

铸坯凝固结构对硅钢热轧织构的影响机制

郭飞虎^{1,2}, 时朋召¹, 李泽超¹, 仇圣桃¹

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

摘要: 基于某钢厂不同电磁搅拌参数调控的 Fe-3.2%Si 取向硅钢连铸坯凝固结构及热轧工业试验, 采用光学显微镜 (OM)、X 射线衍射 (XRD) 和电子背散射衍射 (EBSD) 等检测技术, 表征分析连铸过程电磁搅拌参数对铸坯凝固结构中柱状晶率的影响, 探讨柱状晶率对热轧板织构的影响机制。结果表明: 电磁搅拌器的工作电流 (3 Hz) 由 900 A 降到 200 A, 铸坯凝固结构中柱状晶率由 40.1% 增加到 68.5%, 柱状晶初始尺寸也随之增大; 热轧板表层以铜型和黄铜织构为主, 次表层以 Goss 织构为主, 中心层主要为沿轧向延伸的 α 纤维织构及较弱的 γ 纤维织构。随铸坯柱状晶率的提高 (40.1%~68.5%), 热轧板再结晶区晶粒尺寸增加, 有利于次表层 Goss 织构的保留; 提高铸坯柱状晶率可降低热轧板中心层再结晶程度, 中心层变形晶粒变大, 不利于 $\{114\}<481>$ 织构晶粒的形核与长大, 且明显提高了织构强度梯度。

关键词: 取向硅钢; 凝固结构; 组织; 织构; 再结晶; 新能源汽车

中图分类号: TG 142.77 文献标志码: A doi: 10.12415/j.issn.1671-7872.24074



Influence Mechanism of Solidification Structure of Silicon Steel Castings on Hot Rolling Texture of Silicon Steel

GUO Feihu^{1,2}, SHI Pengzhao¹, LI Zechao¹, QIU Shengtao¹

(1. National Engineering and Research Center of Continuous Casting Technology, Iron and Steel Research Institute Co., Ltd, Beijing 100081, China; 2. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: Based on the solidification structure and hot rolling industrial experiments of Fe-3.2% Si oriented silicon steel continuous casting billets controlled by different electromagnetic stirring parameters in a steel plant, the effect of electromagnetic stirring parameters on the proportion of columnar crystal in the solidification structure of cast billet during continuous casting was characterized and analyzed using detection techniques such as optical microscopy (OM), X ray diffraction (XRD), and electron backscatter diffraction (EBSD). The influence mechanism of columnar crystal proportion on the texture of hot-rolled plate was explored. The results show that as the working current (3 Hz) of the electromagnetic stirrer decreases from 900 A to 200 A, the proportion of columnar crystal in the solidification structure of the casting billet increases from 40.1% to 68.5%, and the initial size of columnar crystal also increases. The surface layer of hot-rolled plate is mainly composed of copper type and brass texture, the secondary layer is mainly composed of Goss texture, and the central layer is mainly composed of α fiber texture extending along the rolling direction and weak γ fiber texture. With the increase of columnar grain rate in oriented silicon steel billet (40.1%~68.5%), the grain size in the recrystallization zone of hot-rolled plate increases, which is conducive to the preservation of the Goss texture in the subsurface layer. Increasing of the columnar grain rate of casting billet can reduce the degree of recrystallization in the central layer of the hot-rolled plate, and the deformation grain in the central layer become larger, which is not conducive to the formation of $\{114\}<481>$ textured grains.

收稿日期: 2024-04-30

基金项目: 江西省重大科研专项 (20213AAE01009)

作者简介: 郭飞虎 (1991—), 男, 安徽阜阳人, 博士生, 主要研究方向为硅钢工艺。

通信作者: 仇圣桃 (1965—), 男, 江苏扬州人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为冶金基础理论与工艺技术研发。

引文格式: 郭飞虎, 时朋召, 李泽超, 等. 铸坯凝固结构对硅钢热轧织构的影响机制 [J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2024, 41(4):441-449.

Keywords: oriented silicon steel; solidification structure; microstructure; texture; recrystallization; new energy vehicles

取向硅钢是1种重要的硅铁合金,其以优异的磁性能和可靠性在新能源汽车领域扮演着至关重要的角色,尤其是在提高能源效率和减少能源浪费方面,作用不可忽视。取向硅钢的性能与其组织结构紧密相关,特定的晶体取向和适当的组织处理是保证其优异磁性能的关键。取向硅钢生产的控制目标是成品板形成取向度高且锋锐的Goss织构,铸坯凝固组织作为取向硅钢热处理生产的起点,对后续工艺组织和织构的控制有重要影响。 $\{100\}$ 取向的柱状晶具有晶体各向异性和尺寸粗大等特点^[1-3],铸坯中粗大的柱状晶若后续热处理不当,将引起产品表面瓦楞缺陷和组织极不均匀等问题。此外,铸坯凝固结构影响热轧板组织的均匀性和织构的形成,以及二次再结晶过程Goss织构的发展,进而影响最终产品磁性能^[4-5]。因此,研究取向硅钢合理的凝固结构对于提升硅钢产品的性能,促使其更好地满足新能源汽车的应用需求具有重要意义。

Li等^[6]试验研究中间包钢水过热度、电磁搅拌电流和拉速等连铸工艺参数对铸坯凝固结构的影响,结果表明调控电磁搅拌参数可有效控制板坯,等轴晶率从10%提高到75%。Jiang等^[7-8]通过硅钢柱状晶热轧试验,研究铸坯初始 $\{100\}$ 织构与热轧板表层 $\{110\}\langle 001\rangle$, $\{112\}\langle 111\rangle$ 和 $\{110\}\langle 112\rangle$ 剪切织构形成之间的关系,确定表层剪切织构的分布规律。邵媛媛等^[9]研究表明,粗大柱状晶中 $\{100\}$ 织构的遗传性强,造成的影响主要体现在热轧板中心层,一般以立方取向和旋转立方取向为主。目前关于硅钢纯柱状晶在轧制过程织构的形成规律已有研究,但工业铸坯凝固结构差异对热轧板织构的影响还需进一步讨论,有必要研究工业现场不同凝固结构的铸坯在热轧过程组织和织构的演变机制。因此,通过调整连铸工艺电磁搅拌参数调控连铸坯凝固结构,试验研究不同柱状晶占比的铸坯在热轧过程中组织、织构的演变规律,分析铸坯初始组织与热轧板织构之间的内在关系,为取向硅钢工业流程组织、织构调控提供研究基础。

1 试验材料与过程

1.1 试验材料

试验材料取自某钢厂生产的取向硅钢铸坯和热轧板。采用立弯式双流板坯连铸生产Fe-3.2%Si取向硅钢,在二冷区内弧侧零段位置安装箱式搅拌器,设置电磁搅拌参数200 A-3 Hz,400 A-3 Hz,900 A-

3 Hz,以调整厚度为240 mm的铸坯凝固结构。铸坯经1280 °C×120 min加热炉均热,经5道次粗轧至45 mm,经7道次精轧至2.3 mm(热轧温度在1040~940 °C,550 °C卷曲)。

1.2 检测方法

在铸坯横截面1/4位置截取尺寸为80 mm(transverse direction, TD)×240 mm(normal direction, ND)断面,将其打磨至表面光滑、盐酸腐蚀后,记录低倍组织。在沿热轧板宽度方向1/4位置截取10 mm(rolling direction, RD)×8 mm(TD)的样品,将样品侧面(RD-ND面)进行磨光和机械抛光后,使用体积分数为4%的硝酸酒精侵蚀30 s,在光学显微镜(optical microscope, OM)下观察,并采用配备EDAX OIM电子背散射衍射(electron backscatter diffraction, EBSD)的ZEISS SUPRA 55VP扫描电镜(scanning electron microscope, SEM)和OIM软件采集样品的组织与取向信息,织构的最大允许偏差角为15°。定义参数 $S=d/(d_0/2)$,其中 d 为与热轧板中心位置的距离, d_0 为热轧板厚度。沿热轧板宽度方向1/4位置截取20 mm(RD)×15 mm(TD)的样品,沿厚度方向分别将样品减薄至1/4和1/2厚度(RD-TD面)后进行磨光,采用X射线衍射(X ray diffraction, XRD)测量样品不同厚度的宏观织构。图1为典型截面 $\varphi_2=45^\circ$ 的取向分布函数(orientation distribution function, ODF)^[10]。图中 $\varphi_1, \varphi_2, \Phi$ 为Roe符号系统中表示样品坐标系的欧拉角, φ_1, φ_2 为绕ND转的角度; Φ 为绕RD转的角度。

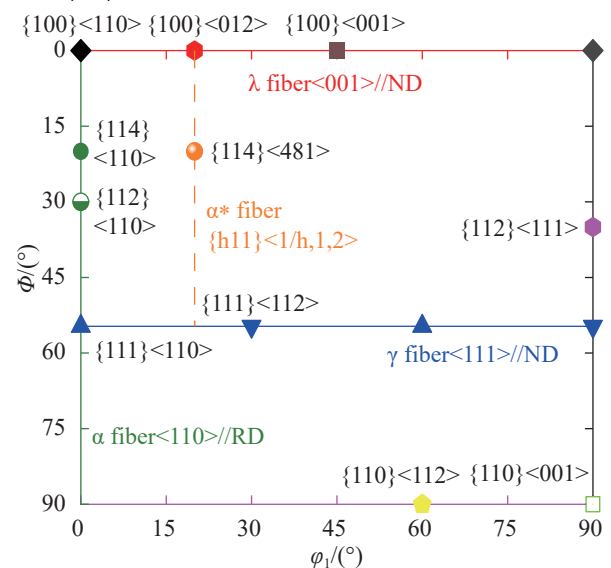


图1 $\varphi_2=45^\circ$ ODF 图中特殊织构和取向线织构分布
Fig. 1 Special texture and fiber texture distribution in the $\varphi_2=45^\circ$ ODF diagram

2 结果与讨论

2.1 铸坯凝固结构

通过调节箱式电磁搅拌器的工作电流改变电磁搅拌力, 研究取向硅钢连铸生产过程中电磁搅拌参数对板坯凝固组织的影响。图 2 为取向硅钢连铸生产时电磁搅拌参数分别为 200 A-3 Hz, 400 A-3 Hz, 900 A-3 Hz 时铸坯横截面的凝固结构, 铸坯凝固结构分为激冷层细晶区、柱状晶区和等轴晶区。由图 2 可知: 电磁搅拌电流对铸坯柱状晶有显著影响, 这是因为在连铸过程中由电磁搅拌电流增加引起的钢液强流动将破坏枝晶生长, 破坏后的枝晶碎片将作为钢液凝固异质形核点; 随电磁搅拌电流的增加, 电磁搅拌强度提高, 这有利于均匀钢液成分和凝固前沿温度, 减小温度梯度, 致使柱状晶向等轴晶方向的转变^[11-12]。

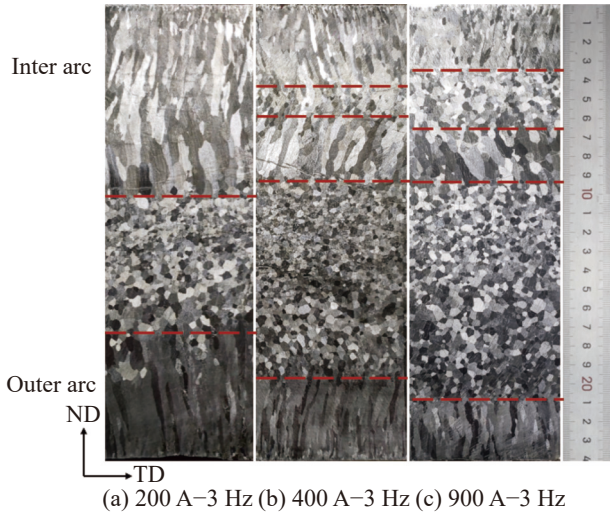


图 2 不同电磁搅拌参数下铸坯的凝固结构

Fig. 2 Solidification structure of casting billet under different electromagnetic stirring parameters

表 1 为电磁搅拌参数分别在 200 A-3 Hz, 400 A-3 Hz 和 900 A-3 Hz 时铸坯凝固结构各晶区的大小。

由表 1 可看出: 电磁搅拌电流为 200, 400, 900 A 时, 相应铸坯柱状晶率分别为 68.5%, 50.2% 和 40.1%; 随电磁搅拌电流的增大, 铸坯中初始柱状晶尺寸变小, 外弧柱状晶区长度由 64.1 mm 减小到 32.0 mm, 内弧柱状晶区长度由 100.3 mm 减小到 35.2 mm, 而中心等轴晶区长度由 69.8 mm 增大到 113.8 mm。

表 1 铸坯凝固结构中各晶区和比例

Tab. 1 Crystal zones and proportions in the solidification structure of casting billet

电磁搅拌参数	晶区宽度/mm					柱状晶率/%
	外弧柱状晶	中心等轴晶	二次柱状晶	内弧等轴晶	内弧柱状晶	
200 A-3 Hz	64.1	69.8	—	—	100.3	68.5
400 A-3 Hz	43.1	102.7	35.0	16.2	42.2	50.2
900 A-3 Hz	32.0	113.8	28.7	30.5	35.3	40.1

2.2 热轧板微观结构

图 3, 4 为柱状晶率分别为 68.5%, 50.2% 和 40.1% 时, 铸坯经热轧后热轧板厚度方向的组织及表层、次表层和中心层的宏观织构。

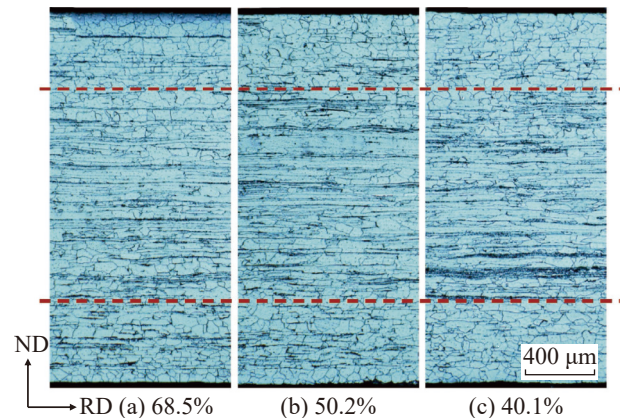
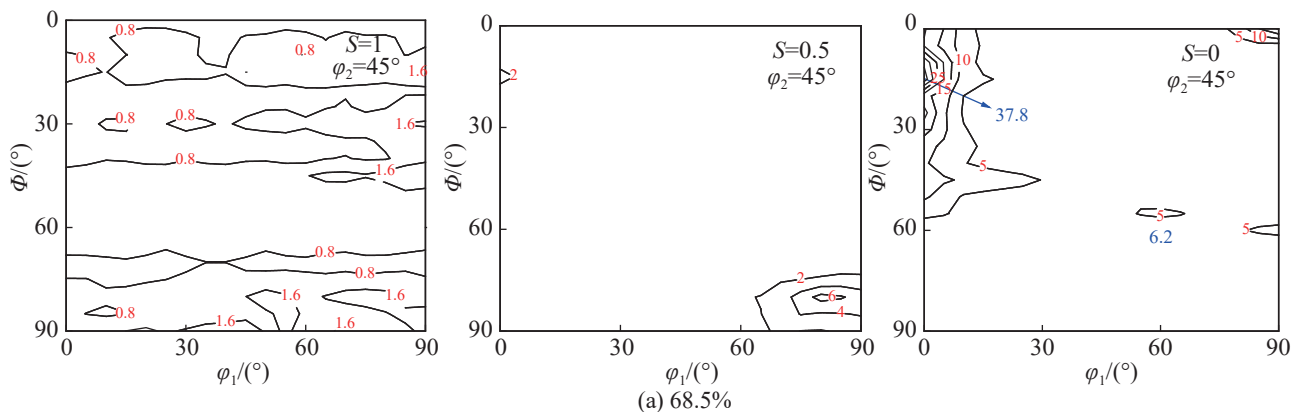


图 3 不同柱状晶率铸坯的热轧板组织

Fig. 3 Structure of hot-rolled band with different columnar crystal ratios of casting billet



(a) 68.5%

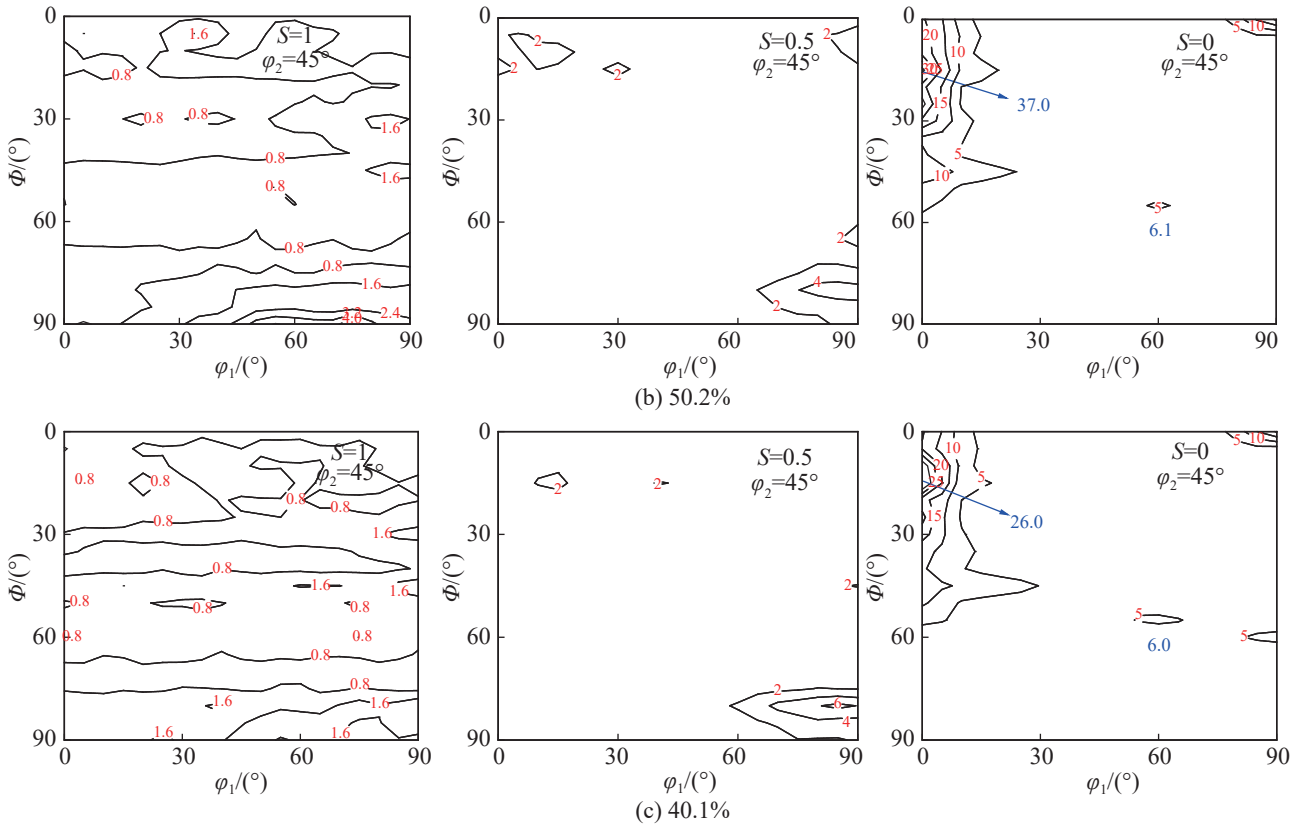


图4 不同铸坯柱状晶率下热轧板 S=1.0, 0.5, 0 位置的宏观织构 ($\phi_2=45^\circ$ ODF 图)

Fig. 4 Macro texture of hot-rolled band at S=1.0, 0.5, 0 position under different columnar crystal ratios of casting billet (in the $\phi_2=45^\circ$ ODF diagram)

由图 3, 4 可知: 热轧板组织和宏观织构在厚度方向上存在显著差异, 沿厚度方向的显微组织可分为 3 个不同的区域, S=1.0~0.5 位置以细小的再结晶晶粒为主, 表层织构较为漫散, 次表层织构以较强的 Goss 织构为主, 中心层则以沿轧向拉长的变形晶粒为主, 该区域的织构由强的 α 纤维织构及较弱的 γ 纤维织构组成; 随铸坯柱状晶率的降低, 热轧板中心层 α 纤维织构最大强度为 $\{114\}\langle 110\rangle$ 组分, 织构强度梯度弱化, 强度由 37.8 降至 26.0。

采用 Jmat-Pro 软件计算取向硅钢不同温度相的组成情况, 结果如图 5。由图 5 可看出: 奥氏体最大含量和完全转变为铁素体的温度分别为 1 150, 782 $^\circ\text{C}$; 铸坯在 1 120~940 $^\circ\text{C}$ 温度范围, $\alpha+\gamma$ 两相区完成精轧, 热变形过程存在奥氏体向铁素体转变, 组织晶粒经历多道次热轧变形的同时伴随着动态再结晶。

热轧过程中钢板厚度方向应力和温度分布的差异易引起热轧板组织和织构的差异。在热轧过程中, 钢板表层温度较低, 受剪切应力的作用, 储能较高, 再结晶驱动力高, 表层会形成等轴再结晶组织, 表层的强高斯织构是由轧辊与钢板表面之间摩擦产生的

强剪切应力形成的; 钢板中心层保持相对较高的温度, 受平面压缩应力的作用, 形成更强的回复而降低再结晶驱动力, 并保持形变组织^[13-14]。

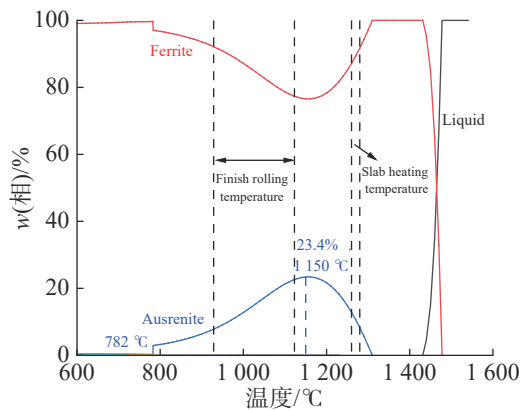


图5 取向硅钢不同温度相含量

Fig. 5 Phase content of oriented silicon steel at different temperatures

为分析铸坯凝固组织对热轧板组织和织构的影响, 采用 EBSD 检测热轧板纵截面厚度方向显微组织。图 6~8 为铸坯柱状晶率分别为 68.5%, 50.2% 和 40.1% 时, 热轧板半厚度截面区域 EBSD 分析结果。由图 6~8 可知: 热轧板表层和次表层主要分布

高斯、黄铜和铜型 3 种典型的剪切织构; 表层黄铜和铜型取向晶粒多为均匀等轴动态再结晶晶粒, 次表层高斯晶粒为沿轧向拉长的条形晶粒, 中心层主要为 $\{100\} \sim \{112\} \langle 110 \rangle$ 变形的 α 纤维晶粒和部分 α^* 和 γ 纤维织构晶粒。铸坯柱状晶率为 68.5% 的热轧

板中心层变形 α 纤维晶粒粗大, 部分长度达到毫米级; 柱状晶率为 50.2% 和 40.1% 的热轧板中 α 纤维晶粒一定程度上细化, 晶界附近分布着 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 和 $\{114\} \langle 418 \rangle$ 取向晶粒。

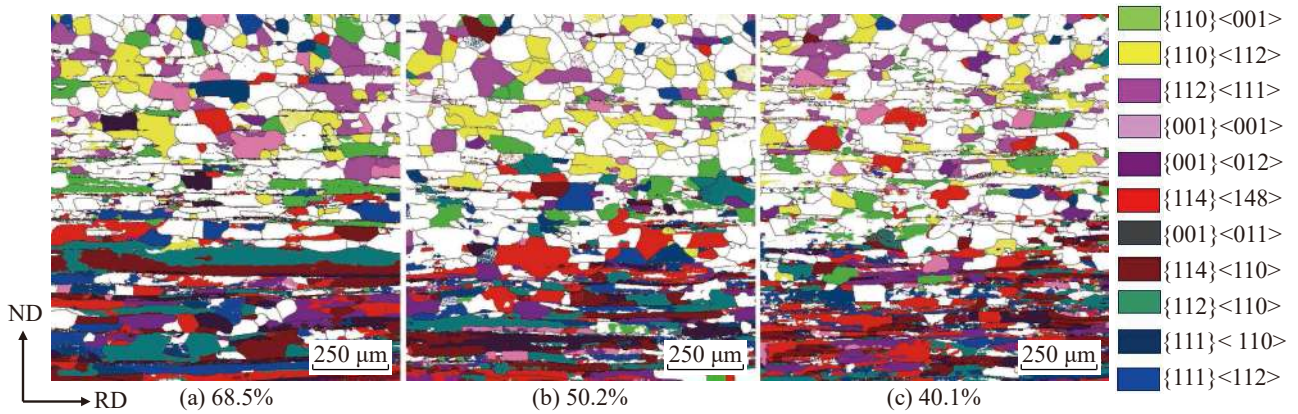


图 6 不同铸坯柱状晶率的热轧板侧面晶粒取向分布

Fig. 6 Grain orientation distribution on the side of hot-rolled band with different columnar crystal ratios of casting billet

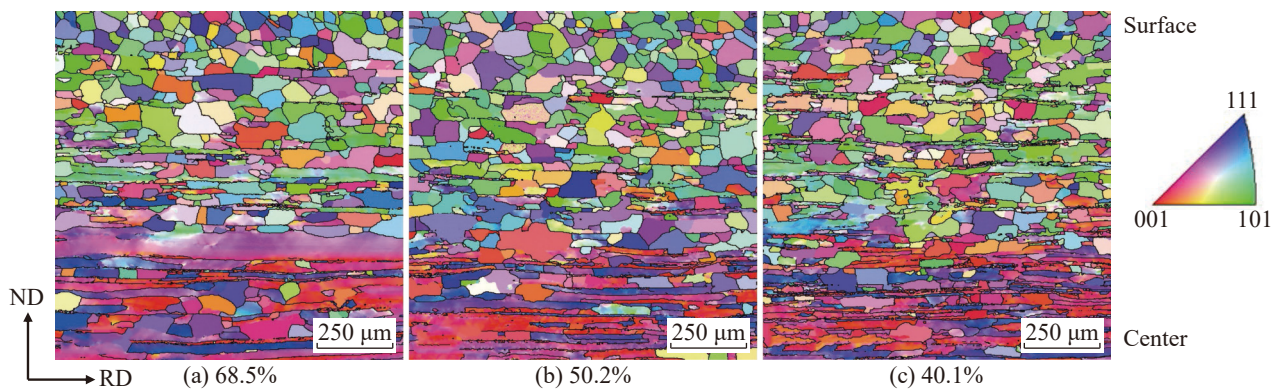


图 7 不同铸坯柱状晶率的热轧板侧面特定晶粒取向分布

Fig. 7 Specific grain orientation distribution on the side of hot-rolled band with different columnar crystal ratios of casting billet

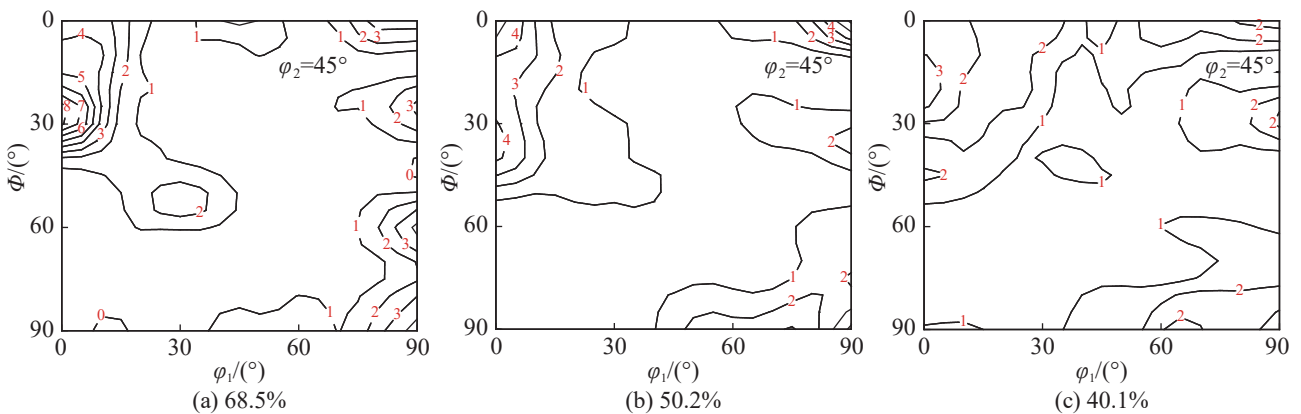


图 8 不同铸坯柱状晶率的热轧板侧面 ODF 图 ($\phi_2=45^\circ$)

Fig. 8 ODF diagram on the side of hot-rolled band with different columnar crystal ratios of casting billet ($\phi_2=45^\circ$)

采用等效圆直径的方法统计3组热轧板 $1\ 150\ \mu\text{m}\times 1\ 150\ \mu\text{m}$ 范围的晶粒尺寸,结果如图9。由图9可看出:铸坯凝固结构对热轧板晶粒尺寸有很大影响,3组热轧板的平均晶粒尺寸分别23.4,22.9,18.2 μm 。原因是热轧过程中铸坯原始晶界的作用促进了再结晶形核,热轧前铸坯柱状晶粗大,再结晶区晶粒形核少,晶粒充分长大;变形区变形晶粒粗大难以发生再结晶,相应热轧板的平均晶粒尺寸也增大。

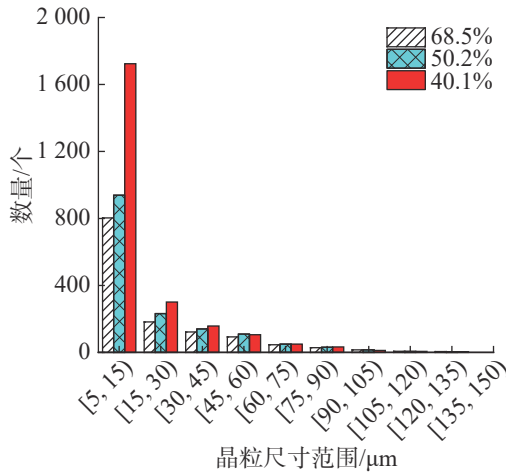


图9 热轧板晶粒尺寸分布

Fig. 9 Grain size distribution of hot-rolled band

2.3 铸坯凝固结构对热轧板组织的影响

2.3.1 热轧板表层组织

取向硅钢热轧过程中,随压下量的不断增加,热轧板中形成动态再结晶区和倾斜的变形组织区。受铸坯原始组织特征及铸坯与轧辊之间应力分布的影响,热轧板表层剪切组织特征存在显著差异。有限元结果表明^[15],平行于轧制方向的剪切应变在热轧板表层附近最大,并沿厚度方向减小,在1/4层到中心层剪切应力几乎为零,主要为压缩力。高剪切力区晶粒储能较高,促进动态再结晶,有利于均匀等轴晶粒的形成;相对较低的剪切力则促使形成细长、变形的再结晶晶粒。

为定量表征热轧板中3种剪切组织的含量及分布,统计3组热轧板1/2厚度方向5层组织含量,结果如图10。图中a,b,c表示铸坯柱状晶率分别为68.5%,50.2%和40.1%的热轧板。

由图10可知:铜型组织主要分布于表层($S=1.0$),面积分数在0.12~0.16范围,自表层($S=1.0$)到1/4层($S=0.5$)组织面积分数线性下降至0;黄铜组织在表层附近($S=1.0, S=0.8$)分布较多,面积分数高于0.1;高斯组织在次表层($S=0.5$)的面积分数最高,随铸坯柱状晶率的降低,热轧板中次表层Goss组织含量降

低,柱状晶率为68.5%,50.2%和40.1%时,相应Goss组织的面积分数分别为0.14,0.12,0.11。

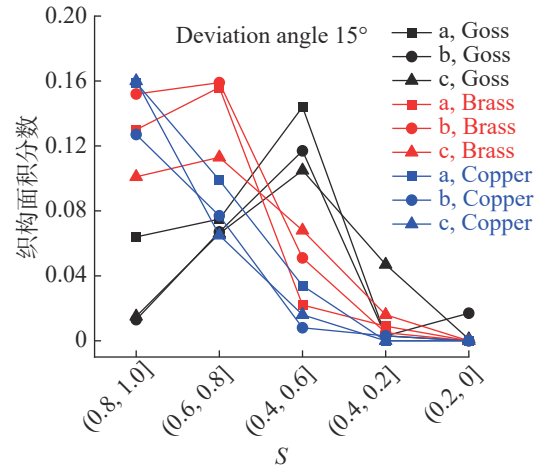


图10 热轧板厚度方向各层剪切组织面积分数

Fig. 10 Area fraction of shear texture in each layer of hot-rolled band thickness direction

泰勒因子反映晶粒在给定晶体取向上的抗变形能力,数值越高表示该取向晶粒的抗变形能力越强^[16]。文献[7]中的计算结果表明:在单纯剪切作用下Copper组织形成的泰勒因子(2.0)比Brass(2.8)和Goss(3.2)组织的小,其组织在大剪切应力下更易形成;在剪切应变和平面应变压缩联合作用下,Goss组织形成的泰勒因子(2.0)最小。热轧初期铸坯柱状晶在剪切力和压应力的作用下会转向Goss组织,Goss组织先形成。随压下率的增加,在剪切力和动态再结晶的作用下Goss组织并非稳定组织,而是向着铜型和黄铜型组织转动^[9,17],这可解释热轧板表层($S=1.0\sim 0.6$)铜型和黄铜组织占主要的原因。随着向热轧板中心位置的靠近,剪切应力减小和相应动态再结晶的能力降低,Goss组织转向Copper等其他剪切组织的能力受阻,相应地Copper组织含量降低,次表层($S=0.4\sim 0.6$)位置Goss晶粒得以保留,在弱剪切力的作用下沿轧向拉长变形。Goss取向主要通过立方体取向 $\{100\}\langle 001\rangle$ 绕 $\langle 100\rangle//RD$ 轴旋转获得,铸坯中柱状晶为近立方组织,发达的柱状晶对Goss组织的形成有利^[18]。随铸坯柱状晶率的增加,热轧板次表层Goss组织含量增加。

2.3.2 热轧板中心层组织

铸坯凝固结构中柱状晶可提供强立方取向的初始组织,铸坯柱状晶率和晶粒尺寸差异对热轧板中心层组织影响较大。如果粗大的柱状晶不能完全破碎,热轧板中心层附近将存在粗大、伸长的形变晶粒,主要为 α 纤维组织($\{100\}\sim\{111\}\langle 110\rangle$)。其中旋转立方组织 $\{100\}\langle 011\rangle$ 是稳定的轧制组织,难以再发生结晶^[19-20]。

为分析铸坯柱状晶特征对热轧板中心层织构形成和演变的影响, 选取 3 组热轧板厚度方向 $S=0, 0.5$ 位置的 EBSD 微观织构进行分析, 结果如图 11。由

图 11 可看出: 经 99% 压下率热轧后, 热轧板中心层主要为沿轧向变形的 α 纤维织构, 部分为发生再结晶的 $\{111\}\langle 112\rangle$, 另 $\{114\}\langle 481\rangle$ 晶粒均匀分布在其中。

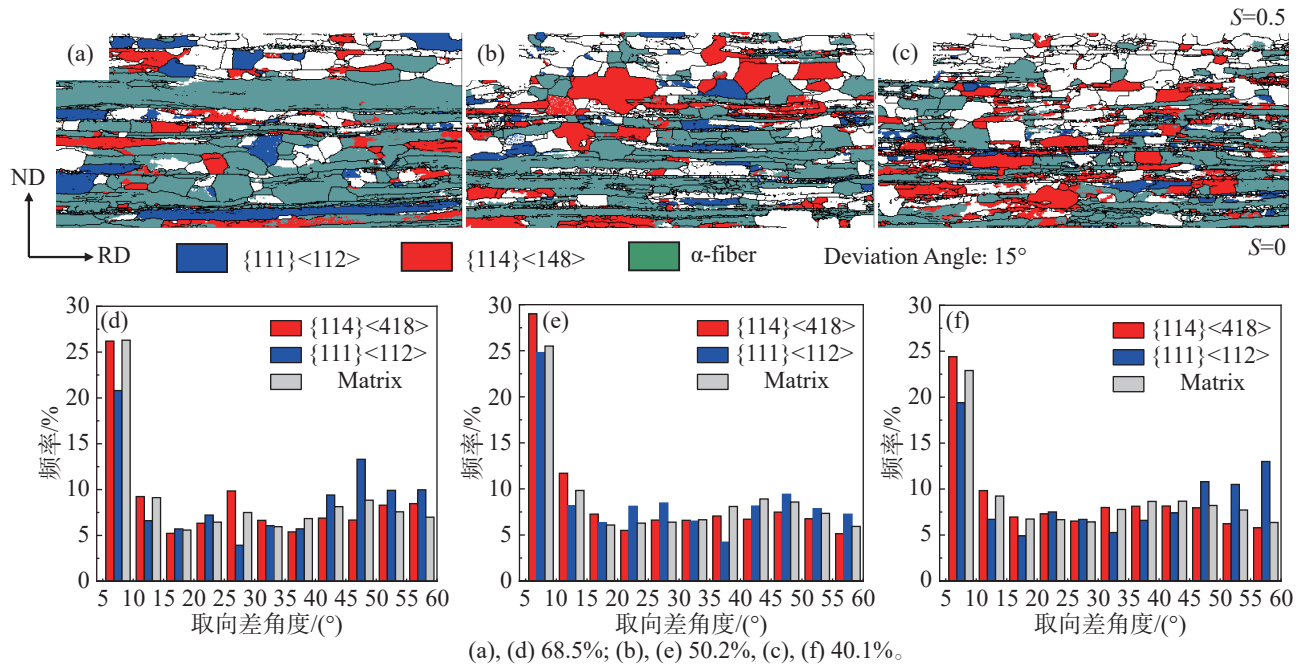


图 11 热轧板中心层晶粒取向分布和相邻晶粒的取向差分布

Fig. 11 Grain orientation distribution in the center layer of hot-rolled band and orientation difference distribution of adjacent grains

图 12 为热轧板中心层 $\{111\}\langle 112\rangle$, $\{114\}\langle 481\rangle$ 和 α 纤维织构面积分数。

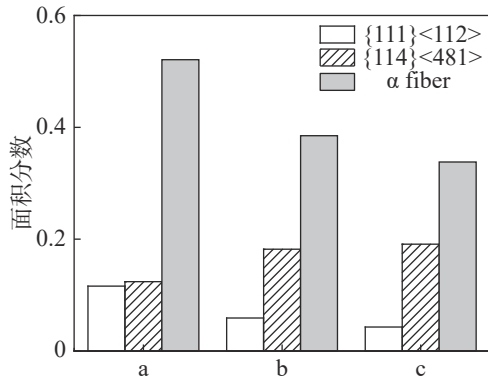


图 12 热轧板中心层 $\{111\}\langle 112\rangle$, $\{114\}\langle 481\rangle$ 和 α 纤维织构面积分数

Fig. 12 Area fraction of $\{111\}\langle 112\rangle$, $\{114\}\langle 481\rangle$ and α fiber texture in the center layer of hot-rolled band

由图 12 可看出: 随铸坯柱状晶率的减小, 相应热轧板中心层 α 纤维织构变弱, 而 α^* 纤维织构增强。表现为 α 纤维织构和 $\{111\}\langle 112\rangle$ 织构面积分数减小, 而 $\{114\}\langle 481\rangle$ 织构面积分数明显增加。

统计 3 组热轧板中心层 α 纤维织构、 $\{111\}\langle 112\rangle$ 和 $\{114\}\langle 481\rangle$ 织构晶粒个数和平均晶粒尺寸, 结果如表 2。由表 2 可知: 随铸坯柱状晶率和尺寸的降低, 相应热轧板中心层组织均匀化程度增强, 铸坯柱状晶率由 68.5% 降至 40.1%, 基体晶粒数量由 464 个增至 968 个, 基体平均晶粒尺寸由 $26.6 \mu\text{m}$ 减至 $20.7 \mu\text{m}$; 其中 $\{411\}\langle 148\rangle$ 晶粒数量由 47 个增至 165 个, 平均晶粒尺寸变化较小, 由 $17.8 \mu\text{m}$ 降至 $15.9 \mu\text{m}$; 而 $\{111\}\langle 112\rangle$ 晶粒的数量变化较小, 其平均晶粒尺寸由 $26.9 \mu\text{m}$ 降至 $15.4 \mu\text{m}$ 。

表 2 热轧板中心层特殊织构晶粒数量和平均晶粒尺寸统计

Tab. 2 Statistics on the number and average grain size of special texture grain in the center layer of hot-rolled band

试样	晶粒数量/个			平均晶粒尺寸/ μm		
	$\{114\}\langle 481\rangle$	$\{111\}\langle 112\rangle$	Matria	$\{114\}\langle 481\rangle$	$\{111\}\langle 112\rangle$	Matria
a	47	24	464	17.8	26.9	26.6
b	95	31	691	17.2	15.8	23.9
c	165	25	968	15.9	15.4	20.7

取向硅钢铸坯在较高的温度终轧后,经卷曲的热轧板中心层也发生不同程度的再结晶。 $\{111\}<112>$ 织构是具有高储能的变形晶粒,会在再结晶早期优先在晶界附近和 $\{111\}<uvw>$ 变形晶粒内部形核;变形的 α 纤维织构($\{001\}\sim\{112\}<110>$ 区域)可为 $\{114\}<481>$ 晶粒提供成核位点^[21-22]。经较大的热轧压下率热轧后,铸坯凝固组织中的初始柱状晶粒尺寸变大,热轧板中心层形成的 α 纤维织构变形晶粒变粗大。细化的 α 纤维织构变形晶粒有利于 $\{114\}<481>$ 晶粒形核,而对 $\{111\}<112>$ 晶粒的形核影响较小。

热轧板中心层再结晶晶粒的长大可用相邻晶粒的取向差分布来解释。通常认为相邻晶粒取向差小于 15° 的小角度晶界具有较低的晶界迁移率,而取向差在 $15^\circ\sim 40^\circ$ 的大角晶界具有较高的晶界迁移率^[23]。由图11中3组热轧板中心层 $\{111\}<112>$, $\{114\}<481>$ 和基体相邻晶粒的取向差分布可知,热轧板中心层基体相邻晶粒取向差小于 15° 的小角度晶界频率由35.4%降至32.1%,相邻晶粒取向差在 $15^\circ\sim 40^\circ$ 的大角度晶界频率由32.3%增至36.3%。随铸坯等轴晶率的降低,热轧板中心层基体晶粒的长大趋势增加。 $\{111\}<112>$ 晶粒与相邻晶粒间的小角度晶界频率较小, $\{114\}<481>$ 与相邻晶粒间存在较高的大角度晶界频率,在粗大的 α 纤维织构变形晶粒中, $\{111\}<112>$ 形核晶粒以较低的相邻晶粒小角度晶界频率长大。 α 纤维织构变形晶粒的细化,有利于促进 $\{114\}<481>$ 晶粒形核, $\{411\}<148>$ 晶粒由于具有较高迁移率和较大数量的优势而选择性地生长。

3 结论

1) 取向硅钢连铸过程中,电磁搅拌参数为200 A-3 Hz, 400 A-3 Hz, 900 A-3 Hz时,铸坯凝固组织中柱状晶率分别为68.5%, 50.2%, 40.1%,柱状晶率越高,柱状晶初始尺寸越大。

2) 取向硅钢热轧板表层以细小的强Goss织构再结晶晶粒为主;而中心层沿轧向拉长,以强 α 纤维及较弱 γ 纤维织构的变形晶粒为主。随铸坯柱状晶率的降低,热轧板平均晶粒尺寸减小,组织均匀程度提高,厚度方向织构梯度弱化。

3) 在剪切应变和平面应变压缩联合作用下,取向硅钢热轧板表层($S=1.0\sim 0.8$)织构以铜型和黄铜织构占主,次表层($S=0.5$)在弱剪切力的作用下,Goss晶粒沿轧向拉长变形得以保留,初始大尺寸的柱状

晶对Goss织构的形成有利。

4) 随取向硅钢铸坯柱状晶率的减小,热轧板中心层 α 纤维织构变弱,变形晶粒细化,而 α^* 纤维织构增强, $\{114\}<481>$ 织构面积分数明显增加。

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] 李志超,杨平,颜孟奇,等. 电工钢中 $\{100\}$ 织构的演变规律[J]. 中国体视学与图像分析,2009,14(3):237-244.
- [3] 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.
- [4] SHIN H J, AN J K, PARK S H, et al. The effect of texture on ridging of ferritic stainless steel[J]. *Acta Materialia*, 2003, 51(16):4693-4706.
- [5] MUNETSUGU M. Texture control in the production of grain oriented silicon steels[J]. *ISIJ International*, 1989, 29,10(8):809-827.
- [6] LI J B, DENG B R, YANG X Z. Microstructure control of continuous casting slab of grain oriented silicon steel[J]. *Materials Transactions*, 2022, 63(2):112-117.
- [7] JIANG W N, WU X, YANG P, al. Relationship between the initial $\{100\}$ textures and the shear textures developed in sheet surface during hot rolling of non-oriented silicon steel[J]. *Materials Characterization*, 2021, 182:111534.
- [8] 姜伟宁,武晓龙,杨平,等. 热轧硅钢表层动态再结晶区形成规律及剪切织构特征[J]. 金属学报,2022,58(12):1545-1556.
- [9] 邵媛媛,杨平,李志超,等. 电工钢中柱状晶对热轧和退火时晶粒取向及组织的影响[J]. 中国体视学与图像分析,2011,16(2):141-146.
- [10] LI Z H, XIE S K, WANG G D, et al. Dependence of recrystallization behavior and magnetic properties on grain size prior to cold rolling in high silicon non-oriented electrical steel[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 888:161576.
- [11] 任忠鸣,雷作胜,李传军,等. 电磁冶金技术研究新进展[J]. 金属学报,2020,56(4):583-600.
- [12] ZENG J, CHEN W, WANG Q, et al. Improving inner quality in continuous casting rectangular billets: comparison between mechanical soft reduction and final electromagnetic stirring[J]. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2016, 69:1623-1632.
- [13] 毛卫民,杨平. 电工钢的材料学原理[M]. 北京:高等教育出版社,2013.

- [14] ZOU X, LIU Q Y, QIU S T. A study on the formation of fiber texture in the subsurface layer of hot-rolled plate of 3.2% Si grain-oriented steel[J]. *Metals*, 2023, 13(9):1597.
- [15] MUKHOPADHYAY A, HOWARD I C, SELLARS C M. Finite element modelling of effects of roll gap geometry in hot rolling[J]. *Mater Sci Technol*, 2005, 21:901–911.
- [16] BUNGE H J. Some applications of the Taylor theory of polycrystal plasticity[J]. *Kristall Und Technik*, 1970, 5(1):145–175.
- [17] LEE S, KO H S, HAN K, et al. Role of subsurface goss-oriented grains in abnormal grain growth in Fe–3%Si steel[J]. *Materials Characterization*, 2021, 180:111381.
- [18] SHAO Y Y, YANG P, FU Y J, et al. Texture evolution of columnar grains in electrical steel during hot rolling[J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2013, 20(10):99–106.
- [19] 丁磊, 邵媛媛, 杨平, 等. 电工钢中柱状晶尺寸及退火工艺对{100}织构的影响 [J]. *材料热处理学报*, 2013, 34(8): 111–117.
- [20] CALVILLO P R, SALAZAR N, SCHNEIDER J, et al. Microstructure characterization by EBSD of hot rolled high-silicon steel[J]. *Defect & Diffusion Forum*, 2008, 273/276: 69–74.
- [21] YASUDA M, MURAKAMI K, USHIODA K. Recrystallization behavior and formation of {411} grain from α fiber grains in heavily cold-rolled Fe–3%Si alloy[J]. *ISIJ International*, 2020, 60(11):2558–2568.
- [22] QIN J, YANG J F, ZHANG Y H, et al. Strong {100}<012>-{411}<148> recrystallization textures in heavily hot-rolled non-oriented electrical steels[J]. *Materials Letters*, 2020, 259:126844.
- [23] SUEHIRO R, HAYAKAWA Y, TAKAMIYA T. Effect of Sn addition on evolution of primary recrystallization texture in 3% Si steel[J]. *ISIJ International*, 2019, 59(2):351–358.

责任编辑: 何莉