

低温板坯加热 Hi-B 钢的组织 and 织构演变

刘磊¹, 郭飞虎^{1,2}, 时朋召¹, 乔家龙¹, 田玉石¹, 仇圣桃¹

(1. 钢铁研究总院连铸技术国家工程研究中心, 北京 100081; 2. 东北大学冶金学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 采用光学显微镜和 X 射线衍射仪对低温板坯加热 Hi-B 钢的组织、织构的特征演变进行了研究。结果表明: 从热轧板和常化板的表面到中心, 组织和织构分布不均匀。热轧板组织分为表层再结晶区域、再结晶和变形晶粒混合区域和中心变形晶粒区域, 并且热轧板各层的织构类型不同。常化板表层晶粒长大, 过渡层和中心层的形变晶粒基本消失, 常化板继承了热轧板的织构特点。冷轧板为纤维状变形组织, 冷轧后形成了以 $\{001\}\langle 110 \rangle \sim \{111\}\langle 110 \rangle$ 为主的 α 织构。脱碳渗氮板的横断面和纵断面的晶粒平均尺寸分别为 25.9 μm 和 25.3 μm , 织构主要为 $\{111\}\langle 112 \rangle$ 、 $\{114\}\langle 481 \rangle$ 和 $\{001\}\langle 120 \rangle$ 织构。成品板晶粒平均尺寸为 19.1 μm , 成品板为单一的高斯织构。

关键词: 高磁感取向硅钢; Hi-B 钢; 板坯; 低温加热; 组织; 织构

中图分类号: TG142.77

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2023)01-0175-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2023.01.027

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Evolution of microstructure and texture for Hi-B steel using low-temperature slab heating

Liu Lei¹, Guo Feihu^{1,2}, Shi Pengzhao¹, Qiao Jialong¹, Tian Yushi¹, Qiu Shengtao¹

(1. Engineering and Research Center for Continuous Casting Technology, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China; 2. College of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China)

Abstract: The evolutions of microstructure and texture for Hi-B steel using low-temperature slab heating technology were studied by optical microscope and X-ray diffractometer. The results show that the distribution of microstructure and texture is not uniform from the surface to the center layer in the hot-rolled band and annealed hot-rolled band. The microstructure of the hot-rolled band consists of the surface recrystallized region, the mixed region of recrystallized and deformed grains, and the central deformed grain region. Moreover, the texture types of each layer in the hot-rolled band are different. The grains in the surface layer of the annealed hot-rolled band grow, the deformed grains in the transition layer and the center layer disappear, and the annealed hot-rolled band inherits the texture characteristics of the hot-rolled band. In addition, the cold-rolled band has a fibrous deformed structure. An α texture dominated by $\{001\}\langle 110 \rangle \sim \{111\}\langle 110 \rangle$ is formed during cold-rolling. The average grain size of the transverse section and vertical section of the decarburized and nitrided sheet is 25.9 μm and 25.3 μm , respectively, and the textures are mainly $\{111\}\langle 112 \rangle$, $\{114\}\langle 481 \rangle$ and $\{001\}\langle 120 \rangle$ textures. The average grain size of the final product is 19.1 μm , and the final product has a single Gaussian texture.

Key words: high permeability grain oriented silicon steel, Hi-B steel, slab, heating at low temperature, microstructure, texture

收稿日期: 2022-03-21

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFB0300305)。

作者简介: 刘磊, 1988 年出生, 男, 博士研究生, 主要从事取向硅钢工艺和性能方面研究, E-mail: iuleicn@live.com。

0 引言

取向硅钢的主要用途是制造变压器铁芯,在电力行业的发展中发挥了重要作用。根据取向度和磁性性能方面的差异可以分为普通取向硅钢(CGO)和高磁感取向硅钢(Hi-B)^[1-2]。抑制剂在取向硅钢的生产中起到极其重要的作用,抑制剂在高温退火过程中钉扎晶界,使初次再结晶组织中的高斯晶粒吞并周围其他位向的晶粒发生异常长大,最终使取向硅钢的成品发展为单一的高斯织构。以 AlN+MnS 为抑制剂的 Hi-B 钢需要在 1 350~1 400 °C 高温下加热铸坯来保证抑制剂的固溶,但高温板坯加热工艺有成材率低、成本高和作业率低等缺点^[2-3]。以 AlN 为抑制剂并且在脱碳退火后进行渗氮处理代替 AlN+MnS 为抑制剂的高温加热工艺,铸坯加热温度可以降低到 1 150~1 200 °C^[4]。因为 Hi-B 钢的工艺窗口窄且其技术保密严格,目前国内只有少数企业具有 Hi-B 钢生产能力。

相对于高温板坯加热生产 Hi-B 钢,低温板坯加热工艺已经成为主流。由于低温 Hi-B 的铸坯加热温度低,抑制剂形成元素无法完全固溶,固有抑制剂的抑制能力不足,初次再结晶晶粒平均尺寸比较大^[5]。需要在冷轧后的脱碳渗氮退火工序中进行渗氮,渗入的 N 形成新的抑制剂,从而增加抑制能力^[4]。目前关于低温 Hi-B 钢的研究主要集中在抑制剂的析出、初次再结晶行为和二次再结晶行为等方面^[5-11],而关于全流程组织、织构演变规律的系统研究还少有报道。笔者系统研究了低温板坯加热 Hi-B 钢全流程工序中组织和织构特征,分析了组织和织构的演化规律。

1 试验材料及方法

本试验采用的低温 Hi-B 钢为某厂现场生产,以 AlN 为抑制剂,采用低温板坯加热结合渗氮工艺,热轧板和常化板厚度为 2.3 mm,冷轧板、脱碳渗氮板和成品板的厚度为 0.27 mm。试验钢的主要化学成分见表 1。

表 1 试验钢的主要化学成分
Table 1 Main chemical composition of tested steel

C	Si	Mn	Als	S	N
0.05	3.2	0.095	0.029 8	0.007 4	0.008 9

将低温 Hi-B 钢不同工序段的样品经线切割制备成尺寸 10 mm(RD)×8 mm(TD) 和 20 mm(RD)×15 mm(TD) 两种规格的试样,其中尺寸为 10 mm(RD)×8 mm(TD) 的试样经过镶嵌后依次在 400[#]~2 000[#]金相砂纸上进行细磨,然后机械抛光,用 4% 硝酸酒精腐蚀后,采用 ZEISS-Axio Scope A1 光学显微镜对组织进行观察与图像采集。对于成品板,制备成 150 mm(RD)×150 mm(TD) 的尺寸,将表面粗磨与细磨后,采用 30%~50% 盐酸水溶液进行腐蚀,采用数码相机拍摄成品板组织。而规格为 20 mm(RD)×15 mm(TD) 的试样作为织构检测样品,试样在 400[#]~2 000[#]金相砂纸上进行细磨,然后采用 X 射线衍射仪进行织构检测,测量数据采用 X'Pert Texture 分析软件进行取向分布函数分析。

2 结果与分析

2.1 热轧板组织和织构分析

图 1 为热轧板的组织,热轧板由于形变不均匀

以及动态再结晶发展程度不同,热轧后的组织从表面到中心分布不均匀,这对退火过程中的二次再结晶有重要影响,是形成完善二次再结晶组织的必要条件^[4]。可以将热轧板分为三层:表层再结晶区域、再结晶和形变晶粒混合区域和形变晶粒为主的中心层。热轧板表层主要为再结晶组织,横断面和纵断面表层,晶粒平均尺寸分别为 34.9 μm 和 34 μm,过渡层由再结晶和形变组织组成,中心层主要为纤维状的形变组织。

图 2 为热轧板表层、1/4 层和中心层的 ODF 图($\varphi_2=45^\circ$),通过对比不同厚度的 ODF 图可以发现各层织构类型不同。由图 2(a)可知,热轧过程中表面与轧辊之间在摩擦力的作用下产生剪切应力,表层形成了 {110}<001>、{110}<112>与 {441}<118>织构,同时还有较弱的 γ 织构。从图 2(b)中可以看到,1/4 层主要为 {110}<001>、{441}<118>、{554}<225>和 {001}<110>~{114}<110>的 α 织构。从图 2(c)可以看到,中心层主要为 {001}<110>~{223}<110>

的 α 组织。

2.2 常化板组织和织构分析

图 3 为常化板组织, 常化过程中部分 AlN 在高温条件下重新固溶, 起到钉扎作用的第二相数量减

少, 钢中抑制剂的抑制力减弱, 热轧板经过常化后表层晶粒长大, 横断面和纵断面表层晶粒平均尺寸分别增大到 $59.6 \mu\text{m}$ 和 $63.5 \mu\text{m}$, 同时过渡层和中心层在高温过程发生再结晶, 形变组织消失。

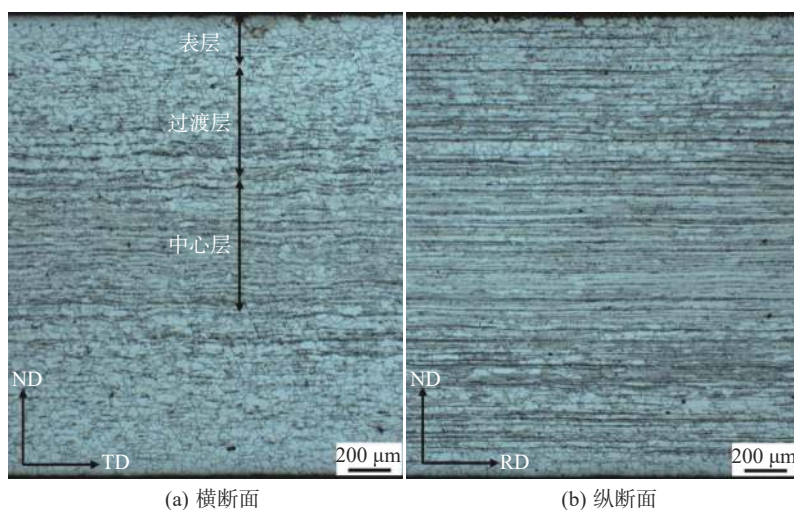


图 1 热轧板组织

Fig. 1 Microstructures of the hot-rolled band

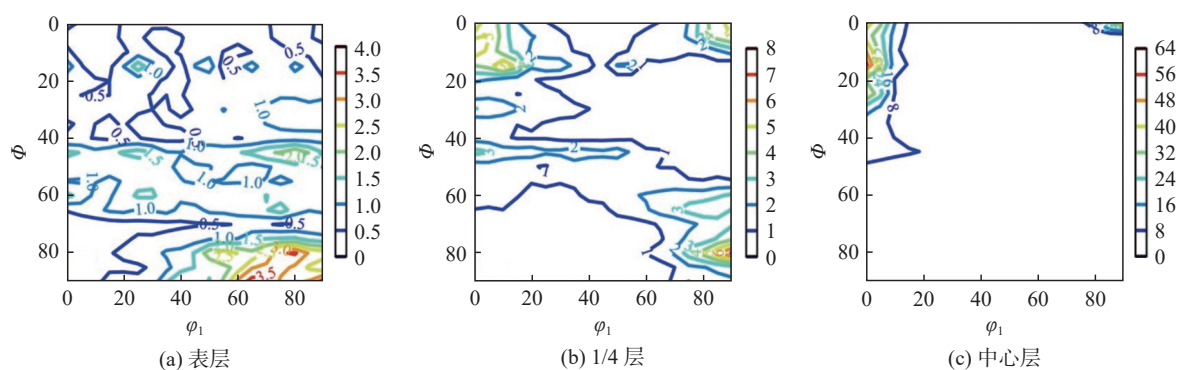


图 2 热轧板的 ODF 图($\phi_2=45^\circ$)

Fig. 2 ODFs figures of the hot-rolled band ($\phi_2=45^\circ$)

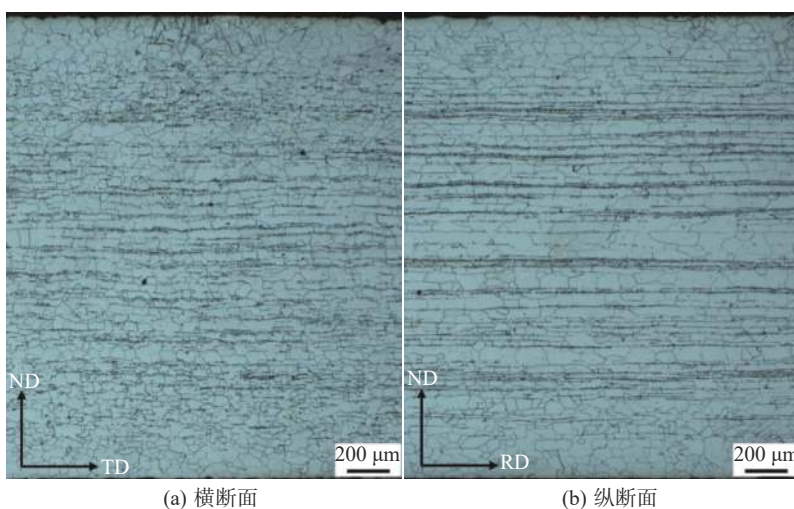


图 3 常化板组织

Fig. 3 Microstructures of the annealed hot-rolled band

图 4 为常化板表层、1/4 层和中心层的 ODF 图 ($\varphi_2=45^\circ$)。对比图 2 和图 4 可知,常化板与热轧板的织构分布情况类似,从表面到中心层织构的分布不均匀。从图 4(a)中可以看到,表层为 $\{110\}\langle 001\rangle$ 、 $\{441\}\langle 118\rangle$ 和 $\{110\}\langle 112\rangle$, 同时还有 γ 织构。从图 4

(b)中可以看到,1/4 层为 $\{110\}\langle 001\rangle$ 、 $\{110\}\langle 112\rangle$ 、 $\{441\}\langle 118\rangle$ 和 α 织构,同时还出现了较弱的 γ 织构。常化过程发生再结晶,与热轧板的 1/4 层相比,常化板中 $\{001\}\langle 110\rangle$ 织构强度大幅降低。由图 4(c)可知,中心层主要为 $\{001\}\langle 110\rangle \sim \{113\}\langle 110\rangle$ 的 α 织构。

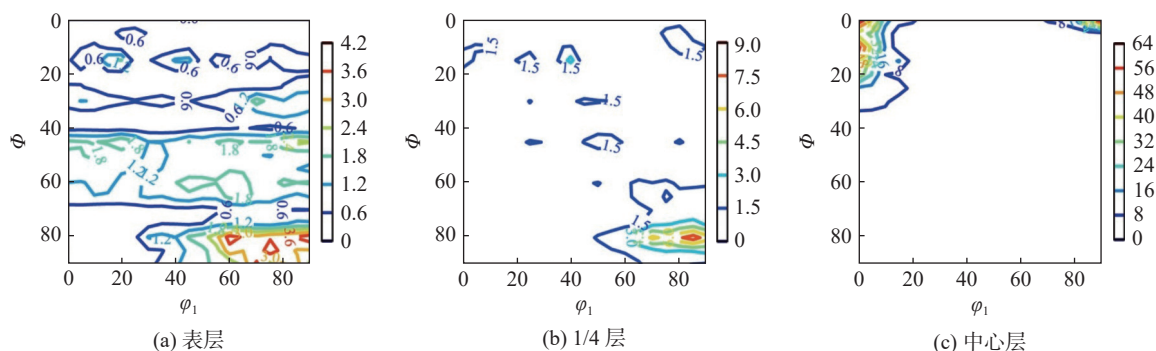


图 4 常化板的 ODF 图 ($\varphi_2=45^\circ$)

Fig. 4 ODFs figures of the annealed hot-rolled band ($\varphi_2=45^\circ$)

2.3 冷轧板组织和织构分析

图 5 为冷轧板组织,常化板的粗大晶粒经过一

次大压下率冷轧后,形成沿轧向伸长的冷轧组织,呈现纤维状。

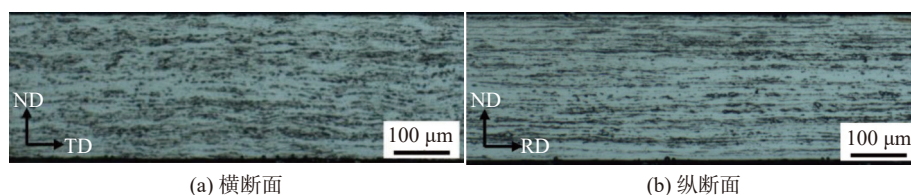


图 5 冷轧板组织

Fig. 5 Microstructures of the cold-rolled sheet

图 6 为冷轧板的 ODF 图 ($\varphi_2=45^\circ$),冷轧板形成了很强的以 $\{001\}\langle 110\rangle \sim \{111\}\langle 110\rangle$ 为主的 α 织构,同时还形成了较弱的 γ 织构。由于细晶粒低碳钢经不同压下率冷轧,取向变化基本上是沿以下两个途径进行晶体转动^[4]:① $\{110\}\langle 001\rangle \rightarrow \{554\}\langle 225\rangle \rightarrow \{111\}\langle 112\rangle \rightarrow \{111\}\langle 110\rangle \rightarrow \{223\}\langle 110\rangle$; ② $\{001\}\langle 100\rangle \rightarrow \{001\}\langle 110\rangle \rightarrow \{112\}\langle 110\rangle \rightarrow \{223\}\langle 110\rangle$,常化板经一次大压下率冷轧后,形成了很强的 α 织构,另外还有相对弱的 γ 织构。

2.4 脱碳渗氮板组织和织构分析

图 7 为冷轧板经过脱碳渗氮退火后的组织形貌,由图可以看到冷轧板经退火后发生了再结晶,冷轧板的变形组织转变为铁素体晶粒组织,脱碳渗氮板横断面和纵断面晶粒的平均尺寸分别为 $25.9\ \mu\text{m}$ 和 $25.3\ \mu\text{m}$ 。

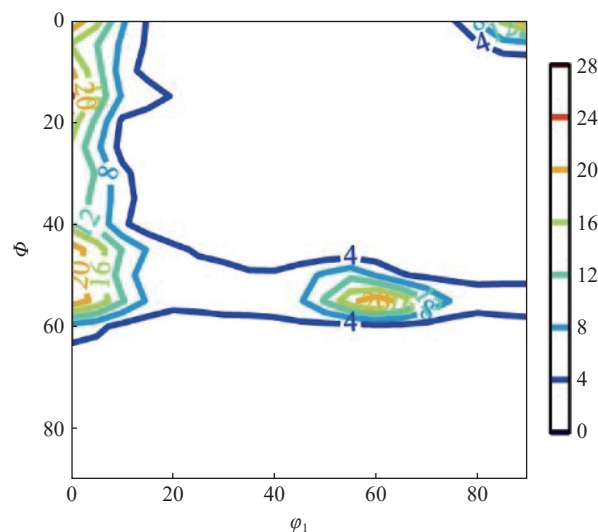


图 6 冷轧板的 ODF 图 ($\varphi_2=45^\circ$)

Fig. 6 ODF figure of the cold rolled sheet ($\varphi_2=45^\circ$)

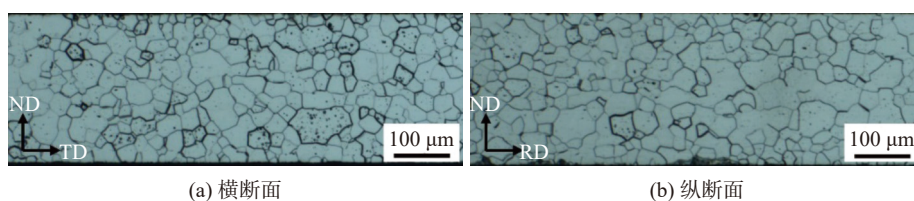
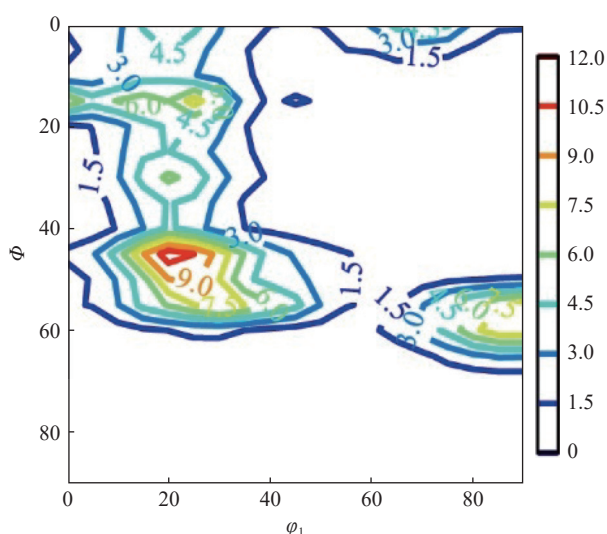


图 7 脱碳渗氮板组织

Fig. 7 Microstructures of the decarburized and nitrided sheet

图 8 为脱碳渗氮板的 ODF 图($\varphi_2=45^\circ$), 脱碳渗氮板有很强的 $\{111\}<112>$ 与 $\{114\}<481>$ 织构, 以及较强的 $\{001\}<120>$ 、 $\{111\}<123>$ 等织构; 还存在较弱的 α 织构。 $\{114\}<481>$ 位向的晶粒在 α 取向线的形变晶粒中形核, 在再结晶过程中吞并周围的形变晶粒长大, 从而导致 α 织构向 $\{114\}<481>$ 织构转变的现象^[9]。 $\{111\}<112>$ 和 $\{111\}<110>$ 之间形成易迁移的大角度晶界, 冷轧织构中存在强的 $\{111\}<110>$ 织构, 再结晶过程中 $\{111\}<112>$ 晶粒吞并 $\{111\}<110>$ 变形基体而长大^[9], 所以初次再结晶后出现强的 $\{111\}<112>$ 织构。通过对比图 6 和图 8, 可以看到 α 织构减弱, 同时 γ 织构向 $\{111\}<112>$ 集中。

图 8 脱碳渗氮板的 ODF 图($\varphi_2=45^\circ$)Fig. 8 ODF figure of the decarburized and nitride sheet ($\varphi_2=45^\circ$)

2.5 成品板组织和织构分析

图 9 为成品板组织, 成品板中二次再结晶组织发展完善, 晶粒平均尺寸为 19.1 mm, 成品晶粒的晶界呈弯曲凹凸状, 晶界的光滑度稍差, 同时成品组织中还存在孤岛晶粒。图 10 为成品板的 ODF 图($\varphi_2=45^\circ$), 可以看出, 成品板的织构集中在 $\{110\}<001>$ 位向, 即成品板的织构为单一的高斯织构。

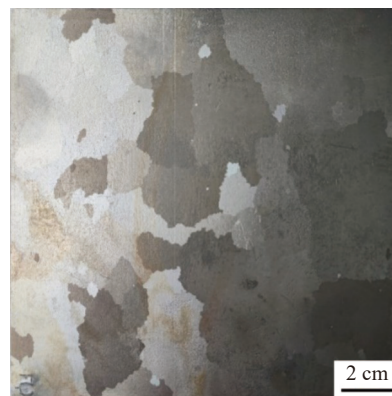


图 9 成品板组织

Fig. 9 Microstructure of the final product

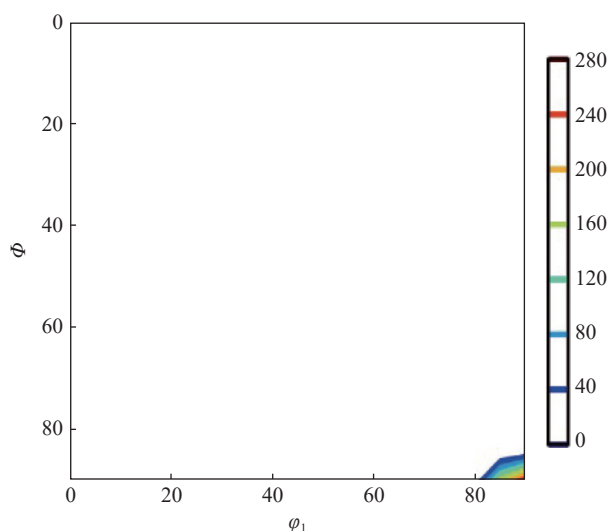


图 10 成品板的 ODF 图

Fig. 10 ODF figure of the final product ($\varphi_2=45^\circ$)

3 结论

1) 从热轧板的表面到中心, 组织和织构的分布都不均匀。热轧板可分为三层, 各个区域的组织特点不同, 并且织构类型也不同。

2) 热轧板经过常化后, 表面脱碳层晶粒明显粗化, 过渡层和中心层的形变晶粒发生再结晶而基本消失, 常化板继承了热轧板的织构特点。

3) 冷轧板为沿轧向伸长的纤维状变形组织, 冷

轧后形成的织构主要为 $\{001\}\langle 110 \rangle \sim \{111\}\langle 110 \rangle$ 。

4) 脱碳渗氮板为再结晶组织, 横断面和纵断面的晶粒平均尺寸分别为 25.9 μm 和 25.3 μm 。脱碳渗氮板织构为很强的 $\{111\}\langle 112 \rangle$ 与 $\{114\}\langle 481 \rangle$ 织

构, 较强的 $\{001\}\langle 120 \rangle$ 、 $\{111\}\langle 123 \rangle$ 织构, 以及较弱的 α 织构。

5) 成品板二次再结晶完善, 晶粒平均尺寸为 19.1 mm, 成品板的织构为单一的高斯织构。

参考文献

- [1] Li Xianhao, Meng Xiaotao, Zhao Pengfei, *et al.* Present status and future prospect of high permeability grain-oriented silicon steel[J]. *China Metallurgy*, 2019, 29(1): 1-7.
(黎先浩, 孟小涛, 赵鹏飞, 等. 高磁感取向硅钢研发现状与展望[J]. *中国冶金*, 2019, 29(1): 1-7.)
- [2] Qiu Shengtao, Fu Bing, Xiang Li, *et al.* Recent research trends and developments of production process and technology for high magnetic induction grain-oriented silicon steel[J]. *Iron and Steel*, 2013, 48(3): 1-8.
(仇圣桃, 付兵, 项利, 等. 高磁感取向硅钢生产技术与工艺的研发进展及趋势[J]. *钢铁*, 2013, 48(3): 1-8.)
- [3] Li Jun, Sun Ying, Zhao Yu, *et al.* Development of low temperature slab reheating technique for grain oriented silicon steel[J]. *Iron and Steel*, 2007, 42(10): 72-75.
(李军, 孙颖, 赵宇, 等. 取向硅钢低温铸坯加热技术的研发进展[J]. *钢铁*, 2007, 42(10): 72-75.)
- [4] He Zhongzhi, Zhao Yu, Luo Haiwen. Electrical steel[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012.
(何忠治, 赵宇, 罗海文. 电工钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012.)
- [5] Woo J S, Han C H, Hong B D, *et al.* The onset temperature of secondary recrystallization and the sharpness of Goss secondary recrystallization texture in the nitrided Fe-3%Si alloy[J]. *Acta Materialia*, 1998, 46(14): 4905-4909.
- [6] Liu Gongtao, Liu Zhiqiao, Yang Ping, *et al.* Effect of primary recrystallized microstructure and nitriding on secondary recrystallization in grain oriented silicon steel by low temperature slab reheating[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2018, 46(1): 16-24.
(刘恭涛, 刘志桥, 杨平, 等. 初次再结晶组织和渗氮量对低温渗氮取向硅钢二次再结晶行为的影响[J]. *材料工程*, 2018, 46(1): 16-24.)
- [7] Xu Shuai, Bao Siqian, Ke Shanshan, *et al.* Grain boundary characteristics of non-abnormal grown Goss grains of Hi-B steel during secondary recrystallization annealing[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2020, 45(9): 167-171.
(徐帅, 鲍思前, 柯珊珊, 等. Hi-B钢二次再结晶退火过程中未异常长大Goss晶粒晶界特征[J]. *金属热处理*, 2020, 45(9): 167-171.)
- [8] Bao Siqian, Liu Bingbing, Zhao Gang, *et al.* Three-dimensional morphologies of abnormally grown goss oriented grains in Hi-B steel during secondary recrystallization annealing[J]. *Acta Metall. Sin.*, 2018, 54(6): 877-885.
(鲍思前, 刘兵兵, 赵刚, 等. Hi-B钢二次再结晶退火中异常长大Goss取向晶粒的三维形貌表征[J]. *金属学报*, 2018, 54(6): 877-885.)
- [9] Liu Zhiqiao, Yang Ping, Mao Weimin, *et al.* Effect of $\{114\}\langle 418 \rangle$ texture on abnormal growth during secondary recrystallization in grain oriented steel[J]. *Acta Metall. Sin.*, 2015, 51(7): 769-776.
(刘志桥, 杨平, 毛卫民, 等. 取向硅钢中 $\{114\}\langle 418 \rangle$ 织构对二次再结晶时晶粒异常长大的影响[J]. *金属学报*, 2015, 51(7): 769-776.)
- [10] Wang Haijun, Fu Bing, Xiang Li, *et al.* Effect of nitrogen content on primary recrystallization behavior and magnetic property of Hi-B steel[J]. *Journal of Iron and Steel Research(International)*, 2016, 23(10): 1080-1085.
- [11] Xiang Li, Rong Zhe, Fu Bing, *et al.* Characterizing microstructure and texture after recrystallization annealing of Hi-B steel with simultaneous decarburization and nitriding[J]. *Journal of Iron and Steel Research(International)*, 2017, 24(12): 1215-1222.