

稀土对冷轧无取向电工钢成品组织和磁性能的影响

光红兵 张文康 辛宪诚 胡志强
(太原钢铁(集团)有限公司技术中心,太原 030003)

摘要 在220 mm×1 280 mm弧形连铸机通过自动喂丝机经金属耳管向结晶器电工钢水(∕% : ≤0.005C、2.0~2.6Si、0.20~0.30Mn、0.008P、0.001~0.009S、0.15~0.40Al、≤0.001 0[O])喂稀土丝。通过光学、电子显微镜,系统地研究了钢中稀土含量(0~0.45% RE)对0.5 mm退火的冷轧无取向电工钢成品组织和结构、夹杂物形态和分布,以及磁性能的影响。结果表明,当钢中稀土含量为0.008%~0.020%时,能有效控制细小夹杂物的有害影响,促进退火成品晶粒尺寸增大,增强有利织构组分,显著地改善了冷轧无取向电工钢成品的磁性能。

关键词 稀土 无取向电工钢 组织 结构 磁性能

Effect of Rare Earth Element on Structure and Magnetic Performance of Cold Rolled Non-Oriented Electrical Steel Products

Guang Hongbing, Zhang Wenkang, Xin Xiancheng and Hu Zhiqiang
(Technical Center, Taiyuan Iron and Steel Co Ltd, Taiyuan 030003)

Abstract Rare earth element (RE) wire is fed to electric steel liquid (∕% : ≤0.005C, 2.0~2.6Si, 0.20~0.30Mn, 0.008P, 0.001~0.009S, 0.15~0.40Al, ≤0.001 0[O]) in mold by auto feeding wire machine through a side tube at 220 mm×1 280 mm curved caster. Effect of rare earth element content (0~0.45% RE) on structure and texture, morphology and distribution of inclusions, and magnetic performance of 0.5 mm annealed cold rolled non-oriented electrical steel products is systematically studied by optical and electric microscope. Results show that 0.008%~0.020% rare elements in steel, it is available to effectively control the harmful effect of fine inclusions in steel, promote increasing of grain size of annealed products, to intensify favorable texture ingredient and obviously improve magnetic performance of cold rolled non-oriented electrical steel products.

Material Index Rare Earth Element, Non-Oriented Electrical Steel, Structure, Texture, Magnetic Performance

稀土在钢中的作用主要包括净化钢质、变质夹杂物和微合金化^[1]。我国在钢中应用稀土的研究开始于20世纪60年代初期^[2]。随着经济和冶金技术的发展,我国目前应用稀土的钢种约有90多种。本文通过连铸喂稀土丝工艺试验,系统地研究了稀土对电工钢微观组织、夹杂形态及分布和电磁性能的影响。

1 试验方法

试验钢的工艺流程:铁水预处理→80 t顶底复吹转炉→RH处理→连铸+电磁搅拌→热连轧→酸洗→冷轧→连续退火。其主要化学成分如表1所示。

试验在弧形连铸机上用自动喂丝装置通过金属耳管向结晶器内喂稀土丝,避免了在钢包内加稀土

引起水口结瘤的问题^[3],得到220 mm×1 226 mm规格的含稀土连铸坯,喂丝方式如图1所示。

采用混合稀土金属丝 RECe-45,直径2.5 mm,执行标准为 YB/T010-1992《混合稀土金属丝、棒》;RECe-45的化学成分

(GB/T4153-1993)如表2所示。

冶炼目标成分见表1,选取4种不同的稀土加入量,并根据稀土加入量,按公式(1)确定稀土的喂丝速度^[3]。

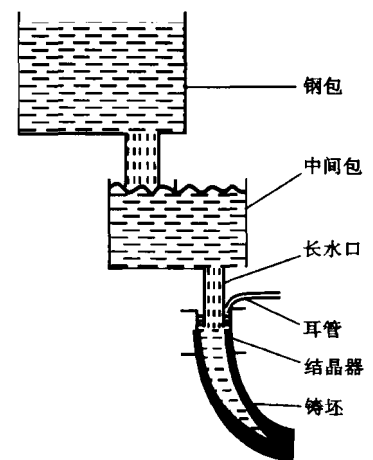


图1 连铸时喂入稀土丝示意图
Fig. 1 Schematics of Rare earth metal wire feeding during continuous casting

表1 试验无取向电工钢的主要化学成分/∕%

Table 1 Main chemical composition of test non-oriented electrical steel /∕%

C	Si	Mn	P	S	Al
≤0.005	2.0~2.6	0.20~0.30	0.008	0.001~0.009	0.15~0.40

表2 稀土金属丝化学成分/%
Table 2 Chemical composition of RE metal wire /%

RE	Ce/RE	杂质含量			
		Fe	Si	S	P
≥98	≥45	≤1.0	≤0.15	≤0.02	≤0.01

$$V_{re} = \frac{V_{sl} \times 0.22 \times 1.226 \times \rho_{sl} \times X \times 100 \times \eta_{re}}{\frac{\Phi^2}{4} \times \pi \times \rho_{re}} \quad (1)$$

式中: V_{re} - 喂丝速度/($m \cdot \min^{-1}$); V_{sl} - 连铸拉速/($m \cdot \min^{-1}$); ρ_{sl} - 铸坯密度/($g \cdot cm^{-3}$); X - 稀土加入量/%; η_{re} - 稀土回收率; Φ - 稀土丝直径/mm; ρ_{re} - 稀土丝密度/($g \cdot cm^{-3}$)。

本次试验炉容量为 80 t, 稀土加入时钢中 [O] $\leq 10 \times 10^{-6}$, 铸坯尺寸为 220 mm \times 1 280 mm \times 9 500 mm, 4 炉钢中稀土实际含量见表 3, 其连铸、热轧及后续的冷轧、退火工艺参数控制完全相同, 成品规格为 0.5 mm \times 1 000 mm \times L mm。

表3 试验钢中稀土的含量和退火成品的磁性能
Table 3 RE content in test steel and magnetic performance of annealed products

编号	稀土含量/%	$P_{1.5/50}$ /($W \cdot kg^{-1}$)	$B_{5,000}/T$
0 [#]	0	3.56	1.670
1 [#]	0.006~0.010	3.41	1.682
2 [#]	0.013~0.020	3.24	1.678
3 [#]	0.035~0.045	3.45	1.658

用扫描电镜和图像分析仪对夹杂物及数量和尺寸分布进行测定, 对每个试样观察 100 个视场, 用图像仪对夹杂物的数量进行统计, 用扫描电镜和能谱仪对典型夹杂物的形貌和成分进行分析, 观察面为与轧制方向平行的纵截面; 使用德国金相显微镜和图像分析仪对成品晶粒尺寸进行分析; 使用西门子 D-5000 型 X 射线衍射仪对试样的织构进行测量, 测量时使用 Mo 靶, 采用级数展开法计算试样的取向分布函数 (ODF)。磁性能采用 500 mm \times 500 mm 单片磁导计 NIM-2000E 检测, 在 1.5 T 和 50 Hz 条件下测量铁损 $P_{1.5/50}$, 在磁场强度为 5 000 A/m 的条件下测量磁感应强度 $B_{5,000}$, 纵、横向分别测量, 最后取平均值。

2 试验结果及分析

2.1 稀土对成品夹杂物的影响

对于电工钢而言, 钢中的夹杂物 (包括第二相析出物) 特别是 $\leq 1 \mu m$ 细小夹杂物越少越好^[4]。当夹杂物尺寸 d 与畴壁 δ 相近时 (0.1 ~ 0.2 μm),

此时钉扎畴壁移动的能力最强, 对电工钢 H_c 和 P_h 影响最大。

本次试验对成品板夹杂物的形貌、大小、分布进行了定量分析, 如图 2 所示。在无稀土的 0[#] 试样成品板中, 0.1 ~ 1 μm 细小夹杂物密度最大, 是含稀土试样的 2 倍多, 除许多细小弥散的 AlN 外, 还存在一些以 AlN 为核心变形的细线状 MnS 析出物 (图 3a)。当 [RE] $\leq 0.02\%$ 时, 随稀土含量的增加, 钢中的稀土夹杂物总体积量在缓慢增加, 主要表现在 $> 3 \mu m$ 的大型夹杂物数量缓慢增加, 但 $\leq 1 \mu m$ 细小夹杂物却明显减少, 2[#] 试样中 0.1 ~ 1 μm 细小夹杂物密度最低, 相对于无稀土的 0[#] 试样减少了 57%, 也即少量的稀土对钢中夹杂物的粗化有利。

夹杂物粗化的主要原因: (1) 结晶器中随钢中稀土含量增加, 稀土与钢中的氧、硫发生反应的几率增加, 导致钢中的稀土夹杂物总量增加; 同时, 这些夹杂物相互碰撞聚集长大的几率也逐渐增加。(2) 含稀土钢中, 稀土硫化物夹杂代替了硫化锰夹杂, 稀土硫化物在钢中固溶度小, 且固溶温度高, 故热轧过程中部分 AlN 以稀土硫化物为核心析出, 避免析出微细 MnS、AlN 夹杂, 如在含稀土的试样中, 存在以 RE_2S_3 -AlN 的变形大型复合夹杂 (图 3b), 另外除 1[#] 试样含少量 MnS 夹杂外其余含稀土试样未发现 MnS 夹杂; 但当稀土含量逐步增加时 (RE $\geq 0.030\%$), 钢中大、小稀土夹杂物明显增多, 由于受连铸条件的限制, 夹杂物并没有充足的时间相互碰撞聚集, 如 3[#] 试样含稀土 0.035% ~ 0.045% 时, 球状稀土夹杂物增多, 其密度高于 1[#]、2[#] 试样。因此, 少量加入稀土 (RE 加入量 $\leq 0.030\%$, 钢中 RE 含量 $\leq 0.020\%$), 粗化夹杂, 对电工钢磁性能有利。

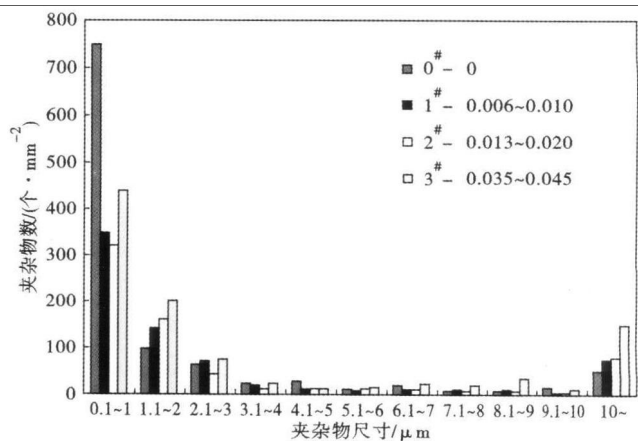


图2 钢中稀土含量 (%) 对成品夹杂物尺寸分布的影响
Fig. 2 Effect of RE content (%) in steel on distribution of size of inclusion in products

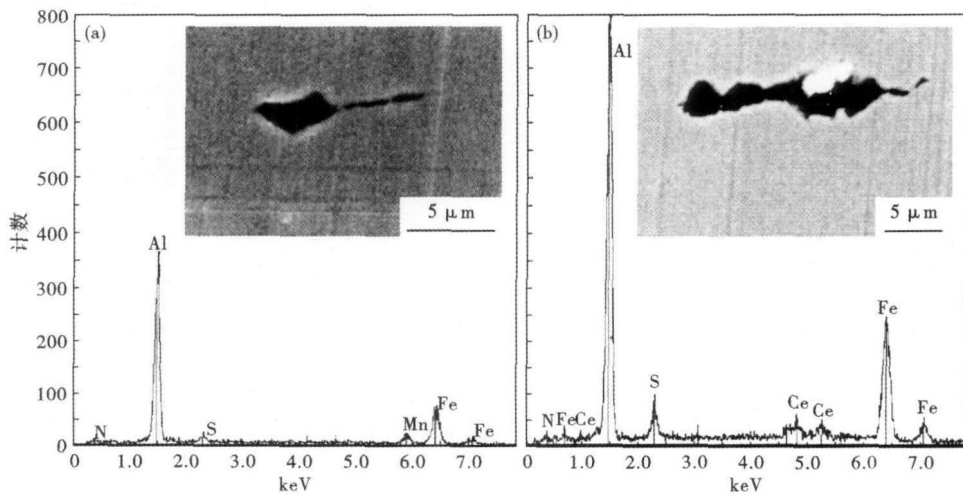


图 3 (a) 0# 钢成品 (未加稀土) 中存在的以 AlN 为核心的细线状 MnS 夹杂; (b) 稀土钢成品板 (1#、2#、3# 0.006% ~ 0.045% RE) 中 RE₂S₃-AlN 的变形大型复合夹杂

Fig. 3 (a) Stringer MnS inclusion with AlN nucleus in annealed products of 0# steel (non-added RE); (b) Deformed large RE₂S₃-AlN compound inclusion in annealed products of No1, No2 and No3 RE steel (0.006% ~ 0.045% RE)

土含量的增多,成品中细小夹杂物数量减少,且夹杂物有球化、粗化的趋势,导致抑制晶粒长大的能力减小,故稀土含量 0.013% ~ 0.020% 时,成品晶粒尺寸达到了最大为 103 μm;当 [RE] > 0.030% 时,成品晶粒尺寸反而减小,这与稀土夹杂物大幅度增多,特别是 ≤ 1 μm 的细小夹杂物也增多,对晶界起钉扎作用,抑制了晶粒长大。故稀土含量为 0.035% ~ 0.045% 的 3# 试样,成

2.2 稀土对最终退火晶粒度的影响

对于电工钢而言,成品晶粒有一个合适的临界尺寸 d_c ,且 d_c 与化学成分有关,一般随硅含量的增高而增大^[4]。本次试验无取向硅钢中硅含量 0.20% ~ 0.26%,其晶粒临界尺寸 d_c 在 120 ~ 150 μm,实际晶粒尺寸都小于临界尺寸,故相对而言成品晶粒尺寸增大有利于铁损 $P_{1.5/50}$ 降低,这与晶界点阵有关。晶界处的点阵是畸变的,晶体缺陷(空位和位错)多,内应力大,磁化困难。故增大平均晶粒直径,晶界所占面积相对减小,导致 H_c 和 P_b 降低,这是降低成品铁损的重要措施。

图 4 为该钢成品晶粒度。当 [RE] (钢中 RE 含量) ≤ 0.020% 时,随稀土含量的增加成品晶粒尺寸不断增大,这与试样中夹杂物体积分数和尺寸有关。无稀土的 0# 试样中存在着大量的细小、弥散 MnS、AlN 夹杂,钉扎晶界移动,导致晶粒无法长大,随稀

品晶粒变小为 74 μm。因此,少量加入稀土(加入 RE 量 ≤ 0.030%,钢中 RE ≤ 0.020%),晶粒尺寸增大,对降低电工钢铁损有利。

2.3 稀土对成品织构的影响

在铁的单晶体中各主晶轴方向磁化难易程度不相同,由易到难的顺序依次为 [100] > [110] > [111]^[4]。{100} 面包含两个相互垂直的易磁化方向 <100>, {110} 面内包含一个易磁化方向 <100>,而 {111} 面内没有易磁化方向 <100>, {100} 面内包含一个难磁化方向 <111>。所以,对于无取向电工钢而言,为获得各向同性的良好磁性,应尽量增强有利织构组分 {100} <uvw>、{110} <uvw>,尽量减弱不利织构组分 {111} <uvw>、{112} <uvw>。

本次试验对成品织构进行了分析,其取向分布函数 $\phi_2 = 45^\circ$ 截面图如图 5 所示。稀土含量为 0.006% ~ 0.010% 的 1# 试样,与不含稀土的 0# 试样

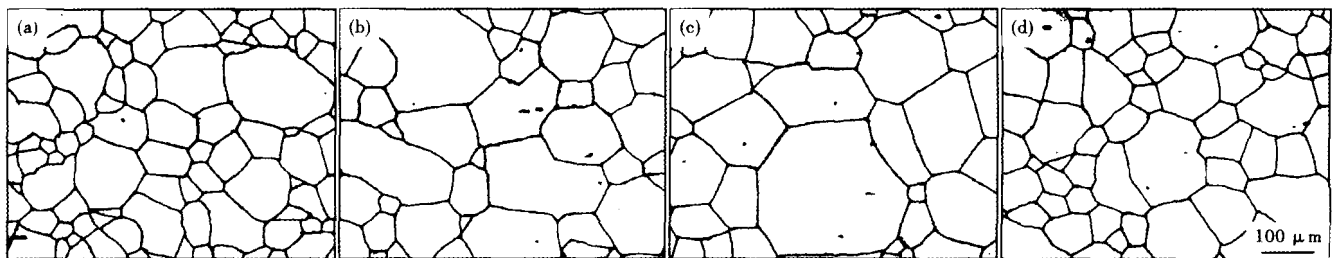


图 4 稀土含量对成品退火钢再结晶组织的影响:晶粒尺寸- (a) 0# 钢 (未加稀土) 67 μm; (b) 1# 钢 (0.006% ~ 0.010% RE) 87 μm; (c) 2# 钢 (0.013% ~ 0.020% RE) 103 μm; (d) 3# 钢 (0.035% ~ 0.045% RE) 74 μm

Fig. 4 Effect of RE content on recrystallized structure; grain size- (a) 67 μm, 0# steel- (non-added RE); (b) 87 μm, No1 steel (0.006% ~ 0.010% RE); (c) 103 μm, No2 steel (0.013% ~ 0.020% RE); (d) 74 μm, No3 steel (0.035% ~ 0.045% RE)

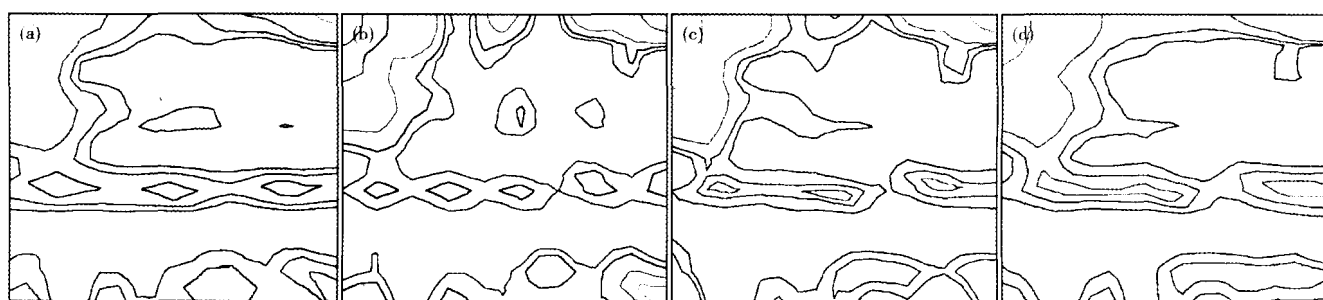


图5 0#钢(未加稀土)(a)、1#钢(0.006%~0.010% RE)(b)、2#钢(0.013%~0.020% RE)(c)和3#钢(0.035%~0.045% RE)(d)成品再结晶组织 $\phi_2 = 45^\circ$ ODF(取向分布函数)截面图

Fig. 5 Orientation distribution function's $\phi_2 = 45^\circ$ sections of annealed recrystallized texture in (a) 0# steel (non-added RE); (b) No1 steel (0.006%~0.010% RE); (c) No2 steel (0.013%~0.020% RE); and (d) No3 steel (0.035%~0.045% RE)

相比, $\{001\}\langle 010\rangle$ 、 $\{110\}\langle 001\rangle$ 织构组分明显增强, $\{111\}$ 面织构组分减弱, 这与钢中细小夹杂物数量减少, 促进了热轧板再结晶且晶粒粗化, 冷轧时易产生更多的剪切带有关; 稀土含量为 0.013%~0.020% 的 2# 试样, 与不含稀土的 0# 试样相比 $\{001\}\langle 010\rangle$ 组分增强、 $\{111\}$ 面织构组分减弱, 但与 1# 试样相比 $\{110\}\langle 001\rangle$ 组分减弱, $\{111\}$ 面织构组分增强, 这与再结晶退火晶粒显著长大有关; 稀土含量为 0.035%~0.045% 的 3# 试样, $\{111\}$ 面织构组分明显增强, $\{110\}\langle 001\rangle$ 织构组分明显减弱, 这与稀土夹杂物数量明显增多直接相关, 退火过程中再结晶晶核优先在夹杂物附近形核, 并且 $\{111\}$ 取向的晶粒优先在夹杂物附近形核和长大, 导致成品中 $\{111\}$ 取向的分布密度增加。因此, 当 RE 加入量 $\leq 0.030\%$ 时, 能减少细小夹杂, 对增强 $\{001\}\langle 010\rangle$ 、 $\{110\}\langle 001\rangle$ 织构组分、减弱 $\{111\}$ 面织构组分有利。

2.4 稀土对成品磁性能的影响

如表 3 所示, 成品铁损值 $P_{1.5/50}$ 开始随稀土含量增加而降低, 稀土含量为 0.013%~0.020% 的 2# 试样时成品铁损 $P_{1.5/50}$ 最低为 3.24 W/kg, 随后稀土含量为 0.035%~0.045% 时成品铁损 $P_{1.5/50}$ 又明显升高为 3.45 W/kg。这与稀土对夹杂物和晶粒度二方面的综合影响直接相关。当少量加入稀土 (RE 加入量 $\leq 0.030\%$) 时, 会形成粗大的稀土硫化物夹杂, 抑制了微细 MnS、AlN 析出, 减少了细小夹杂物, 促进了成品晶粒尺寸粗大, 最终降低了无取向电工钢成品铁损值; 当稀土过量加入时 (RE $\geq 0.030\%$), 明显增加细小的稀土夹杂物, 从而成品晶粒尺寸长大受到限制, 二方面综合影响导致成品铁损升高。

如表 3 所示, 成品磁感值 $B_{5,000}$ 开始随稀土含量添加而升高, 稀土含量为 0.006%~0.010% 时成品磁感 $B_{5,000}$ 最高为 1.682 T, 随后又随稀土含量增加

而下降, 当稀土含量为 0.035%~0.045% 时成品磁感 $B_{5,000}$ 急剧下降为 1.658 T。本次试验中, 当稀土含量为 0.006%~0.010% 时, 细小夹杂物数量减少, 促进对磁性有利的 $\{110\}\langle 001\rangle$ 、 $\{001\}\langle 010\rangle$ 织构组分增强, 对磁性不利的 $\{111\}$ 面织构组分减少, 故此时成品磁感最高; 当稀土含量为 0.013%~0.020% 时, 细小夹杂物数量虽减少, 但成品晶粒显著长大, 故引起成品 $\{111\}$ 面织构组分增强, 直接导致磁感降低; 当稀土含量为 0.035%~0.045% 时, 稀土夹杂物数量明显增多, 退火过程中再结晶晶核优先在夹杂物附近形核, 并且 $\{111\}$ 取向的晶粒优先在夹杂物附近形核和长大, 导致成品中 $\{111\}$ 取向的分布密度增加, 有利织构 $\{110\}\langle 001\rangle$ 、 $\{001\}\langle 010\rangle$ 组分减弱, 故此时成品磁感最低。

3 结论

在电工钢连铸过程中, 向结晶器少量喂稀土丝 (RE 加入量 $\leq 0.030\%$), 钢中稀土含量为 0.008%~0.020% 时, 对电工钢中夹杂物的形态、大小、分布产生影响, 适当的稀土含量能有效地控制细小夹杂物的有害影响, 促进退火后成品晶粒度增大, 有利织构组分增强, 最终有效地改善了电工钢的磁性能。

参考文献

- 林勤, 宋波. 钢中稀土微合金化作用与应用前景. 稀土, 2001, 22(4): 31
- 赵路遇. 微量稀土元素在铸钢中的应用. 材料开发与应用, 2003, 18(3): 43
- 汪洪峰, 简明, 邹俊芬. 结晶器喂稀土丝工艺的应用. 稀土, 2003, 24(5): 61
- 何忠治. 电工钢. 北京: 冶金工业出版社, 1996

光红兵 (1972-), 男, 硕士, 工程师, 1996 年太原工业大学毕业, 硅钢新产品、新涂层开发与研究。

收稿日期: 2011-10-19