

高牌号无取向硅钢 CSP 流程铸坯及热轧板的组织和夹杂物分析

马良^{1,2} 荣哲² 项利² 仇圣桃² 赵沛²

(钢铁研究总院 1 先进钢铁流程及材料国家重点实验室; 2 连铸技术国家工程研究中心, 北京 100081)

摘要 2.9 mm 热轧 3% Si 高牌号无取向硅钢板 (/% : 0.004 6 C, 3.04 Si, 0.32 Mn, 0.49 Als, 0.004 S, 0.013 P, 0.004 2 N) 由 CSP (Compact Strip Production 紧凑式带材生产线) 流程: 120 t BOF-70 mm CC-热轧工艺生产。热轧终轧温度 872 °C, 卷取温度 683 °C。铸坯及热轧板的组织和夹杂物的分析结果表明, 铸坯组织为典型的贯穿柱状晶组织; 热轧板边部为再结晶组织, 中部为纤维组织带有少量再结晶晶粒; 高牌号无取向硅钢的主要夹杂物为铸坯- Al_2O_3 , AlN 和 $Cu_2S + MnS$; 热轧板- Al_2O_3 , AlN, AlN + MnS 和 $Cu_2S + MnS$ 。

关键词 CSP 流程 高牌号无取向硅钢 70 mm 铸坯 热轧板 组织 夹杂物

An Analysis on Structure and Inclusions in CSP Casting Slab and Hot Rolled Plate of High Grade Non-Oriented Silicon steel

Ma Liang^{1,2}, Rong Zhe², Xiang Li², Qiu Shengtao² and Zhao Pei²

(1 State Key Laboratory of Advanced Iron and Steel Flow Sheet and Materials; 2 National Engineering and Research Center for Continuous Casting Technology, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081)

Abstract The 2.9 mm hot rolled 3% Si high grade non-oriented silicon steel plate (/% : 0.004 6 C, 3.04 Si, 0.32 Mn, 0.49 Als, 0.004 S, 0.013 P, 0.004 2 N) is produced by CSP (Compact Strip Production) flow sheet i. e. 120 t BOF-70 mm CC-hot rolling process with end rolling at 872 °C and coiling at 683 °C. The analysis results on structure and inclusions in casting slab and hot rolled plate show that the structure of slab is typical trans-columnar crystal, the structure of hot rolled plate at edge is recrystallized grain and in center of plate is fibrous structure with minor recrystallized grains; and the main inclusions in high grade non-oriented silicon steel are Al_2O_3 , AlN and $Cu_2S + MnS$ in casting slab and Al_2O_3 , AlN, AlN + MnS and $Cu_2S + MnS$ in hot rolled plate.

Material Index CSP Flow Sheet, High Grade Non-Oriented Silicon Steel, 70 mm Casting Slab, Hot Rolled Plate, Structure, Inclusions

由于大电机和发电机铁芯中的铜损所占比例很小加之冷却困难, 因此提高电机和发电机效率的主要措施是电机铁芯材料选用低铁损的高牌号无取向硅钢^[1-2]。与传统工艺相比, CSP 流程生产无取向电工钢, 能在较低加热条件下得到较高的终轧温度, 铸坯铸态组织特殊, 轧件温度更均匀, 因此热轧板再结晶更充分。在温度控制方面, CSP 流程比传统工艺更适宜生产无取向电工钢^[3]。

1 试验材料及方法

试验用钢取自钢厂 CSP 生产线试制的高牌号无取向硅钢 (表 1), 主要工序流程为: 120 t BOF 冶炼→70 mm 连铸→均热→热轧→卷取→常化→酸洗→冷轧→退火→磁性测量。其中均热温度为 1 100 °C, 热轧终轧温度为 872 °C, 热轧板厚度为 2.9 mm, 热轧压下率为 95.9%, 卷取温度为 683 °C。

采用带 X 射线能谱 (XEDS) 的 JWM2100F 型透射电子显微镜和蔡司 SUPRA-55VP 扫描电子显微镜观察铸坯和热轧板中夹杂物的尺寸、形貌, 并检测成分。

表 1 试验高牌号无取向硅钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of test high grade non-oriented silicon steel /%

C	Si	Mn	Als	S	P	Cu	N
0.004 6	3.04	0.32	0.49	0.004	0.013	0.021	0.004 2

2 结果与分析

2.1 铸坯及热轧板组织

转炉炉容量为 120 t, 铸坯厚 70 mm, 宽 1 170 mm, 铸坯组织 (图 1) 主要由表层的激冷层和表层以下柱状晶区组成, 其中激冷层主要是细小等轴晶; 而柱状晶区主要是由从激冷层以下向心部生长、长短大小不一的细密柱状晶组成, 直到两侧柱状晶相遇形成贯穿柱状晶组织, 这是因为高牌号无取向硅钢硅含量高, 导热性差, 而且凝固过程中不发生相变, 导致连铸过程中柱状晶容易粗大, 易于形成贯穿柱状晶组织。

由图 2 可以看出, 热轧板纤维组织较少, 从板边部到中心区晶粒组织变化较大, 边部晶粒为等轴铁素体晶粒, 平均尺寸约为 45 μm, 形状呈不规则的多

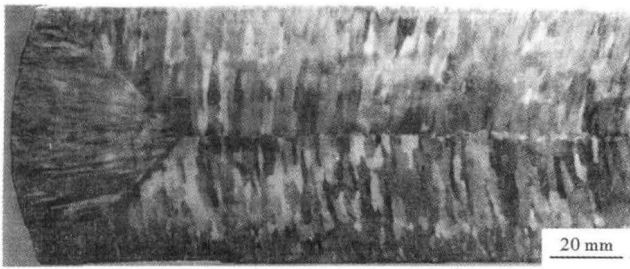


图 1 高牌号无取向硅钢 70 mm 铸坯低倍组织形貌
Fig. 1 Morphology of macrostructure of 70 mm casting slab of high grade non-oriented silicon steel



图 2 高牌号无取向硅钢 2.9 mm 热轧板组织形貌

Fig. 2 Morphology of structure of 2.9 mm hot rolled plate of high grade non-oriented silicon steel

边形结构,从板边部到1/4厚度处再结晶晶粒尺寸变化不大,中部为拉长的纤维组织和少量再结晶晶粒组成的混合组织,纤维组织宽度为 50 ~ 150 μm。

相比于传统流程, CSP 流程连铸坯厚度减小,连铸坯表面到中心的温度梯度变大,传热更快,柱状晶宽度小,在轧制过程中更容易破碎。传统板坯均热温度一般在 1 200 °C 左右, CSP 流程可以采用较低的加热温度 (本实验为 1 100 °C),可以使铸坯内部和表面温度均匀,

防止铸坯产生裂纹和变形,还可以延缓均热过程中铸坯中柱状晶长大,获得尽量小的热轧初轧晶粒尺寸,有利于提高热轧过程中动态回复和动态再结晶的速度^[3-6]。CSP 连铸坯加热温度低,热轧初始晶粒小,柱状晶容易破碎,热轧板表层到1/4层存在较大的剪切应变,有足够的驱动力促进再结晶的发生,从而使表层到1/4层形成较细小的等轴晶;1/4层到中心层剪切应变变小,再结晶驱动力变小,不利于发生再结晶,因而保留了较多的变形晶粒,即纤维组织^[7-9]。低的加热温度可减少 MnS、AlN 等夹杂的固

溶量,减少热轧过程细小弥散夹杂物的数量,有利于热轧板常化和冷轧板再结晶退火过程中的再结晶和晶粒长大,提高产品磁性能, CSP 流程还可以提高终轧温度和卷取温度,有利于热轧板的回复、再结晶和晶粒长大,起到部分常化作用。

2.2 铸坯及热轧板中夹杂物

铸坯中的氧化物以 1 ~ 5 μm Al₂O₃ 为主;还观察到部分 1 ~ 5 μm 多边形结构的粗大 AlN 夹杂物,以及尺寸较小多为 100 ~ 200 nm 呈球形的 Cu₂S + MnS 为主内生夹杂物(图 3)。

热轧板中夹杂物主要是 1 ~ 5 μm Al₂O₃ 以及较大的 0.5 ~ 2.0 μm AlN 及 AlN + MnS 和大量细小弥散分布的 30 nm 左右的 Cu₂S + MnS。

图 4(a) 中 1、2 是 AlN + MnS 复合析出, 3 是 AlN 单独析出。从图 4(b, c, d) XEDS 能谱分析可以发现 AlN + MnS 夹杂物的核心处(2 处)是 AlN, 几乎没有 MnS, 而在其的边部(1 处)则发现有 MnS。说明在高牌号无取向硅钢的降温过程中 AlN 首先析出, 而后 MnS 以 AlN 为核心进行析出。这与常见低牌号无取向硅钢中 MnS 优先析出的情况相悖, 其原因在于(1)高牌号无取向硅钢中, 在碳含量低于 0.01%, 硅含量大于 1.7% 时, 凝固冷却乃至均热、热轧过程都不经过 γ 相区, 只经过 α 相区。AlN 在 α 相中的固溶度远低于其在 γ 相中的固溶度, 同一温度下 AlN 在 α 相中的固溶度积相比在 γ 相中的固溶度积低 1 ~ 2 个数量级。因此 AlN 在 α 相析出条件更佳;(2)高牌号无取向硅钢成分中铝含量高而锰含量相对降低, 造成 AlN 的析出提前, 经平衡条件下热力学计算表明, 本成分硅钢 AlN 在凝固前已经具备热力学析出条件, 而 MnS 的开始析出温度为

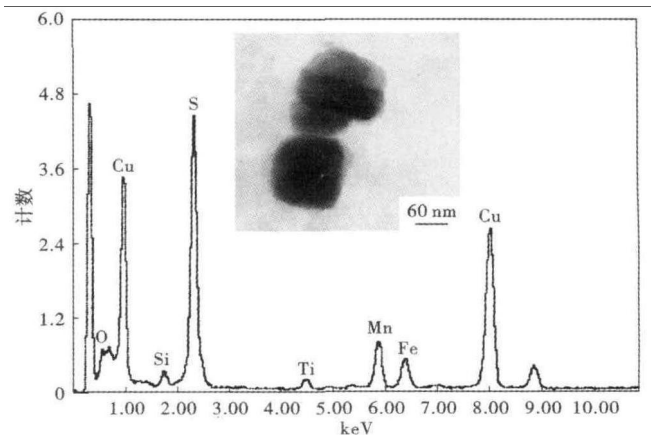


图 3 铸坯中 Cu₂S + MnS 形貌及能谱分析

Fig. 3 Morphology and energy spectrum analysis of Cu₂S + MnS in casting slab

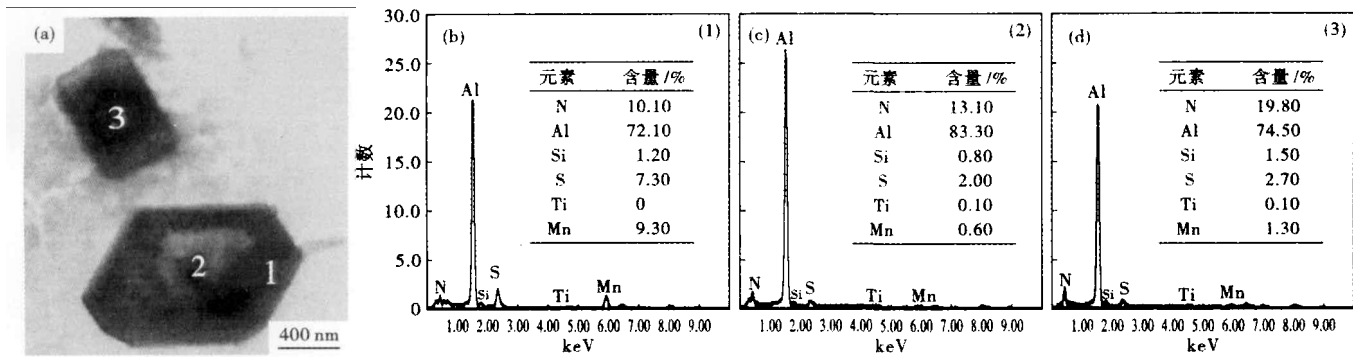


图4 热轧板中的 AlN(3)及 AlN(2) + MnS(1)形貌(a)和对应的能谱分析(b)(c)(d)

Fig.4 Morphology (a) and energy spectrum analysis (b)(c)(d) of AlN (3) and AlN (2) + MnS (1) in hot rolled plate

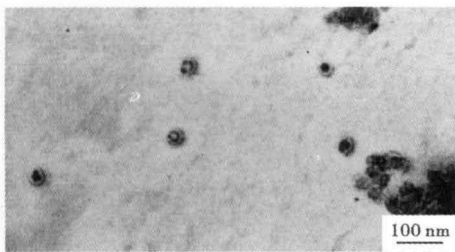


图5 热轧板中弥散分布的 Cu₂S + MnS 形貌

Fig.5 Morphology of dispersive distributed Cu₂S + MnS in hot rolled plate

表2 试验高牌号无取向硅钢铸坯和热轧板中夹杂物分布密度、体积分数和平均直径

Table 2 Distribution density, volume percentage and average diameter of inclusions in casting slab and hot rolled plate of test high grade non-oriented silicon steel

项目	分布密度/(个·cm ⁻³)	体积分数/%	平均直径/nm
铸坯	1.56 × 10 ¹³	0.03	137.8
热轧板	9.02 × 10 ¹³	0.08	51.2

1516 K,根据经典形核理论,以 AlN 为核心析出 MnS。

1 μm 左右 AlN + MnS 复合夹杂物及元素面扫描结果表明 Al 元素聚集于析出物的中心部, Mn 元素分布于周围,进一步证明了 AlN 的优先析出。

热轧板中还发现 30 nm 左右弥散分布的细小球形 Cu₂S + MnS(图5)。

2.3 铸坯及热轧板中夹杂物统计结果

从表2(50个视场统计)可见,在热轧过程中析出大量细小弥散的夹杂物,主要是 Cu₂S + MnS,将会阻碍后续常化和退火过程中晶粒的长大,降低磁性能,并且阻碍磁畴壁的移动,对成品性能产生不利的影响。因此在高牌号无取向硅钢冶炼过程中,必须严格控制杂质元素的含量,如 S、N、Ti、Zr、Nb、V 等^[3]。

3 结论

(1)CSP 流程工业试制高牌号无取向硅钢铸坯

组织为典型的贯穿柱状晶组织;热轧板边部到1/4层为等轴晶,平均晶粒尺寸约 45 μm,1/4层到中心层为纤维组织和少量再结晶晶粒组成的混合组织。

(2)铸坯和热轧板中夹杂主要为 1 ~ 5 μm 的 Al₂O₃,铸坯中较大的夹杂物为 1 ~ 5 μm AlN,较小的夹杂物以 100 ~ 200 nm Cu₂S + MnS 复合夹杂物为主。热轧板中还有 0.5 ~ 2.0 μm 的 AlN 及 AlN + MnS 复合夹杂物以及细小弥散分布的 30 nm Cu₂S + MnS 复合夹杂物。AlN + MnS 复合夹杂物心部为 AlN 边部为 MnS。因此必须严格控制杂质元素含量,以减少热轧过程中析出细小弥散的夹杂物。

国家自然科学基金委员会与上海宝山钢铁股份有限公司联合资助项目(50934009)

参考文献

- [1] 何忠治. 电工钢[M]. 北京:冶金工业出版社,1996:409.
- [2] 高振宇,罗理,李文权,等. 高牌号无取向电工钢技术发展及应用[J]. 鞍钢技术,2011(2):6-10.
- [3] 刘光穆,郑柏平,焦国华. 薄板坯与厚板坯生产电工钢的比较与分析[J]. 钢铁,2004,39(10):28-31.
- [4] 朱涛,施立发,董梅,等. CSP 与传统工艺生产无取向电工钢的组织与织构对磁性能影响的对比分析[J]. 钢铁研究学报,2009,21(11):35-39.
- [5] 张留文,黄叶新. 1.3% Si 电工钢经热轧和退火后静态再结晶的研究[J]. 电工钢,2000,40(2):26-28.
- [6] 樊立峰,岳尔斌,项利,等. CSP 工艺生产高牌号无取向电工钢的组织与夹杂物[J]. 钢铁研究学报,2008,20(1):32-36.
- [7] Park J T, Szpunar J A. Effect of Initial Grain Size on Texture Evolution and Magnetic Properties in Nonoriented Electrical Steels[J]. Magnetism and Magnetic Materials,2009,321(13):1928-1932.
- [8] Park J T, Szpunar J A. Texture Development during Grain Growth in Non-oriented Electrical Steels[J]. ISIJ International,2005,45(5):743-749.
- [9] Jong-Tae P. The Development of Texture of Grain-grow for Non-oriented Silicon[J]. ISIJ International,2005(5):26-30.

马良(1980-),男,博士生,高牌号无取向硅钢研究。
E-mail: maliang19801021@163.com

收稿日期:2013-02-28