

异步轧制取向硅钢中织构沿板厚的分布与发展*

刘刚^{1,2)} 王福¹⁾ 齐克敏¹⁾ 刘桂兰¹⁾ 梁志德¹⁾

1) 东北大学, 沈阳 110006

2) 辽宁大学, 沈阳 110036

摘要 采用异步轧制对经过一次正常冷轧和中间退火的、厚度为 0.746 mm 的工业取向硅钢实施一次速比为 1.17 的异步冷轧, 轧至 0.34 mm. 在普通的工艺条件下, 进行退火. 用 ODF 和反极图定量研究各层织构的分布与转化, 并测量了磁性. 结果表明: 在本工艺条件下, 织构组分与传统冷轧相同, 异步轧制板材的表层附近也出现了类似于正常轧制下位于亚表面层上的、理想的冷轧织构组分, 但是已明显地偏向于快速辊侧表面. 冷轧织构组态沿着轧板的厚度方向呈现了非对称分布; 脱碳退火后, η 织构加强, 织构组分沿板厚方向上重新出现了以轧板中心面为对称的分布; 二次再结晶退火后, 产生了强度集中的 Goss 织构, 其磁性能不低于同步轧制.

关键词 异步轧制, 硅钢, 织构

在传统的同步轧制方式下, 通过二次冷轧^[1]生产的取向硅钢具有优良的磁性. 对化学成分、工艺参数和夹杂与织构转化关系的研究, 及冷轧和退火工艺的改进已将最终形成的 Goss 织构的漫散控制在几度范围内, 取得了广泛的应用.

区别于同步轧制的异步轧制是以两个轧辊转速不等为特征^[2]. 这种轧制的轧制压力小、产品精度高, 特别有利于薄板或超薄板的生产, 因此已用于普通金属薄板的冷轧, 并取得了成功. 但是, 对于要求特殊物理性能的功能材料, 如取向硅钢的轧制, 却迄今未见资料报道. 本工作采用异步轧制, 在表层织构分析的基础上^[3,4], 进一步探索取向硅钢在冷轧和退火过程中, 织构沿板厚方向的分布及其变化规律.

1 实验方法

实验采用工业取向硅钢, 化学成分(质量分数, %)为: Si 3.15, C 0.041, Mn 0.060, S 0.021, P \leq 0.020, Cu \leq 0.25. 将 2.2 mm 热轧板一次正常冷轧至 0.746 mm, 经过正常的中间退火后, 裁成 80 mm 宽的板带, 在实验室的小四轮异步轧机上, 采用速比为 1.17 的多道次冷轧, 轧至 0.34 mm. 按照普通的工业生产工艺进行脱碳退火和二次再结晶退火. 经过冷轧和脱碳退火的板带裁成直径 30 mm 的样品, 分层测定织构. 采用相对厚度, 与慢速辊接触的表面称: S=0, 与快速辊接触的表面称: S=1.0. 用 HF+H₂O₂ 溶液减薄, 分别得到 S=0.2, 0.4, 0.6 和 0.8 面, 再加上两侧表面, 沿板厚方向共有六层. 在 D/Max-3A X 射线衍射仪上, 用背射

* 收到初稿日期: 1996-03-20. 收到修改稿日期: 1996-07-10

本文通讯联系人: 刘刚, 沈阳(110006)东北大学材料科学与工程系

法测量样品各层的 $\{110\}$, $\{200\}$, $\{112\}$ 不完整极图($\alpha=0-70^\circ$). 以二步法^[5] 求算的 ODF 用角度间隔为 10° 的恒 Ψ 截面图来表示. 根据 ODF 理论^[6] 进行织构的反极图定量分析, 即给出某一 $\{hkl\} // ND$ 或 $\langle uvw \rangle // RD$ 的织构组分在 Euler 空间 10° 范围内的晶粒体积百分数. 二次再结晶样品的织构分析采用蚀坑法^[7,8], 选取 100 个晶粒, 逐一地测定出每个晶粒的取向, 再按照谱分析方法, 求算出晶粒的取向分布函数^[6], 并用角度间隔为 10° 的恒 Ψ 截面图来表示.

二次再结晶退火后, 异步轧制和同步轧制的板带都裁成 $30 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 的单片, 用单片测量仪测取磁场标定值分别为 10 和 25 A/m 条件下的饱和磁感应强度 B_{10} 和 B_{25} (T); 在交流 50 Hz, 磁感分别为 1.5 和 1.7 T 的条件下, 测量铁损 $P_{15/50}$ 和 $P_{17/50}$ (W/kg).

2 实验结果

2.1 织构

异步轧制后, 沿板厚方向上各层冷轧织构的 ODF 如图 1a—f, 分别代表 $S=0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ 和 1.0 层. 冷轧织构主要为 γ 织构($\{111\} // ND$), 其次为 α 织构($\langle 110 \rangle // RD$)和 η 织构($\langle 001 \rangle // RD$), 反极图定量分析如图 2. 尽管在 $S=0.6$ 层上 γ 织构略低, 但 γ 织构明显高于 α 织构和 η 织构. 除在 $S=0.2$ 层上 η 织构明显高于 α 织构外, 其余各层 η 织构均低于 α 织构. 在各层的 γ 线上, $\{111\} \langle 112 \rangle$ 织构分布不同. 对后序工艺过程, Goss 织构发展比较有利的 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 和 η 织构沿板厚的分布如图 3. $\{111\} \langle 112 \rangle$ 和 η 织构在 $S=0.2$ 层的密度极高, 在 $S=1.0$ 层也比较高.

脱碳退火后, 三种织构沿层厚的分布如图 4. γ 织构和 α 织构减少, η 织构增加, 并在 $S=0.2$ 和 $S=0.8$ 层显示出较高的密度.

二次再结晶退火后, 形成了直径为 3—7 mm 的大晶粒, 由连续分布的 100 个晶粒通过蚀坑技术求算的 ODF 如图 5. 尽管被测晶粒数目偏少, 但 ODF 基本上表明了其织构为取向集中、偏离较小的、单一的 Goss 织构, 对其磁性的提高十分有利.

2.2 磁性

将用异步轧制和同步轧制获得的、相同厚度的板带同时进行退火, 最终退火后, 测量四种样品的磁性如表 1.

表 1 样品二次再结晶退火后的磁性
Table 1 Magnetic properties after annealing

Rolling way	$P_{15/50}$, W/kg	$P_{17/50}$, W/kg	B_{10} , T	B_{25} , T
Cross shear	0.99	1.41	1.830	1.906
Traditional	1.02	1.45	1.806	1.896

3 讨 论

同步轧制方式下, 冷轧织构主要由 γ 织构、 α 织构和极少量的 η 织构组成, 冷轧使 γ 织构和 α 织构加强, η 织构减弱, 退火过程中, 织构发生了相反的变化^[9]. 异步轧制下, 织构的组成与转变基本上与同步轧制相同, 但在异步轧制方式下, 由于轧板的受力不同, 因此沿板厚方向上, 织构的分布具有一定的特点:

(1) 冷轧结构的偏离. 从图 1 可以看出, γ 线上的 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 结构存在着一定的偏离, 在角度间隔为 10° 的恒 Ψ 截面图上, $\{\bar{1}11\} \langle 1\bar{1}2 \rangle$ 和 $\{\bar{1}11\} \langle \bar{1}21 \rangle$ 也显示出不同的强度. 异步轧制变形下, 轧板的宏观应变张量⁽¹⁰⁾

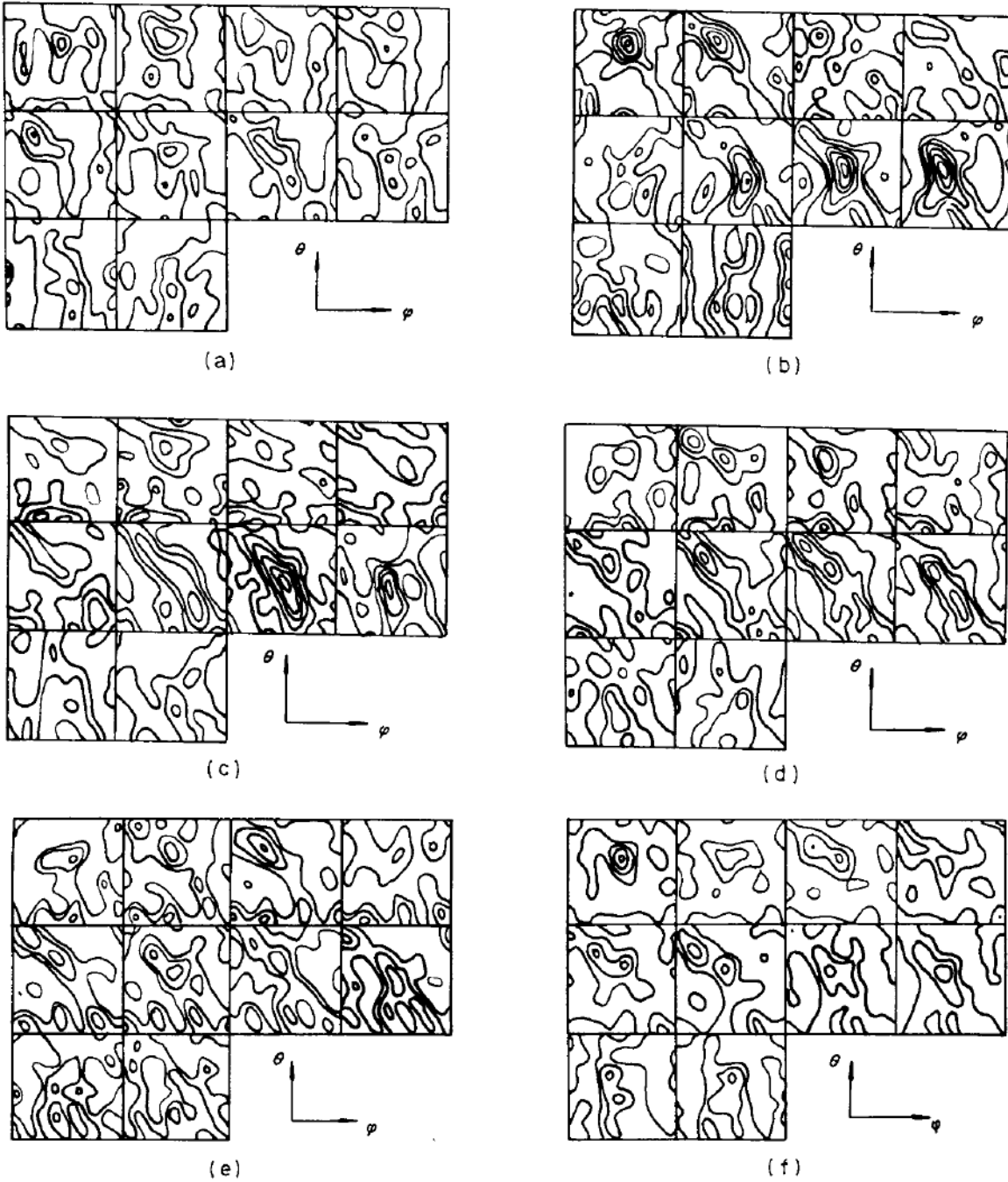


图 1 冷轧结构 ODF 恒 Ψ 截面图

Fig.1 ODFs constant Ψ sections after cross shear rolling ($I = 1, 3, 5, \dots$)

(a) $S=0$ (b) $S=0.2$ (c) $S=0.4$ (d) $S=0.6$ (e) $S=0.8$ (f) $S=1.0$

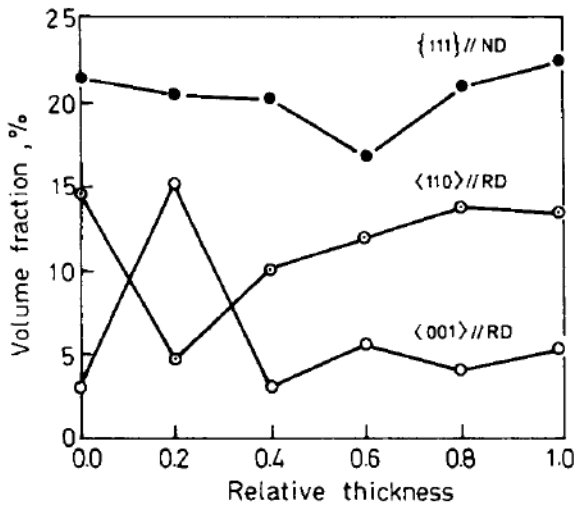


图 2 冷轧织构沿板厚方向的分布

Fig.2 Distribution of deformation textures through the thickness

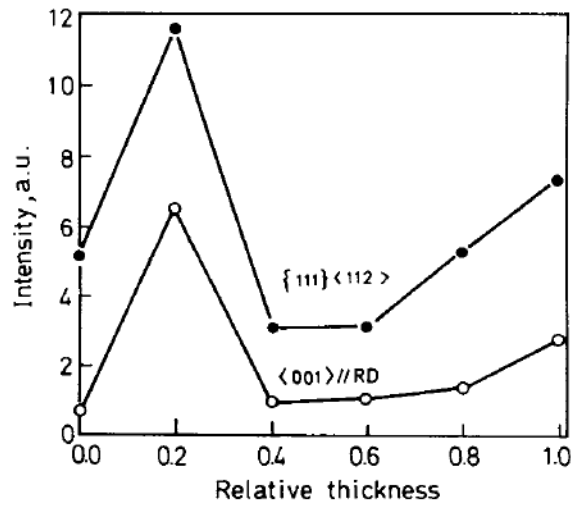


图 3 {111} <112> 和 η 织构强度沿板厚方向的分布

Fig.3 Distribution of texture intensities for {111} <112> and η-fibre through the thickness

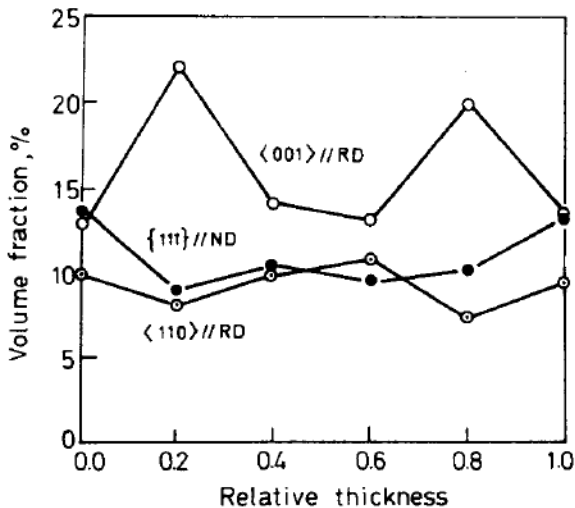


图 4 脱碳退火织构沿板厚方向的分布

Fig.4 Distribution of decarbon annealing textures through the thickness

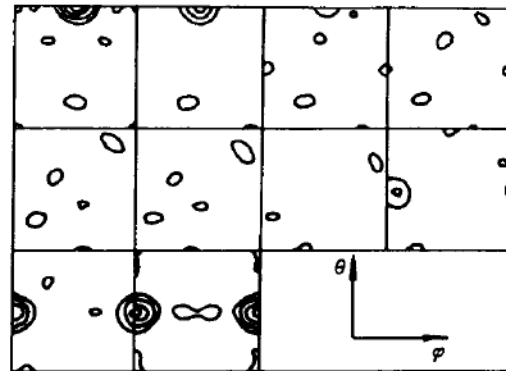


图 5 二次再结晶后, ODF 恒 Ψ 截面图

Fig.5 ODF constant Ψ section after secondary recrystallization annealing

$$E = \begin{bmatrix} \varepsilon & 0 & \Delta \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\varepsilon \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 ε 为张量元素, Δ 代表异步轧制所产生的切应变, 在靠近慢速辊侧取负值, 在靠近快速辊侧取正值. 在 Δ 的作用下, 模拟冷轧织构相对理想取向产生了几度的偏离⁽¹⁰⁾. 在 fcc 结构金

属中,异步轧制导致织构的偏离沿板厚方向具有某种规律^{〔11〕}.而在bcc结构的取向硅钢中, $\{111\}$ $\langle 112 \rangle$ 组分的偏离却没有一定的规律.

(2) 冷轧织构组分的不对称分布.同步轧制下,表面向里层 γ 织构减少, α 织构增加.在两个表层附近的亚表面层上有利的 γ 织构和 η 织构明显多于 α 织构,织构组分呈现出以板材中心为对称的分布.在异步轧制的板材中,由于塑性流变的不对称分布^{〔12〕},导致板材中心的对称面向着快速辊侧偏离,如图2.

(3) 亚表面层的偏移.同步轧制的板材中,理想的冷轧织构出现在表层之下的、以轧板中心为对称的亚表面层上,亚表面层为后序退火过程中Goss织构的发展提供了十分有利的环境^{〔13〕}.异步轧制的板材中,理想的冷轧织构也在表层两侧($S=0.2$ 和 $S=1.0$)出现,如图1b, f.但是其位置已经明显地移向了快速辊侧,快速辊侧理想的冷轧织构移至表面层,如图3.此外,两层上理想冷轧织构组分的含量不同,在 $S=0.2$ 的百分含量明显高于 $S=1.0$ 层.

以上分析表明:异步轧制取向硅钢的冷轧织构与同步轧制完全相同,在两个表层附近也存在着理想的冷轧织构.异步轧制对取向硅钢的影响是导致某些冷轧织构组分的偏离,并使得板材中心的对称面向快速辊侧偏移.除此之外,板内各层的冷轧织构中都有一定量的 η 织构(如图1),有利于后序退火过程中Goss织构的发展.

脱碳退火中, γ 织构和 α 织构减少, η 织构增加,并成为主要织构.但是,一个值得重视的现象是:织构组分重新出现了以板材中心为对称的分布,如图4. $S=0.2$ 层的织构转变与同步轧制的研究结果基本相同,而在冷轧织构比较理想的 $S=1.0$ 层, η 织构的数量却比冷轧织构不甚理想的 $S=0.8$ 层少.异步轧制下产生的这种现象说明:理想的冷轧织构组态只是决定退火中 η 织构发展的主要因素之一,其它因素如表面条件、控制气氛、杂质的溶解和扩散等,对 η 织构的发展也具有十分重要的影响.

异步轧制的板材在退火后,沿板厚方向的各层,特别是在 $S=0.2$ 和 $S=0.8$ 层上,都产生了大量的 η 织构,为Goss晶粒的异常长大创造了有利的条件.因此,经过二次再结晶退火后,产生了取向集中的、单一的Goss晶粒,如图5.

异步轧制板材的磁性能优于同步轧制,说明异步轧制可以用于取向硅钢的冷轧.异步轧制能以较小的轧制压力生产薄板和超薄板,用于取向硅钢的冷轧,有助于改进生产工艺、降低成本.此外,异步轧制板材的织构转变具有不同于传统冷轧的特点,开展异步轧制的研究也可以加深对取向硅钢中织构转化机理的认识.

4 结 论

(1) 冷轧织构与同步轧制基本相同,某些冷轧织构组分产生了一定的偏离,板材中心的对称面向快辊侧偏移.

(2) 脱碳退火后,织构重新出现了以板材中心为基本对称的分布.

(3) 经过二次再结晶退火后,产生了近于取向集中的、单一的Goss织构.

(4) 异步轧制板材的磁性不低于同步轧制.

参 考 文 献

- 1 Goss N P. *Trans Am Soc Met.* 1935; 23: 511
- 2 朱 泉. 钢铁, 1980; 15(6): 1

- 3 刘 刚, 王 彤, 王 福, 齐克敏, 梁志德, 栗守维, 叶久美. 电工钢, 1995; 4: 22
- 4 Liu G, Wang F, Qi K M, Liang Z D. *Proc 11th Inte Conf on Textures of Materials*, Xi'an, China 1996; 315
- 5 Liang Z, Xu J, Wang F. *Proc 6th Int Conf on Textures of Materials*, Tokyo: ISIJ, 1981; 1259
- 6 梁志德, 徐家桢, 王 福. 织构材料的三维取向分析术—ODF分析. 沈阳: 东北工学院出版社, 1986; 115: 151
- 7 罗 阳. 金属学报, 1977; 13(1,2): 93
- 8 罗 阳, 吕其春. 金属学报, 1979; 15: 235
- 9 Mishra S, Darmann C, Lücke K. *Acta Metall*, 1984; 32: 2185
- 10 刘燕声, 梁志德. 科学通报, 1989; 34: 471
- 11 刘燕声, 赵 骧, 梁志德. 金属学报, 1990; 25: B198
- 12 朱 泉等. 板材异步轧制理论与实际. 沈阳: 东北工学院出版社, 1984; 48
- 13 Böttcher A, Hastenrath M, Lücke K. *Textures Microstruct*, 1991; (14-18): 799

TEXTURE DISTRIBUTION AND DEVELOPMENT THROUGH THE THICKNESS AFTER CROSS SHEAR ROLLING OF GRAIN ORIENTED SILICON STEEL

LIU Gang (Northeastern University, Shenyang 110006; Liaoning University, Shenyang 110036), WANG Fu, QI Kemin, LIU Guilan, LIANG Zhide (Northeastern University, Shenyang 110006)

(Manuscript received 1996-03-20, in revised form 1996-07-10)

ABSTRACT Commercial grain oriented silicon steel was cold rolled from 0.746 mm to 0.34 mm, by cross shear rolling with a roll mismatch speed ratio 1.17, after first cold rolling and intermediate annealing as normal. The subsequent annealing was just as that in industry. The texture distribution and development through the thickness were researched by ODF and reverse pole figure quantitative analyses, and the magnetic properties were measured. The results indicate that the deformation texture is similar to that obtained by traditional one, favorable deformation texture can also be found near the both outer layers of sheet, but they deviate obviously to the fast speed roll. Therefore, the deformation texture shows an asymmetry distribution through the thickness. After decarbon annealing, η -fibre increases, texture with a symmetry distribution reappears through the thickness; sharp Goss texture forms after the secondary recrystallization annealing, and the magnetic properties measured are not lower than that rolled by traditional one.

KEY WORDS cross shear rolling, silicon steel, texture

Correspondent : LIU Gang, Department of Materials Science, Northeastern University, Shenyang 110006