稀土 Ce 对取向硅钢铸坯及热轧态组织的影响*

卢晓禹[1,2], 董丽丽[1], 王少炳[1], 刘朋成[1], 杨 雄[1]

(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)

摘 要: 文章介绍了稀土 Ce 对取向硅钢铸坯组织及热轧态组织的影响。采用冷酸低倍及光学显微镜观察有无稀土铸坯及热轧态组织, 对比分析稀土的作用。结果表明, 稀土 Ce 可以改善取向硅钢铸坯组织, 增加等轴晶比例, 细化部分柱状晶。稀土 Ce 作为第二相粒子, 起到钉扎作用, 热轧时阻止晶粒过度长大, 细化晶粒, 使再结晶晶粒增多。

关键词: 稀土 Ce; 取向硅钢; 组织
中图分类号: TG142.1; TG337.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2019)06-0039-03
DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2020.01.010

Effects of Rare Earth Ce on Slab and As-hot-rolled Microstructure of Oriented Silicon Steel

Lu Xiao-yu[1,2], *Dong Li-li*[1], *Wang Shao-bing*[1], *Liu Peng-cheng*[1], *Yang Xiong*[1]

(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*)

Abstract: In this paper, the effects of rare earth Ce on the microstructure of slab and as-hot-rolled microstructure of oriented silicon steel are introduced. The cold acid and optical microscopy are used for observing whether there is slab with the rare earth and as-hot-rolled microstructure as well as comparing and analyzing the functions of rare earth. The results showed that the rare earth Ce could improve the microstructure of slab of oriented silicon steel, increase the ratio of equiaxed crystal and refine part of columnar crystal. As the second-phase particle, the rare earth Ce plays the role of pinning to prevent excessive growth of crystal grain during hot rolling, refine crystal grain and make the recrystallized grain increased.

Key words: rare earth Ce; oriented silicon steel; microstructure

取向硅钢是我国电力、电子和军事工业不可缺少的重要软磁合金材料, 主要用作各种变压器的铁芯。国家电网对配电变压器能效提升以后, S13 卷铁芯变压器或是叠铁芯变压器对取向硅钢牌号及性能要求提高, 高牌号、低铁损、低噪音取向硅钢是发展的方向, 更是市场的着眼点。稀土易与钢中的碳

* 收稿日期: 2019-09-16
作者简介: 卢晓禹(1985-), 男, 河北省保定市人, 硕士, 工程师, 现从事板带材产品开发工作。

中国知网 https://www.cnki.net

氮及硫结合，随着温度的变化钢中稀土对第二相固溶、析出量及大小变化影响较为显著[1]。加入钢中的稀土除了净化晶界及细化钢的凝固组织、改变硫氧夹杂物的形态和分布外，还有微合金化作用。包钢依托资源优势，大力发展取向硅钢热轧钢带，发挥稀土的有利作用，改善取向硅钢热轧钢带铸坯组织及热轧态组织。

1 材料及方法

试验钢经过 KR 脱硫后，在 240 t 转炉中冶炼，经 RH 精炼真空处理，在无电磁搅拌工艺的条件下，浇铸成厚度为 230 mm、宽度为 1 300 mm 板坯，板坯加热到 1 300 ℃，在炉时间大于 240 min，终轧温度 950 ℃，卷取温度550 ℃。试验钢主要化学成分见表 1。钢中的碳元素可扩大奥氏体相区，保证热轧时钢中含有一定的 γ 相，有利于热轧板组织细化并形成细小的再结晶晶粒。硅能明显使钢的电阻率增高、涡流损耗降低、磁导率提高。Cu 和 S 形成的 Cu_xS，与 MnS、AlN 共同起到抑制剂的作用，热轧温度与硫化铜的析出峰值温度接近，这可以使硫化物的总析出量增多并使硫化物质点细化，还有利于位向准确的(110)［001］晶粒长大，可提高抑制能力。磷有加强抑制力的作用，能使抑制剂质点更细小、分布更均匀，可提高磁性并使磁性稳定[2]。

表 1 试验材料的化学成分(质量分数) %

编号	C	Si	Mn	P	S	Al_s	Cu	Ce
1	0.030	3.17	0.22	0.009	0.011	0.020	0.48	
2	0.030	3.15	0.21	0.009	0.013	0.020	0.50	0.002 0

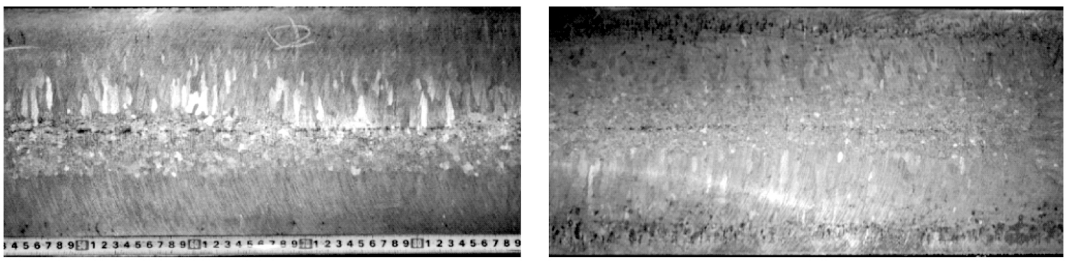
2 结果与讨论

2.1 稀土 Ce 对铸坯组织的影响

对比同一批次有稀土与无稀土的铸坯低倍组织，有稀土铸坯等轴晶比例从无稀土的 28% 左右提高到 35% 左右，提升 7 个百分点。等轴晶比例增多的原因是，钢中加入稀土元素，随着晶体的长大，稀土元素会富集在结晶前沿的液相中，使此处的平衡凝固点温度降低，呈现出反常的过冷度分布，造成了“成分过冷”现象，所以部分柱状晶转化为等轴晶；到达中心位置，凝固层和凝固层前沿的温度梯度逐渐减小，全部为等轴晶组织。

在铸坯边部，过冷度大，冷却速度快，形成等轴晶；在远离边部位置，由于稀土元素的作用，造成成分过冷现象，开始成分过冷小的情况下，固相上某些偶然突出的部分，可能伸入过冷区长大，形成等轴晶；心部传热的单向性不明显，形成等轴晶。

另外，加入稀土后柱状晶变得细小。这是因为，稀土加入钢中形成了稀土化合物，这些化合物由于熔点较高，在钢液凝固前析出时，呈细小的质点分布在钢液中，可作为非均质形核的核心，增加了非均质形核的地点，容易形核[3]。



(a) 无稀土 (b) 有稀土

图 1 有无稀土 Ce 的铸坯组织

2.2 稀土 Ce 对热轧态组织的影响

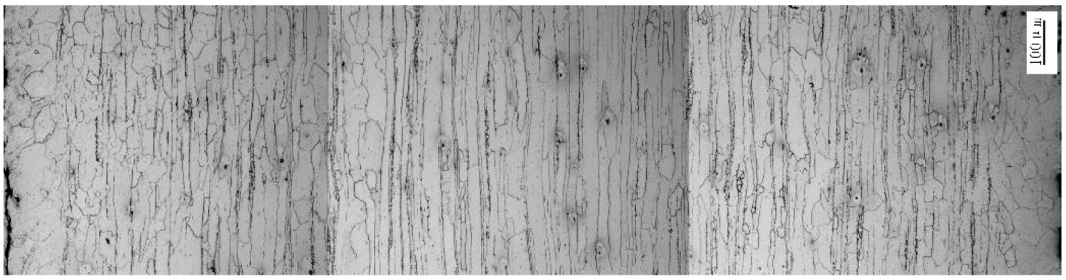
由于加热到 1 300 ℃，有无稀土铸坯都处于铁素体和奥氏体相区，在大变形量热轧时，形变奥氏体的加工硬化能力很强，可促使铁素体因较高温度变

中国知网 https://www.cnki.net

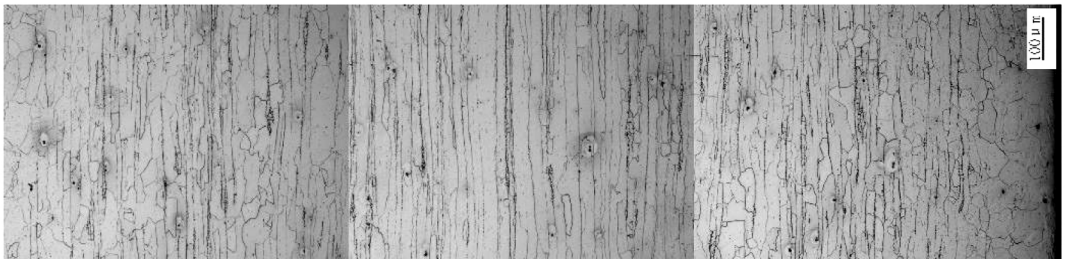
形而发生动、静态再结晶，进而有效细化铁素体，并使组织均匀化，因此希望足够厚的板坯在此两相区温度范围内完成热粗轧和热精轧[4]。

如图 2 所示，热轧后的组织分布不均匀，靠近边部位置为再结晶组织，心部为变形组织，在晶粒之间存在黑色渗碳体颗粒，这是由高温变形或再结晶的奥氏体转变来的，起到促进铁素体再结晶、组织均匀化的作用。

有稀土热轧卷板上下表层的再结晶晶粒数量增多，晶粒更细小，这是由于在均热及热轧过程中稀土起到了第二相作用，在晶粒长大的温度范围内，定扎在晶界上，增加了位错，阻止了晶粒的过度长大，细化了热轧组织；同时，使奥氏体相区温度内奥氏体相对细小，随着温度的降低，奥氏体组织进行相变，产生更加细小的铁素体组织，致使热轧后组织也相应的细小。



（a）无稀土



（b）有稀土

图 2　有无稀土 Ce 的热轧态组织

组织左右两侧为钢带厚度方向上下表面，中心位置为厚度的 1/2 处。

3　结论

(1) 稀土 Ce 可以改善取向硅钢铸坯组织，使等轴晶比例增多，柱状晶更加细小，为热轧组织做准备。

(2) 稀土 Ce 作为第二相粒子，增加了位错，热轧时阻止晶粒的过度长大，细化了晶粒，使再结晶晶粒增多。

参　考　文　献

[1] 姜茂发，李春龙，王荣，等. 钢中稀土与铌、钒、钛等微合金元素的相互作用[J]. 稀土，2003，24(5)：1－3.

[2] 李晓强，李智彪，刘志坚，等. 多元抑制剂对高磁感取向硅钢性能的影响[J]. 南方金属，2013，(1)：1－3.

[3] 常慧，金自力，任慧平，等. 稀土对薄板坯连铸连轧工艺连铸坯组织和夹杂物的影响[J]. 中国稀土学报，2010，28(5)：603－604.

[4] 毛卫民，杨平. 电工钢材料学原理[M]. 北京：高等教育出版社，2013.

中国知网　https://www.cnki.net