

常化工艺对高磁感取向硅钢组织和织构的影响

郝娟娟¹, 屈文胜¹, 刘朋成¹, 卢晓禹¹, 邬宇轩¹, 冯海涛¹, 李洋²

1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古包头 014010;
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司制造部, 内蒙古包头 014010)

摘要:常化工艺作为取向硅钢重要的生产制造工序,对高磁感取向硅钢磁性能有关键影响。文章利用光学显微镜和X射线衍射仪,研究了常化保温时间和冷却速度对高磁感取向硅钢组织和织构的影响。常化板对热轧板的组织和织构有一定的继承性,在板厚方向上组织具有不均匀性,织构类型主要为Goss织构 $\{110\} \langle 001 \rangle$ 、铜型织构 $\{112\} \langle 111 \rangle$ 和黄铜型织构 $\{110\} \langle 112 \rangle$ 。延长保温时间,晶粒完全发生再结晶,织构类型发生显著变化;提高冷却速度,组织及织构类型无显著变化,Goss织构强度提高。

关键词:取向硅钢;常化;组织;织构

中图分类号: TG142.1

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2024)05-0024-06

Effects of Normalizing Process on Microstructure and Texture of High Magnetic Induction Oriented Silicon Steel

Hao Juan-juan¹, Qu Wen-sheng¹, Liu Peng-cheng¹, Lu Xiao-yu¹,
Wu Yu-xuan¹, Feng Hai-tao¹, Li Yang²

(1. Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010,
Inner Mongolia Autonomous Region, China;

2. Manufacturing Dept. of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010,
Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: As an important manufacturing process of oriented silicon steel, the normalizing process has a key effect on magnetic properties of high magnetic induction oriented silicon steel. In the paper, the effects of holding time and cooling rate for normalizing on microstructure and texture of high magnetic induction oriented silicon steel are studied with optical microscope and X-ray diffractometer. The microstructure and texture of normalizing plate are similar to those of hot rolled plate as well as microstructure is with nonuniformity in the direction of plate thickness. The main types of texture are Goss texture $\{110\} \langle 001 \rangle$, copper type texture $\{112\} \langle 111 \rangle$ and brass type texture $\{110\} \langle 112 \rangle$. With the extension of holding time, grains recrystallize completely and texture types are changed significantly; with the increase of cooling rate, there are not significant changes for microstructure and texture types as well as strength of Goss texture is increased.

Key words: oriented silicon steel; normalizing; microstructure; texture

取向硅钢含碳量极低,具有良好的磁性能,是制造电源变压器、脉冲变压器和磁放大器铁芯的核心材料。随着节能降耗要求的提高、新能源的普及与使用和变压器新能效国标 GB 20052—2024《电力变压器能效限定值及能效等级》的正式发布,使得高磁取向硅钢(Hi-B钢)受到高度关注。许多钢厂及科研院所投身于取向硅钢研发和工艺优化,力求获得综合性能良好的高磁取向硅钢。常化工艺作为高磁取向硅钢生产的重要步骤^[1-2],常见的工艺为两段式常化,首先将热轧板加热至高温促进抑制剂固溶,在随后低温保温及冷却过程中抑制剂重新均匀、弥散析出增强抑制能力^[3-6]。目前关于取向硅钢常化工艺的研究主要集中在高温保温段温度及冷却方式的影响,如 Hu 等^[7]研究了常化温度对重要取向晶粒长大过程的影响,Ling 等^[8]研究了

两段式常化工艺中冷却段冷却方式对抑制剂析出的影响,Li 等^[9]研究表明采用两段式常化工艺能够获得更加尖锐的 Goss 织构,提高磁性能,忽略了保温时间及冷却方式对组织和织构的影响。本文利用金相显微镜、X 射线衍射仪研究常化保温时间及冷却方式对高磁取向硅钢组织和织构演变规律的影响。

1 试验材料及方法

本试验所用的 Hi-B 钢 Si 含量为 3.24%,具体化学成分如表 1 所示。将铸坯热轧为 2.3 mm 厚钢板,沿轧向取 550 mm × 180 mm × 2.3 mm 热轧板采用两段式常化工艺进行常化,常化工艺如图 1 所示,具体工艺参数如表 2 所示。

表 1 试验钢化学成分(质量分数)

C	Si	Mn	P	S	Ti	N	O
0.045	3.24	0.15	0.015	0.005	0.0020	0.006 5	0.001 5

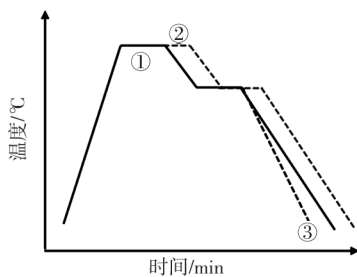


图 1 常化工艺图

表 2 常化工艺参数

工艺编号	高温段		低温段		冷却方式
	温度/°C	时间/min	温度/°C	时间/min	
1	1 020	3	930	3	沸水淬
2	1 020	5	930	3	沸水淬
3	1 020	3	930	3	空冷

各常化工艺常化板沿轧向取 20 mm × 15 mm × 2.3 mm 试样,定义 $s = 0$ mm、 $s = 0.6$ mm 和 $s = 1.2$ mm 分别代表表层、1/4 层和 1/2 层。样品经过磨抛处理后用 4% 硝酸酒精溶液腐蚀 20 s,利用蔡司显微镜观察金相组织,利用 X 射线衍射仪对不同常化工艺常化板宏观织构进行分析。通过对不同

常化工艺常化板金相组织和织构进行研究,获得保温时间、温度和冷却方式对组织及织构的影响规律。

2 试验结果与分析

2.1 热轧板组织及织构分析

热轧板组织如图 2 所示。

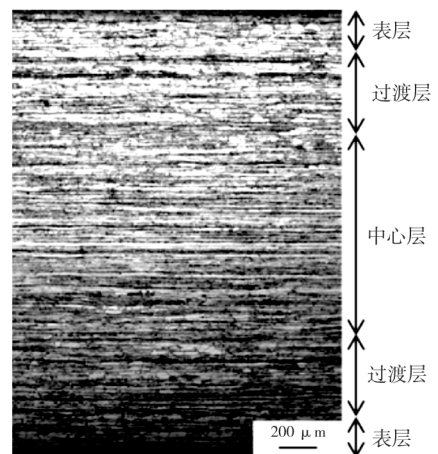


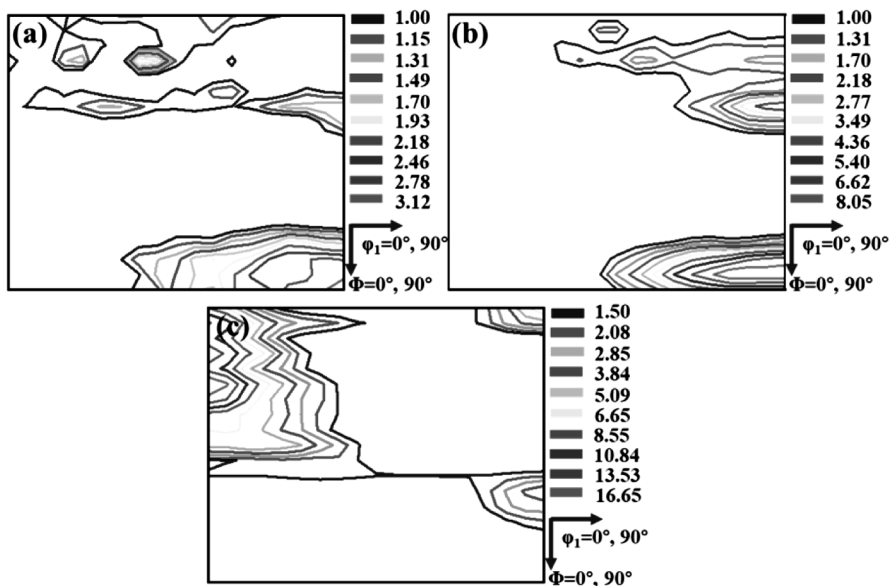
图 2 热轧板组织

由于热轧过程中板坯厚度方向受力和受热不均匀,导致热轧板厚度方向动态再结晶发展程度不

同^[10],热轧后厚度方向组织分布不均匀,可分为表层再结晶区、再结晶和变形晶粒混合的过渡区及以变形晶粒为主的中心层区。表层受到轧制力较大且温度相对较高,轧制过程中发生动态再结晶获得等轴晶。由表层到中心,温差逐渐加大,轧制力逐渐减小,晶粒动态再结晶程度逐渐减小,从而获得长条状变形组织

对热轧板表层、1/4 层和 1/2 层宏观织构进行分析,如图 3 所示。表层主要的织构类型为 Goss 织

构 $\{110\} \langle 001 \rangle$ 、铜型织构 $\{112\} \langle 111 \rangle$ 和黄铜织构 $\{110\} \langle 112 \rangle$,其中 Goss 织构强度最强;1/4 层黄铜织构消失,Goss 织构和铜型织构强度均增强;1/2 层处织构类型发生明显变化,Goss 织构和铜型织构消失,产生 $\{112\} \langle 110 \rangle$ 、 $\{118\} \langle 110 \rangle$ 、 γ 织构 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 和立方织构 $\{001\} \langle 110 \rangle$,其中 $\{112\} \langle 110 \rangle$ 织构强度最强。热轧板厚度方向织构类型分布不均匀,其中 Goss 织构在 1/4 层处最强。



(a) $s = 0$ mm; (b) $s = 0.6$ mm; (c) $s = 1.2$ mm

图 3 热轧板织构

2.2 常化板组织分析

常化工艺作为取向硅钢生产不可或缺的工序,对显微组织有显著影响。各常化工艺常化板显微组织如图 4 所示。热轧板经过工艺 1 常化后,厚度方向组织不均匀性略有改善,沿厚度方向各层均发生一定程度再结晶,表层完全由再结晶晶粒构成,过渡层再结晶组织比例增加,长条形变形组织减少,中心层部分组织发生再结晶,长条状变形组织仍为主体组织,长条状变形组织宽度增加,如图 4(a) 所示。当高温段保温时间延长至 5 min 时(工艺 2),板厚度方向各层均发生完全再结晶,变形组织完全消失,晶粒显著长大,出现混晶组织,显微组织如图 4(b) 所示。当冷却方式由沸水淬改为空冷时,冷却速度加快,显微组织如图 4(c) 所示,与图 4(a) 对比,沿板厚度方向同样发生不同程度再结晶,但是由于冷

却速度加快,工艺 3 各层晶粒尺寸小于工艺 1。综上所述,常化工艺能够促进热轧板组织发生再结晶,晶粒尺寸增大,组织软化,利于后续冷轧。

2.3 常化板织构分析

除显微组织外,织构是影响取向硅钢性能的另一个重要因素。分别对各工艺常化板表层、1/4 层和 1/2 层织构类型及强度变化进行分析,研究不同保温时间和冷却方式的影响。工艺 1 常化板各层织构类型及分布如图 5 所示,表层($s = 0$ mm)和 1/4 层($s = 0.6$ mm)主要织构类型为 Goss 织构 $\{110\} \langle 001 \rangle$ 、铜型织构 $\{112\} \langle 111 \rangle$ 和黄铜型织构 $\{110\} \langle 112 \rangle$,中心层主要织构为强度极高的 $\{118\} \langle 110 \rangle$ 和 $\{112\} \langle 110 \rangle$,表层 Goss 织构强度最高。

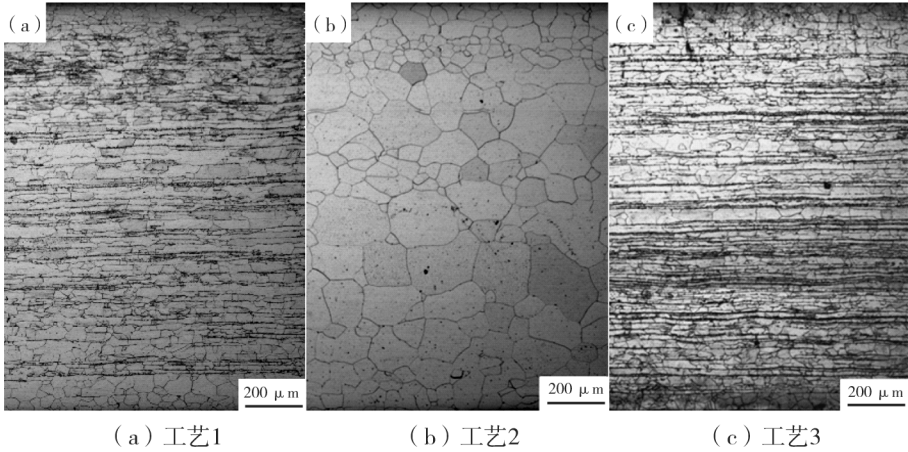


图 4 常化板金相组织

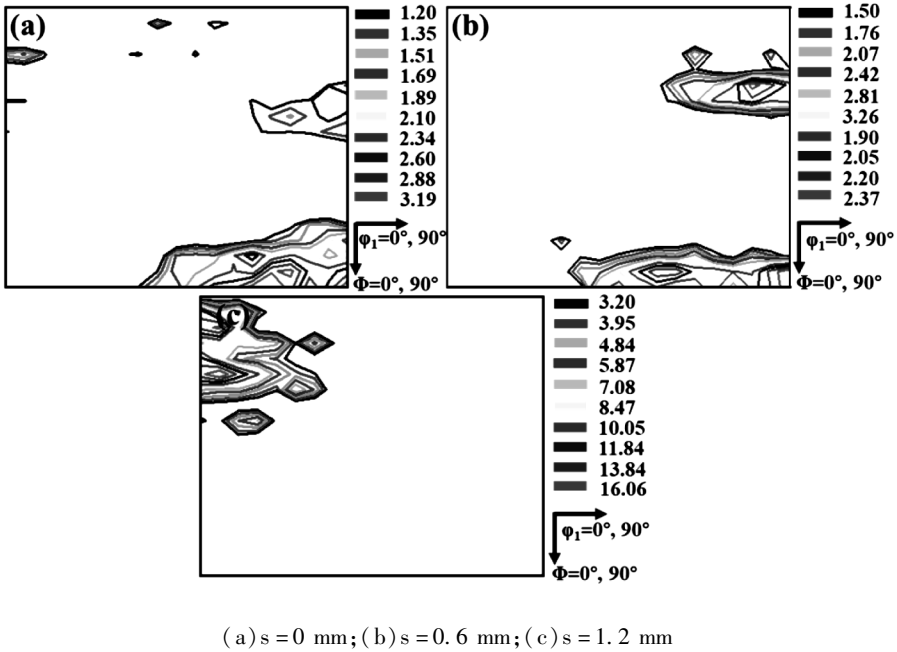
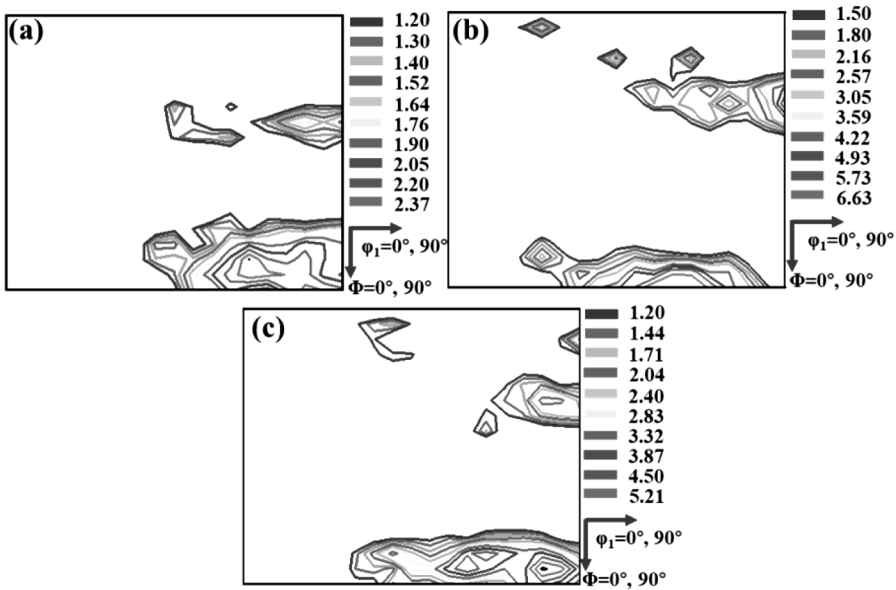


图 5 工艺 1 常化板织构

工艺 2 常化板各层织构类型如图 6 所示。延长保温时间,对织构类型及强度有明显影响。表层及 1/2 层主要织构类型为 Goss 织构 $\{110\} \langle 001 \rangle$ 、铜型织构 $\{112\} \langle 111 \rangle$ 和黄铜型织构 $\{110\} \langle 112 \rangle$, 1/4 层主要织构类型为铜型织构 $\{112\} \langle 111 \rangle$ 和黄铜型织构 $\{110\} \langle 112 \rangle$, Goss 织构消失。与工艺 1 相比, Goss 织构强度降低。

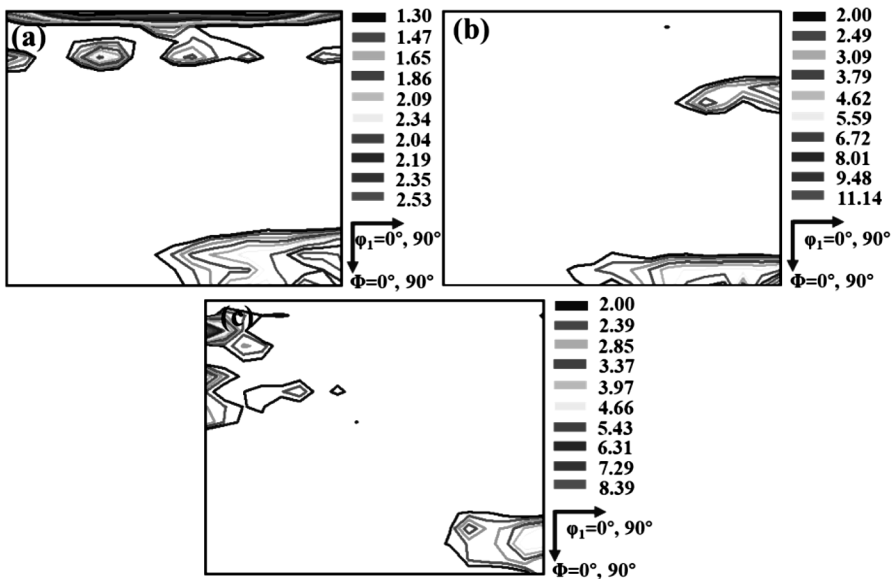
完成常化后采用空冷方式进行冷却,各层织构

类型如图 7 所示。提高冷却速度,织构类型无明显变化。表层主要为立方织构和 Goss 织构 $\{110\} \langle 001 \rangle$, 1/4 层主要为 Goss 织构 $\{110\} \langle 001 \rangle$ 、铜型织构 $\{112\} \langle 111 \rangle$, 1/2 层铜型织构 $\{112\} \langle 111 \rangle$ 和 Goss 织构 $\{110\} \langle 001 \rangle$ 消失,出现强度较高的 $\{118\} \langle 110 \rangle$ 织构和 $\{112\} \langle 110 \rangle$ 织构, 1/4 层 Goss 织构 $\{110\} \langle 001 \rangle$ 强度最高。



(a) $s=0$ mm; (b) $s=0.6$ mm; (c) $s=1.2$ mm

图 6 工艺 2 常化板织构



(a) $s=0$ mm; (b) $s=0.6$ mm; (c) $s=1.2$ mm

图 7 工艺 3 常化板织构

综上所述,常化板对热轧板组织和织构具有一定继承性。不同常化工艺促进晶粒再结晶,改善了热轧板组织的不均匀性。当延长高温段保温时间至 5 min 时(工艺 2),厚度方向上晶粒均完成再结晶,变形组织完全消失。不同常化工艺,织构类型无显著变化,主要为 Goss 织构 $\{110\} \langle 001 \rangle$ 、铜型织构 $\{112\} \langle 111 \rangle$ 和黄铜型织构 $\{110\} \langle 112 \rangle$, $1/4$ 层处 Goss 织构强度最强。工艺 2 由于晶粒完全发生

再结晶,其织构类型与热轧板有明显差别。

3 结论

(1) 常化板对热轧板的组织和织构具有继承性,常化工艺能够改善热轧板组织的不均匀性。

(2) 常化板主要织构类型为 Goss 织构 $\{110\} \langle 001 \rangle$ 、铜型织构 $\{112\} \langle 111 \rangle$ 和黄铜型织构 $\{110\} \langle 112 \rangle$, $1/4$ 层处 Goss 织构强度最强。

(3) 延长常化保温时间能够促进晶粒再结晶, 促使变形组织消失, 织构类型发生明显变化。

(4) 提高冷却速度, 织构类型无明显变化, Goss 织构强度提高。

参 考 文 献

- [1] Giri S K, Kundu S, Prakash A, et al. Defining the Role of Hot Band Annealing in High - Permeability Grain - Oriented (GO) Electrical Steel [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2022, 53(5): 1873 - 1888.
- [2] Chang S K. Texture Change from Primary to Secondary Recrystallization by Hot - band Normalizing in Grain - oriented Silicon Steels [J]. Materials Science & Engineering A, 2007, 452: 93 - 98.
- [3] 李慧, 冯运莉, 齐雪京, 等. Fe - 3.15% Si 低温取向硅钢不同常化工艺下的组织及析出相研究 [J]. 金属学报, 2013, 49(5): 562 - 568.
- [4] 杨帆, 花艳侠, 张晨, 等. 正火对高锰 50W470 无取向硅钢磁性的影响 [J]. 金属热处理, 2015, 40(11): 165 - 167.
- [5] Cheng Z, Liu J, Yang J, et al. Effect of Normalization on the Microstructure and Texture Evolution During Primary and Secondary Recrystallization of Hi - B Electrical Steel [J]. Indian Journal of Engineering and Materials Sciences, 2016, 23(2/3): 165 - 170.
- [6] Tsai M, Hwang Y. The Quenching Effects of Hot Band Annealing on Grain - Oriented Electrical Steel [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2010, 322(18): 2690 - 2695.
- [7] Hu C, Song R, Wang Y, et al. Comprehensive Influence of the Normalized and Final Annealing Process on High Strength Nonoriented Silicon Steel [J]. Steel Research International, 2022, 93(7): 1 - 12.
- [8] Ling C, Xiang L, Qiu S, et al. Effects of Normalizing Annealing on Grain - Oriented Silicon Steel [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2014, 21(7): 690 - 694.
- [9] Li H, Feng Y L, Song M, et al. Effect of Normalizing Cooling Process on Microstructure and Precipitates in Low - Temperature Silicon Steel [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(3): 770 - 776.
- [10] 桂攀. 低温加热取向硅钢组织与织构演变研究 [J]. 电工钢, 2021, 3(5): 15 - 20.