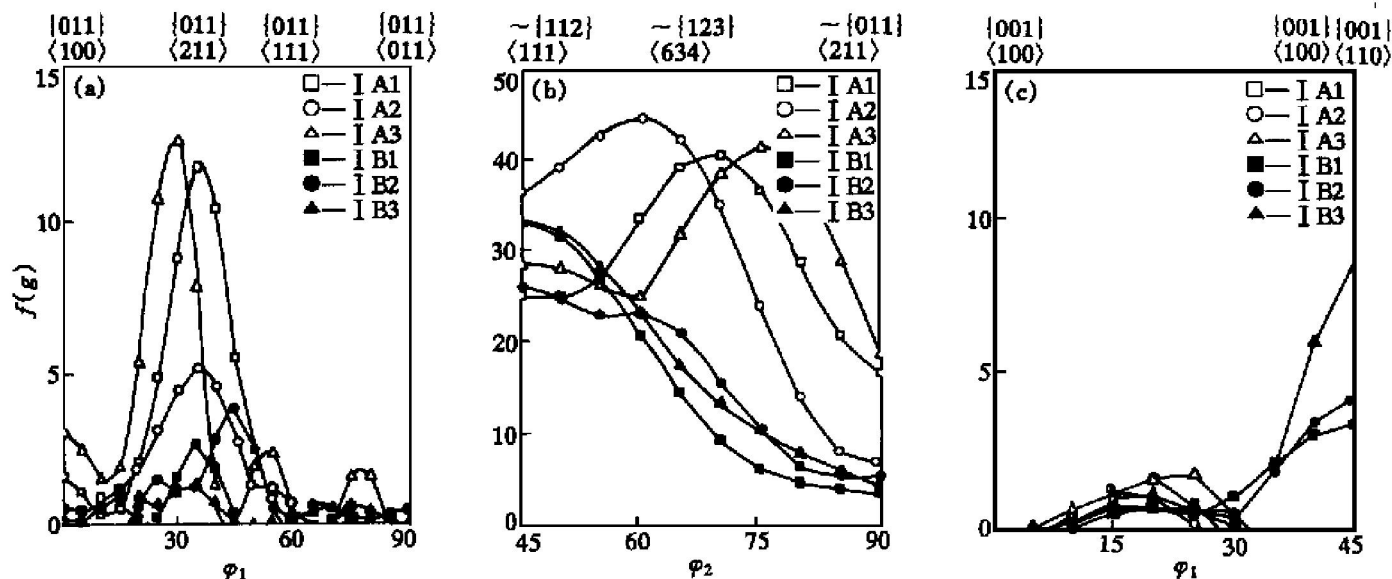
图 1 冷轧箔织构的取向线分析($\varepsilon = 97.6\%$)

Fig. 1 Skeleton lines of cold rolling textures of foils with 97.6% reduction

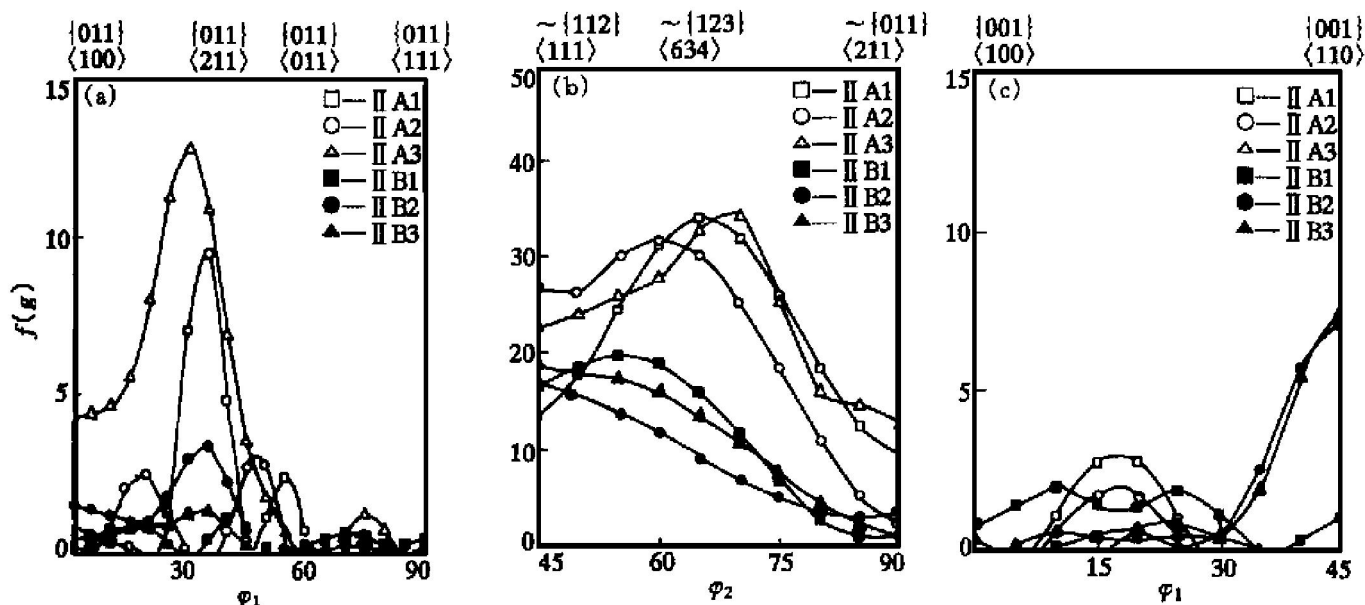
(a) — α -fibre; (b) — β -fibre; (c) —Cub_{ND}-fibre图 2 冷轧箔织构的取向线分析($\varepsilon = 95\%$)

Fig. 2 Skeleton lines of cold rolling textures of foils with 95% reduction

(a) — α -fibre; (b) — β -fibre; (c) —Cub_{ND}-fibre

度为 15.72) 及 B^- (取向密度为 4.84) 这些取向明显增强(图 4(b)), 轧制 95% 时已形成了铜型轧制织构(图 4(c))。G-取向是一个亚稳定取向, 随变形的深入, 逐渐流向 B^- 取向。随着变形程度增加, 晶粒取向向 β -线流动, 如图 4(a) ~ (c) 所示, B^- 、S-及 Cu-取向密度不断增加, 大变形量下形成了典型的铜型轧制织构, 而且晶体取向主要聚集于 S-取向位置, 使得变形后 S-取向密度最大。S-取向也是亚稳定的^[10], 随着变形程度增加, S-取向将向稳定的 Cu-取向转化, 见图 3。因此可以预测, 若变形进一步增加, 则 S-织构将减弱而 Cu-织构加强。

Zhou 等用速率敏感模型的计算表明^[11], 在变形比较均匀的状态下, 轧前以 Cube 取向为主的多晶体, 变形后 S-织构比较强。轧制过程中 Cube 取向要么直接流向 β -取向线, 要么首先沿 α -取向线, 然后沿 α -线到 β -线, 朝稳定取向 Cu-取向流动。大变形程度下晶粒通过 S-取向位置后, 旋转速度减慢, 大多数晶粒聚于 S-取向。Hirsch 等^[12]也预测了同样的结果。

煤油润滑条件下, 由于煤油粘度较小, 所以轧制摩擦系数 f 较大, 轧辊与轧件间产生较大的摩擦, 不均匀变形严重。图 4(d), (e), (f) 为煤油润

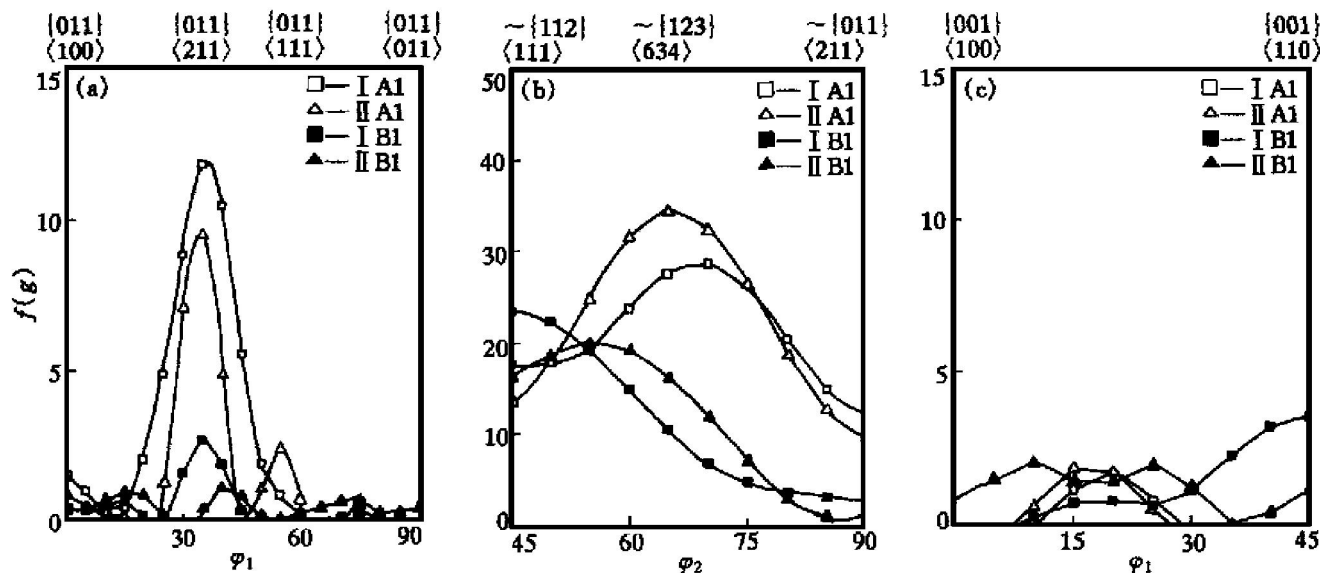
图 3 1[#] 试样 2 种变 形程度下冷轧成品箔织构的取向线分析

Fig. 3 Skeleton lines of cold rolling textures of f oils with 97.6% and 95% reductions

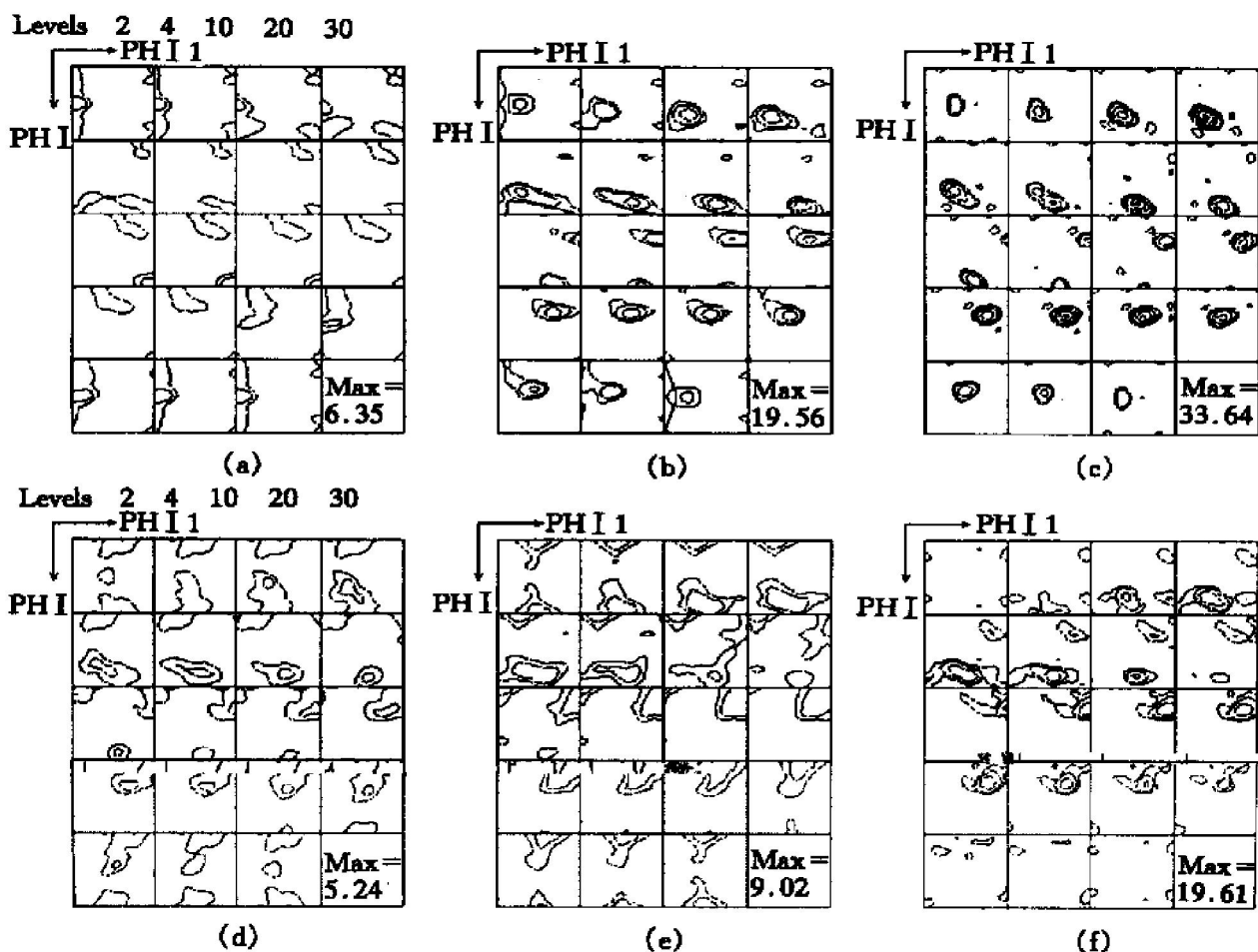
(a) — α -fibre; (b) — β -fibre; (c) —Cub_{EUR}-fibre图 4 1[#] 试样冷轧中间道次的 ODF 图(总变形量为 95%)

Fig. 4 ODFs of 1[#] sample cold rolled to 43.2%, 75% and 95% with machine oil (a, b, c) kerosene (d, e, f), 43.2% reduction (a) 75% reduction (b) 95% reduction (c) and 43.2% reduction (d) 75% reduction (e) 95% reduction (f)

滑条件下冷轧样品中晶粒取向分布的情况。由图可以看出, 在 43.2% 低变形量时, 立方取向沿板面

法向旋转, Rot. Cube 取向变强, 位于 $(45^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ 处, 取向密度为 2.4, Cu 取向密度为 5.3 及 B-

取向密度为 3.4, (图 4(d))。随着变形量增加, Rot. Cube 取向减弱 (95% 变形量时取向密度为 1.09) 而 Cu 取向增强 (95% 变形量时取向密度为 16.35), B-织构几乎消失, 如图 4(d), (f) 所示。煤油润滑轧制过程中, 由于轧件承受较大的剪切变形, 产生了表面 Rot. Cube 剪切织构^[13]。随着变形的深入, 织构增强 (图 4(e)), 但 Rot. Cube 织构不稳定^[14], 在轧制变形时, 晶体绕横向 TD 方向旋转, 随着变形量继续增加而逐渐朝 Cu 取向演变。由图 4(d) ~ (f) 可以看出, 随变形的深入 Cu 织构逐渐加强, 图 1(b), 2(b) 的 β -取向线分析也表明了同样的结果。Köhlhoff^[15] 在实验中也发现 Rot. Cube 织构的单晶体铝在轧制过程中逐渐转向 Cu 取向的规律。先前的研究工作也表明, 随着变形增加, $\{001\}\langle 100 \rangle$ 向 S-取向转化^[16], $\{001\}\langle 110 \rangle$ 向 Cu 取向转化^[16, 17]。综上所述, 冷轧时使用不同的润滑剂, 由于摩擦系数不同, 导致金属不均匀变形程度不同。试样 IIB2, IIB3 中 Rot. Cube-织构仍然比较强 (图 1(c), 2(c)), 这可能是由于 2[#], 3[#] 含有微量的稀土 Y, 含稀土化合物粒子在变形过程中阻碍位错运动, 可能使得 Rot. Cube 织构难以绕 TD 转动。而且, 随着微量元素 Y 增加, Rot. Cube 织构增强。表明微量 Y 的加入也可能导致不均匀变形程度增加。

除摩擦条件外, 轧制几何因素 l/d (其中 l 为轧制区接触弧长, d 为试样轧制前厚度) 也可引起试样的不均匀变形。文献[3, 6]指出, 在润滑条件不变的情况下, 当道次压下量 $\geq 50\%$, 且 $l/d > 5$ 时, 不均匀变形产生, 并随着 l/d 值及道次变形量继续增加, 不均匀变形愈严重。表 3 表示了每道次变形量及 l/d 值, 由表 3 可见, 试样轧到 0.6 mm 或 0.55 mm 厚以后, 道次变形量为 50% 左右, $l/d > 7$ (有的甚至达到 11), 会导致严重的不均匀变形。机油和煤油两种润滑条件轧制时, 试样在轧制变形过程中所受的法向应力 (p_c) 及单位摩擦力 (τ) 不同。煤油轧制时, 摩擦力 τ 比较大, 当 τ 达到临界剪切应力 k 时 (如图 5(a) 所示), 开始产生剪切变形, 在较大的剪切摩擦作用下导致轧制箔中剪切织构的形成。机油润滑时, 冷轧箔中没有发现由不均匀变形引起的剪切织构, 这可能是由于摩擦力 τ 比较小, 不能达到剪切临界值 (图 5(b)), 因而, 即使几何因素 l/d 比较大, 由于机油良好的润滑效果, 金属变形也比较均匀。因此, 不能只从单方面分析摩擦条件或 l/d 参数的变化对金属不均匀变形程度的影响, 应该结合考虑。

文献[5]研究了铝单晶 (348) $[\bar{1}\bar{1}\bar{4}6]$ 经不同的 l/d 值 (6.5, 8.0) 轧制变形, 指出随着 l/d 和轧制

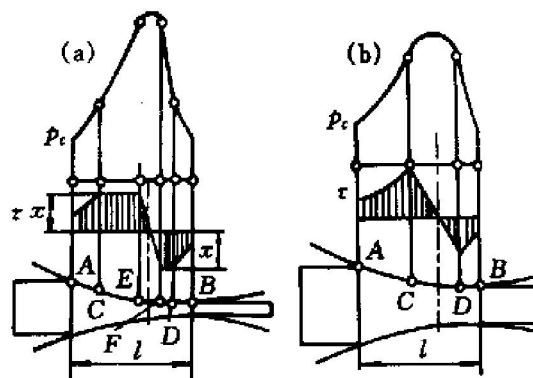


图 5 轧制变形过程中 试样受力情况^[13]

Fig. 5 Force analyses during rolling^[13]

(a) —Lubricating with kerosene;

(b) —Lubricating with machine oil

程度增加, (3 48) $[\bar{1}\bar{1}\bar{4}6]$ 取向的中心稍有移动且织构变强, 但由于不均匀变形, 晶体中形成了 (001) $[100]$ 变形结构, 这种变形结构既不能用均匀变形的滑移旋转理论也不能用 Dillamore 等^[18] 的模型解释。这种不均匀变形造成了一种没能预料到的晶体滑移-旋转, 为再结晶立方织构提供了良好的形核条件。本文作者也发现, 煤油润滑轧制的试样中存 在大量的剪切带, 带中存在立方取向的结构。

[REFERENCES]

- [1] Asbeck H O, Mecking H. Influence of friction and geometry of deformation on texture inhomogeneities during rolling of Cu single crystals as an example [J]. Met Sci Eng, 1978, 34: 111–119.
- [2] Hirsch J, Lücke K, Mecking H. Comparison of experimental and theoretical rolling textures of FCC metals [A]. Proc ICOTOM 7 [C]. Noordwijkerhout, 1984. 83–88.
- [3] ZHANG Xirong. Entstehung und Entwicklung der Walz und Rekristallisationstextur in Cu-Zn und Cu-P Legierungen in Abhängigkeit von der Walz τ und Glühtemperatur sowie von der Ausgangskorngröße [D]. RWTH-Aachen, 1987.
- [4] LIU C M, ZHANG X M, CHEN Z Y, et al. The effect of hot finishing rolling on cube texture on high purity aluminum foils [J]. Trans Non ferrous Met Soc China, 2001, 11(1): 103–107.
- [5] Kneynsberg H P, Verbraak C A, Ten Bouwhuijs M J. The influence of inhomogeneous rolling on the capacity of aluminum anode foil material [J]. Mater Sci Eng, 1985, 72: 171–176.
- [6] Kamijo T, Adachihara H, Fukutomi H, et al. Development of cube texture in aluminum single crystals of a star

- ble orientation [J]. *Acta Metall*, 1992, 40(4): 693–698.
- [7] Bunge H J. *Mathematische Methoden der Texturanalyse* [M]. Berlin: Akademie Verlag, 1969.
- [8] Lücke K, Pospiech M J, Virnich K H, et al. On the problem of the reproduction of true orientation distribution from pole figures [J]. *Acta Metall*, 1981, 29: 167–185.
- [9] YAO Ruohao (姚若浩). Friction and Lubrication of Metals during Plastic Deformation (金属压力加工过程中的摩擦与润滑) [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1993. 125–157.
- [10] MAO Weimin (毛卫民), ZHANG Xinming (张新明). Quantitative Texture Analysis of Crystalline Materials (晶体材料织构定量分析) [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1995. 96–102.
- [11] Zhou Y, Tóth L S, Neale K W. On the stability of the ideal orientations of rolling textures for FCC polycrystals [J]. *Acta Metall*, 1992, 40: 3179–3193.
- [12] Hirsch J, Lücke K. Mechanism of deformation and development of rolling textures in polycrystalline FCC metals II simulation and interpretation of experiments on the basis of Taylor-type theories [J]. *Acta Metall*, 1988, 36: 2883–2904.
- [13] Lee C S, Duggan B J. A simple theory for the development of inhomogeneous rolling textures [J]. *Metall Trans A*, 1991, 22A: 2637–2643.
- [14] Hjelen J, Ørsund R, Nes E. On the origin of recrystallization textures in aluminium [J]. *Acta Metall*, 1991, 39(7): 1377–1404.
- [15] Köhlhoff G D. *Texture und Mikrostrukturentwicklung bei Walzformung und Rekristallisation von Einkristallen Kubischflächenzentrierter Metalle* [D]. RWTH-Aachen, 1988.
- [16] Köhlhoff G D, Krentscher B, Lücke K. Texture Development in a Cube Oriented Copper Single Crystal [A]. *Proc ICOTOM 7* [C]. Noordwijkerhout, 1984. 95–100.
- [17] Köhlhoff G D, Hirsch J, Schlippenbach U V, et al. Microstructure and recrystallization of rolled FCC single crystals [A]. *Proc ICOTOM 6* [C]. Tokyo, 1981: 481–498.
- [18] Dillamore I L, Katoh H. The mechanisms of recrystallization in cubic metals with particular reference to their orientation dependence [J]. *Metal Science*, 1974, 8: 73–83.

Influence of lubricants on deformation textures in high purity Al

ZHANG Xin-ming, JIANG Hong-hui, XIAO Ya-qing,

CHEN Zhi-yong, LIU Chu-ming, ZHOU Zhuo-ping

(Department of Materials Science and Engineering, Central South University,
Changsha 410083, P. R. China)

[Abstract] The influence of the cold rolling lubricants on the deformation texture in high purity Al was investigated in detail by ODF's. The results show that the foil which is deformed at room temperature at high reduction with machine oil lubrication has developed the typical rolling textures of FCC metals, which consist of B -, Cu - and S -component, and the maximum peak of the orientation density $f(g)$ trends towards S position; in the case of the kerosene lubricant, however, the rolling textures were comparatively weak, and at the same time the shear texture $\{001\}\langle 110 \rangle$ is developed. The rolling deformation was much more homogeneous and the shear strain was lower on the condition of machine oil lubricant because of its high viscosity. The grain orientations gathered around α -fibre at low reduction and shifted towards β -fibre with increasing reduction. At high reduction the final texture became the copper-type rolling texture of FCC metals. Comparatively, the viscosity of kerosene is much lower, the coefficient of friction between the roller and the metal surface is higher during rolling, and it results in the inhomogeneous deformation. At lower reduction the shear texture (Rot. Cube texture) in the rolled surface of the foil appeared, the Rot. Cube orientation shifted towards Cu orientation with increasing reduction.

[Key words] high purity aluminum; deformation texture; shear texture; lubrication

(编辑 黄劲松)