

文章编号:1671-6833(2009)01-0025-05

## 线材冷轧织构演变的定量研究

姚旭升<sup>1</sup>, 刘沿东<sup>1</sup>, 蒋奇武<sup>2</sup>, 左良<sup>1</sup>

(1. 东北大学 材料各向异性与织构教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110004; 2. 鞍钢集团 冷轧硅钢厂, 辽宁 鞍山 114002)

**摘要:** 为了探讨圆柱型线材压扁过程中晶粒取向的变化规律, 借助于 XRD 织构衍射仪与三维取向分布函数(ODF)分析, 研究了异步轧制的 ECAP 一道次处理后的实验样品的织构随着冷轧压下量的演变规律. 实验结果表明: 从快辊侧分析, 织构取向密度沿着冷轧实验试样的厚度从表层到中心层随着形变量的增加, 冷轧纯铁试样中主要织构组分逐渐形成了  $\langle 110 \rangle // RD$  (轧向) 的  $\alpha$ -纤维织构和  $\langle 111 \rangle // ND$  (轧面法向) 的  $\gamma$ -纤维织构, 且织构组分的取向密度级别逐渐增加. 另外, 通过反极图分析与定量计算可以知道: 不同压下量下,  $\langle 110 \rangle$  织构组分体积分数由表及里呈现增长趋势.  $\langle 100 \rangle$  织构组分体积分数在压下量为 0%, 40% 时由表及里先上升后下降. 当压下量为 80% 时则出现相反变化趋势. 当压下量为 0% 时,  $\langle 111 \rangle$  织构组分体积分数先下降后升高. 而压下量为 40%, 80% 时  $\langle 111 \rangle$  织构组分体积分数呈现上升趋势, 沿着试样厚度存在一定差别.

**关键词:** ECAP; 纯铁; 轧制; 织构; 取向分布函数(ODF)

**中图分类号:** TG 142.4 **文献标识码:** A

### 0 引言

超窄钢带在工业生产中有着极其广泛的用途, 如锯条、弹簧、航天航空制导系统和军工用合金扁钢丝、定时发条、汽车雨刮器骨架以及纺织行业使用的钢片等<sup>[1-9]</sup>. 而在超窄钢带制备过程中, 形变会引起位错滑移导致晶格转动、晶体取向的择优形核和生长, 从而使材料产生各向异性. 对材料这种各向异性可以通过调整织构组分的变化来提高和改善金属材料的性能<sup>[10]</sup>. 笔者采用三维取向分布函数(ODF)分析法研究了圆柱型线材冷轧过程中织构的变化规律, 为平辊轧制线材的制备工艺提供一定理论基础.

### 1 实验材料与方法

实验材料选用经过一道次 ECAP 处理的纯铁(纯度为 99.9%). 首先将  $\Phi 10 \times 10$  mm 样品冷轧厚度为 2.75 mm, 长度为 12 mm 的实验材料. 然后利用四辊轧机对上述样品进行轧制, 分别得到压下量为 0%、40%、80% 的实验试样. 从不同压

下量的实验样品上截取 12 mm  $\times$  20 mm 的织构测试试样, 采用 Schulz 背反射法<sup>[11]</sup>, 利用 Philips 公司生产的 X'Pert PRO 型织构测量衍射仪上进行织构测定, 织构检测采用 Co 靶 (CoK $\alpha$  辐射), 管电压为 35 kV, 管电流为 40 mA. 对实验样品进行  $\{110\}$ ,  $\{200\}$ ,  $\{211\}$  三张不完整极图的测定, 测定范围为  $\alpha = 0^\circ \sim 360^\circ$ ,  $\beta = 0^\circ \sim 70^\circ$ , 步长为  $5^\circ$ . 经过对试样测定结果扣除测定背底, 并且与标准粉末样品测定数据进行比较后获得实验的织构数据. 同时, 采用东北大学“二步法”<sup>[12]</sup> 织构分析软件对织构实验数据进行织构计算并绘制取向分布函数(ODF)恒  $\Phi$  截面图. 利用取向分布函数对实验样品的测定结果进行分析与比较.

### 2 实验结果

图 1~3 为 0%, 40%, 80% 的冷轧纯铁试样不同厚度的 ODF 恒  $\Phi$  截面图. 由图 1 可以看出压下量为 0% 试样的  $\gamma$  纤维织构 ( $\{111\} \langle uvw \rangle$ ) 的强度随着距离试样表层深度增加而增强, 在试样的中心层达到最大. 而且  $\gamma$  纤维织构中  $\{111\}$

收稿日期: 2008-09-15; 修订日期: 2008-10-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50671021); 教育部新世纪人才计划资助项目(NCET-06-0287)

作者简介: 姚旭升(1972-), 男, 山东寿光人, 工程师, 东北大学博士生, 主要从事金属材料形变与再结晶织构的分析与模拟. E-mail: yaoxsh1@163.com

$\langle 112 \rangle$  结构的强度明显高于  $\{111\} \langle 110 \rangle$  织构强度. 试样的  $\alpha$  纤维织构 ( $\{hkl\} \langle 110 \rangle$ ) 中  $\{001\} \langle 110 \rangle$  至  $\{112\} \langle 110 \rangle$  的强度沿着试样由表及里下降.  $\{001\}$  织构组分沿着试样厚度逐渐增强. 由图 2 可以看出: 当压下量达到 40% 时, 试样亚表层的  $\alpha$  纤维织构与  $\gamma$  纤维织构比压下

量为 0% 时明显增强. 同样, 试样的  $\gamma$  纤维织构 ( $\{111\} \langle uvw \rangle$ ) 与  $\alpha$  纤维织构 ( $\{hkl\} \langle 110 \rangle$ ) 的强度呈现与 0% 相同变化规律. 由图 3 可以看出: 试样由表层到中心层都已经形成了较强的  $\gamma$  纤维织构与  $\alpha$  纤维织构, 并且强度随着试样厚度的增加而增大.

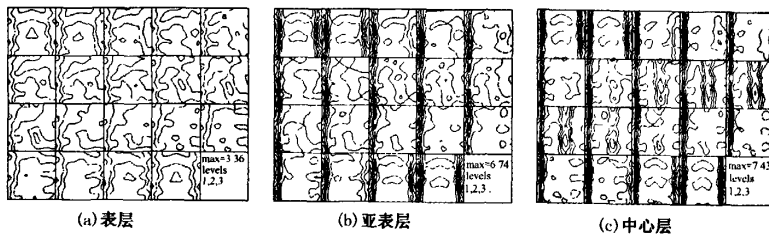


图 1 冷轧形变量为 0% 的纯铁的 ODF 恒  $\Phi$  截面图

Fig. 1 Constant sections of ODFs on cold rolled iron with 0% reduction

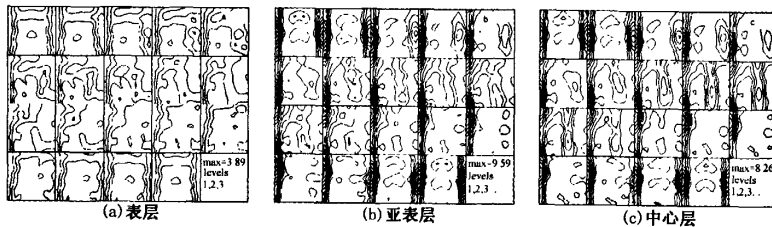


图 2 冷轧形变量为 40% 的纯铁的 ODF 恒截面图

Fig. 2 Constant sections of ODFs on cold rolled iron with 40% reduction

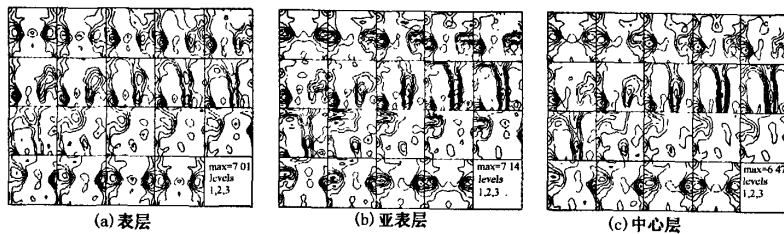


图 3 冷轧形变量为 80% 的纯铁的 ODF 恒截面图

Fig. 3 Constant sections of ODFs on cold rolled iron with 80% reduction

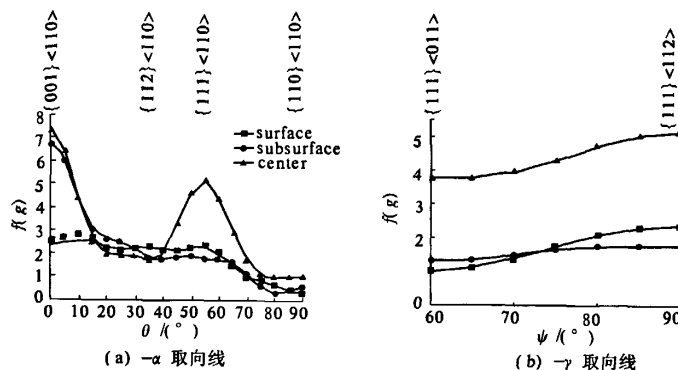


图 4 冷轧压下量为 0% 的纯铁试样的取向密度变化

Fig. 4 Orientation density variation on cold-rolled iron with 0% reductions

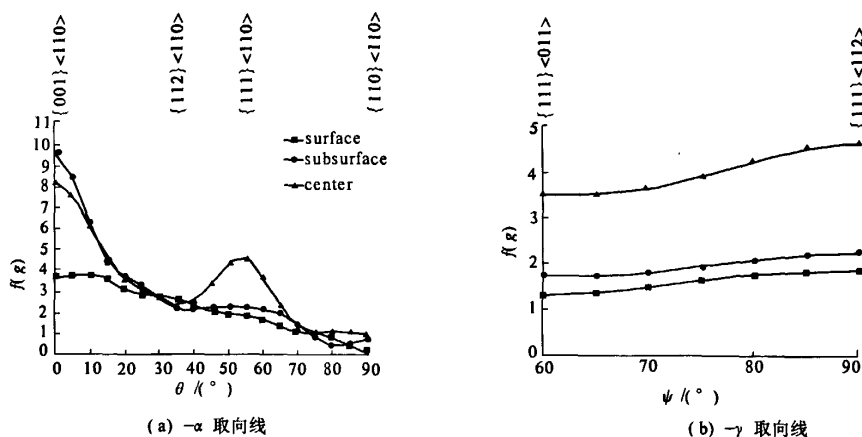


图 5 冷轧压下量为 40% 的纯铁试样的取向密度变化

Fig. 5 Orientation density variation on cold-rolled iron with 40% reductions

图 4~6 分别给出了形变量 0%, 40%, 80% 时冷轧纯铁试样的取向密度的变化规律。由图 4 可以看出表层、亚表层的  $\alpha$  纤维织构强度随着  $\theta$  角的变化趋势基本相同; 中心层明显与表层、亚表层存在明显不同。{001} <110> 与 {111} <110> 织构取向密度增加, 在 {111} <110> 织构取向密度出现了峰值。同时, 从图 4(b) 可以看出, 在实验样品的中心层, {111} <110> 与 {111} <112> 织构的取向密度明显的高于表层和亚表层。由此可以知道, 形变量为 0% 时, 冷轧纯铁试样的表层、亚表层中织构强度明显与试样的中心层存在不

同, 这与试样中晶粒的应力与应变分布存在直接的关系。

由图 5 可以看出: 冷轧形变量为 40% 时, 沿着纯铁试样厚度,  $\gamma$  纤维织构具有相同的变化趋势, {111} <110> 织构强度高于 {111} <112>。试样表层、亚表层中  $\alpha$  纤维织构变化趋势相似。而中心层与以上两层织构的变化趋势存在一定差别。冷轧纯铁试样中  $\gamma$  纤维织构变化在试样表层、亚表层与中心层基本相同, 取向密度沿着试样厚度逐渐增加。

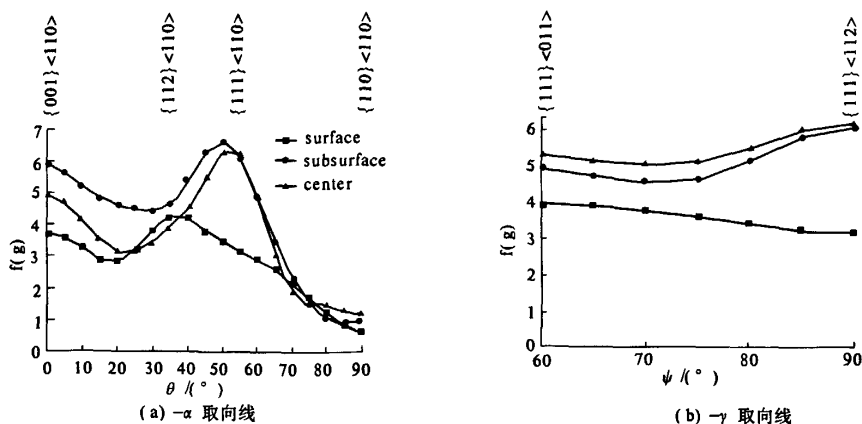


图 6 冷轧压下量为 80% 的纯铁试样的取向密度变化

Fig. 6 Orientation density variation on cold-rolled iron with 80% reductions

由图 6 可以看出: 冷轧形变量为 80% 时,  $\gamma$  纤维织构中表层的 {111} <112> 织构强度高于 {111} <110> 织构, 表层与亚表层的织构变化相似。  $\alpha$  纤维织构变化趋势明显不同与形变量为

0%、40% 的实验样品。沿着试样不同厚度都具有突变点。表层 {112} <110> 达到最大, 亚表层、中心层 {111} <110> 织构强度达到最大。

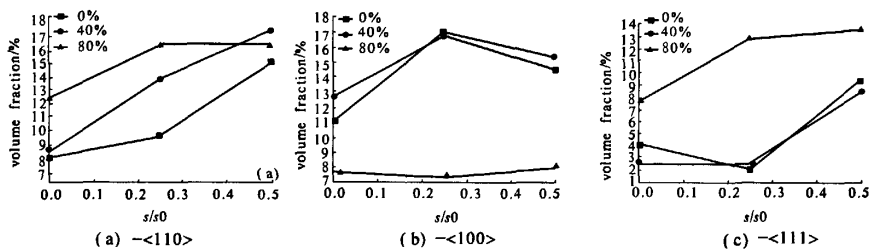


图7 不同冷轧形变量纯铁试样中主要织构分析

Fig. 7 Analysis on the variation of main texture components in the different reductions

为了更好地定量分析冷轧纯铁试样的织构变化规律,根据取向分布函数分析法以及反极图可以做出一些定量的分析和计算.不同冷轧压下量时纯铁试样中主要织构组分沿着试样厚度分布分析如图7所示.由图7(a)可以看出不同压下量时, $\langle 110 \rangle$ 织构组分变化规律存在一定差别.随着压下量增加,织构组分体积分数含量增加.从试样表层到亚表层在不同形变量下织构组分含量逐渐增加,从亚表层到中心层时,形变量为0%、40%时,织构组分也呈现增长趋势.但是形变量为80%时织构组分变化不大.由图7(b)可以知道形变量为0%、40%时 $\langle 100 \rangle$ 织构组分变化趋势相似,由表及里先下降后上升.当形变量为80%时, $\langle 100 \rangle$ 织构组分呈现先下降后上升趋势.由图7(c)可以看出形变量为0%时, $\langle 111 \rangle$ 织构组分先下降后上升.压下量为40%、80%时 $\langle 111 \rangle$ 织构组分呈现上升趋势,沿着试样不同厚度织构的变化快慢存在一定差别.随着压下量的增大,线材受力情况发生一定变化,试样变形的不均匀性使变形金属各部分塑性流动的速度和位移存在着一定差别.

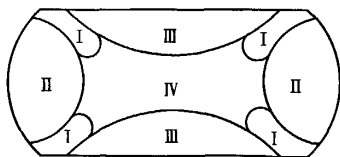
图8为线材平辊轧制过程中,变形区域划分示意图.平辊轧制过程中,变形铁丝和轧辊接触面上只受径向压力而不受纵向拉力.压扁轧制变形时,轧辊与铁丝非同性接触,变形区形状沿着轧件

宽度方向上是变化的,金属沿着纵向及横向流动不均匀.接触面区域从线接触到面接触,并且逐渐增大.接触表面的摩擦各方向相同,变形是轴对称的.

从图8可以看出线材压扁过程中线材边缘部分金属变形较小.其原因是压扁过程中由于摩擦作用,接触面是难变形区,变形较小;中心部分是易变形区,边部是自由变形区,无约束,而金属流动的趋势是向阻力最小方向流动.因此,中心部的变形朝着横向的方向流动,导致线材边缘部分的变形较小.圆形截面轧扁时,最大的有效应变处在轧件中心.而最小的有效应变处在轧件边部.剪切变形带的存在是由于在压扁轧制变形时,线材不同部位发生塑性变形程度不同及金属流动的不均匀性造成的.同时由文献[2-6]可以知道随着试样厚度的减小,轧辊与线材之间摩擦造成变形金属各部分产生剪切应力,导致剪切织构产生.这样变形的不均匀性造成了剪切织构沿着冷轧纯铁试样厚度存在一定差别.通过以上分析可知,从试样表面到试样中心层,有效应变存在一定变化.应变差别必然造成冷轧织构存在一定的差别. $\langle 100 \rangle$ 、 $\langle 111 \rangle$ 、 $\langle 110 \rangle$ 织构取向随着压下量的变化而变化.

### 3 结论

通过圆柱型线材冷轧过程中织构的分析,可以得到以下结论:纤维织构、纤维织构沿着试样厚度随着压下量的增加而增强.反极图定量分析和计算表明:不同压下量下, $\langle 110 \rangle$ 织构组分体积分数由表及里呈现增长变化. $\langle 100 \rangle$ 织构组分体积分数在压下量为0%、40%时由表及里先上升后下降.当压下量为80%时出现相反趋势.压下量为0%时 $\langle 111 \rangle$ 织构组分体积分数先下降后升高.而压下量为40%、80%时 $\langle 111 \rangle$ 织构组分体积分数呈现上升趋势,沿着试样厚度织构组分



I - 剪应变区 II - 自由变形区  
III - 难变形区 IV - 易变形区

图8 变形区域划分示意图<sup>[13]</sup>

Fig. 8 The schematic plan of the divided deformation region

体积分数存在一定差别。

### 参考文献:

- [1] KAZEMINEZHAD M, KARIMI TAHERI A, KIET TIEU A. Utilization of the finite element and Monte Carlo model for simulating the recrystallization of inhomogeneous deformation of copper [J]. Computational Materials Science, 2007, 38(4): 765 - 773
- [2] KAZEMINEZHAD M, KARIMI TAHERI A. The prediction of macroscopic shear bands in flat rolled wire using the finite and slab element method [J]. Materials Letters, 2006, 60(27): 3265 - 3268
- [3] KAZEMINEZHAD M, KARIMI TAHERI A. Calculation of the rolling pressure distribution and force in wire flat rolling process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 171(2): 253 - 258
- [4] KAZEMINEZHAD M, KARIMI TAHERI A. A theoretical and experimental investigation on wire flat rolling process using deformation pattern [J]. Materials & Design, 2005, 26(2): 99 - 103
- [5] KAZEMINEZHAD M, KARIMI TAHERI A. An experimental investigation on the deformation behavior during wire flat rolling process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 160(3): 313 - 320
- [6] DOMANTI S, MCELWAIN D L S. Two - dimensional plane - strain rolling: An asymptotic approach to the estimation of inhomogeneous effects [J]. Int. J. Mech. Sci., 1995, 37: 175 - 182.
- [7] CARLSSON B. The contact pressure distribution in flat rolling of wire [J]. J. Mater. Process. technol., 1998, 73: 1 - 6
- [8] UTSUNOMIYA H, HARTLEY P, PILINGER. Three dimensional elastic plastic finite - element analysis of the flattening of wire between plain rolls [J]. J. Manuf. Sci. Eng., 2001, 123: 397 - 404
- [9] IANKOV R. Finite element simulation of profile rolling of wire [J]. J. Mater. Process. Technol., 2003, 142: 355 - 361
- [10] LIU Q, HANSEN N. Effort of grain orientation on deformation structure in cold rolled aluminum [J]. Acta. Mater., 1998, 46(16): 5819 - 5838
- [11] SCHULZ L G. A method of determining preferential orientation for reflected sheet sample by X - ray instrument [J]. J. Appl. Phys., 1949, 20: 1030 - 1034.
- [12] 梁志德, 徐家桢, 王 福. 织构材料的三维取向分析 [M]. 沈阳: 东北工学院出版社, 1986, 108 - 109
- [13] 魏 洁, 李 权, 唐广波, 等. 碳锰钢压缩过程中非均匀应变与再结晶之间关系的研究 [J]. 钢铁, 2006, 41(7): 74 - 78.

## Quantitative Analysis on Texture Evolution of Wire Flat Rolling

YAO Xu - sheng<sup>1</sup>, LIU Yan - dong<sup>1</sup>, JIANG Qi - wu<sup>2</sup>, ZUO Liang<sup>1</sup>

(Key Laboratory of Ministry of Education for Anisotropy and Texture of Materials, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. Angang Steel Company Limited, Anshan 114002, China)

**Abstract:** Texture evolution in the wire flat rolling process were investigated, by means of ODF, selecting the iron of ECAP. The experimental results show that  $\alpha$  and  $\gamma$  - fibre texture increases with the development of the depth and deformation reduction. The results of inverse pole figure calculations demonstrate  $\langle 110 \rangle$  texture components increases from surface to center, under the various reductions.  $\langle 100 \rangle$  texture components first increase then decrease from surface to center in the various reduction of 0% and 40%, however, having the different tendency in the 80%.  $\langle 111 \rangle$  texture components first decrease then increase from surface to center in the various reduction of 0%. Moreover,  $\langle 111 \rangle$  texture components tend to increase in the 40% and 80%, and they are different in various depths.

**Key words:** ODF; ECAP; rolling; texture; orientation distribution function (ODF)