

## 常化和退火对模拟 CSP 工艺生产无取向电工钢磁性能的影响

孙颖<sup>1,2</sup> 李军<sup>2</sup> 赵宇<sup>2</sup> 喻晓军<sup>2</sup> 连法增<sup>1</sup>

(1 东北大学材料与冶金学院,沈阳 110004; 2 安泰科技股份有限公司功能材料事业部,北京 100081)

**摘要** 采用 30 kg 真空感应炉-50 mm 铸坯-热轧 2.0~2.3 mm 板-冷轧 0.5 mm 薄板流程的模拟 CSP 工艺生产 0.005% C、0.42% Si 和 0.002% C、0.98% Si 的无取向电工钢。结果表明,两种电工钢的热轧板经 900 °C 5 min 常化处理后,铁损  $P_{1.5/50}$  分别由原有的 7.01 W/kg 和 7.34 W/kg 降至 6.49 W/kg 和 5.96 W/kg,冷轧板经 820~910 °C 退火后随退火温度的提高铁损降低至 5.15 W/kg。

**关键词** 无取向电工钢 常化 退火 磁性能

## Effect of Normalizing and Annealing on Magnetic Properties of Non-oriented Electrical Steel Produced by Simulated CSP Process

Sun Ying<sup>1,2</sup>, Li Jun<sup>2</sup>, Zhao Yu<sup>2</sup>, Yu Xiaojun<sup>2</sup> and Lian Fazeng<sup>1</sup>

(1 School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004;

2 Functional Materials Branch, Antai Advanced Technology and Materials Co Ltd, Beijing 100081)

**Abstract** Two non-oriented electrical steels 0.005C-0.42Si and 0.002C-0.98Si were produced by the simulated CSP (compact strip production process): 30 kg vacuum induction furnace - 50 mm cast slab - 2.0~2.3 mm hot rolled plate - 0.5 mm cold rolled sheet process. Results showed that after normalizing at 900 °C for 5min, the iron loss  $P_{1.5/50}$  of two electrical steels reduced respectively from original 7.01 W/kg and 7.34 W/kg to 6.49 W/kg and 5.96 W/kg, and after 820~910 °C annealing, with increasing annealing temperature the iron loss of cold rolled sheet decreased to 5.15 W/kg.

**Material Index** Non-oriented Electrical Steel, Normalizing, Annealing, Magnetic Properties

与传统生产工艺相比,采用薄板坯连铸连轧(CSP)工艺生产无取向电工钢在节能降耗,提高生产率等方面具有很大的优势<sup>[1,2]</sup>,是电工钢生产工艺的重要创新。本实验采用 CSP 工艺进行实验室模拟生产无取向电工钢,分别研究了常化及退火工艺对磁性能的影响。

### 1 实验材料和方法

采用 30 kg 真空感应炉进行冶炼。两炉钢成分见表 1。钢水直接浇铸,控制钢水冷却速度以及铸坯组织与 CSP 工艺相同。铸坯断面为:50 mm × 100 mm;用保温炉热送,铸坯经 1 100 °C 30 min 加热后热轧,终轧温度为 820~880 °C,厚度为 2.0~2.3 mm。为进行对比实验,选取部分热轧板在 900 °C 均热 5 min 进行常化处理,处理气氛为纯氮气。将热轧板试样酸洗之后进行冷轧,达到 0.5 mm 厚度。冷轧过程中控制好板形,冷轧带厚度公差为

-0.03~0.01 mm。之后将冷轧带分别沿纵向、横向剪切成磁性能测量要求的尺寸 100 mm × 30 mm,在 30% H<sub>2</sub> + 70% N<sub>2</sub> 气氛下进行 820~910 °C 的退火处理。将退火之后的试样利用交流磁性测量仪以单片测量方式测量铁损  $P_{1.5/50}$  和磁感应强度  $B_{5000}$ 。

### 2 实验结果与讨论

#### 2.1 常化对磁性能的影响

常化是改善无取向电工钢织构和磁性能的重要措施,可以使热轧板内部晶粒粗化并且更加均匀,晶界减少,析出物聚集粗化,在冷轧后的退火再结晶过程中,易在晶界处形核的(111)面晶粒减少,而(100)和(110)面晶粒增加,因此能够明显提高磁性能,特别是  $B_{5000}$  值<sup>[3]</sup>。

将经过常化处理的热轧板酸洗、冷轧、退火之后的成品试样与相应未常化的试样进行对比。图 1 为实验室模拟 CSP 生产的 0.5% (Si + Al)、1.0% (Si + Al) 无取向电工钢成品试样的金相照片,由图 1 可见,热轧板经过常化处理的试样其晶粒尺寸较大。

无取向电工钢的铁损以磁滞损耗为主,晶粒尺寸是影响磁滞损耗的主要因素之一。晶粒尺寸越小,晶界越多,阻碍畴壁移动的作用越大,导致磁滞

表 1 试验钢化学成分/%

Table 1 Chemical compositions of test steels /%

炉号	C	S	Si	Mn	P	Al
1	0.005	0.005	0.42	0.34	0.069	≤0.005
2	0.002	0.004	0.98	0.34	0.008	≤0.005

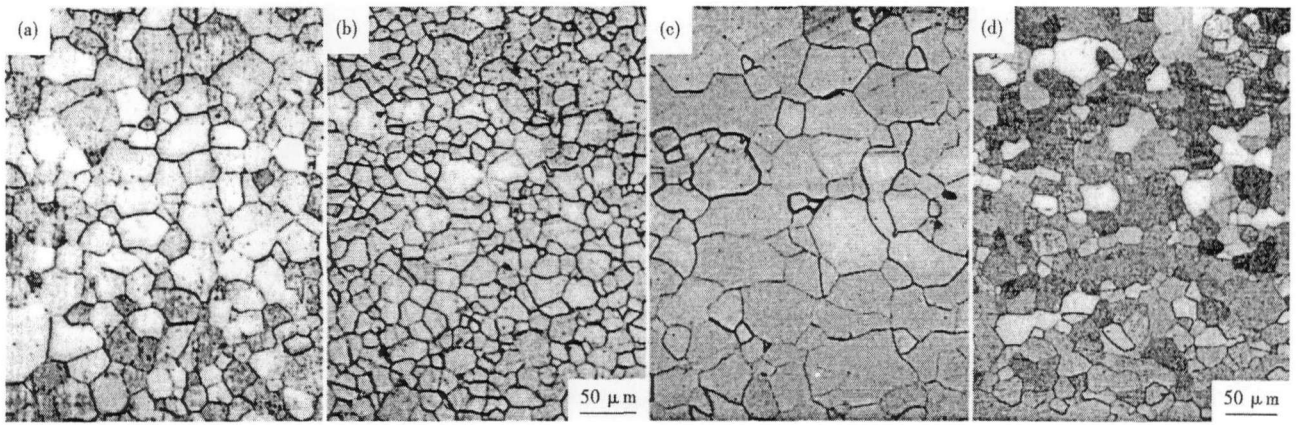


图 1 0.5% (Si + Al) 钢(a,b)和 1.0% (Si + Al) 钢(c,d) 成品板组织形貌:(a) (c)- 常化;(b) (d)- 未常化

Fig.1 Structure morphology of plate of 0.5% (Si + Al) steel (a,b) and 1.0% (Si + Al) steel (c,d): (a) (c)- normalizing; (b) (d)- un-normalizing

损耗增加<sup>[4]</sup>。因此晶粒尺寸的增加可以使铁损降低,同时对磁感应强度也产生一定的有利影响。表 2 为热轧板经过常化及未常化处理的实验室模拟 CSP 生产成品试样的磁性能与平均晶粒尺寸。可见,经过常化处理试样的晶粒尺寸增大,相应的铁损  $P_{1.5/50}$  降低,磁感应强度  $B_{5000}$  也有一定提高。

无取向电工钢中的析出物会阻碍畴壁移动使铁损增大,尤其是细小弥散状的析出物对磁性能影响较大。因此要求钢中的夹杂物和形成杂质物的元素 (C、N、S 等) 尽量低,析出物粒子尽量粗化。经过扫描电镜观察及能谱分析,本实验成品试样中的析出

物以 MnS 为主,部分为 MnS-AlN 复合析出,只有极少量为 AlN。所选 1.0% (Si + Al) 试样所观察到的析出物颗粒中,经过常化处理的颗粒平均尺寸较大,如图 2 所示。

### 2.2 退火温度对磁性能的影响

冷轧板在退火时发生明显的回复、再结晶和晶粒长大过程。为尽快地发生再结晶和晶粒长大,应快速升到规定的退火温度,这样可以使晶粒粗化,改善织构和磁性能<sup>[5]</sup>。退火温度必须在相变点以下,因为相变可产生大小混合晶粒,破坏有利织构组分并降低磁性能。在  $\alpha$ -相区内退火温度增高和退火时间延长,会使晶粒尺寸增大,铁损降低,而磁感应强度和硬度也降低。为了提高无取向电工钢的产量和磁性能,一般选用高温短时间的退火方法<sup>[3]</sup>。实验根据无取向电工钢的 (Si + Al) 含量,采用 820 ~ 910 °C 5 min 的退火制度。

通过对比实验可以看出,退火温度的提高对成品晶粒尺寸增大有一定的作用(图 3),进而成品磁性能有所改善。 $P_{1.5/50}$  值与晶粒尺寸、退火温度的关

表 2 常化对无取向电工钢的平均晶粒尺寸与磁性能的影响  
Table 2 Effect of normalizing on average grain size and magnetic properties of non- oriented electrical steels

试样分类	平均晶粒尺寸/ $\mu\text{m}$	$P_{1.5/50}$ / $(\text{W} \cdot \text{kg}^{-1})$	$B_{5000}$ / T
0.5% (Si + Al) 常化	44.70	6.49	1.77
0.5% (Si + Al) 未常化	33.50	7.01	1.76
1.0% (Si + Al) 常化	12.60	5.96	1.76
1.0% (Si + Al) 未常化	10.80	7.34	1.73

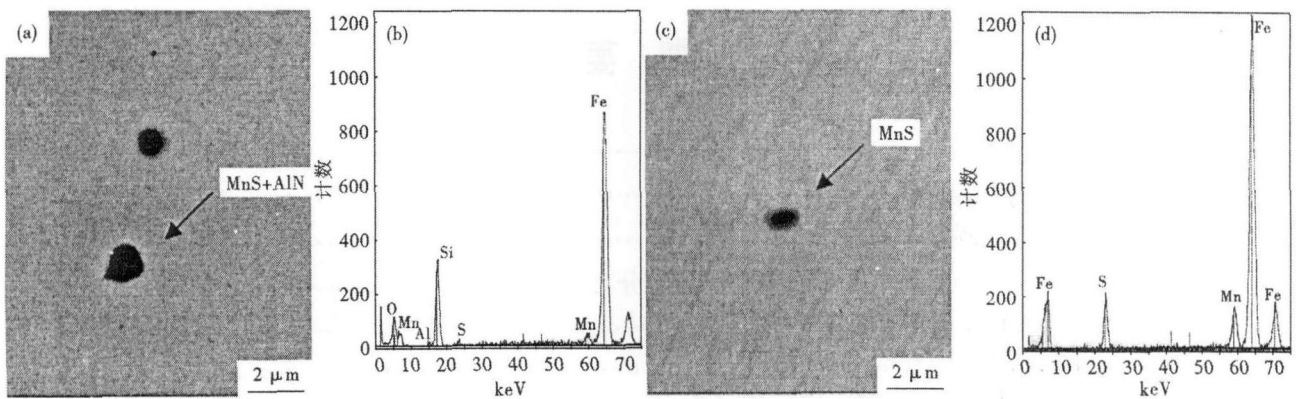


图 2 1.0% (Si + Al) 钢成品板的析出物形貌及 EDX 分析:(a) (b) 常化;(c) (d) 未常化

Fig.2 Precipitates morphology and EDX analysis of plate of 1.0% (Si + Al) steel: (a) (b)- normalizing; (c) (d)- un-normalizing

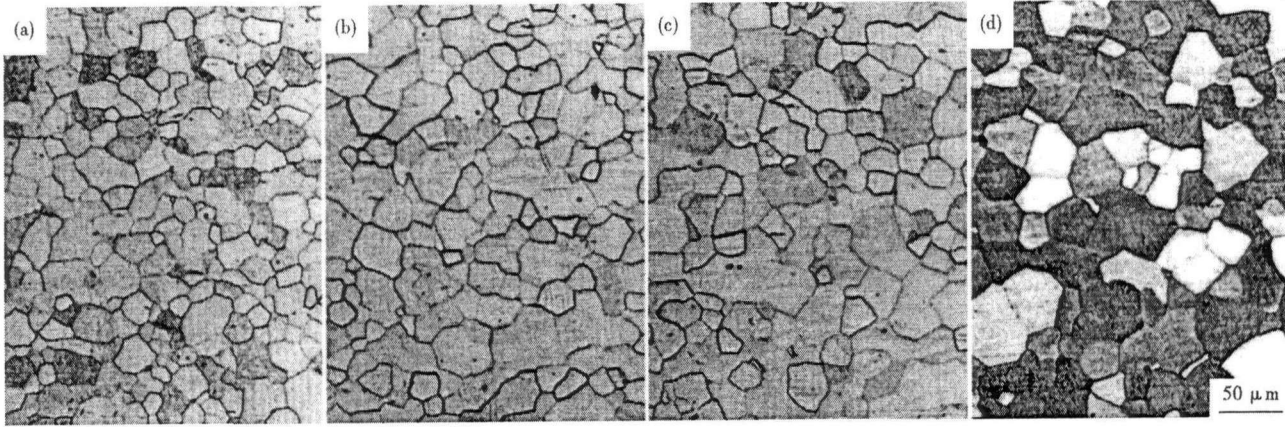


图 3 1.0% (Si + Al) 退火冷轧板的组织形貌: (a) 820 °C 5 min; (b) 860 °C 5 min; (c) 880 °C 5 min; (d) 910 °C 5 min 退火  
 Fig.3 Structure morphology of annealed cold rolled sheet of 1.0% (Si + Al) steel: annealing at 820 °C for 5min (a), 860 °C for 5 min (b), 880 °C for 5 min (c) and 910 °C for 5 min (d)

系如图 4 所示。随退火温度的升高,实验室模拟生产 1.0% (Si + Al) 成品试样的平均晶粒尺寸增大,铁损  $P_{1.5/50}$  降低。

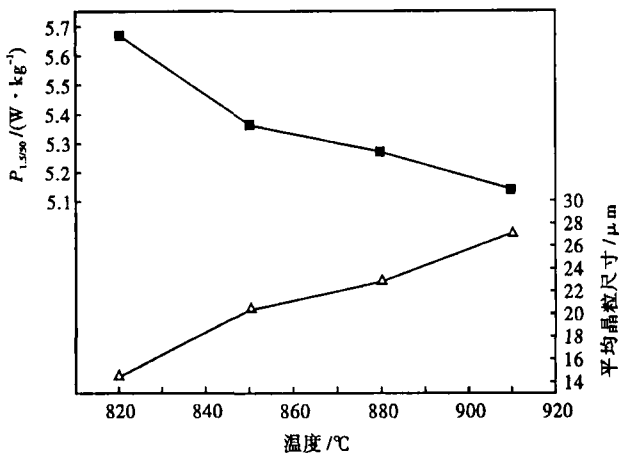


图 4 退火温度对 1.0% (Si + Al) 钢冷轧板的铁损  $P_{1.5/50}$  与平均晶粒尺寸的影响

Fig.4 Effect of annealing temperature on iron lose  $P_{1.5/50}$  and average grain size of cold rolled sheet of 1.0% (Si + Al) steel

### 3 结论

(1) 微观组织分析可知,实验室模拟 CSP 无取向电工钢的热轧板经过常化处理,晶粒尺寸增大,铁损降低,磁感应强度提高。

(2) 退火温度对实验室模拟 CSP 无取向电工钢的磁性能有一定的改善,随着退火温度的提高,晶粒尺寸增大,铁损降低。

### 参考文献

- 1 毛新平. 薄板坯连铸连轧技术综述. 冶金丛刊, 2004, 150(2): 35
- 2 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. 钢铁, 2004, 39(10): 28
- 3 何忠治. 电工钢. 北京: 冶金工业出版社, 1996
- 4 张文康, 毛卫民, 王一德, 等. 热轧板常化后的晶粒尺寸对无取向硅钢组织和磁性能的影响. 钢铁, 2007, 42(2): 64
- 5 Marco A da Cunha, Sebastião C Paolinelli. Effect of the Annealing Temperature on the Structure and Magnetic Properties of 3% Si Non-oriented Steel. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2003, 254: 379

孙 颖(1981-), 女, 博士研究生, 2003 年东北大学毕业, 从事金属软磁材料研究。

收稿日期: 2007-10-22

## 下 期 要 目

板坯连铸中间包水模型研究 .....	梁福斌等
六流小方坯中间包气幕挡墙的数学模拟 .....	黄 奥等
超低氧弹簧钢脱磷回磷的热力学研究 .....	王 郢等
双辊连铸 304 不锈钢 2.0 mm 薄带中铁素体的形态与分布 .....	季晨曦等
2 000 MPa 高强度钢的超高周疲劳破坏行为 .....	赵海民等
T91 耐热钢析出物的热力学计算和平衡相分析 .....	郝 珊等
Si 对中碳弹簧钢氧化脱碳行为的影响 .....	石如星等
碳化物堆积对钨钼系高速钢性能的影响 .....	秦 茶等