

# 掺稀土无取向硅钢 50W470 全工艺组织性能分析

刘朋成<sup>1</sup>, 邬宇轩<sup>1</sup>, 刘宝志<sup>2</sup>, 吴忠旺<sup>3</sup>, 孙婷婷<sup>3</sup>

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. 包头市威丰稀土电磁材料股份有限公司, 内蒙古 包头 014010;
3. 内蒙古科技大学 材料和冶金学院, 内蒙古 包头 014010)

**摘 要:**从夹杂物、析出物、晶粒尺寸和组织等方面认识了添加稀土元素 Ce 对无取向硅钢 50W470 组织及磁性能的影响。稀土元素加入后的无取向硅钢铸坯中心等轴晶比例在 41% ~ 45% 之间, 以无尖角的球状和棒状形式存在的稀土夹杂物尺寸约为 664 nm。热轧组织在 RD - ND 面存在较为明显的组织不均匀性, 表层以再结晶组织为主并存在少量带状组织; 中心以带状组织为主, 带状组织间存在部分再结晶晶粒。通过全工艺工业生产的掺稀土无取向硅钢 50W470 成品磁性能铁损 P<sub>1.5/50</sub> 为 3.142 W/kg, 磁感应强度 B<sub>50</sub> 为 1.705 T。

**关键词:**稀土元素; 无取向电工钢; 夹杂物; 微观组织; 磁性能

中图分类号: TG142.1

文献标识码: B

文章编号: 1009 - 5438 (2025) 02 - 0027 - 06

## Analysis on Microstructure and Properties of Rare Earth Doped Non - oriented Silicon Steel 50W470 with Complete Process

Liu Pengcheng<sup>1</sup>, Wu Yuxuan<sup>1</sup>, Liu Baozhi<sup>2</sup>, Wu Zhongwang<sup>3</sup>, Sun Tingting<sup>3</sup>

1. Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
2. Baotou Weifeng Rare Earth Electromagnetic Material Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
3. School of Materials and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

**Abstract:** The effects of adding rare earth element Ce on microstructure and magnetic properties of non - oriented silicon steel 50W470 are studied from such aspects as inclusions, precipitates, grain size and texture. The proportion of central equiaxed crystal in the billet of non - oriented silicon steel after adding rare earth element is 41% ~ 45%, size of rare earth inclusions existed in forms of globularity and rod without sharp corner is about 664 nm. There is obvious inhomogeneity of microstructure on the RD - ND plane of hot rolled microstructure, it is mainly recrystal microstructure with a small amount of banded microstructure on surface layer and mainly banded microstructure in the center as well as there are part of recrystallized grains among banded microstructure. For the finished product of rare earth doped non - oriented silicon steel 50W470 produced with complete process, its magnetic properties, iron loss P<sub>1.5/50</sub> is 3.142 W/kg and magnetic induc-

tion intensity B50 is 1.705 T.

**Key words:** rare earth element; non-oriented electrical steel; inclusion; microstructure; magnetic property

无取向硅钢属于含碳量很低的硅铁合金,硅含量一般为 1.5% ~ 3.0%,或硅铝含量之和为 1.8% ~ 5.0%,成品通常为冷轧板材或带材,在经形变和退火后的板材中其晶粒呈无规则取向分布<sup>[1]</sup>。无取向硅钢常见公称厚度主要为 0.35 mm 和 0.5 mm,主要用于制造电动机和发电机的铁芯。在国家“双碳”战略的要求下,各类新型电动机、发电机和压缩机等对无取向硅钢提出更低铁损和更高磁感的要求,影响无取向硅钢磁性能的因素包括化学成分、夹杂物、组织和织构等。设计合适的化学成分和控制较低的有害元素,改变有害夹杂物尺寸和形貌,优化组织晶粒尺寸和织构类型均可以改善和提升磁性能指标<sup>[2]</sup>。

碳、氮及硫元素对无取向硅钢磁性能极为有害,在钢中形成小于 0.1 μm 细小弥散的 MnS、AlN 和 TiC 等析出物,会明显阻碍退火时晶粒的长大。硅、锰和铝的含量是影响无取向硅钢电阻率的主要元素,需要按要求控制在一定的范围内。随着无取向硅钢的牌号及硅含量的升高,铝含量也可随之增加。锰元素改善热轧板的组织和铸坯的热轧塑性,扩大奥氏体相区,使相变速度减缓以及降低相变温度,同时锰元素也是降低成品铁损的有效元素之一<sup>[3-5]</sup>。

对于无取向硅钢,随着(Si + Al)的含量升高,Mn 的含量应适度的降低,否则对成品的冷加工性不利,无取向硅钢中一般含有 0.2% - 0.8% 的锰。

稀土元素具有极强的化学活性,当稀土加入钢中,与 S、O 等非金属元素反应,形成稀土化合物,比重较小的脱硫脱氧产物上浮速率增大,排出钢液,从而净化钢液。钢中常见的夹杂物如 MnS、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等一般为长条状的不规则形貌,通过添加稀土,夹杂物的形貌变质为球状或椭球状,形成稀土复合夹杂物<sup>[6-8]</sup>,并且端部无棱角,夹杂物尺寸增大,成品晶粒尺寸粗化。本文通过大工业生产将稀土元素 Ce 加入无取向硅钢 50W470 中,设计各工序的工业生产工艺,研究各工序组织和织构演变、夹杂物分布和磁性能,为实现掺稀土无取向硅钢的大工业生产的长足发展积累了重要的经验和基础数据。

## 1 实验材料及方法

### 1.1 实验材料

基于化学元素的作用和成品磁性能要求,掺稀土无取向硅钢 50W470 化学成分见表 1 所示。试验用材料均为工业生产各工序结束现场取样结果。

表 1 掺稀土无取向硅钢 50W470 化学成分(质量分数)

化学元素	C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	N	O
设计范围	0.001 ~ 0.004	1.65 ~ 2.10	0.10 ~ 0.60	≤0.050	≤0.005	0.20 ~ 0.60	≤0.003	≤0.003	≤0.001 5

### 1.2 实验方法

将制备好的金相试样打磨、抛光、侵蚀后,用光学显微镜观察样品的显微结构。采用场发射扫描电子显微镜及能谱仪(FE - SEM, Nova 400 Nano; EDS)对铸坯试样进行形貌观测和成分分析。采用机械抛光和电解抛光制备 EBSD 扫描样品,并用蔡司 Ultra 55 场发射扫描电镜检测其取向像图。宏观织构采用 XRD 衍射仪检测,宏观织构的样品尺寸为 15 mm(RD) × 10 mm(TD)。测试条件和设备参数:Co 靶;电压 35 kV;电流 40 mA;光阑尺寸 0.18 mm。采用反射法测量,测量范围:α 为 0 ~ 80°,β 为 0 ~ 360°。使用单片测试仪测量最终退火板在 RD - TD 中 5 000 A/m 的磁感应强度(B50)和 1.5 T × 50 Hz

的铁损耗(P1.5/50)。用于测量磁性能的样品尺寸为 100 mm × 30 mm。

## 2 掺稀土无取向硅钢全工艺控制

### 2.1 掺稀土无取向硅钢冶炼

冶炼无取向硅钢要向转炉提供低硫铁水。采用 KR 法脱硫技术,使得入转炉铁水硫含量均低于 0.002%。采用顶底复吹 260 t 转炉冶炼,出钢时保证钢中碳含量 ≤ 0.04%。终点出钢温度要求大于 1 620 °C,出钢时采用挡渣操作严格控制下渣量,争取做到零下渣。出钢时在钢包中加入少量铝进行预脱氧。

RH 精炼工序主要是脱碳、脱氧及合金化。真

空状态下,碳和氧的亲合力增加,可以得到含碳量很低的钢水。在脱碳结束后,先加入适量的铝进行预脱氧,最大限度地降低钢中的氧,同时将氧控制在合适的范围内。然后再加入金属锰、铝粒、硅铁等合金进行成分调整和均匀化。在真空处理结束前 5 min 加入 30% 含量的稀土铈铁合金 60 kg,循环 7 分钟左右后负压,然后进行钙处理。

连铸全程采用保护浇铸。在连铸过程中为了防止钢水的二次氧化和吸入氮气,在大包和中间包采用保护套管加石棉套加氩气的保护形式,中间包到结晶器采用浸入式水口,中间包加硅钢专用覆盖剂,结晶器采用低碳保护渣。铸机采用恒拉速控制,拉速范围 0.8 ~ 1.2 m/min。在连铸时采用电磁搅拌,控制等轴晶的比例大于 30%,在液相线温度以下进行搅拌可以发生等轴晶化。

## 2.2 热轧工艺

连铸坯下线后进行保温和缓冷,保证铸坯入炉温度高于 300 °C。由于 MnS 和 AlN 在热轧过程中析出会恶化磁性能,其中 MnS 固溶温度大于 1 300 °C,AlN 固溶温度 1 200 ~ 1 300 °C 之间,因此控制加热温度在 1 100 ~ 1 200 °C 之间对成品磁性能有利。粗轧和精轧过程中控制组织转变,精轧快速轧制实现高终轧温度和卷取温度,保证热轧板中组织尽可能多的发生再结晶。掺稀土无取向硅钢 50W470 热轧工艺参数见表 2 所示。热轧粗轧采用“1+3”轧制模式,粗轧和精轧的快速轧制实现储存能的积累,终轧温度控制在 890 °C 左右,层流冷却基本没有水冷却钢带,最终保证较高的卷取温度,热轧板厚度控制在 2.3 ~ 2.6 mm。

表 2 掺稀土无取向硅钢 50W470 热轧轧制工艺参数 °C

出炉温度	精轧开轧温度	精轧出口温度	卷取温度
1 100 ~ 1 200	950 ~ 1 000	890 ± 20	720 ± 20

## 2.3 冷轧退火工艺

冷轧原料厚度 2.3 ~ 2.6 mm,酸洗后经过冷轧轧成 0.5 mm 冷硬板,总压下量控制在 78% ~ 82% 之间,冷轧过程重点关注表面质量、同板差和板形。冷硬板经过碱洗后进行退火,退火工艺参数见表 3,退火温度控制在 820 ~ 930 °C 之间,炼钢中包成分碳含量低于 30 ppm,不需要在湿保护气氛中脱碳。退火时快速升温至要求温度,促进再结晶晶粒长大。退火后双面涂绝缘层,经过 300 ~ 450 °C 干燥后形成绝缘膜保证良好的层间电阻和冲片性能,掺稀土无

取向硅钢 50W470 连续退火工艺参数如表 3 所示。

表 3 掺稀土无取向硅钢 50W470 连续退火工艺参数

炉区各段温度/°C				工艺段速度/(m·min <sup>-1</sup> )
RTF	SF	RJC	EXIT	
820 ~ 930	890	120	20	80 ~ 90

## 3 结果及分析

### 3.1 掺稀土无取向硅钢铸坯

#### 3.1.1 铸坯组织分析

图 1 所示为掺稀土无取向硅钢 50W470 铸坯横截面低倍组织,由于硅含量较高,凝固过程中形成了比较发达的柱状晶,稀土元素 Ce 的加入并且连铸过程中使用了电磁搅拌,将中心等轴晶比例控制在了 41% ~ 45% 之间,减少柱状晶比例,避免产生瓦楞状缺陷。表 4 所示为铸坯低倍缺陷判定情况,通过在工业生产中随机选择两炉钢水的连铸坯与标准要求对比判定分析发现,两炉掺稀土无取向硅钢连铸坯横截面中心偏析和中心疏松均 0.5 级,且无中间裂纹及三角区裂纹,符合标准要求。

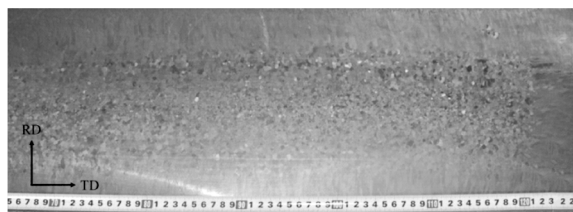


图 1 掺稀土 50W470 铸坯横截面低倍组织

表 4 铸坯低倍缺陷判定情况

炉号	中心偏析	中心疏松	中间裂纹	三角区裂纹
标准要求	不大于 B1.0 级	不大于 1 级	-	-
1	C0.5 级	0.5 级	无	无
2	C0.5 级	0.5 级	无	无

#### 3.1.2 铸坯夹杂物分析

通过在精炼 RH 工序时加入 60 kg 稀土铈铁合金(铈含量 30%)实现无取向硅钢掺稀土的目的,利用扫描电镜(SEM)分析稀土铈的存在形式,在铸坯的宽度和厚度方向取样观察夹杂物的成分、形貌和尺寸,发现比较典型的稀土夹杂物如图 2 所示。稀土夹杂物尺寸均较大,图 2 中夹杂物尺寸达 664 nm,以无尖角的球状和棒状形式存在,分析图 2 中能谱

图可以看出,稀土夹杂物为  $Ce_2O_3 \cdot S$ 。稀土铈与氧及硫元素结合可降低有害元素硫含量并减少小尺寸 MnS 夹杂物数量,起到净化作用。

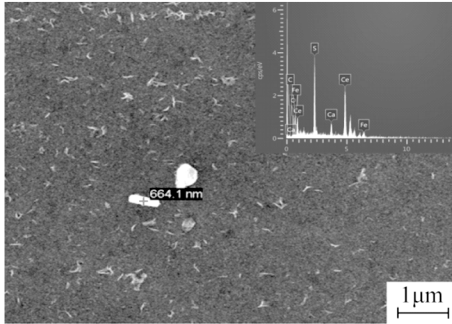


图 2 铸坯夹杂物

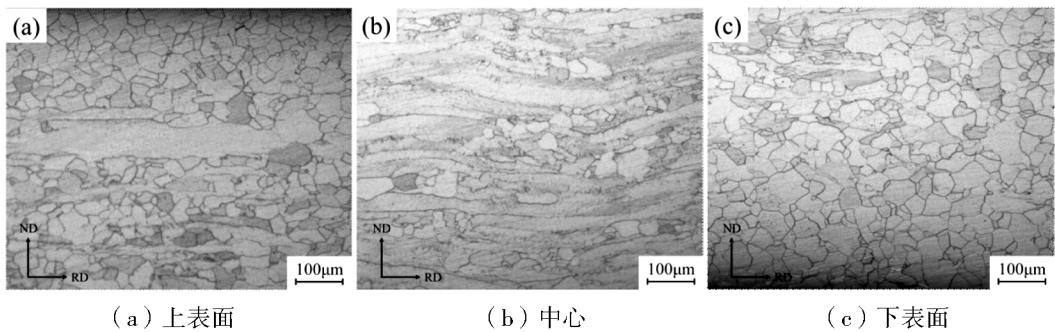


图 3 掺稀土 50W470 热轧金相组织

### 3.2.2 退火板组织

掺稀土无取向硅钢 50W470 退火板金相组织如图 4 所示,冷轧组织经过高温短时间连续退火后组织已经完全发生回复和再结晶,带状组织全部消失,平均晶粒尺寸为  $97.13 \mu\text{m}$ 。在退火过程中,冷轧板组织发生回复、形核和再结晶,形成等轴再结晶晶粒。冷轧板中存在形变储能,冷轧板的变形组织处于亚稳定化态,具有向稳定状态转化的趋势。温度较低时,原子的活动能力有限,冷轧板的亚稳定状态可维持很长时间不发生变化。在高温退火的条件下,原子获得足够的活动能力,变形组织开始释放形变储能,由高位错密度的冷轧变形组织向低位错密度的再结晶组织转化,从亚稳定状态转变为稳定状态<sup>[9,10]</sup>。形变储能为再结晶形核提供了驱动力,在变形组织的剪切带中形成小晶粒,小晶粒通过大角度晶界的迁移不断的吞噬、长大,最终得到低位错密度的完全再结晶晶粒。

## 3.2 组织分析

### 3.2.1 热轧板组织

掺稀土无取向硅钢 50W470 热轧金相组织如图 3 所示。通过对比 RD - ND 面 ND 方向上、中和下三个位置的组织情况,分析发现 RD - ND 面组织存在明显的不均匀性,表层以再结晶组织为主并存在少量带状组织,中心以带状组织为主,带状组织间存在部分再结晶晶粒。轧制过程中表层温度低且应力场复杂,在轧制过程中产生严重的剪切变形,使带钢表层组织具有较高的位错密度和形变储能,为形成再结晶晶粒提供了形核的驱动力。在层流冷却和  $720 \text{ }^\circ\text{C}$  高温卷取后发生再结晶,中心温度高且仅有压应力储存能低不易发生再结晶,带状组织最终保留下来。



图 4 掺稀土 50W470 退火板金相组织

## 3.3 织构分析

### 3.3.1 热轧板织构

利用 XRD 观察热轧板不同厚度层的宏观织构,并计算得到  $\varphi_2 = 45^\circ$  织构的 ODF 截面图,如图 5 所示。热轧板不同厚度组织存在不均匀性,分别观察对比厚度 1/8、1/4 和 1/2 层的宏观织构。从图 5 可以看出,热轧板厚度 1/8 处主要织构为剪切织构  $\{110\} \langle 001 \rangle$  和  $\{110\} \langle 112 \rangle$ ,热轧板厚度 1/4 处

织构  $\{110\} \langle 001 \rangle$  和  $\{110\} \langle 112 \rangle$  强度降低,同时出现  $\alpha$  线和  $\gamma$  线织构;热轧板厚度中心 1/2 处主要为  $\alpha$  线和  $\gamma$  线织构,不存在剪切织构  $\{110\} \langle 001 \rangle$  和  $\{110\} \langle 112 \rangle$ 。

图 6 所示为对比热轧板厚度 1/8、1/4 和 1/2 层  $\alpha$  线和  $\gamma$  线织构分布情况。从图 6 中可以看出厚度 1/8 处无  $\alpha$  线和  $\gamma$  线织构;厚度 1/4 处存在  $\alpha$  线织构  $\{001\} \langle 110 \rangle$ 、 $\{112\} \langle 110 \rangle$  和  $\{111\} \langle 110 \rangle$  和  $\gamma$  线织构  $\{111\} \langle 011 \rangle$ ;厚度中心 1/2 处存在  $\alpha$  线织构  $\{001\} \langle 110 \rangle$ 、 $\{112\} \langle 110 \rangle$ 、 $\{111\} \langle 110 \rangle$  和  $\{110\} \langle 110 \rangle$ 、 $\gamma$  线织构  $\{111\} \langle 011 \rangle$ ,与厚度 1/4 处对比可以看出厚度中心 1/2 处  $\{001\} \langle 110 \rangle$ 、

$\{112\} \langle 110 \rangle$  和  $\{111\} \langle 110 \rangle$  织构强度明显升高并出现  $\{110\} \langle 110 \rangle$  织构, $\gamma$  线织构  $\{111\} \langle 011 \rangle$  强度保持不变。

热轧板厚度 1/8 和 1/4 处织构与 1/2 处不同,热轧板表面同时受剪切应力和压应力的作用,形变储存能较高出现  $\{110\} \langle 001 \rangle$  织构。 $\{110\} \langle 001 \rangle$  取向的晶粒受到轧制力的作用,沿横向和轧制方向发生一定角度的旋转,从而形成取向的铜型织构以及  $\{110\} \langle 112 \rangle$  取向的黄铜型织构,1/2 层仅受到压应力的作用,出现最易形成且强度较高  $\{100\}$  织构。

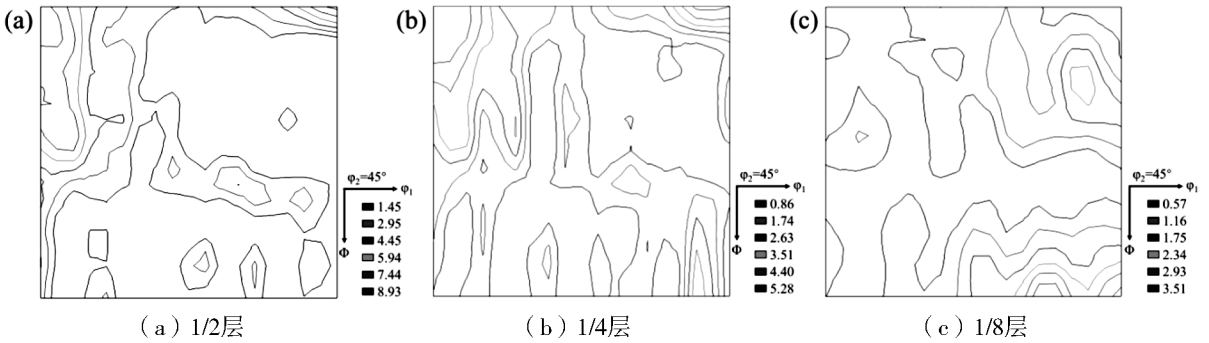


图 5 热轧板不同厚度处  $\phi_2 = 45^\circ$  ODF 截面图

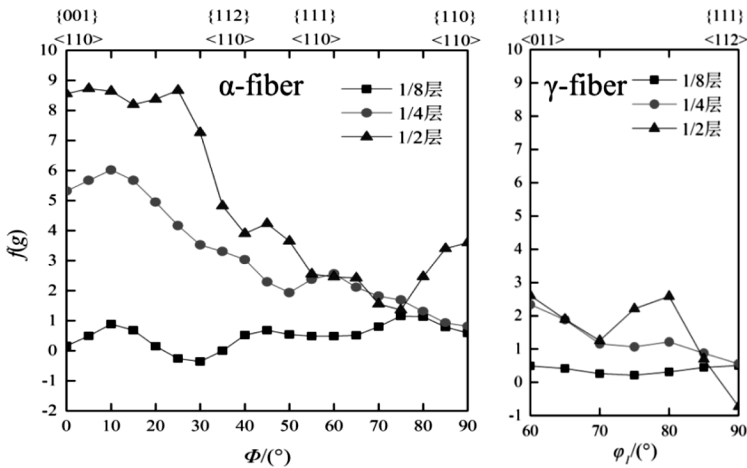


图 6 热轧板不同厚度取向线分布

### 3.3.2 退火板织构

利用 XRD 观察成品板表层宏观织构并计算得到  $\phi_2 = 45^\circ$  织构的 ODF 截面图,如图 7 所示。退火

板织构主要为  $\gamma$  线和  $\alpha$  线织构,其中比较强的织构为  $\{111\} \langle 112 \rangle$  和  $\{111\} \langle 112 \rangle$  强度为 5.91,  $\{100\} \langle 110 \rangle$  织构强度 1.95,  $\{100\} \langle 010 \rangle$  强度约 3.93。

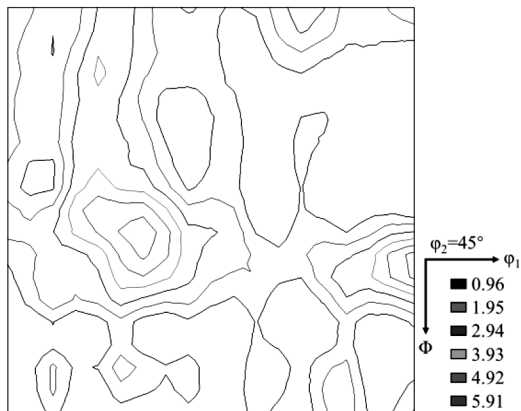


图 7 退火板  $\phi_2 = 45^\circ$  ODF 截面图

为进一步研究不同取向晶粒的分布情况,利用 EBSD 观测成品板微观结构,如图 8 所示。利用软件对主要面织构的晶面体积分数进行计算,设定的偏离角为  $10^\circ$ ,结果见表 5 所示。退火板有利织构  $\{001\}$  和  $\{110\}$  组分面积分数和为 19.23%,其中  $\{110\}$  组分的面积分数 17.9%。为获得良好的成品磁性能,在无取向硅钢的生产中一般要求尽量提高  $\{100\}$  和  $\{110\}$  面织构的组分,特别是  $\{100\}$  组分,同

时尽量降低  $\{111\}$  织构的组分。冷轧板中不同位向的晶粒储能能按以下顺序: $\{100\} \leq \{111\} \leq \{112\} \leq \{110\}$ 。经过退火有利的  $\{100\}$  面织构的组分降低,而不利的  $\{111\}$  面织构组分增强。 $\{100\}$  晶粒最易发生滑移,位错密度低、储能低,最难发生再结晶。而  $\{111\}$  晶粒比  $\{100\}$  晶粒的储能高,退火时  $\{111\}$  晶粒优先形核和长大,吞噬  $\{100\}$  组分的晶粒,导致  $\{100\}$  面织构组分减弱。按照标准要求,利用方圈法检测成品磁性能,铁损 P1.5/50 为 3.142 W/kg,磁感应强度 B50 为 1.705 T。

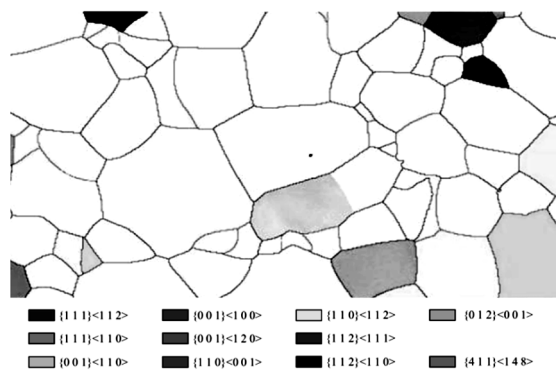


图 8 退火板微观结构

表 5 主要织构的面积分数

主要织构	$\{001\} \langle 100 \rangle$	$\{110\} \langle 112 \rangle$	$\{001\} \langle 120 \rangle$	$\{112\} \langle 111 \rangle$	$\{112\} \langle 110 \rangle$	$\{411\} \langle 148 \rangle$	%
面积分数	1.33	17.90	0	1.35	6.12	12.30	

## 4 结论

(1) 探明了掺稀土无取向硅钢 50W470 铸坯组织情况,中心等轴晶比例在 41% ~ 45% 之间,中心偏析和中心疏松均为 0.5 级。稀土夹杂物为  $Ce_2O_2S$  尺寸约为 664 nm,以无尖角的球状和棒状形式存在。

(2) 掌握了掺稀土无取向硅钢 50W470 不同轧制工艺阶段的组织与织构变化规律,热轧组织在厚向存在明显的不均匀性,表层以再结晶组织为主并存在少量带状组织,中心以带状组织为主,带状组织间存在部分再结晶晶粒。成品板组织平均晶粒尺寸为 97.13  $\mu m$ 。

(3) 分析了无取向硅钢 50W470 加入稀土元素后的成品磁性能。掺稀土无取向硅钢 50W470 成品磁性能铁损 P1.5/50 为 3.142 W/kg,磁感应强度 B50 为 1.705 T。

## 参考文献

- [1] 李培中,马良,马国明,等. 铈对 3.0% Si 无取向电工钢磁性能的影响[J]. 稀土,2016,37(2):81-86.
- [2] 杨健,李婷婷. 稀土处理的无取向硅钢夹杂物控制研究进展[J]. 钢铁,2022,57(7):1-15.
- [3] Wang Yong, Chen Weiqing, Wu Shaojie. Effect of lanthanum content on microstructure and magnetic properties of non-oriented electrical steel [J]. Journal of Rare Earth, 2013, 31(7): 728-731.
- [4] 段承轶,刘朋成,黄利,等. 稀土 Ce 对 1.5% Si 无取向硅钢组织和磁性能的影响[J]. 包钢科技,2019,45(6):47-49.

状,调整边部直角为内凹圆弧状,抵消轧制过程中产生的横向不均匀变形,同时配合设置合理的立辊压下量,对不锈钢热轧中间坯的边部侧翻缺陷位置与严重程度有一定的改善效果。

## 4 结论

(1)边部侧翻缺陷是一种表面裂纹缺陷,在热轧中间坯上已经产生,形成于高温条件下,内部夹杂物主要以 Fe、Cr 氧化物为主;

(2)边部侧翻微观形态为开口指向边部的裂纹且内部氧化物存在分层现象,成因是由于轧制过程中金属横向变形不均匀导致的;

(3)可以通过优化铸坯横截面等方式有效的防治措施减小侧翻缺陷对于成品成材率的影响。

## 参 考 文 献

- [1] 熊云龙, 娄延春, 刘新峰. 不锈钢材料研究的新进展[J]. 热加工工艺, 2005(5): 51-53.
- [2] 代征栋. 以史鉴今新形势下钢铁行业发展趋势探究[J]. 冶金管理, 2022(22): 36-42.
- [3] 卢维佳, 陈家进, 周洪旭. 纵切钢带切边余量

的控制[J]. 四川冶金, 2000(2): 15-16.

- [4] 杨文, 王新华, 王万军, 等. 一种热轧板表面长条线状缺陷的形成机理[J]. 钢铁钒钛, 2011, 32(3): 34-39.
- [5] 徐海卫, 于洋, 李飞, 等. IF 钢热轧薄板边部翘皮缺陷的产生原因及机制[J]. 钢铁, 2012, 47(9): 53-56.
- [6] 喻海良, 刘相华, 李长生. 多道次立-平辊轧制轧件角部金属流动状态有限元模拟[J]. 东北大学学报, 2005(10): 982-985.
- [7] 胡鹏. 带钢边部折叠缺陷形成机理及连铸坯倒角的影响规律研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2016.
- [8] 陈韧, 刘立文, 李梦炜, 等. 粗轧板坯侧翻变形的数值模拟[J]. 中国冶金, 2007(8): 29-32.
- [9] 杨明永. 不锈钢中板边部侧翻问题的分析与控制[J]. 轧钢, 2012, 29(2): 58-60.
- [10] 范众维, 王艳林, 孙振忠, 等. 铸坯到轧材的表面缺陷演变行为研究[J]. 失效分析与预防, 2017, 12(4): 259-264.

(上接第 32 页)

- [5] Ren Qiang, Yang Wen, Cheng Lin, et al. Effect of calcium treatment on magnetic properties of non-oriented electrical steels [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2020, 48(4): 531-539.
- [6] 林勤, 宋波, 郭兴敏, 等. 钢中稀土微合金化作用和应用前景[J]. 稀土, 2001(4): 32-35.
- [7] 丁西安, 陆勤阳, 李娜, 等. Ce、Cu 合金化高强高效无取向硅钢中的夹杂物和析出相分析[J]. 材料热处理学报, 2023, 44(7): 107-114.
- [8] 李长一, 冯大军, 黎世德, 等. 不同晶体学平面对无取向电工钢电磁性能贡献及其磁性各向异性[J]. 武汉科技大学学报, 2010, 33(4): 393-396.
- [9] 胡帅, 金自力, 吴忠旺, 等. 含稀土取向硅钢高温铁素体区的再结晶及抑制剂析出行为[J]. 金属热处理, 2023, 48(1): 75-80.
- [10] 薛志勇, 白志浩, 张文康. 热轧常化温度对 3.0Si% 无取向电工钢组织和性能的影响[J]. 特殊钢, 2008, 29(6): 58-60.