

## 薄带铸轧流程制备含钇3% Si取向硅钢的组织与织构研究

朱立光, 李港湾, 郑亚旭, 郭志红, 孙会兰, 李向阳, 冯捷

(河北科技大学材料科学与工程学院, 河北省材料近净成形技术重点实验室, 石家庄 050018)

**摘要:** 通过50 kg真空感应炉冶炼,用常规流程和薄带铸轧两种工艺分别在实验室制备了含稀土钇的3% Si取向硅钢。薄带铸轧浇注温度1 530 ℃,轧制速率0.3 m/s,铸带厚度2.5 mm。常规流程为80 mm铸坯加热温度1 150 ℃,热轧板厚度2.4 mm,终轧温度935 ℃。采用扫描电镜(SEM)和电子探针(EPMA)研究了钢中夹杂物成分、形貌、数量、尺寸和分布;利用光学显微镜(OM)和电子背散射衍射(EBSD)分析了硅钢铸带、热轧板、0.3 mm冷轧板、870 ℃ 7 min和1 100 ℃ 10 min再结晶退火板组织和织构。实验结果表明:与常规流程相比,薄带铸轧硅钢一次再结晶后晶粒较细小,且 $\gamma$ 织构强度达到17,但是二次再结晶后晶粒尺寸不均匀,平均晶粒尺寸为61  $\mu\text{m}$ ,部分Goss取向晶粒尺寸达到1 mm以上。原因为细小的含钇夹杂物数量过多,且分布不均匀,夹杂物聚集的区域晶粒长大受到明显抑制。常规流程生产的含钇硅钢二次再结晶热处理后晶粒均匀长大,平均晶粒尺寸为102  $\mu\text{m}$ ,没有形成明显的Goss织构。

**关键词:** 薄带铸轧; 3% Si取向硅钢; 织构; 夹杂物; 钇微合金化

## Microstructure and Texture of Yttrium Bearing 3% Si Oriented Silicon Steel Fabricated by Thin Strip Casting Rolling Process

Zhu Liguang, Li Gangwan, Zheng Yaxu, Guo Zhihong,  
Sun Huilan, Li Xiangyang, Feng Jie

(School of Material Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology,  
Hebei Key Laboratory of Material Near-net Forming Technology, Shijiazhuang 050018)

**Abstract:** The 3% Si oriented silicon steel containing yttrium is prepared by 50 kg vacuum induction furnace with conventional production process and thin strip casting rolling process, respectively. The casting temperature of thin strip is 1 530 ℃ with rolling rate 0.3 m/s to 2.5 mm cast strip thickness. The conventional process silicon steel 80 mm cast billet heating temperature is 1 150 ℃, hot rolled thickness to 2.4 mm with end rolling temperature 935 ℃. The composition, morphology, quantity, size and distribution of inclusions in steel are studied by scanning-type electron microscope (SEM) and electro-probe microanalyser (EPMA). The microstructure and texture of silicon steel strip, hot rolled plate, 0.3 mm cold rolled sheet and 870 ℃ 7 min and 1 100 ℃ 10 min recrystallizing annealed sheet are analyzed by optical microscope (OM) and electron back-scattering diffraction (EBSD). The experimental results show that, compared with the conventional process, the grains of the thin strip cast rolled silicon steel after the first recrystallization are finer and the strength of  $\gamma$  texture is 17; but the grain size is nonuniform after secondary recrystallization heat treatment, the average grain size is 61  $\mu\text{m}$ , and the partial grain size of Goss orientation bigger than 1 mm. The reason is that the amount of fine yttrium inclusions is too large and the distribution is uneven, and the grain growth in the area where the inclusions gather is obviously inhibited. After secondary recrystallization heat treatment process, the grain size of the silicon steel of yttrium bearing produced by conventional process is uniformly and the average grain size is 102  $\mu\text{m}$ , but the Goss texture is not formed.

**Material Index:** Strip Casting; 3% Si Oriented Silicon Steel; Texture; Inclusions; Yttrium Microalloying

近年来,取向硅钢因其具有优异的磁性能而被广泛应用于变压器、磁放大器、脉冲发电机等<sup>[1]</sup>。目前,取向硅钢主要是通过复杂繁琐的生产工序,调控抑制剂的析出行为和织构演变,以实现Goss取向

晶粒的异常长大<sup>[2-3]</sup>。其主要缺点为成分控制严格,生产工艺和设备复杂,生产工序多,影响性能的因素多。而薄带铸轧技术相比于传统取向硅钢生产工艺,省略了大压缩比热轧工序,并且降低了冷轧压下

**基金项目:** 国家自然科学基金(51974102, 51974103, 52174311); 河北省教育厅科学研究计划(QN2019029); 河北省重点研发计划(19211009D, 20311003D, 20311005D); 河北省钢铁联合基金(E2021208006); 国家自然科学基金面上项目: 稀土钇对薄带铸轧取向硅钢凝固、组织性能演变影响机制的研究(51974102); 高硅钢深过冷过程中析出相机理研究(51974103); 磷处理易切削不锈钢硫化物夹杂控制及点蚀机理研究(52174311)

**作者简介:** 朱立光(1965-),男,校长,教授、博导; **E-mail:** zhulg@ncst.edu.cn; **收稿日期:** 2022-05-16

**通讯作者:** 郭志红(1980-),女,副教授,硕导; **E-mail:** guozhihong191@163.com

率,在很短的时间内完成从液态金属到固态薄带的凝固过程,其冷却速度较快,可细化铸态组织,改善产品的组织和结构。日本川崎制铁公司<sup>[46]</sup>在 20 世纪 80 年代开始研究高硅钢(4.5% ~ 6.5%)薄带铸轧技术。研究发现铁损比常规工艺生产的冷轧硅钢低 15% ~ 20%,且带钢纵横比铁损比值约为 1.06,几乎完全是各向同性。重庆大学<sup>[7-8]</sup>通过薄带铸轧技术生产了硅含量为 0.5%、1.0%、3.0%、5.0% 和 6.0% 的硅钢薄板坯,研究结果表明,含 3.0% Si 的铸带经过冷轧和热处理,其电磁性能可以达到常规流程硅钢性能要求。因此,薄带铸轧非常适用于生产硅钢。

抑制剂在取向硅钢生产中起到至关重要的作用。其在初次再结晶时抑制晶粒长大,为二次再结晶晶粒异常长大提供驱动力。目前在取向硅钢生产中抑制剂主要为化合物抑制剂(MnS、AlN、CuS 等)和单质抑制剂(Sn、Cu、B 等)<sup>[9]</sup>。稀土 Y 元素由于其核外电子分布的独特性,在合金中具有较大的固溶度,根据 Stocks 公式,形成的化合物在钢液中更容易上浮去除。韩国浦项<sup>[10]</sup>在 3% Si 取向硅钢中添加 0.1% Y 作为抑制剂,结果显示,稀土 Y 在晶界处

偏析抑制晶粒长大,二次再结晶后,具有 Goss 取向的晶粒发生异常长大,成功研发出含钇取向硅钢。周情耀<sup>[11]</sup>等人在高硅钢中添加不同含量的稀土 Y,结果表明,随着 Y 含量的增加,晶粒尺寸逐渐减小, Y 具有细化晶粒的作用。基于以上研究结果,本实验选择稀土 Y 作为 3% Si 取向硅钢抑制剂,同时对常规流程和薄带铸轧工艺生产的取向硅钢组织和织构的演变规律。

1 实验材料与方法

薄带铸轧实验采用东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室自主设计开发的立式双辊薄带铸轧机。薄带铸轧机主要技术参数如表 1 所示。薄带铸轧实验采用 50 kg 真空中频感应炉冶炼,随后将钢液经浇铸水口引流至已经预热到 1 200 °C 左右的容量为 20 kg 的中间包内,最后钢液经浇嘴流入结晶辊与侧封板组成的熔池内。铸轧辊中通有循环水以提高铸辊导热能力,加速钢水完成凝固过程。铸带厚度可以通过调整浇铸速率、初始辊缝和铸轧速度等参数进行控制。本实验设置薄带铸轧浇注温度 1 530 °C,轧制速率为 0.3 m/s,铸带厚度为 2.5 mm。

表 1 薄带铸轧机技术参数

Table 1 Technical parameters of thin strip casting and rolling mill

初始辊缝/mm	轧辊宽度/mm	辊套	轧辊直径/mm	铸轧速度/(m · s <sup>-1</sup> )	冷却速度/(°C · s <sup>-1</sup> )	轧制力/kN
1.5 ~ 3(可调)	110/180	铍铜	500	0.3 ~ 0.5	~ 1 000	0 ~ 10

表 2 实验用 3.0% Si 钢化学成分/%

Table 2 Chemical composition of experimental 3.0% Si steel/%

试验钢	C	Si	S	P	Y	O	N
设计成分	0.06	3.00	<0.005 0	<0.015	0.060	<0.003 0	<0.005 0
薄带铸轧硅钢	0.03	2.96	0.002 5	0.011	0.075	0.002 2	0.003 2
常规流程硅钢	0.04	3.10	0.001 1	0.010	0.058	0.002 0	0.004 3

常规流程实验采用 50 kg 真空感应炉冶炼 Si 含量为 3% 的取向硅钢,出钢浇铸前在铸模底部加入稀土钇金属。常规流程铸坯厚度为 80 mm,加热温度 1 150 °C,保温 30 min,经过 9 道次轧制至 2.4 mm,总压下率为 97%,终轧温度 930 °C。试验用钢化学成分如表 2 所示,Y 的收得率约为 30%。

将薄带铸轧板与常规流程生产的热轧板进行常化、酸洗、冷轧、一次再结晶和二次再结晶热处理。首先将硅钢板加热到 1 050 °C 并保温 10 min 完成常化处理,然后将常化后的硅钢板用稀盐酸腐蚀去除表面氧化铁皮,最后经过 12 道次室温冷轧至 0.3 mm,总压下率为 87.5%。将冷轧板置于石英管

中真空封闭后进行再结晶热处理。热处理工艺如图

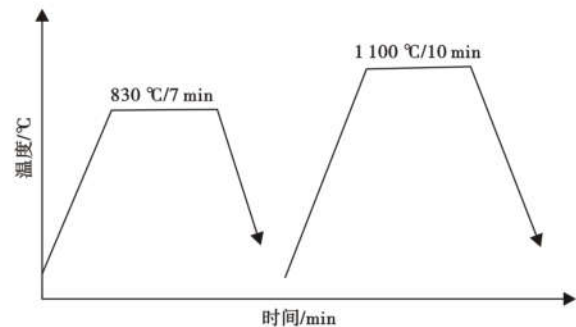


图 1 3% Si 钢热处理工艺示意图

Fig. 1 Schematic diagram of heat treatment process of 3.0% Si steel

1 所示,一次再结晶温度为 830 ℃,保温 7 min 后出炉空冷;二次再结晶温度 1 100 ℃,保温 10 min 后出炉空冷。

采用扫描电子显微镜 (SEM) 和电子探针 (EP-MA) 研究了钢中夹杂物形貌、数量、尺寸、分布和成分;利用光学显微镜 (OM) 和背散射衍射仪 (EBSD) 分析了硅钢薄带、热轧板、冷轧板、一次再结晶和二次再结晶热处理薄板的组织和织构。组织和织构观察面为样品纵截面 (RD-ND 面)。

## 2 结果与分析

### 2.1 薄带铸轧板和热轧板的组织和织构变化规律

图 2 为薄带铸轧板和常规热轧板组织。薄带铸轧有明显的柱状晶,中心为等轴晶。常规流程热轧板表层为细小的等轴晶,心部为没有发生再结晶的纤维组织,剪切带较明显。可能是由于热轧板加热温度较低且心部形变量较小,导致再结晶困难<sup>[12]</sup>。薄带铸轧板晶粒尺寸粗大,平均晶粒尺寸为 79 μm,晶粒集中在 50 ~ 200 μm;热轧板晶粒大小不均匀,表层主要是细小等轴晶而心部为纤维组织,平均晶粒尺寸为 27 μm。

图 3 为薄带铸轧板和常规流程热轧板 RD-ND 面的 IPF (Imagery Processing Facility) 成像处理简图

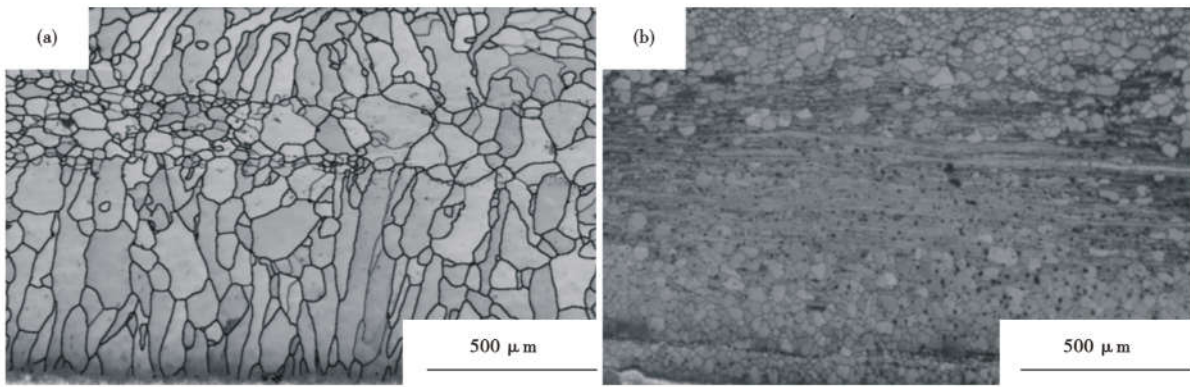


图 2 3% Si 钢薄带铸轧板 (a) 和常规流程热轧板 (b) 组织

Fig. 2 Microstructure of thin strip casting rolling plate (a) and routine process hot rolled plate (b) of 3.0% Si steel

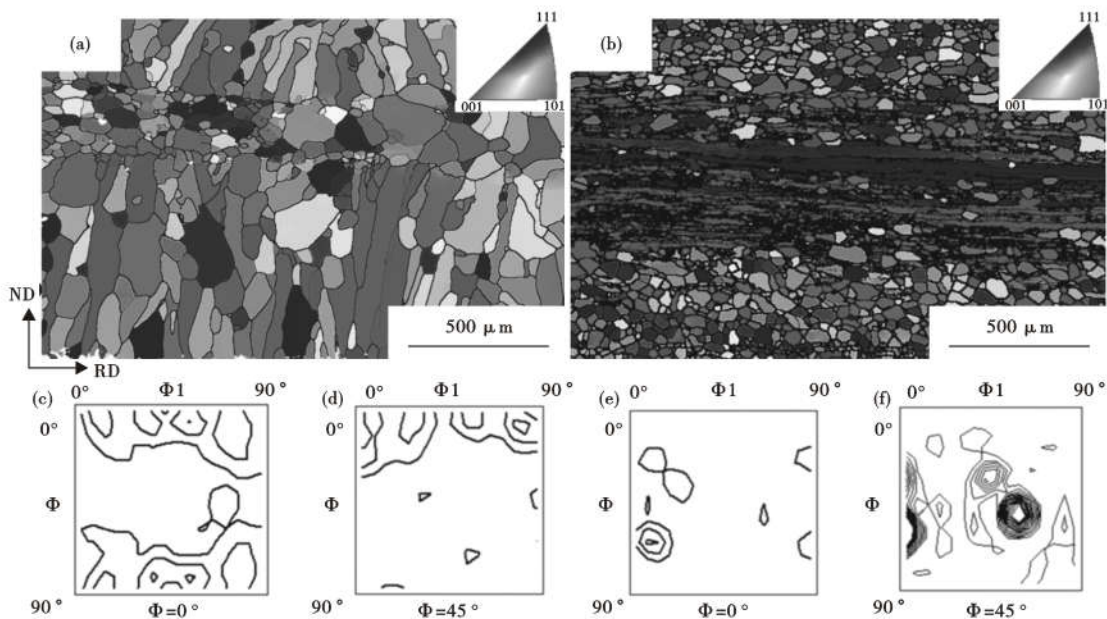


图 3 3% Si 钢薄带铸轧和热轧板 IPF 成像处理简图和 ODF 取向分布函数图: (a) 薄带铸轧 IPF; (b) 常规流程 IPF; (c) 薄带铸轧 ODF (0°); (d) 薄带铸轧 ODF (45°); (e) 常规流程 ODF (0°); (f) 常规流程 ODF (45°)

Fig. 3 Diagram of IPF (Imagery Processing Facility) and ODF (Orientation Distribution Functions) of thin strip casting rolling plate and hot rolled plate of 3.0% Si steel: (a) IPF of thin strip casting rolling; (b) IPF of routine process; (c) thin strip casting rolling plate ODF (0°); (d) thin strip casting rolling plate ODF (45°); (e) routine process hot rolled plate ODF (0°); (f) routine process hot rolled plate ODF (45°)

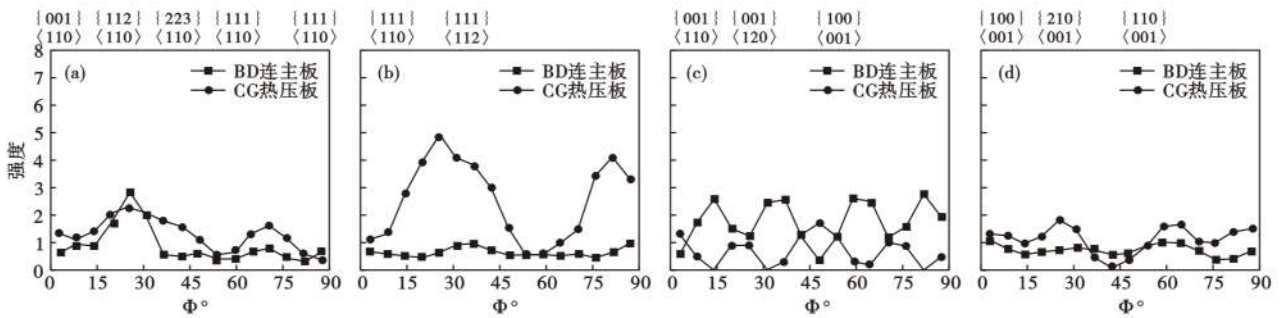


图 4 3% Si 钢薄带铸轧(BD)和常规工艺热轧板(CG) $\alpha$ 、 $\gamma$ 、 $\lambda$  和  $\eta$  织构的取向线密度图:(a)  $\alpha$  取向;(b)  $\gamma$  取向;(c)  $\lambda$  取向;(d)  $\eta$  取向

Fig. 4 Orientation linear density diagram of  $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\lambda$  and  $\eta$  texture of 3.0% Si steel continuous casting rolling plate (BD) and routine process hot rolled plate(CG): (a)  $\alpha$  orientation; (b)  $\gamma$  orientation; (c)  $\lambda$  orientation; (d)  $\eta$  orientation

和  $\Phi_2 = 0^\circ$ 、 $\Phi_2 = 45^\circ$  截面 ODF (Orientation Distribution Functions) 取向分布函数图。可以看出,薄带铸轧板主要为  $\alpha$  织构和少量 Goss ( $\{110\} \langle 001 \rangle$ ) 织构。常规流程热轧板主要为  $\alpha$  和  $\gamma$  织构,Goss 织构较少,中心层主要为  $\langle 001 \rangle$  方向和  $\langle 112 \rangle$  方向的剪切带。

图 4 为薄带铸轧板和常规流程热轧板  $\alpha$ 、 $\gamma$ 、 $\lambda$  和  $\eta$  织构取向线密度分布图,能够更加直观的反映织构强度变化。从图 4 中可以看出,常规流程热轧板具有较强的  $\gamma$  ( $\{111\} \langle 112 \rangle$ ) 织构和  $\eta$  ( $\{210\} \langle 001 \rangle$ ) 织构,薄带铸轧板具有较强的  $\alpha$  ( $\{112\} \langle 110 \rangle$ ) 织构,强度为 3。相比于薄带铸轧的快速凝固过程,常规流程热轧具有更大的形变量,使  $\gamma$  和  $\eta$  织构强度明显提高<sup>[12-13]</sup>。

### 2.2 冷轧板组织和织构的变化规律

图 5 为薄带铸轧和常规流程冷轧板组织,可以看出薄带铸轧后的冷轧板剪切带与轧制方向角度较小,为  $5^\circ \sim 20^\circ$ ;而常规流程冷轧板中剪切带与轧制方向角度较大,为  $20^\circ \sim 45^\circ$ 。剪切带与轧面夹角一般为  $20^\circ \sim 35^\circ$ ,通常会连续贯穿若干个晶粒,随着形变量的增加,正常的位错滑移不能承载瞬间大形变量而发生塑性失稳,从而形成剪切带释放高应变能<sup>[14]</sup>。研究表明<sup>[15]</sup>,特定的取向晶粒对剪切带的形成具有重要作用,泰勒因子很高的  $\gamma$  晶粒对平面应变压缩有很大的抵抗力,通常表现出不均匀变形的趋势,因此, $\gamma$  织构对冷变形过程中剪切带的形成更为有利。由于常规流程在热轧阶段具有较大的压下率,导致热轧阶段产生的  $\gamma$  织构强度较强,使冷轧后剪切带数量更多且尺寸更长。

图 6 为轧向侧面 (RD-ND 面) 的 IPF 图和  $\Phi_2 = 0^\circ$ 、 $\Phi_2 = 45^\circ$  截面 ODF 图。可以看出,两种工艺生产的硅钢冷轧板主要是  $\alpha$  织构和  $\gamma$  织构。薄带冷轧



图 5 3% Si 钢冷轧板组织:(a) 薄带铸轧;(b) 常规流程  
Fig. 5 Microstructure of cold rolling plate of 3.0% Si steel: (a) thin strip casting rolling process; (b) routine process

板的  $\gamma$  织构强度较强且取向较正,最强处可达到 17。冷轧使次表层中的  $\{110\} \langle 001 \rangle$  取向晶粒转变为  $\{111\} \langle 112 \rangle$  取向晶粒,同时在变形晶粒中包含了  $\{110\} \langle 001 \rangle$  取向的亚结构,因此,冷轧后  $\gamma$  织构的强度明显增加<sup>[16]</sup>。

图 7 为薄带和常规流程下冷轧板的  $\alpha$ 、 $\gamma$ 、 $\lambda$  和  $\eta$  织构取向线密度图。从图 7(a) 中得到,薄带冷轧板的  $\alpha$  织构强度明显提高,主要集中在  $\{223\} \langle 110 \rangle$  和  $\{111\} \langle 110 \rangle$  织构,强度达到 18。从图 7(b) 中可以看出,薄带试样冷轧后, $\gamma$  织构大幅提升, $\{111\} \langle 110 \rangle$  织构强度最大,达到 17。从图 7(c) 中可以看出,薄带试样  $\lambda$  织构 ( $\{001\} \langle 110 \rangle$ ) 强度最大,强度为 7;从图 7(d) 中可以看出,传统流程硅钢板  $\eta$  织构 ( $\{110\} \langle 001 \rangle$ ) 较高,强度最高为 1.5。当压下量不断增加,晶粒开始发生转动,逐渐向  $\gamma$  取向线附近靠近,因此冷轧后织构含有较高的  $\gamma$  织构。随着  $\gamma$  织构 ( $\{111\} \langle 110 \rangle$  和  $\{111\} \langle 112 \rangle$ ) 强度增加,更容易形成易于迁移的大角度晶界。此时具有成核优势的晶粒容易吞并另一个晶粒,在随后的退火过程中形成单一取向 Goss 晶粒<sup>[17]</sup>。总体而言,冷轧后薄带铸轧样品织构强度有较大的提高,尤其是  $\alpha$  织构和  $\gamma$  织构。

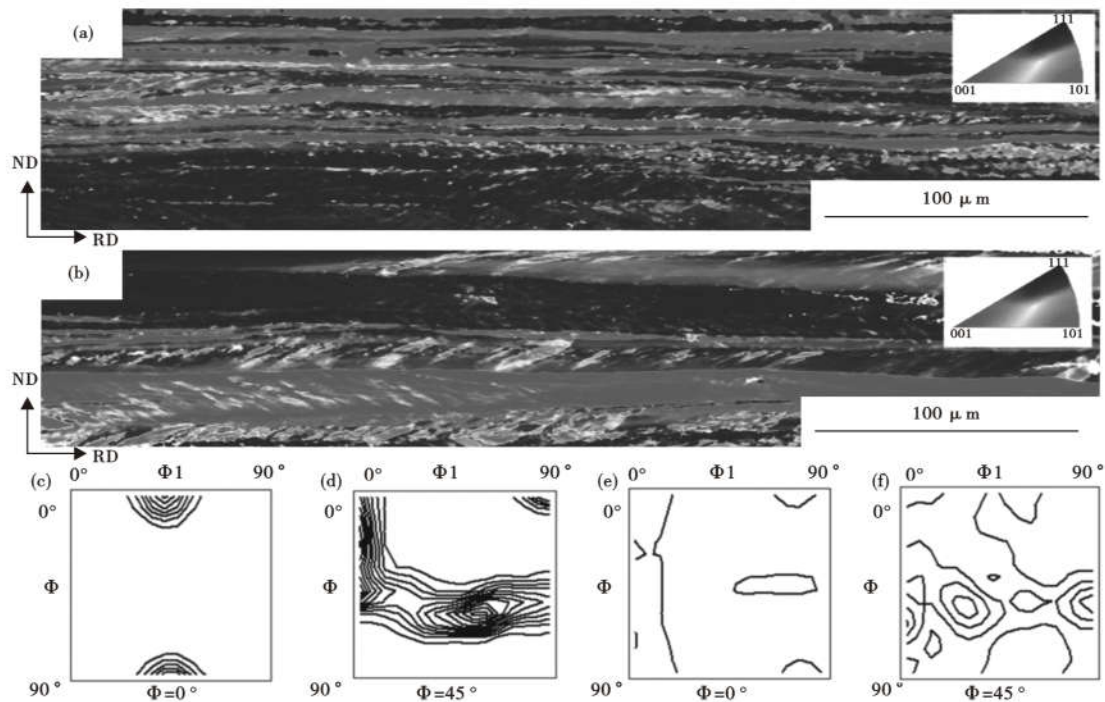


图 6 3% Si 钢冷轧板 IPF 图和 ODF 图: (a) 薄带铸轧 IPF; (b) 常规流程 IPF; (c) 薄带铸轧 ODF(0°); (d) 薄带铸轧 ODF(45°); (e) 常规流程 ODF(0°); (f) 常规流程 ODF(45°)

Fig. 6 Diagram of IPF and ODF of cold rolled thin strip of 3.0% Si steel: (a) IPF of thin strip casting rolling; (b) IPF of routine process; (c) ODF of thin strip casting rolling plate (0°); (d) ODF of thin strip casting rolling plate (45°); (e) ODF of routine process (0°); (f) ODF of routine process (45°)

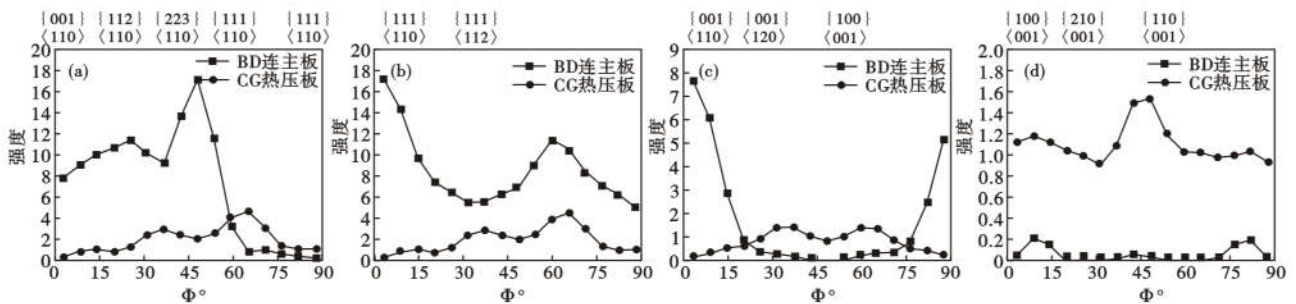


图 7 3% Si 钢冷轧板  $\alpha$ 、 $\gamma$ 、 $\lambda$  和  $\eta$  织构的取向线密度图: (a)  $\alpha$  取向; (b)  $\gamma$  取向; (c)  $\lambda$  取向; (d)  $\eta$  取向

Fig. 7 Orientation linear density diagram of  $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\lambda$  and  $\eta$  texture of cold rolling thin strip of 3.0% Si steel: (a)  $\alpha$  orientation; (b)  $\gamma$  orientation; (c)  $\lambda$  orientation; (d)  $\eta$  orientation

### 2.3 一次再结晶组织和织构的变化规律

图 8 为一次再结晶金相组织,可以看出,一次再结晶后主要为细小的等轴晶,其中薄带铸轧工艺晶粒尺寸主要集中在 5 ~ 20  $\mu\text{m}$ ,晶粒平均尺寸为 9.2  $\mu\text{m}$ 。常规流程晶粒尺寸主要集中在 10 ~ 30  $\mu\text{m}$ ,因此平均晶粒尺寸也较大,为 14.5  $\mu\text{m}$ 。由于冷轧时常规流程的剪切带数量多且尺寸长,储存的能量较高,使一次再结晶后晶粒生长的较大。取向硅钢一次再结晶为二次再结晶提供高斯晶核,并且为高斯晶粒长大提供驱动力。薄带铸轧一次再结晶晶粒尺寸比常规流程小 5  $\mu\text{m}$  左右。小尺寸晶粒拥有更高的晶界能,在二次再结晶阶段为高斯取向

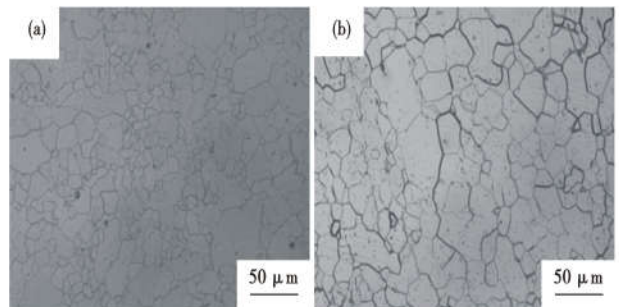


图 8 3% Si 钢冷轧板一次再结晶后组织图: (a) 薄带铸轧; (b) 常规流程

Fig. 8 Microstructure of 3.0% Si steel cold rolled thin strip after primary recrystallization: (a) thin strip casting rolling process; (b) routine process

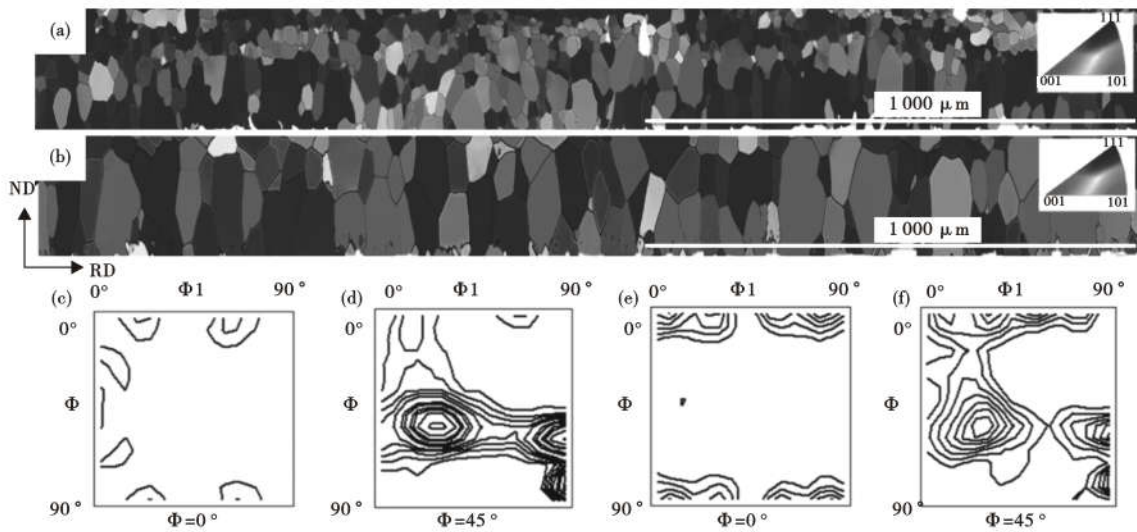


图 9 3% Si 钢冷轧板一次再结晶 IPF 图和 ODF 图:(a) 薄带铸轧 IPF;(b) 常规流程 IPF;(c) 薄带铸轧 ODF(0°);(d) 薄带铸轧 ODF(45°);(e) 常规流程 ODF(0°);(f) 常规流程 ODF(45°)

Fig. 9 Diagram of IPF and ODF of primary recrystallization plate of 3.0% Si steel cold rolled thin strip: (a) IPF of thin strip casting rolling; (b) IPF of routine process; (c) ODF of thin strip casting rolling plate (0°); (d) ODF of thin strip casting rolling plate (45°); (e) ODF of routine process (0°); (f) ODF of routine process (45°)

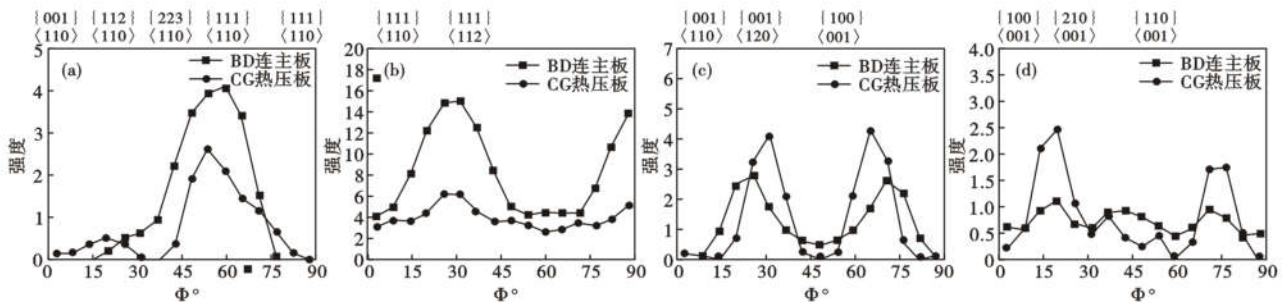


图 10 3% Si 钢一次再结晶薄板  $\alpha$ 、 $\gamma$ 、 $\lambda$  和  $\eta$  织构的取向线密度图:(a)  $\alpha$  取向;(b)  $\gamma$  取向;(c)  $\lambda$  取向;(d)  $\eta$  取向

Fig. 10 Orientation linear density diagram of  $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\lambda$  and  $\eta$  texture of 3.0% Si primary recrystallization thin strip: (a)  $\alpha$  orientation; (b)  $\gamma$  orientation; (c)  $\lambda$  orientation; (d)  $\eta$  orientation

晶粒长大提供更高的驱动力,促进晶界的迁移<sup>[12]</sup>。

图 9 为一次再结晶后钢板的 IPF 图和 ODF 截面图。两种工艺的冷轧板一次再结晶后,织构类型均主要是  $\gamma$  和  $\alpha$  织构,Goss 织构较少。薄带铸轧冷轧板在经过一次再结晶后, $\gamma(\{111\} \langle 112 \rangle)$  织构强度达到 18。常规流程冷轧板一次再结晶后  $\alpha(\{100\} \langle 100 \rangle)$  织构强度为 4.5, $\gamma(\{111\} \langle 112 \rangle)$  织构强度为 5.5。一次再结晶后形成锋锐的  $\gamma$  织构有利于在二次再结晶后生长为大尺寸的 Goss 织构晶粒。

图 10 为薄带和常规流程一次再结晶后  $\alpha$ 、 $\gamma$ 、 $\lambda$  和  $\eta$  织构取向线密度图。从图 10(a)中可以看出,薄带铸轧冷轧板一次再结晶后  $\alpha$  织构整体强度相对于冷轧板有了明显降低,两种工艺的强度峰值相对接近,在  $\{111\} \langle 110 \rangle$  时织构强度达到 4。从图 10(b)中看出,薄带冷轧板一次再结晶后从  $\{111\} \langle$

$110 \rangle$  织构转化为  $\{111\} \langle 112 \rangle$  织构, $\gamma$  织构 ( $\{111\} \langle 112 \rangle$ ) 强度达到 16。常规流程的  $\gamma$  织构强度仅为 6。从图 10(c)中可以得到,常规流程的  $\lambda$  织构强度稍高,薄带铸轧试样一次再结晶后的  $\lambda$  织构 ( $\{001\} \langle 110 \rangle$ ) 有明显降低。从图 10(d)中得知,两种工艺生产的硅钢中  $\eta$  织构强度均较低。由于在冷轧过程积累较高储存能,使一次再结晶形核率提高,新晶核会快速吞并变形基体。因此,初次再结晶退火板中  $\alpha$  织构明显减弱而形成了较强的  $\gamma$  织构。 $\gamma$  织构由于与 Goss 织构具有特殊取向关系,被认为是一种理想的一次再结晶织构组分<sup>[18]</sup>。薄带铸轧试样在一次再结晶后, $\gamma$  织构强度更高。

#### 2.4 二次再结晶组织和织构的变化规律

由图 11 可见,二次再结晶后晶粒明显长大。二次再结晶的驱动力主要来自基体总界面能的降低,初次再结晶晶粒越小,这种驱动力越大,越有利于晶

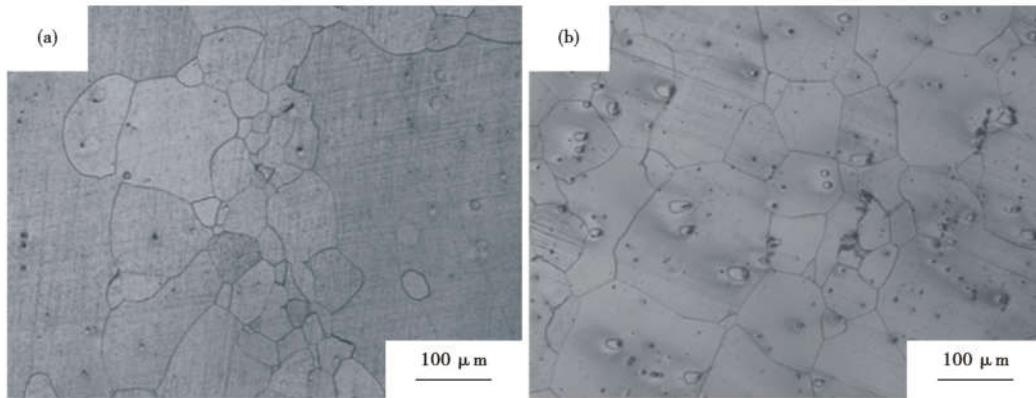


图 11 3% Si 钢二次再结晶薄板组织图:(a)薄带铸轧;(b)常规流程

Fig. 11 Diagram of microstructure of 3% Si steel secondary recrystallization thin strip: (a) thin strip casting rolling process; (b) routine process

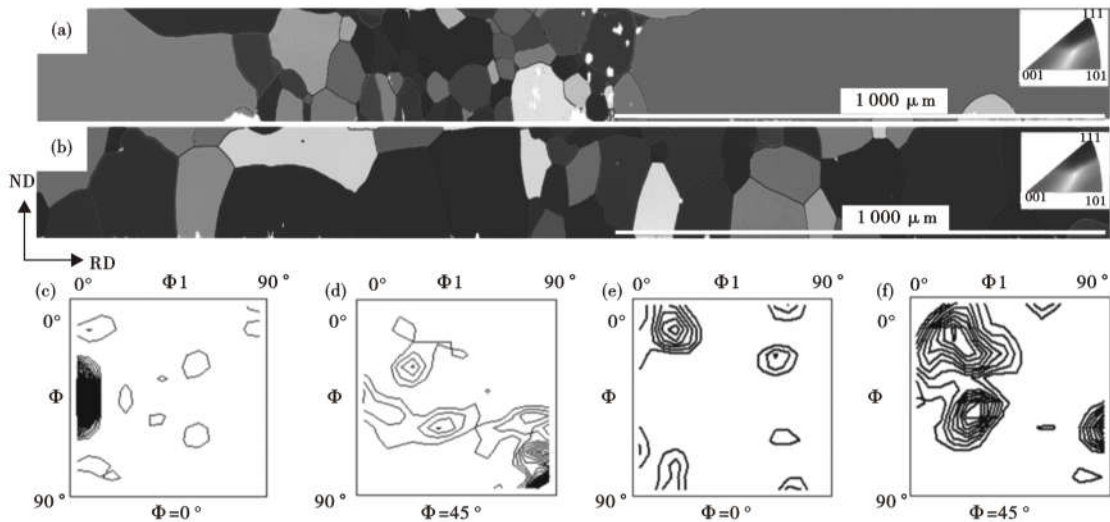


图 12 3% Si 钢二次再结晶板 IPF 图和 ODF 图:(a)薄带铸轧 IPF;(b)常规流程 IPF;(c)薄带铸轧 ODF(0°);(d)薄带铸轧 ODF(45°);(e)常规流程 ODF(0°);(f)常规流程 ODF(45°)

Fig. 12 Diagram of IPF and ODF of 3% Si steel secondary recrystallization plate thin strip: (a) IPF of thin strip casting and rolling; (b) IPF of routine process; (c) ODF of thin strip casting and rolling plate (0°); (d) ODF of thin strip casting and rolling plate (45°); (e) ODF of routine process (0°); (f) ODF of routine process ODF (45°)

粒异常长大。薄带铸轧硅钢二次再结晶后部分小晶粒的尺寸在 20 ~ 60 μm,但部分晶粒发生了异常长大,晶粒尺寸 > 1 mm。常规流程硅钢二次再结晶晶粒尺寸较均匀,平均晶粒尺寸 102 μm。

图 12 为硅钢二次再结晶的 IPF 图(允许偏差角为 15°)和 ODF 图(Φ<sub>2</sub> = 0°和 Φ<sub>2</sub> = 45°)。薄带铸轧硅钢二次再结晶晶粒大小不均匀,个别晶粒发生了异常长大,而常规流程的硅钢晶粒尺寸比较均匀。薄带铸轧硅钢组织类型主要为 γ 结构,部分 Goss ({110} <001>)取向晶粒发生异常长大。与一次再结晶组织相比,二次再结晶后 γ 结构强度有所降低,主要是由于在二次再结晶后部分 γ 结构转变为 Goss 结构({110} <001>),Goss 取向晶粒主要形核于{111} <112>和{111} <110>晶粒内部的剪切

带上,因为这些位置储存能高便于快速形核<sup>[19]</sup>。常规流程硅钢二次再结晶后组织类型主要也是 γ 结构,Goss 结构不明显。

图 13 为薄带铸轧和常规流程硅钢二次再结晶后的 α、γ、λ 和 η 结构取向线密度图。图 13(a)可见,薄带铸轧{223} <110>结构强度最大,达 3.9,常规流程{112} <110>结构强度最大,达 2,两流程硅钢整体的 α 结构强度均较低。从图 13(b)可得,由于生成 Goss 结构({110} <001>),二次再结晶后薄带硅钢的 γ 结构强度降低,强度最高为 4。常规流程硅钢的 γ 结构变化不明显,在{111} <112>取向处强度达到 9。从图 13(c)可见,常规流程硅钢在{001} <120>结构强度最高,为 3.5。薄带铸轧硅钢仅在{100} <001>结构强度较高,达到 1。

通过图 13(d) 可见,薄带铸轧硅钢在 Goss( $\{110\} \langle 001 \rangle$ ) 处具有较高的织构强度,达到 50。常规流程硅钢在二次再结晶后依然具有较高的  $\gamma(\{111\} \langle$

$112 \rangle)$  取向织构,说明  $\gamma$  织构没有转变为 Goss 织构<sup>[20]</sup>。可能是由于常规流程硅钢一次再结晶后晶粒尺寸较大,储存能释放较多,二次再结晶时没有足

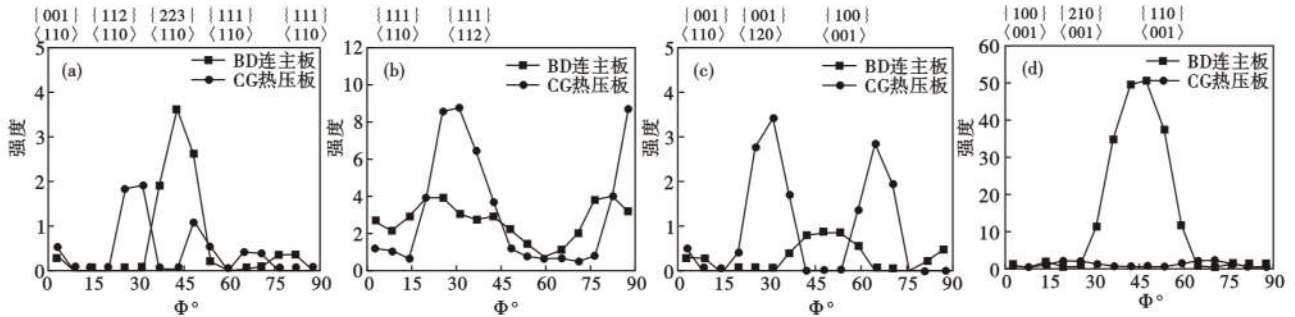


图 13 3% Si 钢二次再结晶薄板  $\alpha$ 、 $\gamma$ 、 $\lambda$  和  $\eta$  织构的取向线密度图(a)  $\alpha$  取向;(b)  $\gamma$  取向;(c)  $\lambda$  取向;(d)  $\eta$  取向  
Fig. 13 Orientation linear density diagram of 3% Si steel  $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\lambda$  and  $\eta$  texture of secondary recrystallization thin strip; (a)  $\alpha$  orientation; (b)  $\gamma$  orientation; (c)  $\lambda$  orientation; (d)  $\eta$  orientation

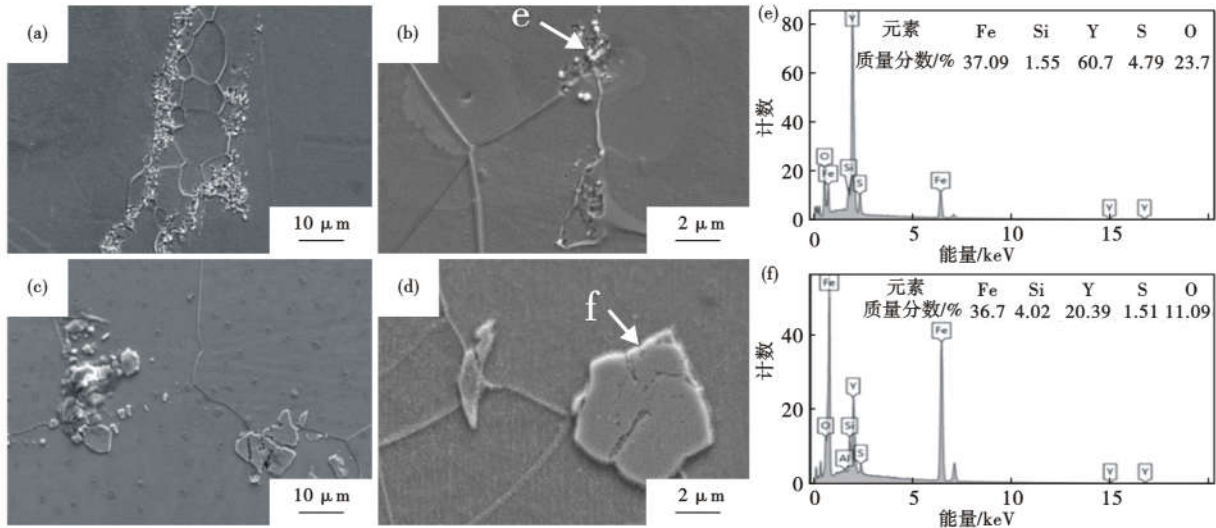


图 14 3% Si 钢二次再结晶薄板夹杂物的形貌分布:(a) (b) (e) 薄带铸轧;(c) (d) (f) 常规流程  
Fig. 14 Morphology distribution of inclusions in 3% Si steel secondary recrystallization thin strip: (a) (b) and (e) thin strip casting rolling; (c) (d) and (f) routine process

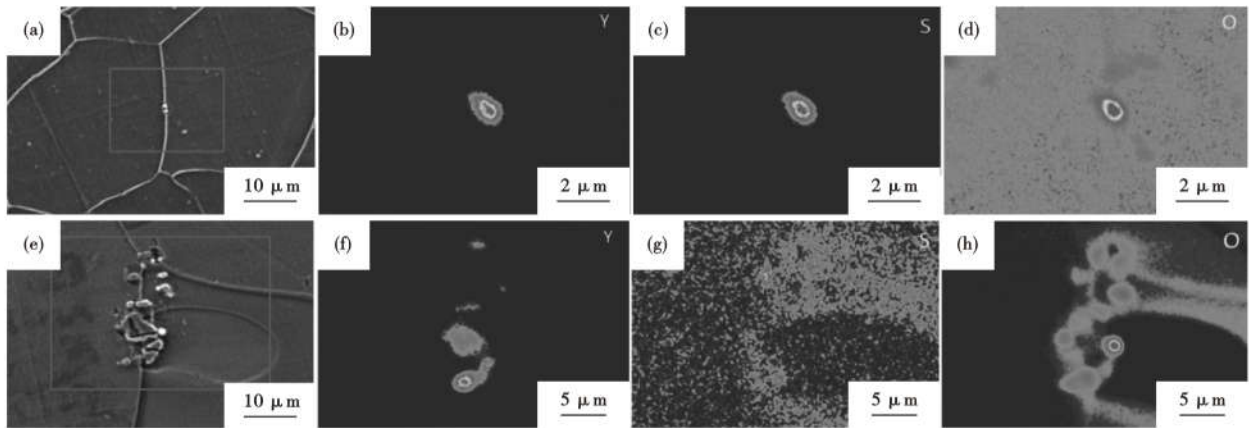


图 15 二次再结晶 3% Si 钢板夹杂物成分分布:(a) (b) (c) (d) 薄带铸轧;(e) (f) (g) (h) 常规流程  
Fig. 15 Composition distribution of inclusions in 3% Si steel secondary recrystallization thin strip: (a) (b) (c) and (d) thin strip casting rolling; (e) (f) (g) and (h) routine process

够的驱动力促使 Goss 晶粒异常长大。

图 14 和图 15 为 SEM 和 EPMA 夹杂物形貌和成分分析,可以看出薄带铸轧硅钢二次再结晶后夹杂物尺寸小于  $1\ \mu\text{m}$ ,但是夹杂物有明显的聚集。常规流程硅钢夹杂物尺寸比较大,为  $2\sim 5\ \mu\text{m}$ 。两工艺生产硅钢中夹杂物主要为 YS、YOXS 和  $\text{SiO}_2$  的复合夹杂物。电子探针 EPMA 检测结果显示,富集在晶界上的圆形夹杂物主要含有 Y、S 和 O 元素,稀土夹杂物对晶粒生长起到明显的抑制作用。

薄带铸轧硅钢中夹杂物分布不均匀,二次再结晶后大量夹杂物富集在小晶粒附近,阻碍了晶粒长大。夹杂物数量较少的位置,Goss 晶粒发生了异常长大。而常规流程硅钢中夹杂物分布均匀,有效钉扎晶界,因此,二次再结晶后晶粒大小比较均匀。

### 3 结论

(1)薄带铸轧板晶粒粗大,尺寸达到  $1\ \text{mm}$  以上有明显的柱状晶,中心为等轴晶。常规流程硅钢晶粒细小,由于热轧温度较低且心部形变量较小,心部没有发生完全再结晶,由于热轧板的压缩变形量大,导致储存能较高,一次再结晶后晶粒较大,储存能释放较多,二次再结晶时,没有足够的驱动力促使晶粒

异常长大。

(2)薄带铸轧板主要有  $\alpha$  织构和少量 Goss ( $\{110\} \langle 001 \rangle$ ) 织构。常规流程热轧板主要为  $\alpha$  和  $\gamma$  织构,中心层主要为  $\langle 001 \rangle$  取向和  $\langle 112 \rangle$  取向的剪切带;由于有较大热轧压下率而产生了较强的  $\gamma$  织构,使冷轧后剪切带数量更多且尺寸更长。两种工艺生产的硅钢冷轧板主要为  $\alpha$  和  $\gamma$  织构,薄带冷轧板中的  $\gamma$  织构较强。一次再结晶后,两种工艺硅钢中仍主要是  $\alpha$  和  $\gamma$  织构,但是薄带铸轧的  $\gamma$  ( $\{111\} \langle 112 \rangle$ ) 织构更强,达到 18。薄带铸轧硅钢二次再结晶后  $\gamma$  ( $\{111\} \langle 112 \rangle$ ) 织构强度降低,形成了一定量的 Goss ( $\{110\} \langle 001 \rangle$ ) 织构,而常规流程硅钢中依然具有较高的  $\gamma$  ( $\{111\} \langle 112 \rangle$ ) 织构,并未出现明显的 Goss ( $\{110\} \langle 001 \rangle$ ) 织构。

(3)两种工艺生产的硅钢中主要有 YS、YOXS 和  $\text{SiO}_2$  的复合夹杂物。薄带铸轧夹杂物尺寸小数量多,分布不均匀,主要聚集在小晶粒的晶界上,夹杂物大量聚集处二次再结晶时晶界移动受到抑制。夹杂物数量较少的位置,Goss 取向晶粒异常长大。常规流程夹杂物尺寸较大,但夹杂物分布均匀,对晶界的钉扎力比较均匀,因此,晶粒均匀长大。

### 参考文献

- [1]付兵,项利,乔家龙,等.薄板坯连铸连轧流程制备低温 Hi-B 钢织构的演变及 Goss 晶粒的发展[J].材料导报,2022(9):1-13.
- [4]李莉,柳金龙,张一凡,等.常化温度对取向硅钢冷加工性的影响[J].上海金属,2021,43(6):32-37.
- [3]Zeng Y M, Luo J L, Norton P R. A Study of Semiconducting Properties of Hydrogen Containing Passive Films [J]. Thin Solid Films, 2004, 460(1-2): 116-124.
- [4]邹冰梅,阮晓丰.双辊薄带连铸工艺生产硅钢技术[J].钢铁研究,2003(5):59-63.
- [5]丁培道,蒋斌,杨春楣,等.薄带连铸技术的发展现状与思考[J].中国有色金属学报,2004(14):192-196.
- [6]夏强强,李莉娟,刘立华,等.取向硅钢生产工艺研究进展[J].材料导报,2010,24(5):85-88.
- [7]肖丽俊,岳尔斌,仇圣桃,等.双辊薄带连铸生产取向硅钢的技术分析[J].钢铁研究学报,2009,21(8):1-5.
- [8]杨春楣,周守则,丁培道.双辊连铸硅钢薄带研究现状[J].材料导报,1999,13(1):24-26.
- [9]何忠治,赵宇,罗海文.电工钢[M].北京:冶金工业出版社,2012:3-52.
- [10]Park H K, Han C H, Park C S, et al. Abnormal Grain Growth Induced by Grain Boundary Segregation of Yttrium in Grain-Oriented Fe-3% Si Steel [J]. Materials Characterization, 2018, 146: 204-208.
- [11]周情耀,秦镜,赵海斌,等.钕对冷轧高硅钢薄板组织、织构及磁性能的影响[J].电工钢,2020,2(3):9-13.
- [12]方烽.薄带连铸流程制备电工钢的组织演变与织构调控[D].沈阳:东北大学,2018.
- [13]李军,孙颖,赵宇,等.取向硅钢低温铸坯加热的研究进展[J].钢铁,2007,42(10):72-75.
- [14]方泽民.中国电工钢五十八年的发展及展望[C].厦门.中国电工钢专业学术年会,2010.
- [15]李军,孙颖.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.
- [16]王国栋.近年我国轧制技术的发展、现状和前景[J].轧钢,2017,34(1):1-8.
- [17]任秀平.电工钢生产技术研发进展及未来发展趋势[N].世界金属导报,2016-7-15[B04].
- [18]焦海涛,蔺晓雪,谢信祥,等.轧制工艺对薄带铸轧无取向硅钢组织性能的影响[J].轧钢,2021,38(5):18-22.
- [19]李文达.冷轧取向硅钢片中的抑制相系[J].特殊钢,1998,19(6):1-7.
- [20]颜孟奇,钱浩,杨平,等.电工钢中黄铜织构行为及其对 Goss 织构的影响[J].金属学报,2012,48(1):16-22.