

# 卷取温度对 50W470 无取向硅钢组织和织构的影响

吴忠旺<sup>1,2</sup>, 何宇峥<sup>1</sup>, 张慧敏<sup>1,2</sup>, 董瑞<sup>1,2</sup>, 孙婷婷<sup>1,2</sup>,  
刘朋成<sup>3</sup>, 金自力<sup>1,2</sup>, 任慧平<sup>1,2</sup>

1. 内蒙古科技大学材料科学与工程学院, 内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古自治区新金属材料重点实验室, 内蒙古 包头 014010;
3. 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古 包头 014010

**摘要:** 利用光学显微镜(OM)、电子背散射衍射(Electron Back-Scattered Diffraction, EBSD)检测分析技术研究了卷取温度对 50W470 无取向硅钢热轧、常化工艺下的组织和织构的影响规律。结果表明, 高温卷取会促进热轧板中心层变形组织向无畸变等轴晶粒的转变, 经过 740 °C 卷取的促进效果要好于 600 °C 卷取, 热轧板经过高温卷取后有利织构{100} + {110} 占比升高, 不利织构{111} 占比减少。高温卷取板经过常化后组织发生完全再结晶, 变形组织消失, 常化后的 740 °C 卷取板较 600 °C 卷取板有利织构{100} + {110} 占比更多, 不利织构{111} 减少。

**关键词:** 卷取温度; 无取向硅钢; 组织; 织构

中图分类号: TG142.1

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2024)04-0079-06

## Effects of Coiling Temperature on Microstructure and Texture of 50W470 Non-oriented Silicon Steel

Wu Zhong-wang<sup>1,2</sup>, He Yu-zheng<sup>1</sup>, Zhang Hui-min<sup>1,2</sup>, Dong Rui<sup>1,2</sup>,  
Sun Ting-ting<sup>1,2</sup>, Liu Peng-cheng<sup>3</sup>, Jin Zi-li<sup>1,2</sup>, Ren Hui-ping<sup>1,2</sup>

1. School of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
2. Inner Mongolia Key Laboratory of New Metal Material, Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
3. Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

**Abstract:** The effect laws of coiling temperature on microstructure and texture of 50W470 non-oriented silicon steel under hot rolling and normalizing processes are studied with such detection and analysis technologies as the optical microscope (OM) and electron back-scattered diffraction (EBSD). The results showed that high temperature coiling could promote the transformation of deformed microstructure in central layer of hot rolled plate to equiaxed grain without distortion.

收稿日期: 2024-06-01

基金项目: 内蒙古自治区直属高校基本科研业务费项目(2023QNJS022, 2023QNJS024)。

作者简介: 吴忠旺(1979-), 男, 安徽省池州市人, 研究员, 现从事硅钢生产技术开发工作。

The promoting effect of coiling at 740 °C is better than that of coiling at 600 °C. After high temperature coiling, the proportion of favorable texture  $\{100\} + \{110\}$  is increased, while the proportion of unfavorable texture  $\{111\}$  is decreased. After normalizing, the microstructure of high temperature coiling plate is with perfect recrystallization and the deformed microstructure is disappeared as well as the coiling plate with temperature of 740 °C is with more favorable texture  $\{100\} + \{110\}$  and fewer unfavorable texture  $\{111\}$  than those of coiling plate with temperature of 600 °C.

**Key words:** coiling temperature; non-oriented silicon steel; microstructure; texture

无取向硅钢主要用于制作电机转子和定子的铁芯材料,其晶粒大小、合金元素含量、夹杂物数量和分布、织构分布等因素都对磁性能有显著的影响<sup>[1-2]</sup>。无取向硅钢理想织构组分为 $\{100\}$ ,在 $\{100\}$ 上有两个易磁化轴,磁性最好;其次是 $\{110\}$ ,在 $\{110\}$ 上有一个易磁化轴;而不利织构为 $\{111\}$ , $\{111\}$ 无易磁化轴,为难磁化方向。因此,织构的分布及各组分强度对冷轧无取向硅钢的磁性能有显著影响<sup>[3-4]</sup>。

无取向硅钢生产过程中提高卷取温度可以明显改善热轧组织,使热轧板发生再结晶,减少热轧板中变形组织,同时可以预防瓦楞状缺陷,改善钢板的性能<sup>[5-9]</sup>。本文重点研究了卷取温度对 50W470 无取

向硅钢的组织 and 织构的影响。

## 1 试验材料及方法

采用 25 kg 真空感应炉冶炼,浇注成尺寸为 220 mm × 150 mm × 150 mm (长 × 宽 × 高)的铸锭,试验钢化学成分如表 1 所示。将铸锭进行均匀化退火和锻造,去除在浇注过程中产生的缺陷,最终锻坯尺寸为 825 mm × 100 mm × 60 mm (长 × 宽 × 高)。锻坯经过 6 道次热轧轧至 2.3 mm 厚,将热轧板分别放入 600 °C 和 740 °C 箱式炉中保温 2 h 后断电,随炉冷却进行模拟卷取。将热轧板进行连续常化处理,常化温度为 930 °C。

表 1 试验钢化学成分(质量分数)

C	Si	Mn	P	S	Al <sub>s</sub>	Ti	O	N	Fe
0.001 6	1.75	0.353	0.028	0.002 6	0.55	≤0.003	≤0.003	≤0.003	余量

选用 VERT A1 型蔡司光学显微镜对金相组织进行观察;选用 Nano Measurer 软件测量试验钢金相组织各区的厚度以及晶粒尺寸大小;选用 Zeiss Supre55 热场发射扫描电子显微镜进行电子背散射衍射(Electron Back-Scattered Diffraction, EBSD)织构标定分析。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 卷取温度对 50W470 无取向硅钢热轧组织的影响

图 1 为不同卷取温度热轧板的显微组织。可以看出,空冷热轧板沿厚度方向的显微组织不均匀,表层为细小的等轴晶粒,平均晶粒尺寸为 28.39 μm,厚度为 321.28 μm;过渡层为等轴晶粒与长条组织的混合区域,厚度为 382.02 μm;中心层为长条组织区域,厚度为 569.73 μm。造成组织分布不均匀的原因与热轧过程中的受力状态与变形程度有关<sup>[10]</sup>,

表面同较冷的轧辊接触,使晶体组织缺陷累积到临界浓度以上,促发再结晶过程得到等轴晶。同时受剪切应力和压应力作用,变形量大,表层缺陷密度大、储能高,有利于发生再结晶;心部不与轧辊接触,受力状态简单,主要为压应力,变形量小,累计能量小,相对不容易发生再结晶。

600 °C 卷取热轧板表层细晶区域平均晶粒尺寸为 31.25 μm,厚度为 477.24 μm,过渡层区域厚度为 421.76 μm,中心层区域厚度为 278.08 μm。相比空冷热轧板表层区域厚度增加,过渡层区域厚度增加,中心层区域厚度减小,表层平均晶粒尺寸增大。

740 °C 卷取热轧板表层平均晶粒尺寸为 39.54 μm,表层区域厚度为 479.82 μm,过渡层区域厚度为 435.48 μm,中心层区域厚度为 286.24 μm。经过 740 °C 卷取后,表层区域厚度最大,中心层区域厚度最小;表层平均晶粒尺寸最大。说明卷取温度越高,晶粒发生再结晶的能力越强。

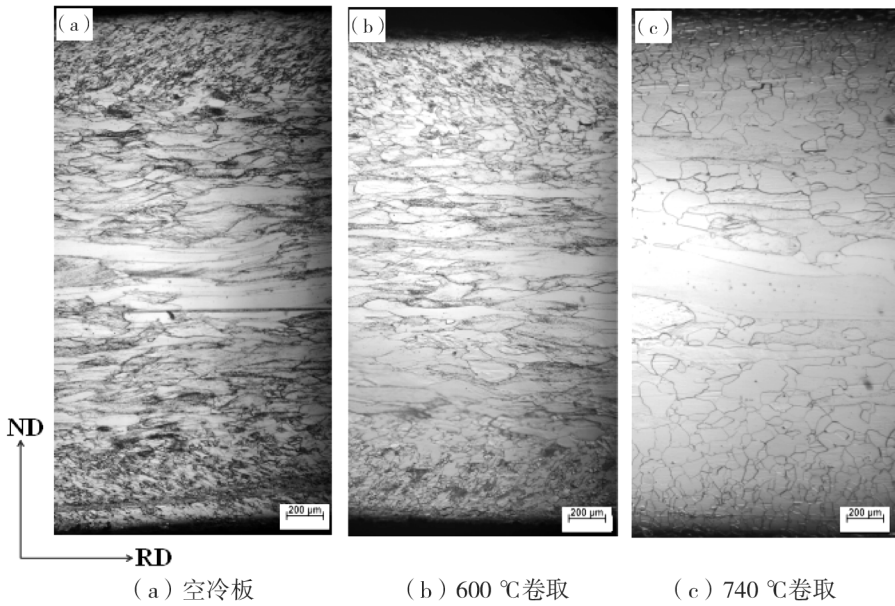


图1 不同卷取温度热轧板的显微组织

## 2.2 卷取温度对 50W470 无取向硅钢常化组织的影响

图2为600 °C和740 °C卷取板常化后显微组织。可以看出,600 °C和740 °C卷取板经过常化后显微组织均发生了完全再结晶,中心层变形组织完全消失,600 °C卷取板常化后平均晶粒尺寸为

130.73  $\mu\text{m}$ ,740 °C卷取板常化后平均晶粒尺寸为120.76  $\mu\text{m}$ 。常化过程是以热轧板晶粒内部形变储能为驱动力,促使晶粒发生再结晶形核,通过大角度晶界迁移并促进再结晶晶粒长大<sup>[11]</sup>,主要表现为热轧态组织的静态再结晶和晶粒长大。

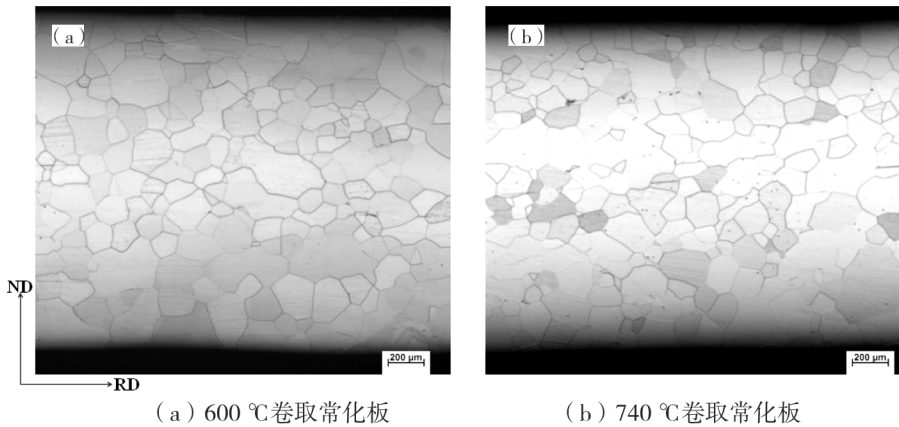


图2 常化板显微组织

## 2.3 卷取温度对 50W470 无取向硅钢热轧织构的影响

图3为不同卷取温度热轧板的晶粒取向IPF图,表2为晶粒取向统计表。50W470的有利织构为 $\{100\}$ 与 $\{110\}$ 织构,不利织构为 $\{111\}$ 织构。由

图3、表2可以看出,热轧空冷板 $\{100\}$ 织构占比为8.33%, $\{110\}$ 织构占比为43.47%, $\{111\}$ 织构占比为29.77%;经过600 °C卷取后 $\{100\}$ 织构占比为12.70%, $\{110\}$ 织构占比为39.24%, $\{111\}$ 织构占比为28.48%;经过740 °C卷取后 $\{100\}$ 织构占比为

14.27%,  $\{110\}$  织构占比为 38.36%,  $\{111\}$  织构占比为 27.38%。在硅钢铸坯中存在大量  $\{100\}$  柱状晶且具有遗传性<sup>[7]</sup>, 热轧后  $\{100\}$  柱状晶会形成立

方取向和旋转立方取向<sup>[12]</sup>。可以看到随着卷取温度的升高, 50W470 无取向硅钢有利  $\{100\} + \{110\}$  织构占比升高,  $\{111\}$  不利织构占比降低。

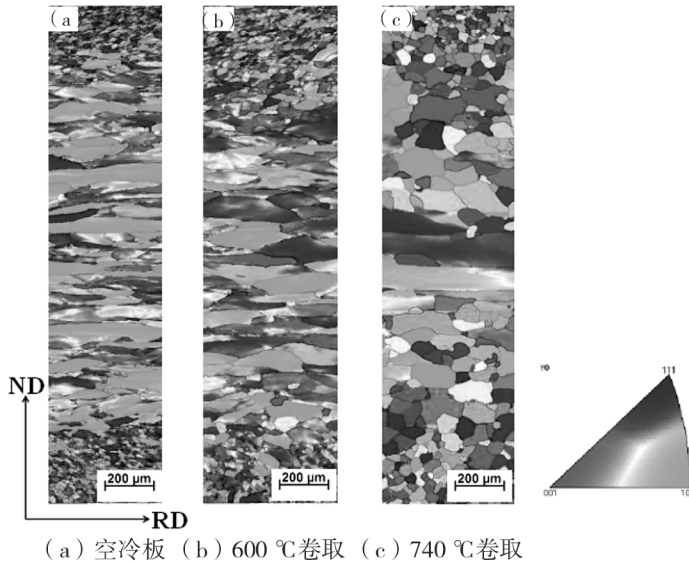


图 3 不同卷取温度热轧板的晶粒取向 IPF 图

表 2 不同卷取温度热轧板的晶粒取向统计表

卷取温度/°C	各织构占比/%		
	$\{100\}$	$\{110\}$	$\{111\}$
空冷	8.33	43.47	29.77
600	12.70	39.24	28.48
740	14.27	38.36	27.38

图 4 为不同卷取温度热轧板的晶粒取向分布图。热轧空冷板表层主要存在织构为  $\alpha$  线织构  $\{112\} \langle 110 \rangle$  和  $\{411\} \langle 148 \rangle$  织构, 过渡层主要为高斯织构  $\{110\} \langle 001 \rangle$  和黄铜型织构  $\{110\} \langle 112 \rangle$ , 中心层主要以黄铜型织构  $\{110\} \langle 112 \rangle$  和  $\gamma$  线织构  $\{111\} \langle 110 \rangle$ 。600 °C 卷取板表层织构占比并没有发生很大变化, 过渡层主要存在  $\gamma$  线织构  $\{111\} \langle 110 \rangle$  和  $\{411\} \langle 148 \rangle$  织构, 中心层主要为  $\gamma$  线织构  $\{111\} \langle 110 \rangle$ 。740 °C 卷取板表层开始出现  $\{411\} \langle 148 \rangle$  织构, 过渡层出现黄铜型织构  $\{110\} \langle 112 \rangle$ , 中心层出现大量  $\gamma$  线织构  $\{111\} \langle 110 \rangle$ 。 $\{411\} \langle 148 \rangle$  织构既可能来源于铸坯中的  $\{100\}$  柱状晶, 也可能来自大压下量下纯  $\alpha$  线形变晶粒内的一些特殊取向<sup>[13]</sup>。

## 2.4 不同卷取温度对 50W470 无取向硅钢常化织构的影响

图 5 为 600 °C 和 740 °C 卷取常化板的 IPF 图 (由表层到中心层), 表 3 为晶粒取向统计表。对于无取向硅钢来说,  $\{100\}$  晶轴易磁化,  $\{110\}$  晶轴次之,  $\{111\}$  织构难磁化<sup>[14]</sup>。因此,  $\{100\}$  和  $\{110\}$  面织构为有利织构,  $\{111\}$  和  $\{112\}$  面织构为不利织构。在热处理过程中, 可以适当增大  $\{100\}$  和  $\{110\}$  面织构的强度、减小  $\{111\}$  面织构的强度来提高成品板材的磁性能。600 °C 卷取常化板中  $\{100\}$  织构占比为 16.38%,  $\{110\}$  织构占比为 31.78%,  $\{111\}$  织构占比为 24.35%; 740 °C 卷取常化板中  $\{100\}$  织构占比为 23.08%,  $\{110\}$  织构占比为 28.68%,  $\{111\}$  织构占比为 19.05%。可以看到 740 °C 卷取板经常化后  $\{100\} + \{110\}$  织构占比更多。

表 3 常化板的晶粒取向统计表

卷取温度/°C	各织构占比/%		
	$\{100\}$	$\{110\}$	$\{111\}$
600	16.38	31.78	24.35
740	23.08	28.68	19.05

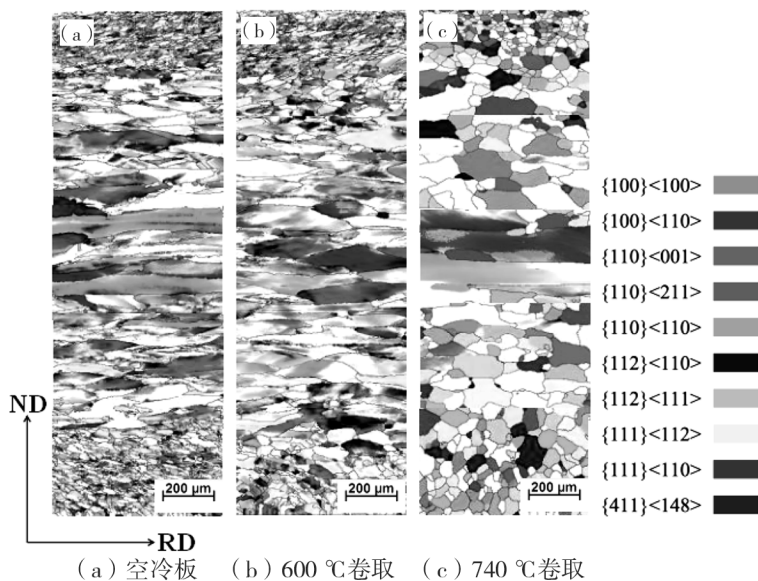


图4 不同卷取温度热轧板的晶粒取向分布图

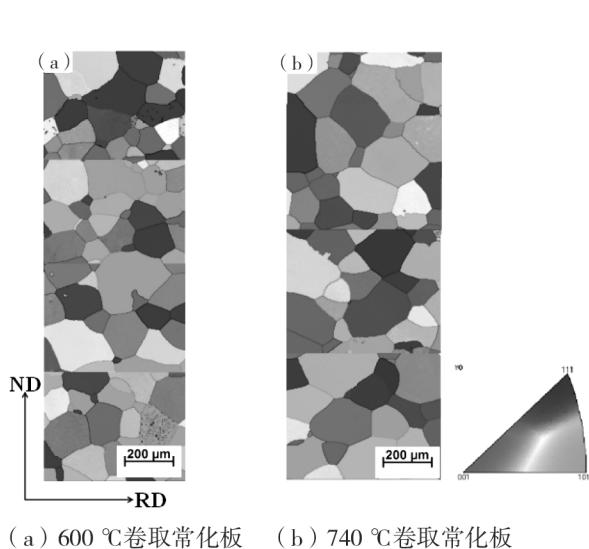


图5 常化板的晶粒取向 IPF 图

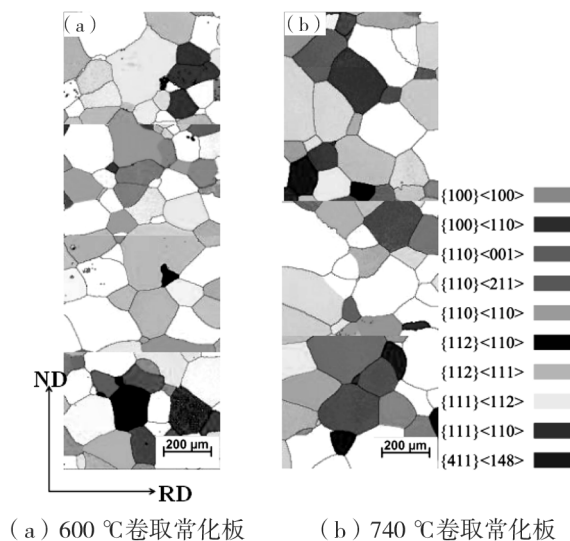


图6 常化板晶粒取向分布图

图6为常化板晶粒取向分布图(由表层到中心层)。可以看出,600 °C卷取常化板表层主要存在织构为 $\gamma$ 线织构 $\{111\} \langle 112 \rangle$ ,过渡层以反高斯织构 $\{110\} \langle 110 \rangle$ 为主,中心层以立方织构 $\{100\} \langle 100 \rangle$ 为主。740 °C卷取常化板表层主要存在织构为 $\{411\} \langle 148 \rangle$ 织构,过渡层以 $\{411\} \langle 148 \rangle$ 织构和 $\gamma$ 线织构 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 为主,中心层以立方织构 $\{100\} \langle 100 \rangle$ 为主。

### 3 结论

(1)50W470 无取向硅钢热轧板经过 600 °C 和 740 °C 卷取后,有利织构 $\{100\} + \{110\}$ 占比升高,不利织构 $\{111\}$ 占比降低,高温卷取有利于生成有利织构,降低不利织构。

(2)50W470 无取向硅钢卷取板经过常化后,随着卷取温度的升高, $\{100\} + \{110\}$ 有利织构占比升高, $\{111\}$ 不利织构占比降低,并且经过 740 °C 卷取后效果更明显。

(3)740 °C 卷取常化板相较于 600 °C 卷取常化

板黄铜型织构  $\{110\} \langle 112 \rangle$  和反高斯织构  $\{110\} \langle 110 \rangle$  明显升高,其他织构占比基本不变。

### 参 考 文 献

- [1] Pinoy L, Eloit K, Standaert C, et al. Influence of Composition and Hot Rolling Parameters on the Magnetic and Mechanical Properties of Fully Processed Non-oriented Low-Si Electrical Steels[J]. Journal De Physique. IN:JP, 1998, 8(2):487-490.
- [2] 王锋,朱志勇,郭海荣,等.常化工艺对高牌号无取向硅钢组织和织构的影响[J].轧钢,2017,34(6):28-32.
- [3] 王龙妹,杜挺,卢先利,等.微量稀土元素在钢中的作用机理及应用研究[J].稀土,2001,22(4):37-40.
- [4] 张正贵,王腾宇,陈昊男,等.热轧与常化无取向硅钢的织构及组织研究[J].热加工工艺,2021,50(3):74-76.
- [5] 安灵子,刘海涛,王国栋.热轧卷取温度对低硅无取向硅钢组织、织构及磁性能的影响[J].电工钢,2021,3(1):15-21.
- [6] Sebastião D C P, Da Cunha M A, Cota A B. Influence of Hot Rolling Finishing Temperature on the Structure and Magnetic Properties of 2.0% Si Non Oriented Silicon Steel [J]. Materials Science Forum, 2007,558-559(1):787-92.
- [7] 孙文科,吴忠旺,任慧平,等.低温高磁感取向硅钢板坯后续工艺流程中的织构演变[J].金属热处理,2024,49(2):40-44.
- [8] 向继明,周和荣.50W800无取向硅钢中 $Al_2O_3$ 和 $Al_2O_3-MnS$ 夹杂物的腐蚀行为研究[J].热加工工艺,2024,53(8):107-112.
- [9] 张贞贞,任卫,方建锋.取向硅钢成品晶粒的位向测定方法[J].金属功能材料,2011,18(4):6-9.
- [10] 张正贵.无取向硅钢织构与性能的研究[D].沈阳:东北大学,2007.
- [11] 齐建波,张旭东,金自力.常化退火对50W400无取向硅钢热轧组织与织构的影响[J].热加工工艺,2023,52(10):118-122.
- [12] 张宁,杨平,毛卫民.柱状晶对Fe-3%Si电工钢再结晶织构演变规律的影响[J].金属学报,2012,48(3):307-314.
- [13] 张慧敏,张程远,吴忠旺,等.Fe-3%Si-Cu取向电工钢热轧及常化组织与织构[J].金属功能材料,2023,30(3):26-33.
- [14] 周莉,黄龙.常化工艺对稀土微合金化高牌号无取向硅钢组织的影响[J].热加工工艺,2016,45(24):249-252.