稀土 Ce 对 1.5% Si 无取向硅钢织构和磁性能的影响*

段承轶[1,2],刘朋成[1,2],黄 利[1],宿 成[1],李人杰[3]

(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. 内蒙古自治区稀土钢产品研发企业重点实验室,内蒙古 包头 014010;
3. 包头钢铁(集团)有限责任公司办公室,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 文章利用蔡司显微镜和 XRD 等设备分析稀土 Ce 对 1.5% Si 无取向电工钢成品金相组织、织构和磁性能的作用,结果表明: 加入稀土 87×10^{-6} 的铈后成品金相组织的平均晶粒尺寸增加,成品板中对磁性能有害的{111} 和 {110} <001> 织构密度减弱,平均铁损值 $P_{15/50}$ 降低 0.102 W/kg,磁极化强度 B_{50} 基本保持不变。

关键词: Ce; 织构; 磁性能
中图分类号: TG142.1; TG337.3 **文献标识码**: B **文章编号**: 1009-5438(2019)06-0047-03
DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2019.06.012

Effects of Rare Earth Ce on Texture and Magnetic Properties of Non-oriented Electrical Steel with 1.5% Si

Duan Cheng-yi[1,2], *Liu Peng-cheng*[1,2], *Huang Li*[1], *Su Cheng*[1], *Li Ren-jie*[3]

(1. *Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
2. *Inner Mongolia Enterprise Key Laboratory of Rare Earth Steel Products Research & Development, Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
3. *Office of Baotou Iron & Steel (Group) Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: The functions of rare earth Ce on metallographic structure, texture and magnetic properties of finished products of non-oriented electrical steel with 1.5% Si were analyzed with such equipment as the Zeiss microscope and X-ray diffraction(XRD). The results showed that the average grain size of metallographic structure of finished products increased after add 87×10^{-6} Ce, the density of such textures as {111} and {110} <001> in finished products harmful to magnetic properties decreased as well as the average iron loss value $P_{15/50}$ decreased by 0.102 W/kg and the magnetic polarization intensity B_{50} kept constant.

Key words: Ce; texture; magnetic properties

无取向硅钢主要用作各种电机、小型变压器及 镇流器的铁芯。在全国电网升级、新能源汽车产业

收稿日期: 2019-09-16
作者简介: 段承轶(1976-),男,内蒙古包头市人,高级工程师,现从事汽车钢和电工钢新产品研发和管理工作。

飞速发展、“一带一路”国际合作平台、国家绿色和环保导向下，国内电工钢市场对牌号和性能的要求逐步提高。电工钢中的夹杂物尺寸、数量和类型显著影响铁素体的晶粒尺寸，而铁素体晶粒的形核和生长过程又与织构的形成有着密切的联系[1]。稀土铈对无取向电工钢中夹杂物尺寸、数量和类型有明显的影响，必然会影响无取向电工钢的磁性能。为此，本文研究稀土 Ce 对 1.5% Si 无取向电工钢中发挥的作用，为开发高磁感、低铁损的高性能无取向电工钢提供一定的指导。

1 材料成分和工艺方案

对比加稀土铈和不加稀土两种成分成品的磁性能，具体成分如表 1 所示。无取向硅钢的生产工艺流程包括：炼铁→KR 脱硫→转炉→RH 精炼→连铸→加热→粗轧→精轧→层冷→卷取→酸轧→退火→涂层→干燥烧结→在线检测→分卷切边→包装交货。按照钢水化学元素的要求挑选铁水，铁水需经 KR 脱硫处理，要求入转炉铁水 $w[S] \leqslant 0.002\%$。转炉出钢温度大于 1 680 ℃，出钢温降要求小于 70 ℃。根据供 RH 钢水成分及温度进行深脱碳处理。脱碳结束后，加入微碳硅铁、金属锰、磷铁、铝粒等合金调整成分。连铸全程保护无氧化浇铸，使用涂抹料中包及无碳中包覆盖剂，减少浇铸过程增碳。铸机采用恒拉速控制，拉速范围 0.8 ~ 1.2 m/min。

表 1 化学成分(质量分数) %

样号	C	Si	Mn	P	S	Al_s	Ce
1	0.002 3	1.46	0.44	0.058	0.003	0.37	0.008 7
2	0.002 0	1.45	0.43	0.060	0.003	0.38	

利用蔡司显微镜观察热轧、冷轧以及退火组织。利用 XRD 测定上述试验试样表面层的{110}、{200}、{112}不完整极图，并计算取向分布函数 ODF。织构检测设备参数：Bruker AXS: D8 GADDS; Co 靶；电压 35 kV；电流 40 mA；光阑尺寸 0.8 mm；采用反射法测量；测量范围 α:0° ~ 80°；β:0° ~ 360°。

2 结果分析及讨论

2.1 稀土 Ce 对成品组织的影响

图 1 所示在相同工艺生产的成品金相组织，其中图 1(a) 为稀土 $w[Ce]$ 87×10^{-6} 的金相组织，图 1(b) 为不含稀土的金相组织。从图 1 可以看出成品组织均完全再结晶，晶粒呈等轴状，图 1(a) 所示的平均晶粒尺寸 60.23 μm，图 1(b) 所示的平均晶粒尺寸 51.42 μm。通过对比可以看出稀土 Ce 可以增加无取向硅钢成品的晶粒尺寸，主要由于稀土 Ce 与氧、硫元素具有很强的亲和力，可以起到净化钢液、控制夹杂物形态等作用，改善成品钢板中的夹杂物的形貌和减少夹杂物的数量，进而减弱夹杂物对晶界的阻碍作用使得晶粒充分长大。

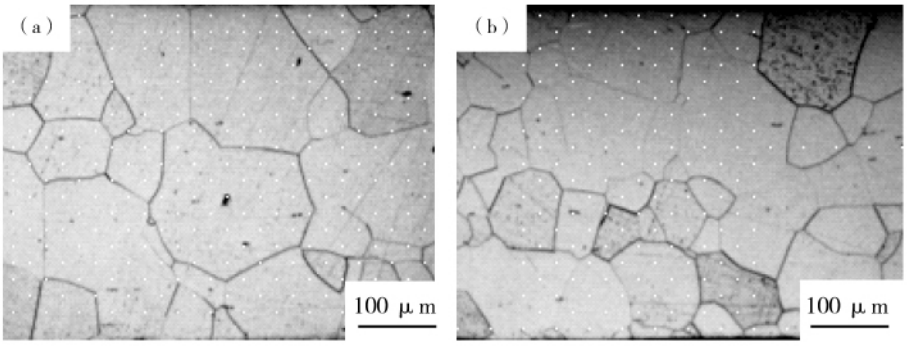


图 1 成品组织

2.2　稀土 Ce 对成品织构的影响

图 2 所示成品织构分布图，其中图 1(a) 为稀土 w[Ce] 87×10^{-6}的 ODF 图，图 1(b) 为不含稀土的 ODF 图。从图 1 可以看出加稀土和不加稀土的主要的织构类型基本一致，主要的织构类型包括 {100} <110>，{001} <110>，{111} <110>，{111} <112>。对比图 1(a) 和(b) 可以看出加入稀土 Ce 可以降低 γ 线上{111} 织构密度由 6.82 降低到 6.17，降低 5.9%。同时加入稀土 Ce 可以减弱高斯织构{110} <001> 附近的密度水平。研究表明[2]，冷轧板退火过程中{111} 位向的新晶粒易在夹杂物和初始晶界附近形核，加入稀土 Ce 后钢板中夹杂物数量的减少和晶粒尺寸的增加会使{100} 组分加强，{111} 组分减弱。

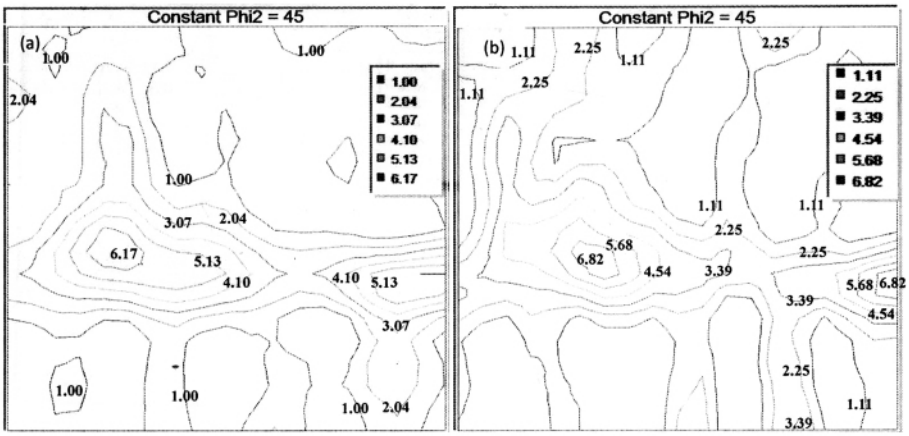


图 2　成品 ODF 图($\psi2=45°$)

2.3　稀土 Ce 对磁性能的影响

加稀土 Ce 和不含稀土对应成品的磁性能结果，测试结果和平均值如表 2 所示。

表 2　成品磁性能

样号	$P_{15/50}$/(W·kg^{-1})				B_{50}/T			
	测试卷 1	测试卷 2	测试卷 3	平均值	测试卷 1	测试卷 2	测试卷 3	平均值
1	3.524	3.420	3.553	3.499	1.693	1.692	1.692	1.692
2	3.631	3.530	3.642	3.601	1.689	1.694	1.691	1.691

由表 2 可以看出样号 1 含稀土 w[Ce] 87×10^{-6}时铁损 $P_{15/50}$平均值 3.499 W/kg，磁极化强度 B_{50}平均值 1.692 T，样号 2 不含稀土铁损 $P_{15/50}$平均值 3.642 W/kg，磁极化强度 B_{50}平均值 1.691 T，通过对比样号 1 和样号 2 加入稀土 Ce 后平均铁损值 $P_{15/50}$降低 0.102 W/kg，磁极化强度 B_{50}基本保持不变。可见，加入稀土 Ce 后可降低铁损，同时可以保持磁极化强度。

3　结论

(1) 1.5% Si 无取向硅钢加入稀土 w[Ce] 87×10^{-6}时，成品金相组织的平均晶粒尺寸增加 8.81 μm，减弱成品板对磁性能有害的{111} 和{110} <001> 织构密度。

(2) 加入稀土 Ce 的成品平均铁损值 $P_{15/50}$降低 0.102 W/kg，磁极化强度 B_{50}基本保持不变。

参　考　文　献

[1]　朱健，黄海友. 近年稀土钢研究进展与加速研发新思路[J]. 钢铁研究学报，2017，29(7) : 513 - 529.

[2]　李培忠，马良. 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.