

取向硅钢板坯凝固结构调控的工业化试验研究

时朋召, 刘红军, 谢建府, 苏风光, 周建军

(湖南华菱涟源钢铁有限公司 210 转炉厂, 湖南 娄底 417000)

摘要: 对取向硅钢板坯在不同连铸工艺条件进行工业化试验, 研究过热度、拉速、电磁搅拌参数与电磁搅拌结构等对铸坯凝固结构的影响, 探讨调控取向硅钢凝固结构的有效手段。结果表明: 过热度由 20 °C 提高到 25 °C 时, 铸坯的等轴晶率由 66.6% 降至 63.4%; 电磁搅拌电流由 200 A 提高到 900 A 时, 铸坯的等轴晶率由 33.3% 提高到 66.6%; 在拉速 0.9, 1.0, 1.1 m/min 条件下铸坯柱状晶倾角分别为 5°, 8° 和 12°。综合考虑拉速、过热度与电磁搅拌对取向硅钢铸坯凝固结构的影响, 电磁搅拌是取向硅钢调控凝固结构最有效的手段。

关键词: 取向硅钢; 凝固结构; 工业化试验; 电磁搅拌; 能效; 节能减排

中图分类号: TG 142.77 **文献标志码:** A **doi:** 10.12415/j.issn.1671-7872.24076



Industrial Experimental Study on Solidification Structure Control of Oriented Silicon Steel Slab

SHI Pengzhao, LIU Hongjun, XIE Jianfu, SU Fengguang, ZHOU Junjun

(210 Converter Plant, Hunan Valin Lianyuan Iron & Steel Co. Ltd, Loudi 417000, China)

Abstract: Industrial experiments were conducted on oriented silicon steel slabs under different continuous casting process conditions to study the effects of superheat, casting speed, electric stirring parameters, and electric stirring structure on the solidification structure of the slab, and to explore effective means of regulating the solidification structure of oriented silicon steel. The results show that the equiaxed crystal rate of the billet decreases from 66.6% to 63.4% when the superheat temperature increases from 20 °C to 25 °C. When the current of the stirring parameter increases from 200 A to 900 A, the equiaxed crystal rate of the billet increases from 33.3% to 66.6%. Under the conditions of drawing speed 0.9, 1.0 and 1.1 m/min, the cylindrical crystal angles are 5°, 8° and 12°, respectively. Considering the influence of drawing speed, superheat and electromagnetic stirring on solidification structure, it is considered that electromagnetic stirring is the most effective means to control solidification structure of oriented silicon steel.

Keywords: oriented silicon steel; solidification structure; industrial test; electromagnetic stirring; energy efficiency; energy conservation and emission reduction

取向硅钢是通过高温退火时发生二次再结晶, 最终形成 Goss 织构的 Fe-3%Si 软磁合金的统称, 是电力生产和电能输送领域不可或缺的功能材料^[1-2]。取向硅钢生产工艺复杂、制造技术严格, 被誉为钢

铁材料中的“艺术品”^[3]。与无取向硅钢相比, 取向硅钢由于晶粒取向的区别, 在磁性能方面有较大的差异, 取向硅钢的饱和磁密在 1.9 T 左右, 无取向硅钢的饱和磁密在 1.8 T 左右, 取向硅钢更易被磁化,

收稿日期: 2024-04-30

基金项目: 冶金工程与资源综合利用安徽省重点实验室开放基金项目 (SKF23-03)

作者简介: 时朋召 (1990—), 男, 河北石家庄人, 博士, 工程师, 主要研究方向为连铸工艺优化及硅钢产品开发。

引文格式: 时朋召, 刘红军, 谢建府, 等. 取向硅钢板坯凝固结构调控的工业化试验研究 [J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2024, 41(4):423-431.

在相同磁场条件下,取向硅钢能获得更好的导磁性能^[4-6]。高温液态钢水的凝固过程是金属材料生产过程的重要环节,取向硅钢铸坯是后续热处理和轧制工艺的初始材料,合理的凝固结构有助于改善铸坯元素偏析,促进析出相的细小弥散析出和有利织构转变,进而提高产品的磁性能^[7-12]。高端取向硅钢的生产技术复杂,但其在电力设备制造中的应用能够显著降低空载损耗和负载损耗。因此,探讨调控取向硅钢凝固结构的有效手段有利于促进高端取向硅钢的研发和应用,对于提高电力设备能效、推动节能减排具有重要作用。

在实际生产过程中,连铸工艺各参数对取向硅钢铸坯凝固结构有不同的影响^[13-18]。方烽^[19]研究了过热度对3%Si取向硅钢铸带凝固组织的影响,结果表明随过热度的增加,等轴晶平均晶粒尺寸也增加,柱状晶率提高。朱诚意等^[20]对比研究不同Al₂O₃含量的取向硅钢铸坯凝固组织,发现Al₂O₃含量最少的铸坯晶粒尺寸最细小、均匀;Li等^[21]通过调控二冷电磁搅拌参数,控制取向硅钢等轴晶率在10%~75%之间,不使用电磁搅拌时常规板坯未发现穿晶现象,铸坯等轴晶率为10%;詹东方等^[22]研究表明,3%Si+0.8%Al的高牌号无取向电工钢连铸过程取消

电磁搅拌后,柱状晶率由33%提升至60%;李红雨等^[23]研究表明,经过脉冲处理后板坯等轴晶率由6%提高到30%,柱状晶宽度也由7.0 mm减小到4.3 mm。因此,探讨调控取向硅钢凝固结构的手段对于在相同的成分体系与轧制工艺条件下,通过调控硅钢铸坯凝固结构影响偏析和织构转变,从而促进产品磁性能的提高。大部分学者研究某一连铸参数对硅钢凝固结构的影响,很少通过工业化试验对比研究多种工艺参数,包括拉速、电搅参数、电磁搅拌安装方式等对硅钢凝固结构的影响。鉴于此,通过工业化试验研究连铸工艺参数对取向硅钢板坯凝固结构的影响规律,以期后续调控取向硅钢凝固结构,进而改善产品磁性能提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为国内某钢厂取向硅钢板坯,主要成分如表1,CGO钢为普通取向硅钢,HiB为高磁感取向硅钢。取向硅钢的冶炼流程是铁水和废钢经转炉、精炼得到纯净的钢水;且通过RH精炼调整钢水成分,去除大尺寸夹杂物;高纯净度钢水经连铸,通过调整连铸工艺参数得到不同的凝固结构铸坯。

表1 试验材料合金元素的主要成分

w/%

Tab. 1 Main components of alloy elements in experimental materials

w/%

材料	C	Si	Mn	S	N
CGO	0.03~0.04	3.10~3.20	0.18~0.20	0.007~0.009	0.005~0.010
HiB	0.05~0.06	3.10~3.20	0.08~0.12	0.005~0.007	0.005~0.010

1.2 试验方法

为研究连铸工艺参数对取向硅钢铸坯凝固结构的影响关系,设计9种不同连铸工艺条件的生产试验方案,如表2。连铸生产的铸坯断面为240 mm×1 070 mm,电磁搅拌方式分别为箱式搅拌器(零段内弧侧)和辊式搅拌器(一段的出口),采用控制变量法,1[#]~3[#]试验方案用于研究不同拉速时的凝固结构;

4[#]~6[#]试验方案以及8[#]~9[#]试验方案用于研究不同电磁搅拌方式时的凝固结构;2[#]和4[#]试验方案用于研究不同过热度时的凝固结构,由于取向硅钢液相线温度较低,为保证保护渣的熔化,未进行温度过低的过热度试验;1[#]和7[#]试验方案用于研究不同成分试验钢的凝固结构。图1为铸坯凝固结构调控试验流程示意图。

表2 不同连铸工艺条件下生产试验方案

Tab. 2 Production test scheme under different continuous casting working conditions

方案	材料	拉速/(m/min)	过热度/℃	电磁搅拌参数
1 [#]	CGO	0.9	25	箱式, 900 A-3.0 Hz
2 [#]	CGO	1.0	25	箱式, 900 A-3.0 Hz
3 [#]	CGO	1.1	25	箱式, 900 A-3.0 Hz
4 [#]	CGO	1.0	20	箱式, 900 A-3.0 Hz
5 [#]	CGO	1.0	20	箱式, 400 A-3.0 Hz
6 [#]	CGO	1.0	20	箱式, 200 A-3.0 Hz
7 [#]	HiB	0.9	25	箱式, 900 A-3.0 Hz
8 [#]	CGO	1.0	20	辊式, 350 A-4.0 Hz
9 [#]	CGO	1.0	20	辊式, 300 A-4.0 Hz

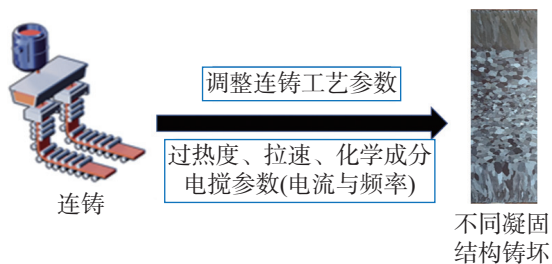


图1 铸坯凝固结构调控试验流程示意图

Fig.1 Schematic diagram of solidification structure control test process for casting billet

试验过程中在每个连铸工艺条件稳定生产 40 min 后, 即在稳定生产的第 2 炉第 2 块板坯上取低倍试样, 低倍为铸坯的整宽, 图 2 为铸坯凝固结构试样取样位置。将低倍试样的横纵截面经锯床、铣床、磨床加工至表面光滑, 采用质量分数为 10%~20% 的过硫酸铵水溶液对其截面进行宏观组织腐蚀, 并用高清摄像机拍照记录, 最后采用割线法计算铸坯等轴晶率和柱状晶率, 计算公式如式 (1), (2)。

$$\text{等轴晶率} = \frac{\text{等轴晶区宽度}}{\text{铸坯厚度}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{柱状晶率} = 100\% - \text{等轴晶率} \quad (2)$$

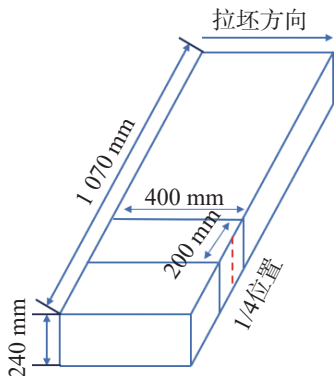


图2 取样位置示意图

Fig.2 Schematic diagram of sampling position

2 结果与讨论

2.1 拉速对铸坯凝固结构的影响

图 3~5 分别为过热度 25 ℃、箱式电炉 900 A-3.5 Hz 时, 拉速在 0.9, 1.0, 1.1 m/min 条件下铸坯横、纵截面的凝固结构。由图 3~5 可知: 铸坯凝固结构分为 3 层, 即激冷层细晶区、柱状晶区和等轴晶区, 表层激冷层细晶区较薄, 可不考虑; 拉速相同的条件下铸坯横、纵截面的凝固结构基本一致, 表面和中心形成的温度梯度最大, 散热最快, 垂直于铸坯表面的晶体以最大的凝固速度生长, 形成单方向的柱状晶, 且柱状晶不完全垂直于铸坯表面, 而是呈向上 5°~12°的倾角。

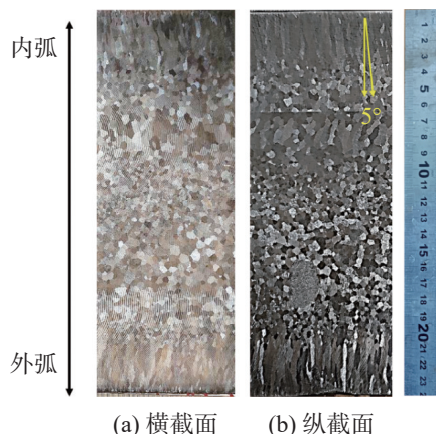


图3 拉速 0.9 m/min 时铸坯凝固结构

Fig.3 Solidification structure of casting billet at a pulling speed of 0.9 m/min

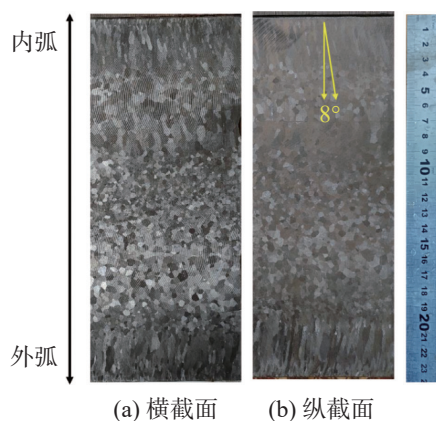


图4 拉速 1.0 m/min 时铸坯凝固结构

Fig.4 Solidification structure of casting billet at a pulling speed of 1.0 m/min

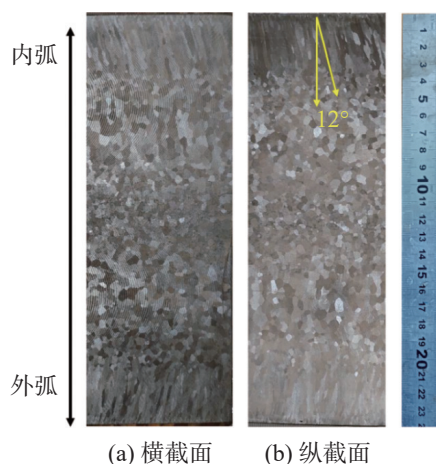


图5 拉速 1.1 m/min 时铸坯凝固结构

Fig.5 Solidification structure of casting billet at a pulling speed of 1.1 m/min

表 3 为过热度 25 ℃、箱式电炉 900 A-3.0 Hz 时, 不同拉速铸坯晶区的比例和平均晶粒尺寸。由表 3 可知: 当拉速由 0.9 m/min 提高到 1.1 m/min 时,

铸坯的柱状晶率由 34.8% 先提高到 36.2% 再降低到 35.7%，拉速对凝固结构的影响没有明显规律，这是因为拉速提高时二次冷却水相应提高，说明拉速与二冷水综合影响铸坯的凝固结构；从不同区域的等轴晶平均宽度看，等轴晶平均宽度为中心等轴晶<内弧等轴晶<外弧等轴晶，外弧侧等轴晶平均尺寸为 3.57~4.40 mm，内弧等轴晶平均尺寸为 3.21~3.65 mm。内弧等轴晶尺寸小于外弧等轴晶是因为内弧侧的冷却速率比外弧侧更大，冷却速率越大，铸坯的晶粒平均尺寸越小。铸坯中心等轴晶尺寸较小的原因是铸坯中心电磁搅拌形核质点较多，导致形成更多的等轴晶粒，晶粒尺寸较小，拉速由 1.0 m/min 提高到 1.1 m/min，铸坯的中心等轴晶尺寸也由 3.22 mm 减小到 2.67 mm。

表 3 不同拉速铸坯晶区比例和平均晶粒尺寸

Tab. 3 Proportion of crystal zones and average grain size of casting billet with different pulling speeds

拉速/ (m/min)	等轴 晶率/%	柱状 晶率/%	外弧等 轴晶/mm	中心等 轴晶/mm	内弧等 轴晶/mm
0.9	65.2	34.8	3.57	3.16	3.21
1.0	63.8	36.2	4.40	3.22	3.65
1.1	64.3	35.7	3.60	2.67	3.30

铸坯柱状晶不完全垂直于铸坯表面，而是呈现向上 5°~15°的倾角，这是钢液在液相穴存在向上流动的缘故，且铸坯表面和中心形成大的温度梯度，柱状晶生长方向与热流方向一致，由低温指向高温区域。图 6 为铸坯柱状晶生长方向示意图，图 7 为过热度 25 °C、箱式电炉 900 A-3.5 Hz 时，不同拉速条件下铸坯柱状晶倾角。由图 6, 7 可看出：取向硅钢在拉速 0.9, 1.0, 1.1 m/min 条件下铸坯柱状晶倾角分别为 5°, 8°和 12°，这是因为拉速越高，二次冷却速度更快，热流方向夹角越大，柱状晶生长方向与热流方向一致，柱状晶倾角越大。

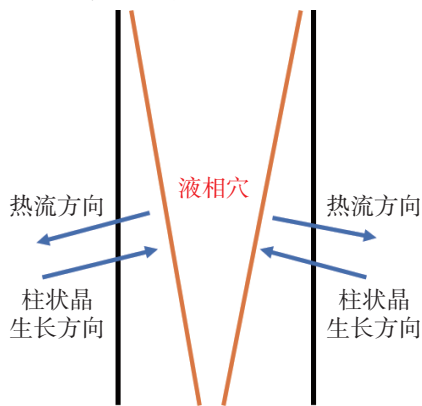


图 6 铸坯柱状晶生长方向示意图

Fig. 6 Schematic diagram of cylindrical crystal growth direction of casting billet

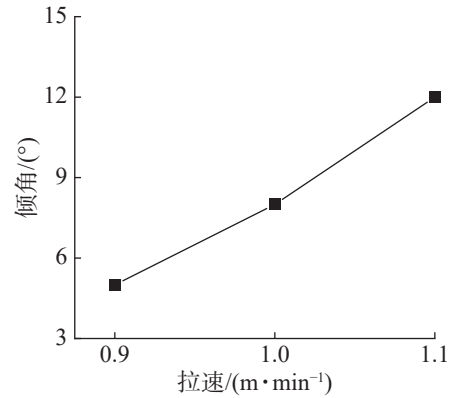


图 7 不同拉速条件下铸坯柱状晶倾角

Fig. 7 Crystal dip angle of casting billet cylindrical under different pulling speed conditions

2.2 过热度对铸坯凝固结构的影响

过热度是连铸重要的工艺参数之一，对铸坯凝固结构和内部产量有一定影响。图 8, 9 为拉速 1.0 m/min、箱式电炉 900 A-3.0 Hz 时，在 20, 25 °C 过热度条件下的铸坯横纵截面凝固结构。

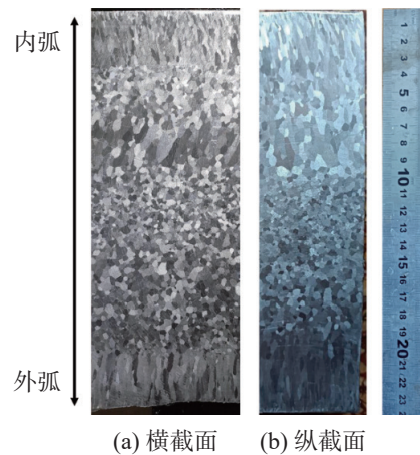


图 8 过热度 20 °C 时铸坯凝固结构

Fig. 8 Solidification structure of casting billet at superheat temperature of 20 °C

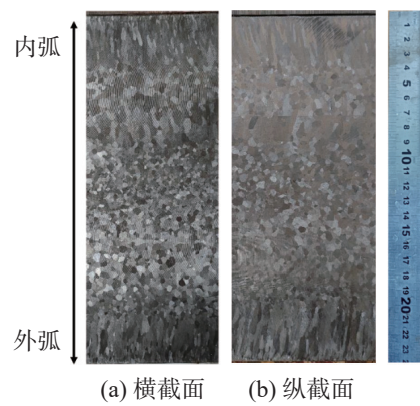


图 9 过热度 25 °C 时铸坯凝固结构

Fig. 9 Solidification structure of casting billet at superheat temperature of 25 °C

由图 8, 9 可知: 过热度相同条件下铸坯横截面、纵截面的凝固结构基本一致; 柱状晶不完全垂直于铸坯表面, 而是呈现出向上的倾角, 且 20, 25 °C 的铸坯柱状晶倾角基本相同; 过热度提高, 铸坯的柱状晶率增加, 这是因为过热度提高, 凝固前沿的温度梯度增大, 有利于柱状晶的生长。表 4 为拉速 1.0 m/min、箱式电搅 900 A-3.0 Hz 时, 在 20, 25 °C 过热度条件下铸坯晶区比例和不同区域的平均晶粒尺寸。

表 4 不同过热度铸坯晶区比例和平均晶粒尺寸

Tab. 4 Proportion of crystal zones and average grain size of casting billet with different superheat temperatures

过热 度/°C	等轴 晶率/%	柱状 晶率/%	外弧等 轴晶/mm	中心等 轴晶/mm	内弧等 轴晶/mm
20	66.6	33.4	3.19	2.40	2.60
25	63.8	36.2	4.40	3.22	3.65

由表 4 可看出: 过热度由 20 °C 提高到 25 °C 时, 铸坯的柱状晶率由 33.4% 提高到 36.2%, 这是因为过热度提高时, 铸坯凝固前沿的温度梯度增大, 有利于柱状晶的生长, 降低铸坯的等轴晶率; 过热度由 20 °C 提高到 25 °C, 铸坯的中心等轴晶尺寸也由 2.42 mm 增加到 3.22 mm; 同一过热度条件下不同区域等轴晶平均宽度为中心等轴晶<内弧等轴晶<外弧等轴晶, 外弧侧等轴晶平均尺寸为 3.19~4.40 mm, 内弧等轴晶平均尺寸为 2.60~3.65 mm。

2.3 电磁搅拌对铸坯凝固结构的影响

研究箱式和辊式搅拌器条件下, 不同电磁搅拌参数对凝固结构的影响。图 10~12 为过热度 20 °C、拉速 1.0 m/min 时, 箱式搅拌器下 900 A-3.0 Hz, 400 A-3.0 Hz, 200 A-3.0 Hz 时的铸坯凝固结构。

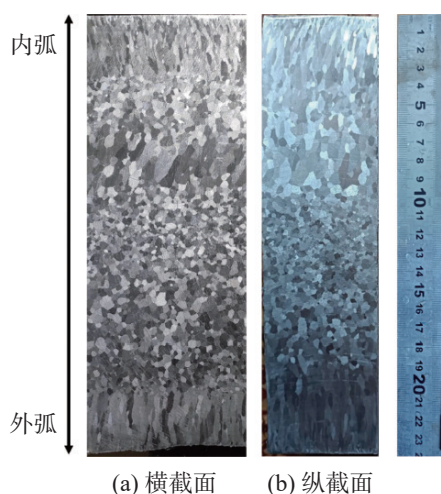


图 10 箱式电磁搅拌参数 900 A-3.0 Hz 下的铸坯凝固结构
Fig. 10 Solidification structure of casting billet under box electric stirring parameters with 900 A-3.0 Hz

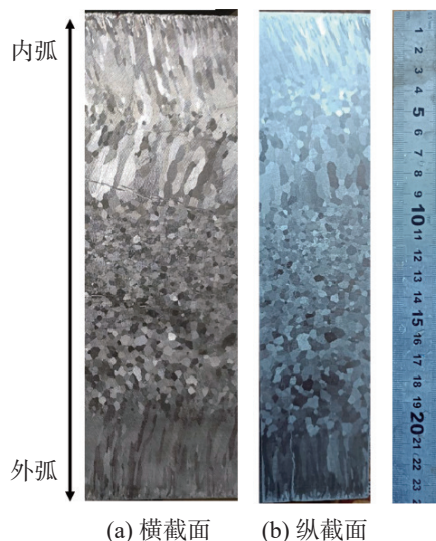


图 11 箱式电磁搅拌参数 400 A-3.0 Hz 下的铸坯凝固结构
Fig. 11 Solidification structure of casting billet under box electric stirring parameters with 400 A-3.0 Hz

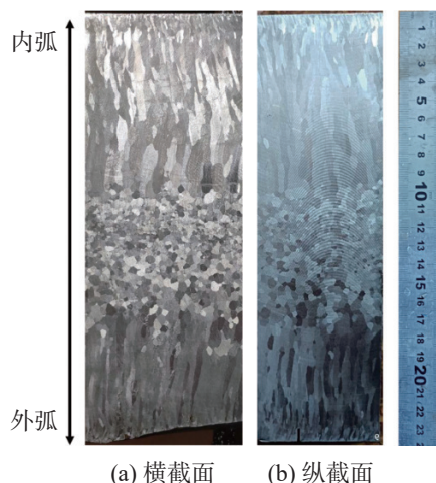


图 12 箱式电磁搅拌参数 200 A-3.0 Hz 下的铸坯凝固结构
Fig. 12 Solidification structure of casting billet under box electric stirring parameters with 200 A-3.0 Hz

由图 11, 12 可看出: 相同电搅参数条件下铸坯横截面、纵截面的凝固结构基本相同; 且随电磁搅拌电流增大时, 铸坯的等轴晶率相应提高。

图 13~14 为过热度 20 °C、拉速 1.0 m/min 时, 辊式搅拌器条件下 300 A-4.0 Hz, 350 A-4.0 Hz 电磁搅拌参数时的铸坯凝固结构, 由图 13, 14 可知: 铸坯凝固结构共分为 3 层, 表层激冷层细晶区、柱状晶区和等轴晶区; 相同电磁搅拌参数条件下铸坯的横截面、纵截面的凝固结构基本相同; 对比 300, 350 A 条件下的铸坯凝固结构, 铸坯电磁搅拌电流增大, 铸坯的等轴晶率提高。

表 5 为过热度 20 °C、拉速 1.0 m/min 时, 不同箱式电磁搅拌下铸坯晶区的比例和平均晶粒尺寸。

由表5可看出:电磁搅拌频率为3.0 Hz,电流为900, 400, 200 A时的铸坯等轴晶率分别为66.6%, 52.7%, 33.3%,即电磁搅拌强度增加时,铸坯的等轴晶率提高,这是因为电流增加时电磁搅拌强度也提高,电磁搅拌增加了形核质点,导致等轴晶率提高,且电磁搅拌强度提高后会均匀凝固前沿的温度,减小温度梯度,有利于柱状晶向等轴晶的转变;搅拌电流由200 A提高到900 A时,铸坯的中心等轴晶尺寸由2.40 mm降到2.22 mm;相同条件下等轴晶平均尺寸由小到大顺序为中心等轴晶<内弧等轴晶<外弧等轴晶,外弧侧等轴晶平均尺寸为3.19~3.64 mm,内弧等轴晶平均尺寸为2.60~2.84 mm。

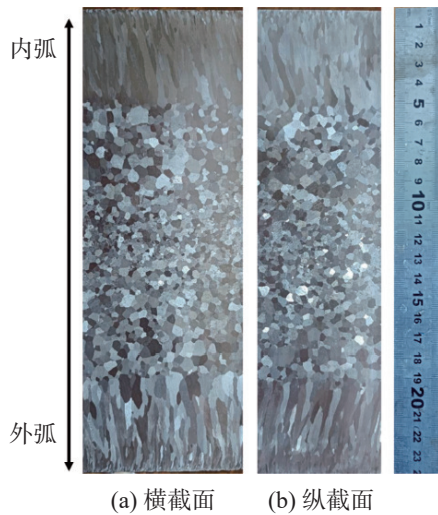


图13 辊式电磁搅拌参数300 A-4.0 Hz下的铸坯凝固结构
Fig. 13 Solidification structure of castings under roller electric stirring parameters with 300 A-4.0 Hz

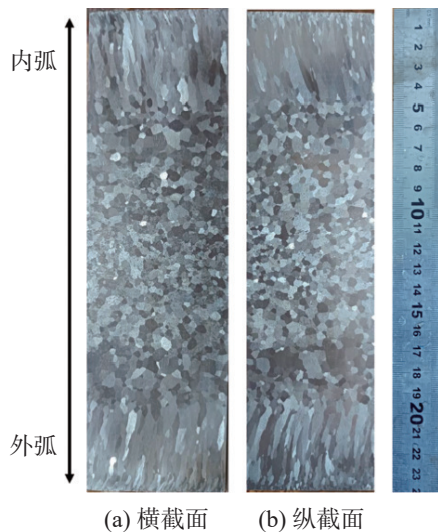


图14 辊式电磁搅拌参数350 A-4.0 Hz下的铸坯凝固结构
Fig. 14 Solidification structure of castings under roller electric stirring parameters with 350 A-4.0 Hz

表5 箱式电磁搅拌下铸坯晶区比例和平均晶粒尺寸

Tab. 5 Proportion and average grain size of casting billet under box electromagnetic stirring

电搅参数	等轴晶率/%	柱状晶率/%	外弧等轴晶/mm	中心等轴晶/mm	内弧等轴晶/mm
900 A-3.0 Hz	66.6	33.4	3.19	2.22	2.60
400 A-3.0 Hz	52.7	47.3	3.26	2.29	2.71
200 A-3.0 Hz	33.3	66.7	3.64	2.40	2.84

表6为过热度20℃、拉速1.0 m/min时,不同辊式电磁搅拌下铸坯晶区的比例和晶粒平均尺寸。由表6可看出:电磁搅拌频率为4.0 Hz,电流为300, 350 A时的铸坯等轴晶率分别为59.9%, 62.9%,铸坯的柱状晶率分别为40.1%, 37.1%,即电磁搅拌强度增加时,铸坯的等轴晶率提高,这是因为电流增加时电磁搅拌强度也提高,搅拌使得晶核数量增加,导致等轴晶率提高,且电磁搅拌强度提高后会均匀凝固前沿的温度,减小温度梯度,更加有利于等轴晶的生长;搅拌电流由300 A提高到350 A时,铸坯的中心等轴晶尺寸由2.41 mm降低到2.26 mm;等轴晶尺寸规律也相同,尺寸由小到大顺序为中心等轴晶<内弧等轴晶<外弧等轴晶,外弧侧等轴晶平均尺寸为3.0~3.49 mm,内弧等轴晶平均尺寸为2.86~2.92 mm。

表6 辊式电磁搅拌下铸坯晶区比例和平均晶粒尺寸

Tab. 6 Proportion and average grain size of casting billet under roller electromagnetic stirring

电搅参数	等轴晶率/%	柱状晶率/%	外弧等轴晶/mm	中心等轴晶/mm	内弧等轴晶/mm
300 A-4.0 Hz	59.9	40.1	3.49	2.41	2.86
350 A-4.0 Hz	62.9	37.1	3.00	2.26	2.92

2.4 铸坯二次柱状晶现象

过热度和温度梯度增加有利于柱状晶生长,反之有利于等轴晶生长。钢液在冷凝过程中晶粒的形核和长大速率对铸坯凝固结构有较大的影响,在较大的温度梯度下,晶核倾向发展为柱状晶体,而在各同向性条件下,晶核倾向发展为等轴晶。图15为含有二次柱状晶的硅钢铸坯凝固结构。由图15可看出:凝固结构分为表层激冷区、内弧柱状晶、内弧等轴晶、二次柱状晶、中心等轴晶和外弧柱状晶。取向硅钢热导率较小,在铸坯外部冷却条件下,铸坯凝固前沿的温度梯度大,存在明显的热流,有利于柱状晶生长;内弧等轴晶位置为二冷电磁搅拌的影响区域(箱式搅拌器安装位置为零段内弧侧),电磁搅拌会均匀凝固前沿温度,促进柱状晶向等轴晶转变,随凝固的进行,电磁搅拌的影响减弱,在铸坯内弧侧出现

了二次柱状晶。这是因为内弧侧凝固前沿又出现大的温度梯度和明显的热流方向, 一是电磁搅拌作用力减小, 且钢种的热导率较小, 提高了凝固前沿温度梯度; 二是内弧冷却水量大, 促进了柱状晶的生长。外弧未出现二次柱状晶, 主要原因是结晶核下沉积到外弧侧, 抑制外弧二次柱状晶的生长。

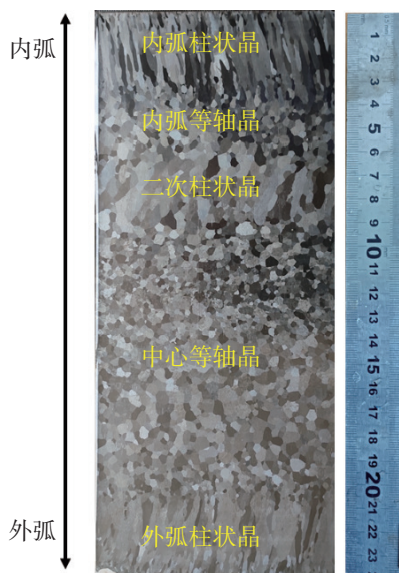


图 15 含有二次柱状晶的铸坯凝固结构

Fig. 15 Solidification structure of casting billet with secondary columnar crystals

2.5 铸坯凝固结构的调控

CGO 钢和 HiB 钢中 Si 质量分数均在 3.2% 左右; 与 CGO 钢相比较, HiB 钢 C 含量更高, 质量分数在 0.05%~0.06% 范围, 且抑制剂元素含量也有所区别。表 7 为 CGO 钢 (1# 试验方案) 和 HiB 钢 (7# 试验方案) 的铸坯相同连铸工艺条件下的凝固结构。由表 7 可见: CGO 钢和 HiB 钢的铸坯等轴晶率分别为 68.4% 和 67.5%; 其他工艺条件相同时, CGO 钢和 HiB 钢铸坯凝固结构相差不大。

表 7 CGO 和 HiB 铸坯凝固结构

Tab. 7 Solidification structure of CGO and HiB casting billets

铸坯	内弧柱状晶/mm	外弧柱状晶/mm	柱状晶率/%	等轴晶率/%
CGO	38	37	31.6	68.4
HiB	39	38	32.5	67.5

在连铸工艺相同条件下, CGO 和 HiB 钢铸坯横纵截面凝固结构分别如图 16, 17。由图 16, 17 可知: 相同连铸工艺条件下, CGO 和 HiB 钢铸坯的横截面、纵截面的凝固结构基本相同, 且铸坯内弧侧的柱状晶长度略大于外弧的柱状晶长度。

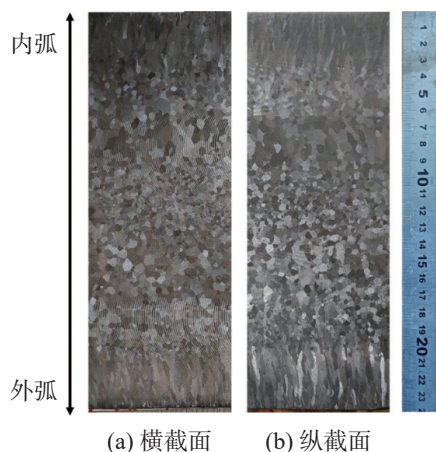


图 16 CGO 铸坯凝固结构

Fig. 16 Solidification structure of CGO casting billet

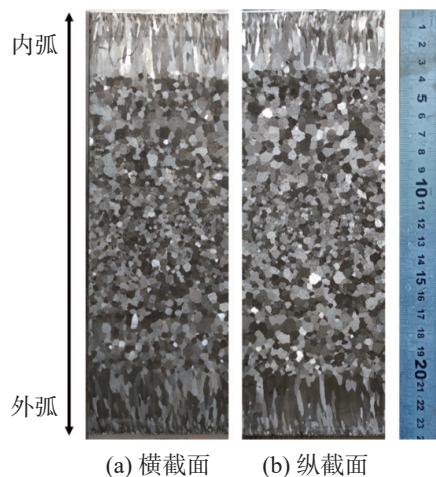


图 17 HiB 铸坯凝固结构

Fig. 17 Solidification structure of HiB casting billet

图 18 为不同搅拌器类型和钢种铸坯内外弧柱状晶尺寸。

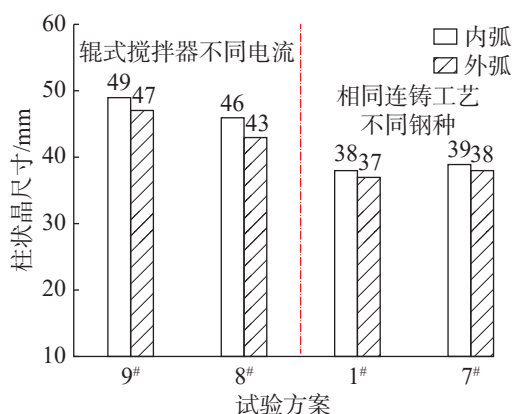


图 18 不同工况铸坯内外弧柱状晶尺寸

Fig. 18 Crystal size of inner and outer arc columns in casting billet under different working conditions

由图 18 可看出: 相同工艺条件下, 铸坯内弧侧的柱状晶长度略大于外弧侧的柱状晶尺寸 1~3 mm。

这有2个方面的原因,一是内弧侧的冷却强度高于外弧侧,有利于内弧柱状晶生长;二是重力作用下的结晶形核沉积外弧侧,抑制外弧柱状晶生长,减小外弧侧柱状晶长度。

图19为不同连铸工艺铸坯等轴晶率。由图19可知:拉速从0.9, 1.0 m/min提高到1.1 m/min时,铸坯的等轴晶率由65.2%降低到63.8%后,又提高到64.3%。拉速提高也会提高冷却水量,有利于提高铸坯等轴晶率;二冷水量提高会降低铸坯等轴率,拉速与二冷水量综合影响铸坯凝固结构。过热度由20℃提高到25℃时,铸坯的等轴晶率由66.6%降低到63.8%,这是因为过热度提高时,铸坯凝固前沿的温度梯度增大,有利于柱状晶的生长,同时降低铸坯的等轴晶率。电流由200 A提高到900 A时,铸坯的等轴晶率由33.3%提高到66.6%,电流增加,电磁搅拌强度相应提高,有利于增加形核数量,导致等轴晶率提高;电磁搅拌强度提高会加速均匀凝固前沿的温度,减小温度梯度,有利于柱状晶向等轴晶的生长。综上可看出,二冷电磁搅拌对调控铸坯凝固结构的作用更明显。

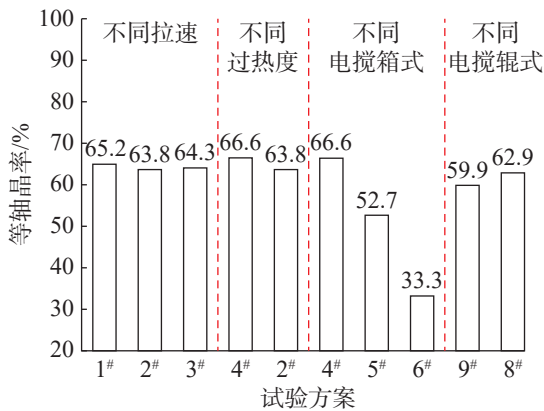


图19 不同连铸工艺下铸坯等轴晶率

Fig. 19 Equiaxed grain rate of casting billet with different continuous casting processes

3 结论

通过工业化试验研究连铸工艺参数对取向硅钢板坯凝固结构的影响,解析板坯二次柱状晶现象,分析不同拉速条件下柱状晶倾角的变化规律,得出以下主要结论:

1) 取向硅钢铸坯凝固结构由3个特征凝固晶区组成,包括表层细晶区、中间粗大柱状晶区(内弧柱状晶和外弧柱状晶)及中心等轴晶区,柱状晶区晶粒尺寸相对粗大,等轴晶平均晶粒尺寸在2.67~4.40 mm

之间。

2) 拉速与二冷水综合影响铸坯的凝固结构。过热度由20℃提高到25℃时,铸坯的等轴晶率由66.6%降低到63.4%;电磁搅拌参数的电流由200 A提高到900 A时,铸坯的等轴晶率由33.3%提高到66.6%。

3) 取向硅钢在拉速0.9, 1.0, 1.1 m/min条件下铸坯柱状晶倾角分别为5°, 8°和12°;相同工艺条件下,铸坯内弧侧的柱状晶尺寸略大于外弧的柱状晶尺寸1~3 mm。

综合拉速、过热度与电磁搅拌对铸坯凝固结构的影响规律,电磁搅拌是取向硅钢调控凝固结构最有效的手段。

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] 黎先浩, 孟小涛, 赵鹏飞, 等. 高磁感取向硅钢研发现状与展望[J]. 中国冶金, 2019, 29(1):1-7.
- [3] 徐劲松. 新贸易环境下我国取向硅钢的发展机遇与使命[J]. 电工钢, 2022, 4(6):22-24.
- [4] 鹿旭升, 李扬阳, 马德稷, 等. 取向硅钢在电机中的应用及展望[J]. 电工钢, 2024, 6(01):23-29.
- [5] 张显东, 王妍, 柳超, 等. 新能源汽车驱动电机用无取向硅钢开发及应用研究现状[J]. 汽车工艺与材料, 2022(9):9-14.
- [6] 张凤泉, 汪水泽. 中小电机新能效等级对无取向电工钢需求的影响[J]. 电工钢, 2022, 4(4):21-27.
- [7] 付勇军, 杨平, 蒋奇武, 等. Fe-3%Si 电工钢铸坯柱状晶组织的演变规律[J]. 金属学报, 2015, 51(5):545-552.
- [8] 时朋召. 取向硅钢凝固结构及其在热轧板中的遗传性研究[D]. 北京: 钢铁研究总院, 2023.
- [9] 李辉, 时朋召, 仇圣桃, 等. HiB 钢连铸坯凝固组织及偏析的研究[J]. 炼钢, 2021, 37(5):29-34,40.
- [10] 邵媛媛, 杨平, 毛卫民. 电工钢柱状晶热、冷轧时晶界作用分析[J]. 金属学报, 2014, 50(3):259-268.
- [11] 丁磊, 邵媛媛, 杨平, 等. 电工钢中柱状晶尺寸及退火工艺对{100}组织的影响[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(8):111-117.
- [12] 于永梅, 李长生, 王国栋. 薄板坯连铸连轧生产取向硅钢技术的研究[J]. 钢铁, 2007(11):45-47,64.
- [13] 张思佳, 冯运莉, 尹晓盼. 取向硅钢铸态组织分析[J]. 热加工工艺, 2015, 44(22):27-30,36.
- [14] 常正昇, 张乔英, 杨克枝, 等. 板坯连铸工艺参数对取向硅钢铸坯中心等轴晶率的影响[J]. 中国冶金, 2020,

- 30(1):58–62,87.
- [15] LIU L, QIAO J L, GUO F H, et al. Mathematical model of microsegregation of grain-oriented silicon steel during solidification of continuous casting[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2019, 40(2):117–120.
- [16] ZHU X. Application of electromagnetic stirring process for continuous casting oriented silicon steel[J]. *Kang Tieh/Iron and Steel (Peking)*, 1994, 29(4):19–23.
- [17] SUN T. Solidification structure of continuous casting large round billets under mold electromagnetic stirring[J]. *Journal of Iron and Steel Research (International)*, 2016, 23(4): 329–337.
- [18] 马幼平, 鲁路, 张远芬. 结晶器内嵌套对连铸方坯凝固组织的影响 [J]. *特殊钢*, 2003(4):42–44.
- [19] 方烽. 薄带连铸超低碳取向硅钢凝固、析出与再结晶行为研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2015:23–51.
- [20] 朱诚意, 陈先红, 陈伟涛, 等. 酸溶铝和硫含量对铸态取向硅钢高温组织演变的影响 [J]. *热加工工艺*, 2017, 46(3):29–33.
- [21] LI J B, DENG B R, YANG X Z. Microstructure control of continuous casting slab of grain oriented silicon steel[J]. *Materials Transactions*, 2022(2):63–75.
- [22] 詹东方, 钱红伟, 岳重祥, 等. 连铸坯中柱状晶比例对无取向电工钢组织和磁性能的影响 [J/OL]. *热加工工艺*, [2024-06-23]. <https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001-3814.20213574>.
- [23] 李红雨, 王静松, 许建国, 等. 电脉冲处理对电工钢凝固组织影响试验研究 [C]//冶金研究中心 2005 年“冶金工程科学论坛”论文集. 北京: 北京科技大学, 2005: 379–383.

责任编辑: 何莉