

[文章编号] 1004- 0609(2002)04- 0634- 05

# 几何因素与摩擦耦合对高纯铝箔剪切织构的影响<sup>①</sup>

邓运来, 张新明, 刘 瑛, 唐建国, 周卓平

(中南大学 材料科学与工程系, 长沙 410083)

**[摘 要]** 采用取向分布函数(ODF)研究了轧制几何因素、轧制摩擦条件对高纯铝箔轧制织构的影响。结果显示, 如果轧制摩擦因数大, 当处于均匀变形几何条件  $1 < l_d/d < 5$  时, 仍会出现粘着剪切变形, 导致产生剪切织构  $Cub_{\text{END}}$ ; 如果润滑条件良好, 即使  $l_d/d$  达到 7~ 10, 处于不均匀变形轧制几何条件时, 也未发现剪切织构  $Cub_{\text{END}}$ 。因此, 考虑剪切织构  $Cub_{\text{END}}$  产生时, 要注意到在几何因素与摩擦条件的耦合作用中, 摩擦条件对  $Cub_{\text{END}}$  织构的产生具有更加明显的影响。

**[关键词]** 轧制几何因子; 摩擦; 织构; 高纯铝箔

**[中图分类号]** TG 339

**[文献标识码]** A

轧制变形时几何因素 ( $l_d/d$ ) 与道次变形程度 ( $\varepsilon$ ) 是引起不均匀变形的两个主要因素。一般认为, 在  $15\% < \varepsilon < 40\%$ ,  $1 < l_d/d < 5$  的情况下, 变形是均匀的<sup>[1~ 4]</sup>。有关摩擦条件的研究表明<sup>[5~ 11]</sup>, 轧辊与轧件间的摩擦力也会引起剪切应变在轧件厚度方向上的不均匀分布, 轧件表面的剪切应变最大。轧件表面的强烈剪切应变会引起剪切织构组分(如  $Cub_{\text{END}}\{001\} \langle 110 \rangle$  等)的产生。但这些关于摩擦条件影响的研究往往又忽略了几何因素变化范围的区分。在实际轧制过程中, 辊径不可能经常变动(忽略磨辊引起的辊径变化), 此时, 对几何因素与道次变形程度的评价可以通过考察几何因素来反映, 实际轧制过程的变形不均匀性是几何因素与摩擦条件耦合的结果, 研究这种耦合变形条件下的轧制织构变化规律, 对于实际轧制过程的变形与织构控制具有十分现实的意义。本文作者在总变形程度 ( $E$ ) 相同, 且不改变轧辊直径的情况下, 通过改变道次变形程度与轧制润滑剂, 研究了轧制几何因素与摩擦条件耦合对高纯铝箔轧制织构的影响。

## 1 实验

### 1.1 样品制备

从 7.0 mm 厚的热轧高纯铝板材(99.99%)上切下尺寸为 7.0 mm × 100 mm × 300 mm 的块状试样。将这些块状试样在箱式电阻炉中退火(400 ℃, 4 h), 将块状试样分作 A, B, C 3 个组, A 组采用较

大的道次变形程度, B, C 两组采用较小的道次变形程度(表 1); A, B 两组试样冷轧润滑剂动力粘度为  $\eta = (1.9 \sim 2.0) \times 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (1<sup>#</sup>), C 组冷轧润滑剂动力粘度为  $\eta = (43 \sim 48) \times 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (2<sup>#</sup>)。3 组试样都采用直径为 170 mm, 长度为 400 mm 的两辊不可逆轧机轧成 0.11 mm 厚的铝箔。 $\varepsilon$  代表道次变形程度,  $l_d$  为轧制接触变形区的长度,  $d$  代表轧件的轧前厚度, 各组试样的  $\varepsilon$ ,  $l_d/d$  如表 1 所示。A, B 两组试样厚度为 0.45 mm 时取样, 分别记为 A45 和 B45。A, B, C 3 组试样厚度为 0.11 mm 时取样, 分别记为 A11, B11, C11。试样在测试极图前用酒精清洗。

### 1.2 织构测算

在采用“Lens+ ThinFilm”光路系统的 X'pert-MRD 衍射仪的织构测角装置上, 用铜靶辐射, 电压 40 kV, 电流 40 mA, 按 Schulz 反射法测量了试样的(111), (200) 和(220) 3 个不全极图, 倾角 ( $\phi$ ) 从  $0^\circ \sim 80^\circ$ , 转角 ( $\psi$ ) 从  $0^\circ \sim 360^\circ$ , 步进角  $\Delta\phi = \Delta\psi = 5^\circ$ , 将测得的极图数据用 X'pert Texture 分析软件计算样品的三维取向分布函数(ODF)。

## 2 实验结果

### 2.1 样品 ODF 图的基本特征

图 1 所示为 A, B, C 3 组样品的 ODF 图。由图可见, 所有样品中都存在黄铜织构( $Bs\{011\}$ )

① [基金项目] 国家重点基础研究发展规划资助项目(1999064908)  
[作者简介] 邓运来(1969-), 男, 讲师, 博士研究生。

[收稿日期] 2002- 02- 20; [修订日期] 2002- 05- 10

表 1 试样轧制变形的道次变形程度和几何因素

Table 1 Pass thickness reduction and rolling geometry of samples

Thickness/mm	5.00	3.50	2.50	1.80	1.20	0.90	0.70	0.55	0.45	0.32	0.22	0.16	0.13	0.11	
Group A	$\epsilon/\%$	50.0		48.6		50.0			50.0		51.1			50.0	
	$l_d/d$		2.5		3.4		4.9		6.9		9.8			13.9	
Group B, C	$\epsilon/\%$	28.6	30.0	28.6	28.0	30.0	25.0	22.2	21.4	18.2	28.9	31.3	27.3	18.8	15.4
	$l_d/d$	1.9	2.3	2.6	3.1	4.0	4.2	4.6	5.1	5.3	7.4	9.1	10.3	10.0	10.0

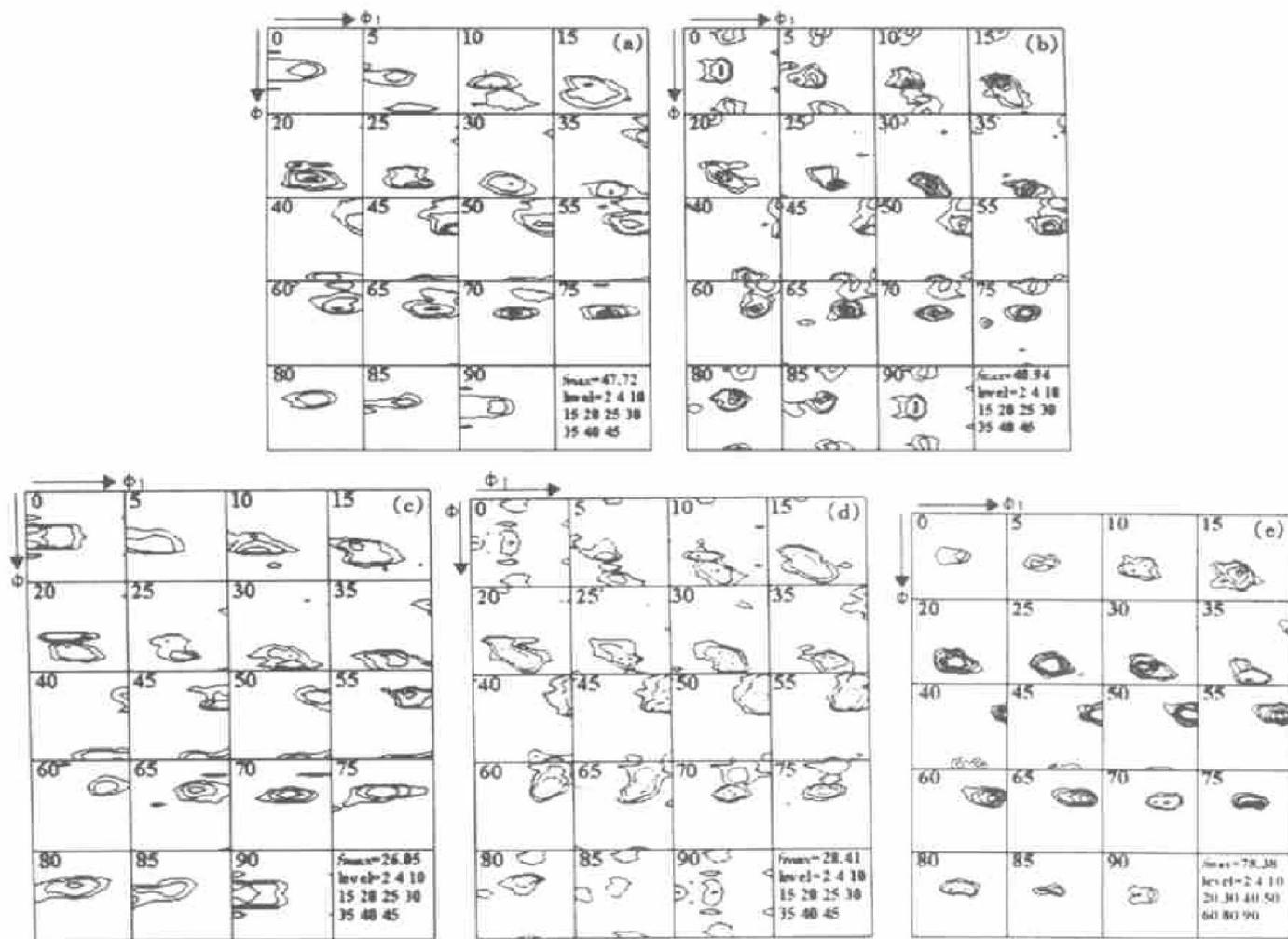


图 1 A, B, C 3 组样品的 ODF 图

Fig. 1 ODFs of samples A, B and C

(a) —A45; (b) —A11; (c) —B45; (d) —B11; (e) —C11

$\langle 211 \rangle$ 、铜织构( $\text{Cu}\{112\} \langle 111 \rangle$ )和 S 织构( $\{123\} \langle 634 \rangle$ )。在 0.11 mm 厚的样品中, 用低粘度润滑剂(1<sup>#</sup>)的样品 A11, B11 中含有绕轧面法向旋转立方织构( $\text{Cub}_{\text{ND}}$ ,  $\{110\} \langle 001 \rangle$ )组分, 但样品 B11 中的要弱一些, 而用高粘度润滑剂(2<sup>#</sup>)的 C11 样品中未出现  $\text{Cub}_{\text{ND}}$  组分。

### 2.2 几何因素对冷轧织构的影响

A, B 两组试样冷轧均采用低粘度润滑剂(1<sup>#</sup>), A 组试样采用大道次变形程度, B 组试样采用小道次变形程度。由于辊径一定, 轧制几何因素

( $l_d/d$ ) 只受道次变形程度( $\epsilon$ )的影响, 两组试样的  $\epsilon$ ,  $l_d/d$  如表 1 所示。0.45 mm 时, A 组试样的轧制几何因素( $l_d/d$ ) 已从 2.5 增加到 6.9, B 组试样的  $l_d/d$  为 5.3, 从 0.45 mm 轧至 0.11 mm, A, B 两组试样的  $l_d/d$  都已大于 7.0。在厚度从 0.45 mm 轧到 0.11 mm 时, A, B 两组试样的总变形程度相同, 其  $\beta$  取向线织构组分的取向密度极大值( $f(g)$ ) 及其在欧拉空间中的位置如图 2 所示。由图可见, 在采用大道次变形量的情况下(A45, A11),  $E = 93.6\%$  时, Cu, S 织构组分的  $f(g)$  分别为 47.72, 20.61, Cu 织构组分含量明显高于 S 织构组

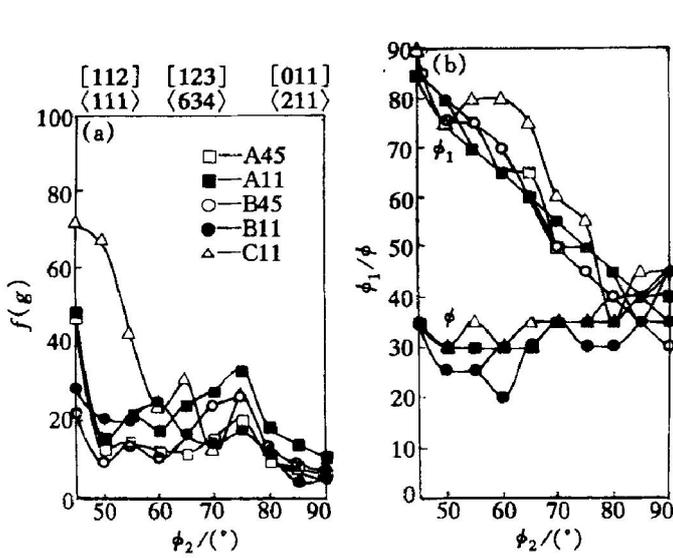


图2  $\beta$ 取向线 (a) 及在欧拉空间的位置(b)

Fig. 2 Orientation densities (a) and positions in Euler space (b) along  $\beta$  fibre of samples A, B and C

分;当  $E$  从 93.6% 增加到 98.4%, Cu 组分含量几乎不变, Bs 组分含量略有升高, 主要是 S 织构组分含量增加,  $f(g)$  从 20.61 增加到 43.21。在采用小道次变形量的情况下(B45, B11),  $E = 93.6\%$  时, Cu, S 织构组分的  $f(g)$  分别为 21.98, 26.05, S 织构组分略强于 Cu 织构组分,  $E$  从 93.6% 增加到 98.4%, Cu 织构组分含量明显提高。S 织构组分的取向密度极大值的位置从  $(65^\circ, 30^\circ, 75^\circ)$  变为  $(70^\circ, 20^\circ, 60^\circ)$ 。

当样品轧至 0.45 mm ( $E = 93.6\%$ ) 时, 样品 A45 的 Cu 织构组分取向密度明显高于样品 B45, 而 B, S 织构组分取向密度值相差不大; 随  $l_d/d$  增大 ( $> 7.0$ ), 样品轧至 0.11 mm ( $E = 98.4\%$ ) 时, 虽然样品 A11 的 Cu, S, Bs 织构组分强于 B11 样品, 但差别已没有 0.45 mm 时的大。

### 2.3 摩擦条件对轧制织构的影响

B, C 两组试样采用较小的相同道次变形程度, 但使用的冷轧润滑剂不同。结果表明, 在使用高粘度润滑剂(2#)的 C11 样品中 Cu 织构组分强于使用低粘度润滑剂(1#)的 B11 样品(图 2), 但 B11 样品中明显含有  $Cub_{END}$  织构组分(如图 3 所示)。从图 3 还看出采用 1# 润滑剂的 A, B 两组样品中, 在试样厚度为 0.45 mm 和 0.11 mm 时, 尽管道次变形程度与几何因素不同, 但都含有  $Cub_{END}$  织构组分, 大道次变形程度轧制的 A 组试样中  $Cub_{END}$  织构组分增强的趋势更明显。

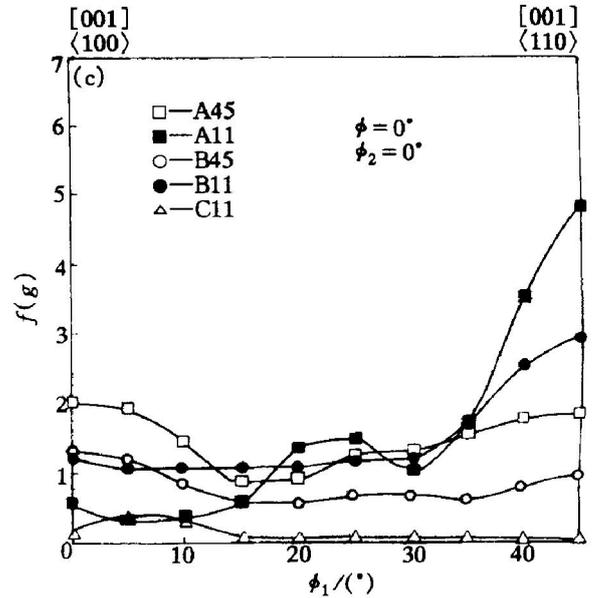


图3 沿轧面旋转立方织构的取向分布

Fig. 3 Orientation densities of cube and normal direction-rotated cube orientation

### 3 讨论

对轧制变形的应变分布规律的研究表明<sup>[2-4]</sup>,  $\epsilon = 15\% \sim 40\%$ ,  $1 < l_d/d < 5$  时, 轧制变形是均匀的。轧件表面的不均匀剪切变形主要发生在两种情况下: a)  $\epsilon = 3\% \sim 15\%$ ,  $l_d/d < 1$ ; b)  $\epsilon = 45\% \sim 50\%$ ,  $l_d/d > 5$ 。随  $\epsilon$  与  $l_d/d$  的增大, 不均匀剪切变形越来越严重。在辊径一定的情况下, 道次变形程度与几何因素相互联系, 一起影响轧制变形区内的应变分布。A 组试样轧至 0.45 mm 时,  $\epsilon = 48\% \sim 50\%$ ,  $l_d/d$  达到 6.9, 试样由 0.45 mm 轧至 0.11 mm 时,  $l_d/d \geq 9.8$ , 轧件表面会产生严重的不均匀剪切变形, 晶粒取向向  $Cub_{END}$  转动<sup>[12]</sup>, A 组试样的轧制几何因素和织构特点符合上述规律; 同时, A 组试样采用 1# 润滑剂, 摩擦因数大, 也容易导致表面发生粘着剪切变形, 导致生成剪切织构  $Cub_{END}$ 。

按上述几何因素与道次变形程度对轧制变形的影响规律, B, C 两组样品在被轧至 0.45 mm 前,  $15\% < \epsilon < 30\%$ ,  $1 < l_d/d < 5.3$ (见表 1), 应该不会出现不均匀剪切变形, 但 B45 样品的织构组分中已有弱的  $Cub_{END}$  织构(见图 3), 表现出不均匀剪切应变的织构特点; 在 0.45 mm 后, B, C 两组样品都已满足  $l_d/d > 5$ , 应该出现不均匀剪切变形<sup>[2-4]</sup>, 只有用低粘度润滑剂(1#)的 B11 样品出现  $Cub_{END}$  织构组分, 但 C11 样品的织构组态却未发现

Cub<sub>END</sub>剪切织构。因此, 在考虑不均匀轧制剪切变形时, 不能只考虑轧制几何因素( $\epsilon, l_d/d$ ), 还应考虑摩擦条件的影响。

影响轧制剪切变形分布的实质是轧辊与轧件之间的摩擦力( $F$ )。在摩擦满足  $F = \mu P_c$  ( $\mu$  为摩擦因数) 时, 轧制变形区由滑动区组成, 轧件表面未出现粘着变形区; 当摩擦力( $F$ ) 增大至轧件的临界剪切应力( $\tau_c$ ) 时, 轧制变形区由滑动区、粘着变形区与停滞区组成, 粘着变形区内的摩擦力会引起强烈的不均匀剪切应变, 从而导致晶体向 Cub<sub>END</sub> 转动。摩擦力是轧制几何因素与摩擦条件耦合的结果, 在  $1 < l_d/d < 5$  时, 采用低粘度润滑剂, 摩擦因数大, 摩擦力也会达到临界剪切应力( $\tau_c$ ), 可能出现粘着变形区; 当  $l_d/d > 5$  时, 采用高粘度润滑剂, 摩擦因数小, 摩擦力也可能达不到临界剪切应力( $\tau_c$ ), 故不出现粘着变形区。

在轧制几何参数与摩擦条件的耦合作用下, 本文中 3 组试样的轧制几何因素(见表 1) 与摩擦条件的耦合情况及其织构特点(见图 3) 可以解释为: A45, A11 试样的  $l_d/d > 5$ ,  $\epsilon$  和摩擦因数( $\mu_1$ ) 都是最大的, 粘着变形区的剪切应变最强(见图 4(a)), 出现了较强的 Cub<sub>END</sub> 织构组分; B 组试样变形到 0.45 mm ( $E = 93.6\%$ ) 时,  $\epsilon$  小,  $2 < l_d/d < 5.3$ , 但摩擦因数( $\mu_1$ ) 大, 出现了弱的粘着变形区(见图 4(b)), 有弱的 Cub<sub>END</sub> 织构组分, B 组样的变形到 0.45 mm 之后, 虽然  $\epsilon$  较 A 组试样小, 但  $l_d/d > 7$ , 与 A 组试样已没有本质差别, 织构组分也越

来越接近; C 组试样在整个变形过程中,  $\epsilon$ , 摩擦因数( $\mu_2$ ) 都较小, 尽管  $l_d/d$  不断增大, 试样变形到 0.45 mm 之后,  $l_d/d = 7 \sim 10$ , 但仍没有发现剪切应变产生的 Cub<sub>END</sub> 织构(见图 4(c))。

上述分析显示, 在轧辊辊径一定的情况下, 如果用摩擦因数较大的润滑剂(如 1<sup>#</sup>), 不管是采用大道次变形程度(约为 50%), 还是采用较小的道次变形程度(约为 15%~30%), 当  $l_d/d > 1$  时, 轧辊与辊件间的摩擦力( $F$ ) 会达到轧件临界剪切应力( $\tau_c$ ), 使高纯铝出现剪切织构 Cub<sub>END</sub>; 如果用摩擦因数较小的润滑剂(如 2<sup>#</sup>), 即使  $l_d/d > 7$ , 仍未出现 Cub<sub>END</sub> 织构。这表明在轧制几何参数与摩擦条件耦合作用中, 摩擦条件对 Cub<sub>END</sub> 织构组分的产生具有更加明显的影响。

### 4 结论

1) 在摩擦因数大时, 当  $1 < l_d/d < 5$  时, 轧制织构中仍会出现 Cub<sub>END</sub> 剪切织构组分; 即使  $l_d/d \approx 7 \sim 10$ , 在润滑情况良好时, 仍未发现有剪切织构 Cub<sub>END</sub>。

2) 轧制几何因素  $1 < l_d/d < 5$  不是均匀变形的充要条件, 轧辊与辊件间的摩擦力( $F$ ) 需综合考虑几何因素与摩擦的耦合作用; 在轧制几何参数与摩擦条件耦合作用中, 摩擦条件对 Cub<sub>END</sub> 织构组分的产生具有更加明显的影响。

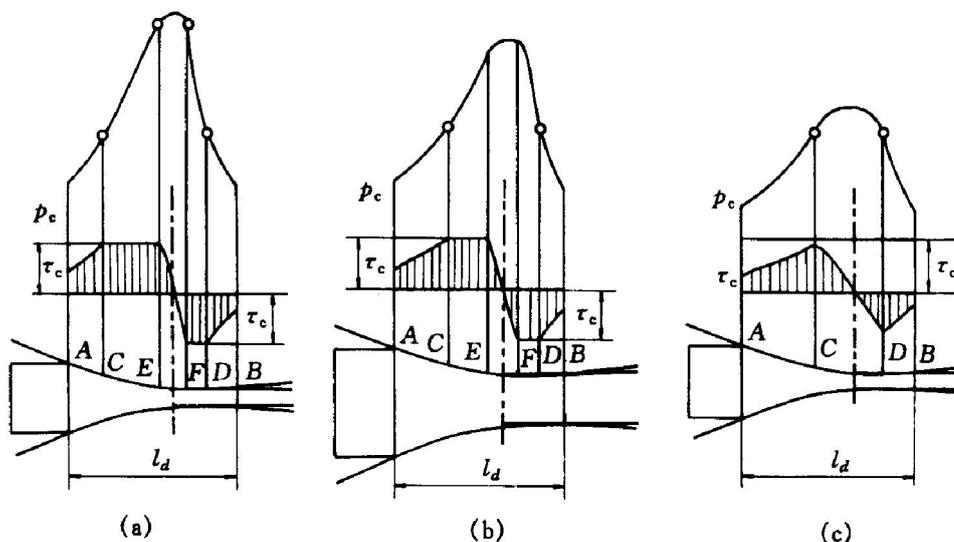


图 4 轧制几何因素与摩擦耦合下的摩擦力情况( $\mu_1 > \mu_2$ )

Fig. 4 Friction distribution in coupling of rolling geometry and friction

(a)  $-\mu_1, l_d/d > 5$ ; (b)  $-\mu_1, 1 < l_d/d < 5$ ; (c)  $-\mu_2, l_d/d > 5$

AC and BD —Sliding zone; CD —Adhesion zone;

CE and FD —Shearing zone; EF —Stagnating zone

## [ 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 ]. *Materials Science and Engineering*, 1978, 34: 111– 119.
- [ 2 ] Truszkowski W, Krol J, Major B. Inhomogeneity of rolling texture in FCC metals [ J ]. *Metallurgical Transactions A*, 1980, 11A: 749– 758.
- [ 3 ] Truszkowski W, Krol J, Major B. On penetration of shear texture into the rolled aluminum and copper [ J ]. *Metallurgical Transactions A*, 1982, 13A: 665– 669.
- [ 4 ] Kneynsberg H P, Verbraak C A, Bouwhuijs M J Ten. The influence of inhomogeneous rolling on the capacity of aluminium anode foil material [ J ]. *Materials Science and Engineering*, 1985, 72: 171– 176.
- [ 5 ] CHEN Zhi-yong, ZHANG Xir-ming, ZHOU Zhou-ping, et al. Simulation of rolling texture of aluminum with lath model [ J ]. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 1999, 9 (2): 307– 311.
- [ 6 ] Lee C S, Duggan B J. A simple theory for the development of inhomogeneous rolling textures [ J ]. *Metallurgical Transactions A*, 1991, 22A: 2637– 2643.
- [ 7 ] Engler O, Huh M-Y, Tome C N. A Study of through-thickness texture gradients in rolled sheets [ J ]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2000, 31A: 2299– 2315.
- [ 8 ] Park Jong-Jin. Predictions of texture and plastic anisotropy developed by mechanical deformation in aluminum sheet [ J ]. *J Mater Proc Technol*, 1999, 87: 146– 153.
- [ 9 ] Bhattacharyya A, Er-Danaf E, Kalidindi S R, et al. Evolution of grain-scale microstructure during large strain simple compression of polycrystalline aluminum with quasi-columnar grain: OIM measurements and numerical simulations [ J ]. *International Journal of Plasticity*, 2001, 17: 861– 883.
- [ 10 ] 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 Xir-ming, JIANG Hong-hui, XIAO Ya-qing, et al. Influence of lubricants on deformation texture in high purity Al [ J ]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2001, 11(5): 785– 790.
- [ 11 ] ZHANG X M, Xiao Y Q, Jiang H H, et al. Cube recrystallization texture in high-purity aluminum foils rolled with different lubrication [ A ]. *Gottstein G, Molodov D A. Recrystallization and growth Proceedings of the First Joint International Conference [ C ]*. Springer, RWTH-Aachen, 2001. 1335– 1340.
- [ 12 ] Hirsch J, Luecke K. Mechanism of deformation and development of rolling textures in polycrystalline F. C. C. metals ( II ) —Simulation and interpretation of experiments on the basis of Taylor-type theories [ J ]. *Acta Metall* 1988, 36(11): 2883– 2904.

## Effect of deformation geometry and friction on shear texture in high purity aluminum foils

DENG Yur-lai, ZHANG Xir-ming, LIU Ying, TANG Jian-guo, ZHOU Zhuo-ping  
(Department of Materials Science and Engineering, Central South University,  
Changsha 410083, China)

**[ Abstract ]** Coupling effect of rolling geometry and friction on shear texture in high purity aluminum foils was investigated by orientation distribution function (ODF). The results show that the shear texture ND-rotated cube texture (Cube<sub>ND</sub>) is observed even if the homogeneous deformation condition,  $1 < l_d/d < 5$ , is met, which may be attributed to the heavy shear strain in deformation zone due to high friction conditions. In spite of the large ratio of  $l_d/d$ , 7~10, at which there should occur heavy shear strain, the Cube<sub>ND</sub> is not observed because of low friction conditions. In regard to the Cube<sub>ND</sub> of high purity aluminum foils, the rolling geometry should be considered together with friction; the effect of friction on the formation of Cube<sub>ND</sub> may outweigh that of rolling geometry in their coupling.

**[ Key words ]** rolling geometry; friction; shear texture; high purity Al foils

(编辑 何学锋)