

## 热轧板常化温度对冷轧无取向电工钢退火组织和磁性能的影响

菅瑞雄<sup>1,2</sup> 张文康<sup>2,1</sup> 杜振民<sup>1</sup> 毛卫民<sup>1</sup> 王一德<sup>2</sup>

(1 北京科技大学材料科学和工程学院, 北京 100083; 2 太原钢铁(集团)有限公司技术中心, 太原 030003)

**摘要** 研究了  $\leq 0.005\% \text{C}-2.5\% \sim 2.8\% \text{Si}$  的 2.5 mm 热轧电工钢板在 850 ~ 1 100 °C 常化对 0.5 mm 冷轧板 880 °C + 950 °C 退火后组织和磁性能的影响。结果表明, 热轧板常化温度升高, 冷轧板退火后的再结晶晶粒增大, 铁损降低, 磁感呈单调递增趋势; 热轧板常化温度超过 1 000 °C, 因第 2 相固溶而后弥散析出, 退火冷轧晶粒细化, 铁损增加, 因此该钢热轧板最佳常化温度为 1 000 °C。

**关键词** 无取向 电工钢 热轧板常化 组织 磁性能

## Effect of Normalizing Temperature on Structure and Magnetic Properties of Annealed Non-Oriented Electric Steel

Jian Ruixiong<sup>1,2</sup>, Zhang Wenkang<sup>2,1</sup>, Du Zhengmin<sup>1</sup>, Mao Weimin<sup>1</sup> and Wang Yide<sup>1</sup>

(1 School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083;

2 Technical Center, Taiyuan Iron and Steel (Group) Co Ltd, Taiyuan 030003)

**Abstract** The effect of 2.5 mm hot rolled plate of electric steel ( $\leq 0.005\% \text{C}-2.5\% \sim 2.8\% \text{Si}$ ) normalizing at 850 ~ 1 100 °C on structure and magnetic properties of 0.5 mm cold rolled sheet annealed at 880 °C + 950 °C has been studied. The results showed that with increasing normalizing temperature of hot rolled plate, the recrystallized grain size of annealed cold rolled sheet increased, iron loss reduced and magnetic induction monotonically increased; as normalizing temperature was more than 1 000 °C, with solid solution second phases then precipitated dispersed in annealed cold rolled sheet, the grain fined and iron loss increased. The optimum normalizing temperature of hot rolled plate is 1 000 °C.

**Material Index** Non-Oriented, Electric Steel, Hot Rolled Plate Normalizing, Structure, Magnetic Properties

节能降耗的需要使冷轧无取向电工钢正向低铁损高磁感方向发展, 而在开发低铁损高牌号产品时除了考虑提高钢质纯净度、增加硅铝合金含量和控制夹杂物分布外, 冷轧前热轧板常化处理也是一个非常重要的工艺环节。本文重点研究了不同热轧板常化温度下成品组织和结构的变化, 进而研究了其对磁性能的影响。

### 1 试验过程

取大生产热轧板作为原料, 规格为 2.5 mm 厚 × 100 mm 宽 × 1 000 mm 长, 其合金成分如表 1 所示。热轧板用热连轧机生产, 热轧时连铸坯的加热温度为 1 180 °C, 终轧温度为 870 °C, 卷取温度为 650 °C。热轧板在箱式炉 850 ~ 1 100 °C 常化 3 min。酸洗后在实验室小型 4 辊轧机上将坯料沿长度方向从 2.5 mm 板冷轧成 0.5 mm 板, 压下率为 80%。在两段式连续退火炉中进行最终再结晶退火, 由于原始碳含量较低, 炉内气氛使用干的分解氨, 温度为 880 °C + 950 °C, 时间为 3 min。

表 1 电工钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of electric steel /%

C	Si	Mn	P	S	Al
$\leq 0.005$	2.50 ~ 2.80	0.23 ~ 0.25	0.008	0.005	0.55

热轧板和冷轧板退火后, 成品的试样使用光学显微镜观察其金相组织, 并用图像分析仪测量平均晶粒大小, 观察面为与轧制方向平行的纵截面。使用西门子 D-5000 型 X 射线衍射仪对成品退火后试样的结构进行测量, 测量时使用 Mo 靶, 首先检测试样的 {110}、{200} 和 {211} 3 个不完全极图, 然后采用级数展开法计算试样的取向分布函数(ODF), 并表示在欧拉角  $\varphi_2 = 45^\circ$  的截面上。磁性能采用 50 mm × 50 mm 单片磁导计检测, 在 1.5 T 和 50 Hz 条件下测量铁损  $P_{15}$ , 在磁场强度为 5 000 A/m 的条件下测量磁感应强度  $B_{50}$ , 纵、横向分别测量, 最后取平均值。

### 2 试验结果

#### 2.1 热轧板常化温度对热轧板晶粒大小的影响

从表 2 可以看出,热轧板未常化时组织为纤维状,热轧板经过常化后,纤维状组织发生再结晶,随着常化温度的升高,晶粒尺寸逐渐增大,温度 > 1 000 °C 时,晶粒显著长大,晶界平直,1 100 °C 时晶粒最大。

表 2 热轧板常化温度对热轧板和成品晶粒的影响  
Table 2 Effect of normalizing temperature of hot rolled plate on grain size of hot rolled plate and finished cold rolled sheet

热轧板常化温度/°C	热轧板晶粒尺寸/ $\mu\text{m}$	冷轧板退火(880 °C + 950 °C)后成品晶粒尺寸/ $\mu\text{m}$
未退火	纤维组织	58
850	67	80
950	100	91
1 000	160	103
1 050	193	82
1 100	247	55

## 2.2 热轧板常化温度对冷轧板退火后成品组织的影响

从图 1 和表 2 可以看出,热轧板常化温度对

成品晶粒尺寸的影响与对热轧板晶粒尺寸的影响不同,热轧板常化温度 < 1 000 °C 时,成品晶粒尺寸随热轧板常化温度的升高而增大,热轧板常化温度为 1 000 °C 时,成品的晶粒尺寸最大,热轧板常化温度 > 1 000 °C 时,成品晶粒尺寸随热轧板常化温度的升高反而逐渐减小。

## 2.3 热轧板常化温度对成品织构的影响

取向分布函数  $\varphi_2 = 45^\circ$  截面图是表达无取向硅钢板织构最具有代表性的截面图。在这个截面图上可以观察到一系列重要的取向位置<sup>[1]</sup>。热轧板常化温度对冷轧板退火再结晶后成品织构的影响如图 2 所示。由图 2 可以看出,成品织构主要由  $\{111\}$ 、 $\{112\}$  和  $\{114\}$  等面织构以及高斯织构组成,成品织构的强度比较弱,最高织构组分的强度是随机织构分布强度的 4 倍。随着热轧板常化温度的升高,成品中  $\{111\}$ 、 $\{112\}$  和  $\{114\}$  等面织构减弱,高斯织构  $\{110\} < 100 >$  增强。

## 2.4 热轧板常化温度对磁性能的影响

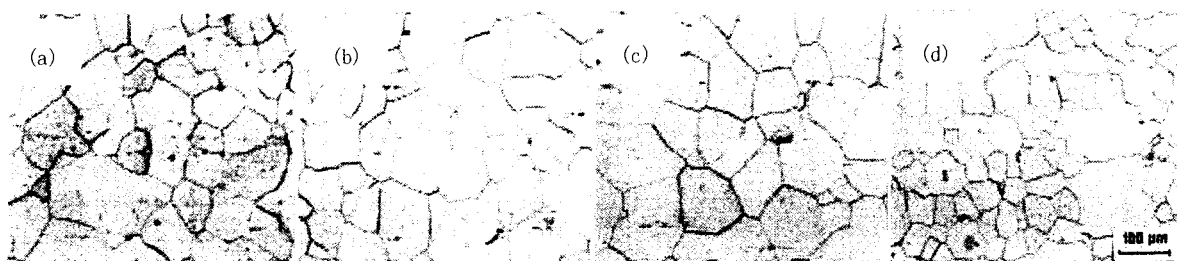


图 1 成品金相组织  $\times 100$ : 热轧板常化温度 - (a) 850 °C; (b) 950 °C, (c) 1 050 °C, (d) 1 100 °C

Fig. 1 Structure of finished cold rolled sheet  $\times 100$ : normalizing temperature of hot rolled plate - (a) 850 °C; (b) 950 °C, (c) 1 050 °C, (d) 1 100 °C

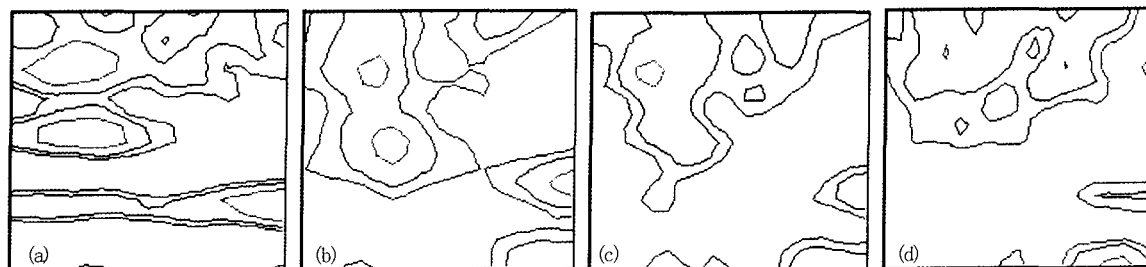
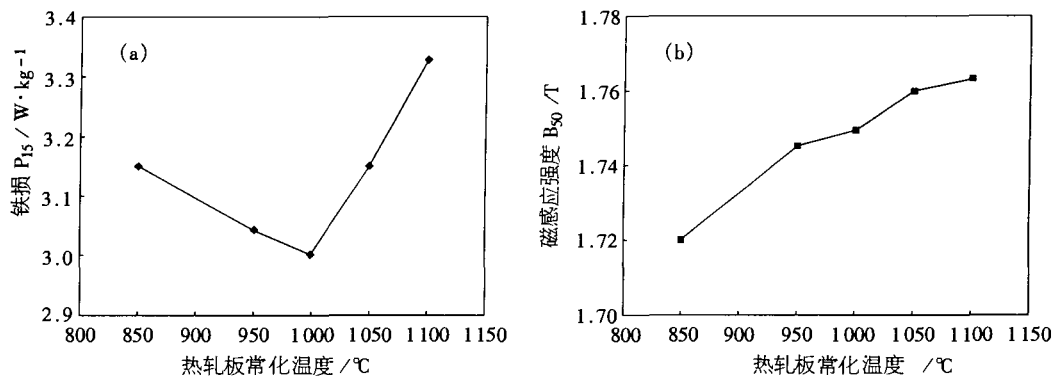


图 2 成品最终退火后取向分布函数  $\varphi_2 = 45^\circ$  截面图(密度水平: 1, 2, 4), 热轧板常化温度: (a) 850 °C; (b) 950 °C; (c) 1 050 °C; (d) 1 100 °C

Fig. 2  $\varphi_2 = 45^\circ$  sections of finished annealed cold rolled sheets (levels: 1, 2, 4), normalizing temperature of hot rolled plate - (a) 850 °C; (b) 950 °C; (c) 1 050 °C; (d) 1 100 °C

由图 3(a) 可以看出,铁损  $P_{15}$  随热轧板常化温度的变化并非单调变化关系,当热轧板常化温度在 1 000 °C 以下时,随着温度的升高,铁损呈降低

趋势,当常化温度在 1 000 °C 以上时,铁损反而随温度的升高而增大。图 3(b) 显示磁感  $B_{50}$  随热轧板常化温度的升高而单调递增,高温段增幅变缓。

图3 电工钢热轧板常化温度对磁性能的影响:(a)  $P_{15}$ ; (b)  $B_{50}$ Fig.3 Effect of normalizing temperature of hot rolled plate on magnetic properties of electric steel: (a)  $P_{15}$ ; (b)  $B_{50}$ 

### 3 讨论

Paepc<sup>[2]</sup>等人通过透射电子显微镜观察了无取向硅钢热轧板中微细析出物的分布,发现随着加热温度的提高,球形或椭球形的微细析出物越多。

热轧板晶粒大小通过影响冷轧变形方式对成品的再结晶织构有显著的影响。当热轧板晶粒较大时,冷轧形变组织中形成较多的剪切带,热轧板晶粒越大,剪切带的分布密度越高。由于剪切带有较高的储能,再结晶晶粒优先在剪切带内形核。再结晶退火时剪切带中更容易形成高斯取向的晶核<sup>[3]</sup>。因此,热轧板晶粒越大,冷轧变形组织中剪切带的分布密度越高,成品织构中高斯织构的强度越高。此外, $\gamma$ 纤维织构取向的再结晶晶核更容易在热轧板的原始晶界处形核。因此,热轧板晶粒越大,原始晶界越少,成品中 $\gamma$ 纤维织构的强度越低。

对于无取向电工钢, $\{100\}$ 和 $\{110\}$ 织构是对磁性能有利的织构, $\{111\}$ 和 $\{112\}$ 织构是不利织构。因此,增加 $\{100\}$ 和 $\{110\}$ 织构的强度和降低 $\{111\}$ 和 $\{112\}$ 织构的强度有利于降低磁滞损耗和增加磁感。晶界对磁化有阻碍作用,晶界越多,磁滞损耗越大,因此,增加成品的晶粒大小有利于降低磁滞损耗。热轧板常化温度在1000℃以下时,随着热轧板常化温度的升高,成品的晶粒尺寸增大,对磁性能不利的 $\{111\}$ 和 $\{112\}$ 织构在减弱,对磁性能有利的高斯织构 $\{110\} < 100 >$ 增强,因此,铁损降低。热轧板常化温度在1000℃以上时,随着热轧板常化温度的升高,虽然对磁性能不利的 $\{111\}$ 和 $\{112\}$ 织构仍在减弱,对磁性能有利的高

斯织构增强,但由于成品的晶粒尺寸减小以及弥散析出物对磁化的阻碍作用,磁滞损耗增加,铁损增加。磁感 $B_{50}$ 主要由晶体织构来决定,随着热轧板常化温度的升高,不利织构一直在减弱,有利织构在增强。因此,磁感随热轧板常化温度的升高而增加。

### 4 结论

(1) 热轧板常化温度 $< 1000$ ℃时,随温度的升高,冷轧板退火后的再结晶晶粒也在增大,热轧板在 $> 1000$ ℃常化时,由于第2相固溶而随后弥散析出,阻碍了成品再结晶晶粒的长大,晶粒反而细化。

(2) 热轧板常化温度 $< 1000$ ℃时,随温度的升高铁损降低,热轧板常化温度 $> 1000$ ℃时,随温度的升高铁损增加。

(3) 随着热轧板常化温度的升高,成品中对磁性能不利的织构组分减弱,对磁性能有利的高斯织构增强,磁感呈单调上升趋势。因此,对于该电工钢,最佳热轧板常化温度约为1000℃。

### 参考文献

- 1 毛卫民,张新明.晶体材料织构定量分析.北京:冶金工业出版社,1995
- 2 Paepc A, Eloot K. Effect of Hot Rolling Parameters on the Magnetic Properties of a Low-silicon Ultra-low-carbon Steel. J. Magn. Mater., 1996, 160: 129
- 3 Jong-Tae Park, Jerzy A Szpunar. Evolution of Recrystallization Texture in Nonoriented Electrical Steels. Acta Materialia, 2003, 51: 3037

菅瑞雄(1973-),男,硕士研究生,1997年西安建筑科技大学毕业,冷轧无取向电工钢的研发。

收稿日期:2006-02-25