

## 冷轧压下率对 Hi-B 高磁感取向硅钢初次再结晶组织的影响

朱炜杰 赵刚 王畅 黄杰 杜亮

(武汉科技大学材料与冶金学院, 武汉 430081)

**摘要** 模拟 CSP Hi-B 钢( $\% : 0.05\text{C}, 0.20\text{Mn}, 3.47\text{Si}, 0.001\text{5S}, 0.007\text{P}, 0.027\text{Al}, 0.006\text{0N}$ )窄带制造流程为 25 kg 真空感应炉熔炼-浇铸成 40 mm × 85 mm 扁锭-热轧 2.5 mm 板-930 °C 常化处理-冷轧成 0.6 mm (76%), 0.4 mm (84%), 0.3 mm (88%) 和 0.2 mm (92%) 薄板-830 °C 5 min 初次再结晶退火。采用 X-射线衍射测量技术 (XRD) 对初次再结晶退火后的试样进行组织分析。结果表明,初次再结晶退火后,GOSS 组织主要形成于次表层,有少量的 GOSS 组织存在于 76% 压下量的 1/4 层;随压下量的增加, $\alpha$  纤维组织中的  $\{112\} \langle 110 \rangle$  和  $\{001\} \langle 110 \rangle$  取向强度逐渐减弱,而  $\gamma$  纤维组织中的  $\{111\} \langle 112 \rangle$  和  $\{111\} \langle 110 \rangle$  取向强度先增强后减弱;在压下量为 88% 时, $\gamma$  纤维组织强烈向  $\{111\} \langle 112 \rangle$  取向集中,强度达到最大,最有利于 GOSS 组织的形成。

**关键词** Hi-B 高磁感取向硅钢 薄板 高斯组织 冷轧压下率 初次再结晶退火

## Effect of Cold Reduction Ratio on Primary Recrystallization Texture of Hi-B High Magnetic Induction Oriented Silicon Steel

Zhu Weijie, Zhao Gang, Wang Chang, Huang Jie and Du Liang

(School of Materials and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

**Abstract** The manufacturing flow sheet simulated CSP process of narrow strip of Hi-B steel ( $\% : 0.05\text{C}, 0.20\text{Mn}, 3.47\text{Si}, 0.001\text{5S}, 0.007\text{P}, 0.027\text{Al}, 0.006\text{0N}$ ) is 25 kg vacuum induction furnace melting- casting to 40 mm × 85 mm slab ingot- hot-rolling to 2.5 mm plate- normalizing at 930 °C - cold-rolling to 0.6 mm (76%), 0.4 mm (84%), 0.3 mm (88%) and 0.2 mm (92%) sheet- primary recrystallization-annealing at 830 °C for 5 min. The analysis on texture of primary recrystallization-annealed specimen has been carried out by X-ray diffractometry (XRD). Results show that after primary recrystallization-annealing, the GOSS texture forms mainly at subsurface and there are some GOSS texture at 1/4 layer of sheet with reduction ratio 76%; with increasing reduction the intensity of  $\{112\} \langle 110 \rangle$  and  $\{001\} \langle 110 \rangle$  orientation of  $\alpha$  fiber texture gradually weaken, while the intensity of  $\{111\} \langle 112 \rangle$  and  $\{111\} \langle 110 \rangle$  orientation of  $\gamma$  fiber texture orientation first increase and then weaken; with reduction ratio 88% the  $\gamma$  fiber texture strongly concentrates to  $\{111\} \langle 112 \rangle$  orientation, the intensity of that reaches to max, it is favourable to form GOSS texture.

**Material Index** Hi-B High Magnetic Induction Oriented Silicon Steel, Sheet, GOSS Texture, Cold-Rolling Reduction Ratio, Primary Recrystallization-Annealing

高磁感取向硅钢沿轧制方向具有高磁感、低铁损的优良性能,主要用于各种变压器的铁芯,是电力电子和军事工业中不可缺少的重要软磁合金<sup>[1]</sup>。初次再结晶的组织形态与组织分布能够显著影响到高斯晶粒二次再结晶的发展,而冷轧压下率的不同会使形成的冷轧组织产生差别,进而会影响到再结晶退火过程中高斯组织的演变<sup>[2]</sup>。本文采用模拟 CSP 工艺试制的 Hi-B 钢热轧常化板作为基板,对不同压下率下再结晶退火组织进行分析对比,以探究不同压下率条件下 GOSS 组织及其相关组织的演变规律。

### 1 试验材料及研究方法

本试验所用基板为模拟 CSP 工艺试制的 Hi-B

钢热轧常化板(表 1),由武汉科技大学高精度轧制重点实验室提供。模拟 CSP 加工工艺流程:25 kg 真空感应炉→200 mm × 85 mm × 40 mm 氧化铝铸模→真空保温运输铸坯 980 °C 进箱式电阻炉,1 200 °C 30 min→40 mm 铸坯通过 7 个道次热轧至 2.5 mm 薄板(实验室自制  $\Phi 180$  mm × 200 mm 二辊可逆式轧机,额定功率 45 kW,最大轧制力 588.4 kN,转速 25 r/min。开轧温度 1 150 ~ 1 200 °C,终轧温度 900 ~ 950 °C),各道次的压下制度见表 2。截取

表 1 试验用 Hi-B 钢常化板的分析成分/ $\%$

Table 1 Analysis of test normalized plate of Hi-B steel / $\%$

C	Si	Al	N	S	Mn	P
0.05	3.47	0.027	0.006	0.001 5	0.20	0.007

通讯作者:赵刚,教授,武汉科技大学材料与冶金学院,武汉 430081

E-mail:853916470@qq.com

表 2 热轧各道次的压下制度  
Table 2 Reduction scheme of each pass of hot rolling

道次	轧前厚度/ mm	轧后厚度/ mm	压下率/ %
1	40.0	32.0	20.00
2	32.0	22.0	13.25
3	22.0	13.0	40.90
4	13.0	7.5	42.30
5	7.5	4.5	40.00
6	4.5	3.0	33.30
7	3.0	2.5	16.70

(mm) 100 × 40 × 2.5 的热轧试样 4 份装入炉温为 1 120 °C 的管式炉中保温 3 min (保温过程中通氮气进行保护,防止试样被氧化),然后将试样取出空冷 15 s,待试样温度降到 930 ~ 960 °C,将试样装入 930 °C 的管式炉中保温 2.5 min,最后将试样取出放入 100 °C 的沸水中冷却。

冷轧前用 15% ~ 20% 盐酸水溶液酸洗 10 ~ 15 min。酸洗后采用 Φ180 mm × 200 mm 的二辊轧机将 4 份常化试样分别用 76%、84%、88%、92% 四种压下率一次冷轧至 0.6、0.4、0.3、0.2 mm 薄板,并在 830 °C 下保温 5 min 进行初次再结晶退火,退火工艺为:脱碳退火在管式电炉上进行,加湿温度设定为 70 °C,加湿 H<sub>2</sub>:加湿 N<sub>2</sub> = 8 L/min : 24 L/min,保证退火后试样 [C] ≤ 30 × 10<sup>-6</sup>,完成初次再结晶。

在 Rigaku D/max-2500PC 型 X 射线衍射仪上进行织构测定,得到不同压下率冷轧样品的次表层、1/4 层和中心层的 {110}、{200} 和 {211} 三张不完整极图,继而采用二步法计算 ODF,结果用恒 Φ 截面图来表示。

2 试验结果及分析

从图 1(a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>, c<sub>1</sub>, d<sub>1</sub>) 可知,对比 4 种压下量的次表层织构,初次再结晶退火后,随压下量的增加,GOSS 织构强度减弱,直至消失,当压下量达到 92% 时出现了少量 {110}、<112> 织构,GOSS 织构有向 {110} <112> 织构偏离的趋势。γ 纤维织构上的 {111} <112> 取向强度先增强后

减弱,α 纤维织构中的 {001} <110> 和 {112} <110> 取向强度有逐渐减弱的趋势。

从图 1(a<sub>2</sub>, b<sub>2</sub>, c<sub>2</sub>, d<sub>2</sub>) 可知,对比 4 种压下量的 1/4 层织构,初次再结晶退火后,随压下量的增加,先有少量的 GOSS 织构,然后减弱直至消失,γ 纤维织构上的 {111} <112> 和 {111} <110> 取向强度逐渐增强,当压下量达到 92% 时,这两种取向织构有回弱的趋势,同时产生有少量的 {110} <112> 织构。α 纤维织构中的 {001} <110> 和 {112} <110> 取向强度有减弱的趋势。和图 1 相比,GOSS 织构主要形成于次表层,而在 1/4 层仅当压下量为 76% 时才存在少量 GOSS 织构,同时 1/4 层的 γ 纤维织构形成的更加完善,强度更高,而 α 纤维织构变化不大。

从图 1(a<sub>3</sub>, b<sub>3</sub>, c<sub>3</sub>, d<sub>3</sub>) 可知,对比 4 种压下量的中心层,初次再结晶退火后,随压下量的增加,中心层的织构分布变化不大,主要分布着 α 和 γ 纤维织构,而无 GOSS 织构出现,其中 γ 纤维织构中的 {111} <112> 和 {111} <110> 取向强度先增强后减弱,其中压下量为 88% 时,强度最大,α 纤维织构没有大的变化。对比图 1(a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>, c<sub>1</sub>, d<sub>1</sub>) 和 (a<sub>2</sub>, b<sub>2</sub>,

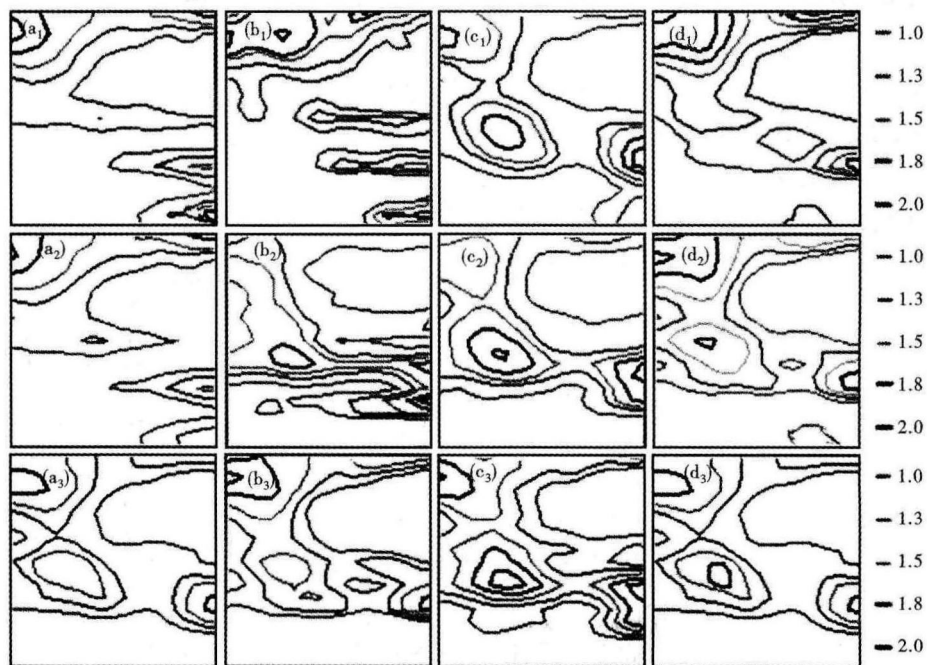


图 1 Hi-B 钢冷轧试样 1/8 层(a<sub>1</sub>)(b<sub>1</sub>)(c<sub>1</sub>)(d<sub>1</sub>), 1/4 层(a<sub>2</sub>)(b<sub>2</sub>)(c<sub>2</sub>)(d<sub>2</sub>) 和中心层(a<sub>3</sub>)(b<sub>3</sub>)(c<sub>3</sub>)(d<sub>3</sub>) φ = 45° 截面 ODF 图,板厚,压下量:(a<sub>1</sub>)(a<sub>2</sub>)(a<sub>3</sub>) 0.6 mm, 76%; (b<sub>1</sub>)(b<sub>2</sub>)(b<sub>3</sub>) 0.4 mm, 84%; (c<sub>1</sub>)(c<sub>2</sub>)(c<sub>3</sub>) 0.3 mm, 88%; (d<sub>1</sub>)(d<sub>2</sub>)(d<sub>3</sub>) 0.2 mm, 92%

Fig. 1 Figure of orientation distribution function (ODF) of Hi-B steel cold-rolled specimen at 1/8 layer (a<sub>1</sub>)(b<sub>1</sub>)(c<sub>1</sub>)(d<sub>1</sub>), 1/4 layer (a<sub>2</sub>)(b<sub>2</sub>)(c<sub>2</sub>)(d<sub>2</sub>) and center layer (a<sub>3</sub>)(b<sub>3</sub>)(c<sub>3</sub>)(d<sub>3</sub>) with section φ = 45°, sheet thickness, reduction ratio: (a<sub>1</sub>)(a<sub>2</sub>)(a<sub>3</sub>) 0.6 mm, 76%; (b<sub>1</sub>)(b<sub>2</sub>)(b<sub>3</sub>) 0.4 mm, 84%; (c<sub>1</sub>)(c<sub>2</sub>)(c<sub>3</sub>) 0.3 mm, 88%; and (d<sub>1</sub>)(d<sub>2</sub>)(d<sub>3</sub>) 0.2 mm, 92%

$c_2, d_2$ ), 样品各层均分布有  $\alpha$  和  $\gamma$  纤维组织, 和次表层、1/4 层相比, 中心层  $\gamma$  纤维组织有所增强, 而其中  $\{111\} \langle 112 \rangle$  组织的强度相对较强。GOSS 组织的强度由次表层到中心层逐渐降低。

GOSS 组织在初次再结晶后, 主要分布于次表层, 且随压下量增大, 其强度呈逐渐减弱的趋势而偏离其 GOSS 取向位置<sup>[3]</sup>; 二次晶核是由一些 GOSS 位向晶粒集团(彼此只差很小的角度)通过聚合而形成的大的初次晶粒<sup>[4]</sup>;  $\{111\} \langle 112 \rangle$  组织满足  $35^\circ \langle 110 \rangle$  关系, 使 GOSS 组分与周围变形晶粒之间有较快的晶界移动速率, 有利于其通过不断吞噬其周围的基体组织而异常长大<sup>[5]</sup>;  $\{110\} \langle 001 \rangle$  晶粒分布在  $\{111\} \langle 112 \rangle$  晶粒的周围, 形成了  $\Sigma 9$  ( $\Sigma$  表示重合位置点阵取向差) 重合位置点阵, 有利于二次再结晶 GOSS 组织的长大<sup>[6]</sup>; 由于  $\{110\} \langle 112 \rangle$  取向晶粒与 GOSS 取向晶粒都有低能的  $\{110\}$  表面, 在二次再结晶过程中同样能发生显著的异常长大并接触表面, 从而难以再被 GOSS 取向晶粒吞噬<sup>[7]</sup>; 近  $\{110\} \langle 112 \rangle$  取向的  $\{110\} \langle 227 \rangle$  晶粒, 会与  $\{111\} \langle 112 \rangle$  晶粒形成  $\Sigma 5$  重合点阵晶界, 在低温时其迁移率高于 GOSS 晶粒与  $\{111\} \langle 112 \rangle$  晶粒形成的  $\Sigma 9$  重合点阵晶界, 不利于 GOSS 晶粒二次再结晶时异常长大<sup>[8]</sup>。因此在工艺控制上, 冷轧初次再结晶后希望得到更锋锐的高斯组织与  $\{111\} \langle 112 \rangle$  组织, 同时尽量避免  $\{110\} \langle 112 \rangle$  组织的生成。

对比分析图 1 的 3 组图片可以看出,  $\alpha$  纤维组织随压下量的增加强度逐渐减弱, 尤其是  $\{112\} \langle 110 \rangle$  和  $\{001\} \langle 110 \rangle$  组织; 而  $\gamma$  纤维组织一直比较完整地存在, 在 4 种压下量下各层中都存在比较强的  $\{111\} \langle 112 \rangle$  组织,  $\{111\} \langle 110 \rangle$  组织在各层均有分布, 但主要集中在中心层, 随压下量增大, 其强度变化不大。当压下量为 88% 时,  $\gamma$  纤维组织强烈向  $\{111\} \langle 112 \rangle$  取向集中, 各层的  $\{111\} \langle 112 \rangle$  组织强度达到最大; 当压下量超过 88% 时, 除了  $\{111\} \langle 112 \rangle$  组织, 其他不利组织尤其是  $\{110\} \langle 112 \rangle$  的强度也会提高。

分析得知, 初次再结晶后  $\{111\} \langle 112 \rangle$  组分对二次再结晶过程中 GOSS 组织的异常长大有着重要的影响; 另外, 像  $\{110\} \langle 112 \rangle$  这类不利组织的出现, 在再结晶退火时会与 GOSS 组织构成竞争关系, 从而破坏 GOSS 组织二次再结晶的异常长大。当压

下率为 88% 时, 各层  $\{111\} \langle 112 \rangle$  组织强度达到最大, 其他不利组织的强度相对较小, 在次表层存在一定量的 GOSS 晶粒, 综合看来, 最有利于 GOSS 组织二次再结晶时的异常长大, 所以在压下量为 88% 时性能最优。

### 3 结论

(1) GOSS 组织在初次再结晶后, 主要分布于次表层, 其强度由表层到中心层逐渐降低, 且随冷轧压下量增大, 其强度呈逐渐减弱的趋势而偏离其 GOSS 取向位置。

(2) 随着压下量的增大,  $\{111\} \langle 112 \rangle$  取向强度先增强后减弱, 其中压下量为 88% 时, 强度最大;  $\{111\} \langle 112 \rangle$  组织在各层都有较完整的分布。

(3) 压下量为 88% 时, 有利的  $\{111\} \langle 112 \rangle$  组织强度达到最大, 不利的  $\{110\} \langle 112 \rangle$  组织强度较小, 并且存在一定量的 GOSS 晶核, 综合比较而言, 此压下量最有利于二次再结晶过程中 GOSS 晶粒的异常长大, 因此 88% 的压下量最优。

2012 国家自然科学基金项目资助(51274155)

### 参考文献

- [1] 何忠治, 赵宇, 罗海文. 电工钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012.
- [2] Zheng Wei, Liu Sanyang, Qi Xiaogang. Multi-Links Recovery Algorithm in Survivable WDM Optical Network[J]. Photonic Network Communications, 2011(21): 39-44.
- [3] 林英哲. 冷变形和初次再结晶过程中取向硅钢 Goss 组织组分演变规律的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
- [4] 赵宇, 何忠治. 取向硅钢二次再结晶研究的发展[J]. 钢铁研究学报, 1991, 3(4): 79-90.
- [5] Gervaseva I V, Zimin V A. Texture and Structural Transformations in Nonoriented Electrical Steel[J]. The Physics of Metal and Metallography, 2009, 108(5): 455-465.
- [6] Shimizu R, Harase J, Dingley. Coincidence Grain Boundary and Texture Evolution in Fe-3% Si[J]. Acta Metallurgica, 1989, 37(4): 1241-1249.
- [7] 颜孟奇, 钱浩, 杨平, 等. 电工钢中黄铜组织行为及其对 GOSS 组织影响[M]. 金属学报, 2012, 48(1): 16-22.
- [8] Harase J, Shimizu R. Influence of Cold Rolling Reduction on the Grain Boundary Character Distribution and Secondary Recrystallization in Nitrided Fe 3% Si Alloy[J]. Journal of Magnetism and Magnetism Materials, 2000, 215-216: 89-91.

朱炜杰(1992-), 男, 本科生, Hi-B 钢初次再结晶组织和组织研究。E-mail: 498946776@qq.com

收稿日期: 2015-06-06