

热轧常化温度对 3.0%Si 无取向电工钢组织和性能的影响

薛志勇¹ 白志浩² 张文康³

(1 华北电力大学电站设备状态监测与控制教育部重点实验室, 北京 102206;

2 上海电视大学南汇分校, 上海 201300; 3 太原钢铁(集团)有限公司技术中心, 太原 030003)

摘 要 当常化温度由 850 ℃ 提高至 1 100 ℃, 0.005% C-3.0% Si 无取向电工钢 2.5 mm 热轧板的平均晶粒尺寸由 60 μm 增至 200 μm; 当热轧板常化温度为 1 000 ℃, 0.5 mm 冷轧板 850 ℃ + 950 ℃ 退火后的晶粒尺寸最大, 为 105 μm。随热轧板常化温度提高, 冷轧板退火后 {111}、{112} 和 {114} 织构明显减弱, {100} 织构增强, 热轧板最佳常化温度为 900 ~ 1 050 ℃, 该电工钢的铁损最低。

关键词 3.0% Si 电工钢 无取向 常化 组织 磁性能

Effect of Normalizing Temperature of Hot Rolled Plate on Structure and properties of 3.0Si Non-Oriented Electric Steel

Xue Zhiyong¹, Bai Zhihao² and Zhang Wenkang³

(1 Key Lab of Condition Monitoring and control for Power Plant Equip of Ministry of Education, North China Electric Power University, Beijing 102206; 2 Nanhui School, Shanghai Television University, Shanghai 201300;

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

Abstract The test results showed that with increasing normalizing temperature from 850 ℃ to 1 100 ℃, the average grain size of 2.5 mm hot rolled plate of 0.005C-3.0Si non-oriented electric steel increased from 60 μm to 200 μm, and with normalizing at 1 000 ℃ for hot rolled plate, the grain size of 0.5 mm cold rolled sheet annealed at 850 ℃ + 950 ℃ was maximum to 105 μm; with increasing normalizing temperature of hot rolled plate, the {111}, {112} and {114} texture in annealed cold rolled sheet obviously weakened and the {100} texture was enhanced. The optimum normalizing temperature of hot rolled plate was 900 ~ 1 050 ℃, with which the iron loss of the electric steel was lowest.

Material Index 3.0Si Electric Steel, Non-Oriented, Normalizing, Structure, Magnetic Properties

热轧板常化是电工钢一个非常重要的工艺环节^[1-3]。本文重点研究了热轧板常化温度和冷轧板退火温度对成品晶粒大小和织构的变化以及对其磁性能的影响。

1 试验过程

取大生产热轧板作为原料, 规格 2.5 mm 厚 × 100 mm 宽 × 1 000 mm 长。成分 (%): 3.0Si、0.38Al、0.30Mn、0.010P、0.003C、0.003N、0.004S。热轧板用热连轧机生产, 热轧时连铸坯的加热温度为 1 160 ℃, 终轧温度为 870 ℃, 卷取温度为 650 ℃。热轧板在 850 ~ 1 100 ℃ 的箱式炉中常化 4 min 酸洗后在实验室小型 4 辊轧机上冷轧到 0.5 mm, 压下率为 80%。在两段式连续退火炉中进行最终再结晶退火, 退火气氛使用分解氨, 冷轧板退火温度分别为 850 ℃ + 950 ℃ 和 850 ℃ + 1 000 ℃, 退火时间为 3 min。

使用西门子 D-5000 型 X 射线衍射仪对成品退火后试样的织构进行测量, 测量时使用 Mo 靶, 首先

检测试样的 {110}、{200} 和 {211} 三个不完全极图, 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 $P_{1.5}$, 在磁场强度为 5 000 A/m 的条件下测量磁感应强度 B_{50} 。

2 试验结果

2.1 常化温度对热轧板和退火冷轧板晶粒尺寸的影响

从表 1 可见, 随着常化温度的升高, 热轧板晶粒尺寸增大。在 1 000 ℃ 以下, 晶粒增长缓慢, 当常化温度大于 1 000 ℃ 时, 热轧板晶粒显著长大; 当热轧板常化温度为 1 000 ℃ 时, 退火冷轧板的晶粒尺寸最大。

2.2 常化温度对冷轧板退火后成品织构的影响

由图 1 看出, 成品织构主要由 {111}、{112}、{114} 和 {100} 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

表1 常化温度对3.0%Si电工钢3 mm热轧板和0.5 mm退火冷轧板平均晶粒尺寸的影响

Table 1 Effect of normalizing temperature on average grain size of 3 mm hot rolled plate and 0.5 mm annealed cold sheet of 3.0Si electric steel

常化温度/℃	平均晶粒尺寸/ μm	
	热轧板	退火冷轧板 (850℃+950℃退火)
850	60	70
900	80	80
950	95	85
1000	145	105
1050	180	75
1100	200	50

品中 $\{111\}$ 、 $\{112\}$ 和 $\{114\}$ 等面织构减弱,高斯织构增强。

2.3 热轧板常化温度和冷轧板退火温度对磁性能的影响

从图2看出,铁损随热轧板常化温度的变化出现极小值,热轧板常化温度太低时达不到热轧板常化的最佳效果,太高时铁损增加。最佳的热轧板常化温度范围在900℃至1050℃。磁感随热轧板常化温度的提高逐渐增加。高温热轧板常化时铁损增

加与夹杂物在热轧板常化过程中的固溶有关。冷轧板退火再结晶段温度升高到1000℃时铁损显著降低。磁感随冷轧板退火温度的变化与不经过热轧板常化的情况类似,随冷轧板退火温度的升高磁感降低。

3 讨论

热轧板常化温度在1000℃以下时,夹杂物没有明显固溶,在热轧板常化后的冷却过程中或冷轧后再结晶退火过程中弥散析出的细小夹杂物少,对冷轧板再结晶退火时晶粒长大的阻碍作用小。热轧板常化温度在1000℃以上时,夹杂物开始固溶,温度越高,固溶的夹杂物越多,随后弥散析出的细小夹杂物也越多,对冷轧板再结晶退火时晶粒长大的阻碍作用越强。因此,热轧板常化温度在1000℃以上时,随着热轧板常化温度的升高,虽然热轧板的晶粒尺寸增大,但由于细小夹杂物阻碍晶粒长大的作用明显增强,成品的晶粒尺寸反而减小。Paape^[4]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,球形或椭圆形的微细析出物越多。

当热轧板晶粒较大时,冷轧变形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^[5]。因此,热轧板常化温度越高,热轧板晶粒越大,冷轧变形组织中剪切带的分布密度越高,成品组织中高斯织构的强度越高。此外, γ 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,热轧板常化温度越高,热轧板晶粒越大,原始晶界越少,成品中 γ 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

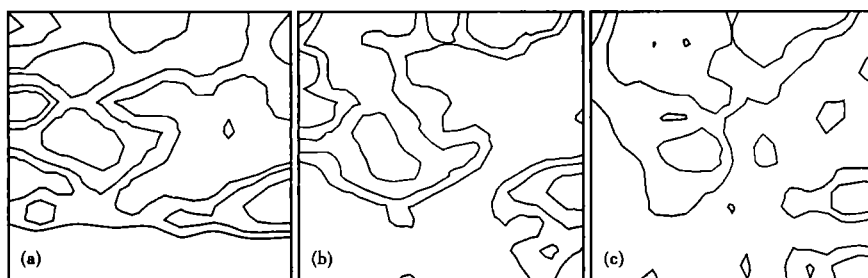


图1 3.0%Si电工钢退火冷轧板取向分布函数 $\phi_2 = 45^\circ$ 截面图(密度水平:1,2,4)热轧板常化温度:(a)850℃;(b)950℃;(c)1100℃

Fig. 1 Pattern of $\phi_2 = 45^\circ$ sections of oriented distribution function of annealed 3.0Si electric steel cold rolled sheet (density level; 1,2,4), hot rolled plate normalized temperature at 850℃ (a), 950℃ (b) and 1100℃ (c)

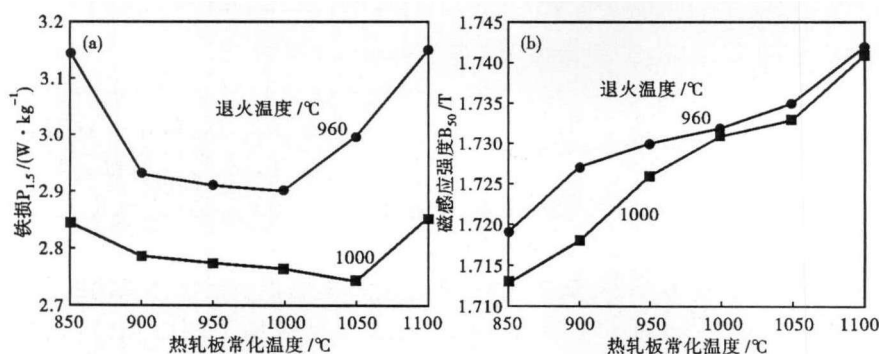


图2 热轧板常化温度和冷轧板退火温度对3.0%Si电工钢(a) $P_{1.5}$;(b) B_{50} 的影响

Fig. 2 Effect of hot rolled plate normalizing temperature and cold rolled sheet annealing temperature on $P_{1.5}$ (a) and B_{50} (b) of 3.0Si electric steel

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1 000 ℃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1 000 ℃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夹杂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。

随着冷轧板退火温度的升高,成品的晶粒尺寸增加,对磁性能不利的{111}织构组分增加,对磁性能有利的{100}和{110}织构组分减少^[6]。磁滞损耗随晶粒尺寸的增加而减小,磁感随{111}织构组分的增加和{100}织构组分减少而降低,因此,随着冷轧板退火温度的升高,铁损降低,磁感也降低。

4 结论

(1)热轧板常化温度小于1 000 ℃时,退火冷轧板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 ℃时,成品的晶粒尺寸最大,热轧板常化温度大于1 000 ℃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)成品织构主要由{111}、{112}、{114}和{110}等织构组成,成品织构的强度比较弱。随着热轧板常化温度的升高,成品中织构强度变弱,特别是{111}、{112}和{114}等织构明显减弱,{110}织构的强度增强。

(3)常化温度太低时达不到常化的最佳效果,太高时铁损增加。最佳的常化温度范围在900 ℃和1 050 ℃之间。磁感随常化温度的提高逐渐增加。高温常化时铁损增加与夹杂物在常化过程中的固溶有关。冷轧板成品退火再结晶段温度对常化后的磁性能特别是铁损也有显著的影响,再结晶段温度升高到1 000 ℃铁损显著降低。

长江学者和创新团队发展计划资助(IRT0720)

参考文献

- 1 张文康,白志浩,毛卫民.退火温度对冷轧无取向硅钢组织结构和磁性能的影响.特殊钢,2006,27(1):15
- 2 金自力,徐向棋.轧制条件对冷轧无取向硅钢织构的影响.特殊钢,2005,26(2):25
- 3 夏兆所,康永林.热轧工艺对冷轧无取向硅钢50W600磁性能的影响.特殊钢,2006,27(6):47
- 4 Paeppe A, Elout K. Effect of Hot Rolling Parameters on the Magnetic Properties of a Low-silicon Ultra-low-carbon Steel. J Magnetics and Magnetic Materials, 1996, 160:129
- 5 Jong-Tae Park, Jerzy A Szpunar. Evolution of Recrystallization Texture in Nonoriented Electrical Steels. Acta Materialia, 2003, 51:3037
- 6 菅瑞雄,张文康,杜振民,等.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.特殊钢,2007,28(6):31

薛志勇(1970-),男,工学博士,工程师,讲师,金属材料加工工艺和机理研究。

收稿日期:2008-05-26

· 特殊钢信息 ·

2008 年中国金属学会特钢冶炼学术委员会年会在西宁召开

为适应当前国内特钢企业的技术进步,提高特钢产品质量、强化节能减排意识,实现特钢企业相互学习、相互促进、共同发展的目标。中国金属学会特钢冶炼学术委员会于2008年7月28日至31日,在西宁特钢召开了“2008年特钢冶炼学术委员会暨特钢学术交流会”。全国40余家特钢企业及相关科研院所负责人共70余位代表参加了会议。在各方面的共同努力下,本次会议取得了圆满成功,代表们对会议的组织、筹备、会议宗旨以及西宁特钢的热情接待给予了高度评价。

会议首先宣读了中国钢铁工业协会领导吴建常

的题为《促进特钢技术发展,满足国家发展需求》的书面讲话,科技部高新司领导黄世兴作了关于特钢发展的讲话。会议特邀特钢冶炼专家及代表对本企业特钢生产及相关特钢冶炼技术的最新研究成果进行了发言及交流,会后组织与会代表参观了西宁特钢炼钢厂。

本次会议收到有关特钢生产、科研方面的技术学术论文30余篇,并编印成《2008年特钢年会论文集》,它代表了国内最近特钢生产技术的进步,对于促进特钢冶炼技术的发展具有一定意义。

(中国金属学会特钢冶炼学术委员会)