

常化和退火工艺对冷轧无取向硅钢高频磁性能和强度的影响

林媛苗晓

(太钢不锈钢股份有限公司技术中心,太原 030003)

摘要 冷轧无取向硅钢(成分:0.003C,2.35Si,0.22Mn,0.011P,0.002S,0.36Al,0.003ON)经890℃或940℃3 min常化的2.3 mm热轧板冷轧成0.35 mm薄板。研究了常化温度和800~920℃3 min退火对该钢高频(400 Hz)磁性能和抗拉强度的影响。结果表明,830~920℃退火时高频铁损 $P_{10/400}$ 值最低,随退火温度增加,晶粒尺寸增大,钢的抗拉强度降低;该钢的最佳热处理工艺为常化温度940℃,退火温度830℃,其抗拉强度 R_m 、高频铁损 $P_{10/400}$ 和磁感应强度 J_{50} 分别为565 MPa,21.5 W/kg和1.69 T。

关键词 冷轧无取向硅钢 常化 退火 高频磁性能 抗拉强度

Effect of Normalizing and Annealing Process on High Frequency Magnetic Properties and Strength of Cold-Rolled Non-Oriented Silicon Steel

Lin Yuan and Miao Xiao

(Technical Center, Taigang Stainless Steel Co Ltd, Taiyuan 030003)

Abstract The cold-rolled non-oriented silicon steel (composition: 0.003C, 2.35Si, 0.22Mn, 0.011P, 0.002S, 0.36Al, 0.003ON) is cold-rolled to 0.35 mm sheet from 2.3 mm hot-rolled plate normalized at 890℃ or 940℃ for 3 min. The effect of normalizing temperature and annealing process at 800~920℃ for 3 min on high frequency (400 Hz) magnetic properties and tensile strength of the steel has been tested and studied. Results show that with annealing at 830~920℃ the high frequency iron loss value $P_{10/400}$ is lowest, and with increasing annealing temperature the grain size increases and tensile strength of steel decreases; the optimum heat treatment process for the non-oriented steel is normalizing at 940℃ and annealing at 830℃, in this case the tensile strength R_m , high frequency iron loss $P_{10/400}$ and magnetic induction J_{50} of steel are respectively 565 MPa, 21.5 W/kg and 1.69 T.

Material Index Cold-Rolled Non-Oriented Silicon Steel, Normalizing, Annealing, High Frequency Magnetic Properties, Tensile Strength

驱动电机是电动汽车^[1]的心脏,电机转子由冷轧无取向硅钢叠片制成。由于驱动电机转速高,而且电动汽车启动和加速时要求高扭矩,转子用铁芯材料需满足高强度和高磁通密度性能。同时,转子高速旋转时,铁损所占功率损失的比重大,因此,电动汽车转子用冷轧无取向硅钢在具备高强度和高磁通密度性能的同时,还需满足高频低铁损性能^[2]。

1 试验方法

试验无取向硅钢采用大生产冷轧板,成分(%):0.003C,2.35Si,0.22Mn,0.011P,0.002S,0.36Al,0.003ON。热轧板厚度为2.3 mm。一部分热轧板890℃常化,另一部分热轧板940℃常化,常化时间均为3 min。常化后一次冷轧至0.35 mm。

每种常化工艺的冷轧板各裁成100片30 mm×300 mm的试料,其中横向、纵向各50片。将同种工艺试样的横向和纵向各取10片组成1组,插入试料架,用试验室的箱式退火炉进行800~920℃3 min退火,退火保护气氛为高纯氩气。

试验后,采用爱泼斯坦方圈检测每组试样的高频(400 Hz)和低频(50 Hz)磁性能,用图像分析软件统计晶粒尺寸(尺寸大小通过统计3张金相图片平均后得出),最后在每组试样中取3片横向试料,裁成30 mm×240 mm规格进行力学性能检测。

2 试验结果

2.1 磁性能

从图1(a)可见,随着退火温度的升高, $P_{10/400}$ 迅速降低;当退火温度升至一定值时, $P_{10/400}$ 降低至最低值;然后,随着退火温度的继续升高, $P_{10/400}$ 反而增加。830~920℃退火时, $P_{10/400}$ 波动小,波动幅度小于0.6 W/kg。当退火温度小于860℃时, $P_{10/400}$ 随着常化温度的升高而降低;当退火温度大于890℃时, $P_{10/400}$ 随着常化温度的升高而增加。从图1(b)中可以看出,随着退火温度的升高, J_{50} 逐渐降低;常化温度提高后,各退火温度对应的 J_{50} 整体高出0.01~0.015 T;退火温度升至890℃后, J_{50} 受温度影响较小,下降趋势趋于平缓。940℃常化冷轧板

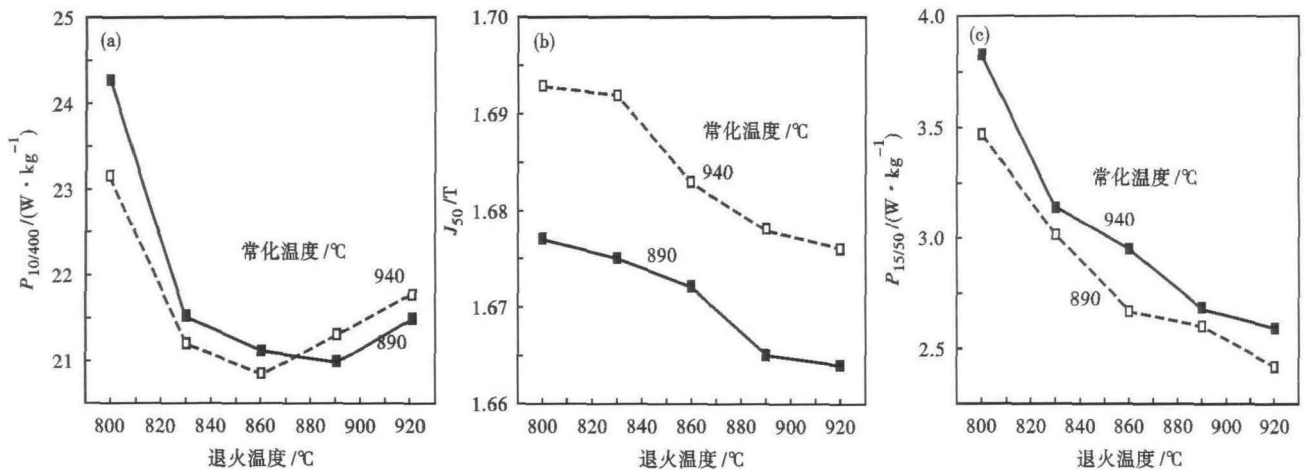


图1 常化和退火温度对冷轧无取向硅钢 400 Hz 高频铁损 $P_{10/400}$ (a) 和磁感应强度 J_{50} (b) 以及 50 Hz 低频铁损 $P_{15/50}$ (c) 的影响
Fig. 1 Effect of normalizing and annealing temperature on high frequency iron loss $P_{10/400}$ (a) and magnetic induction J_{50} (b) as well as 50 Hz low frequency iron loss $P_{15/50}$ (c) of cold-rolled non-oriented silicon steel

在 830 °C 退火时, $P_{10/400} = 21.5$ W/kg, $J_{50} = 1.69$ T。

随着退火温度的升高, $P_{15/50}$ 逐渐降低(图 1c), J_{50} 也逐渐降低。同样常化温度提高后, $P_{15/50}$ 平均降低 0.2 W/kg 左右, J_{50} 提高 0.01 ~ 0.015 T。

相对 400 Hz 时的 J_{50} , 不同退火温度时对应的 50 Hz 的 J_{50} 略高; 由于差值极小(0.001 ~ 0.002 T), 基本可忽略不计。

2.2 晶粒度

2 种常化温度, 5 种退火温度时, 试样均发生完全再结晶。常化温度高时, 常化板晶粒尺寸较高(平均提高 10 μm), 相对应的成品晶粒尺寸也稍高。随着退火温度的升高, 成品的晶粒尺寸递增, 晶粒平均直径也增大, 当退火温度升至 890 °C 后, 晶粒尺寸增幅变缓, 晶粒尺寸相对均匀。如图 2、图 3。

2.3 抗拉强度

图 4(a) 为常化和退火温度对成品晶粒度的影响。随着退火温度的升高, 抗拉强度(R_m) 缓缓下降; 相同退火条件下, 常化温度 940 °C 时试料的抗拉强度比 890 °C 时平均低约 5 MPa, 即 $R_m = 565$ MPa。见图 4(b)。

3 讨论

常化是使热轧板组织均匀, 晶粒和析出物粗化, 钢板强度略有下降, 但常化可以加强 {100} 和 {110} 组分以及减弱 {111} 组分, 使磁性能显著提高, 尤其是 J_{50} 值。常化后随着退火温度的升高, 平均晶粒尺寸增加^[3], 如图 4(a) 所示。

生产中常见的晶粒度在 1 ~ 8 级范围内, 其中 1 ~ 3 级($\Phi 250 \sim 125 \mu\text{m}$) 为粗晶, 4 ~ 6 级($\Phi 88 \sim 44 \mu\text{m}$) 为中等晶粒, 7 ~ 8 级($\Phi 31 \sim 22 \mu\text{m}$) 为细晶^[4]。

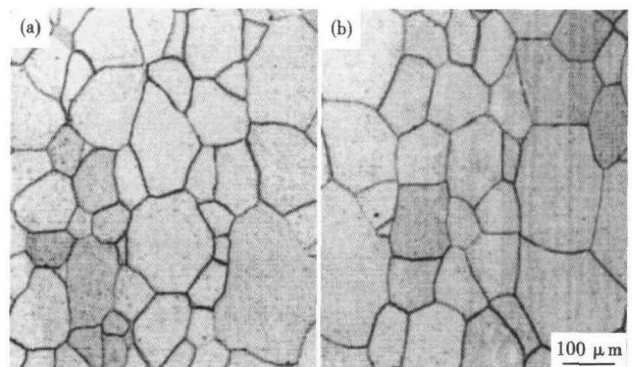


图2 (a) 890 °C (93 μm), (b) 940 °C (103 μm) 常化后无取向硅钢热轧板的晶粒形貌

Fig. 2 Grain morphology of hot-rolled plate of non-oriented silicon steel normalized at 890 °C (a- 93 μm) and at 940 °C (b- 103 μm)

退火温度为 800 °C 时, 晶粒尺寸小, 分别为 18 μm 和 20 μm , 属于细晶范畴, 见图 3(a₁, a₂), 与之相对应的高频铁损 $P_{10/400}$ 稍差; 830 ~ 920 °C 退火温度内生成的晶粒均属于中等晶粒范畴, 且该温度范围各自对应的晶粒尺寸差值小, 与之相对应的高频铁损 $P_{10/400}$ 值也接近; 退火温度每升高 30 °C, 低频铁损 $P_{15/50}$ 降低约 0.3 W/kg, 当温度升至 890 °C 和 920 °C 时, 由于晶粒尺寸接近, 对应的 $P_{15/50}$ 差异小。

冷轧无取向硅钢的铁损 P_T 主要由磁滞损耗 P_h 和涡流损耗 P_e 组成。 P_T 既取决于材料本身化学成分, 也决定于该材料在交变磁场中的工作频率 f 。 P_h 与 f 成正比, P_e 与 f^2 成正比, 故 $P_T = af + bf^2$, a 和 b 为与 f 无关的常数^[5]。随着频率的提高, P_e 在铁损 P_T 所占的比重增加。因此, 和低频铁损相比, 高频铁损中 P_e 的比重将随着频率的升高而逐渐增加; 当频率提高至一定值时, P_e 在高频铁损中的比

重将超过 P_h 所占比重。

当退火温度较低时,由于晶粒尺寸较小, P_e 较低,此时,冷轧无取向硅钢的铁损 P_T 主要以 P_h 为主,当退火温度在较低值范围内升高时,高频铁损 $P_{10/400}$ 和低频铁损 $P_{15/50}$ 均降低,见图1(a)和图1(c);但是,如果频率非常高(例如1000 Hz),即使晶粒尺寸较小,高频铁损仍将随着退火温度的升高而增加。当退火温度升至较高值时,晶粒尺寸增大, P_e 增大;如果冷轧无取向硅钢

工作频率较低, P_e 受 f 影响的增值也小,低频铁损 $P_{15/50}$ 仍将随着退火温度的升高而降低,但由于 P_e 随晶粒尺寸增大而增加,使得 $P_{15/50}$ 降幅趋缓,见图1(c);如果冷轧无取向硅钢工作频率较高, P_e 受 f 影响的增值也增加, P_e 的增幅将逐渐超过 P_h 的降幅,因此,随着退火温度的继续升高, $P_{10/400}$ 将增加,见图1(a)。

在成分和生产工艺不变条件下,高频和低频下 J_{50} 基本无差异,随着退火温度升高,晶粒尺寸增大,磁感应强度降低。当退火温度升至 890 °C 和 920 °C 时,由于晶粒尺寸接近, J_{50} 变化不大。

4 结论

(1) 随着退火温度的升高,高频铁损 $P_{10/400}$ 先降低后升高;退火温度在 830 ~ 920 °C 时, $P_{10/400}$ 存在最低值,且波动小;常化温度高时, $P_{10/400}$ 较好。

(2) 退火温度为 800 °C,成品晶粒尺寸小且不均匀;当退火温度升至 890 °C 后,晶粒尺寸增幅变缓,晶粒尺寸相对均匀, J_{50} 基本不变。

(3) 随着退火温度的降低,成品晶粒尺寸变小,抗拉强度增大;常化温度高时,成品晶粒尺寸略高,抗拉强度略有降低。

(4) 常化温度为 940 °C,退火温度 830 °C 时为本试验中最佳热处理工艺,其中 $R_m = 565$ MPa,

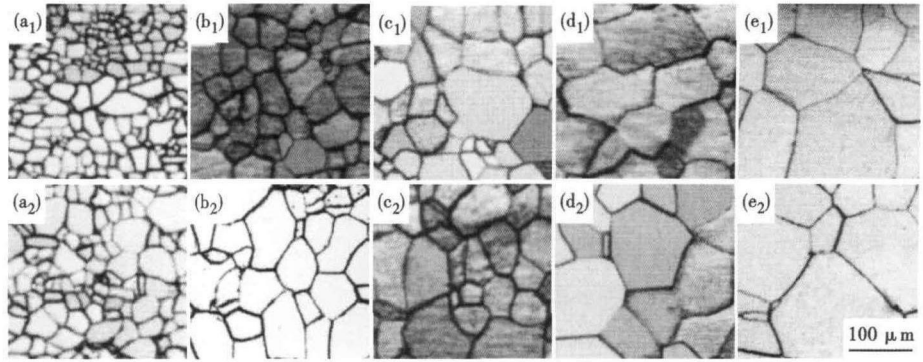


图3 800 °C (a₁-18 μm;a₂-22 μm),830 °C (b₁-40 μm;b₂-47 μm),860 °C (c₁-49 μm;c₂-54 μm),890 °C (d₁-69 μm;d₂-77 μm)和920 °C (e₁-74 μm;e₂-81 μm)退火时冷轧无取向硅钢的晶粒形貌;890 °C常化(a₁,b₁,c₁,d₁和e₁);940 °C常化(a₂,b₂,c₂,d₂和e₂)

Fig. 3 Grain morphology of cold-rolled sheet of non-oriented silicon steel annealed at 800 °C (a₁-18 μm; a₂-22 μm); 830 °C (b₁-40 μm; b₂-47 μm); 860 °C (c₁-49 μm; c₂-54 μm); 890 °C (d₁-69 μm; d₂-77 μm) and 920 °C (e₁-74 μm; e₂-81 μm); normalized at 890 °C (a₁, b₁, c₁, d₁ and e₁) and at 940 °C (a₂, b₂, c₂, d₂ and e₂)

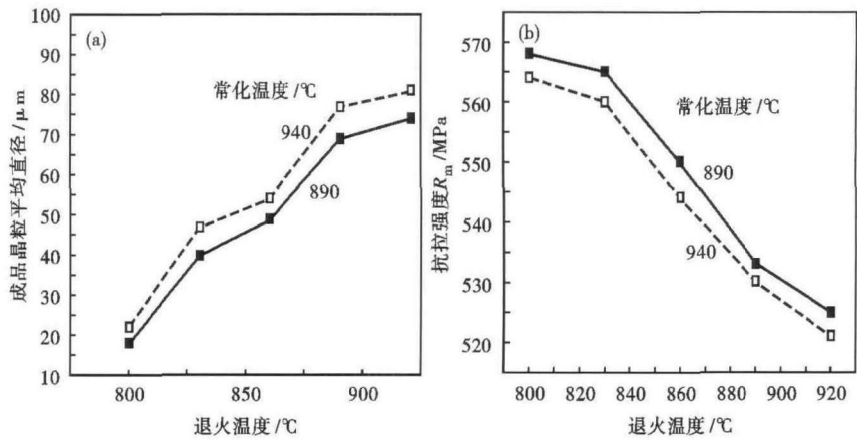


图4 常化和退火温度对冷轧无取向硅钢成品晶粒尺寸(a)和抗拉强度(b)的影响
Fig. 4 Effect of normalizing and annealing temperature on grain size (a) and tensile strength (b) of cold-rolled non-oriented silicon steel sheet products

$$P_{10/400} = 21.5 \text{ W/kg}, J_{50} = 1.69 \text{ T}.$$

参考文献

- [1] 王爱华. 日本开发新能源汽车用高效电工钢产品及应用的浅析[J]. 电工钢, 2012(1): 13-18.
- [2] 庞玮骥. 新型高效马达用无取向电工钢板 JNP 系列的开发[J]. 太钢译文, 2012(2): 42-45.
- [3] 苗晓, 张文康. 退火温度对无取向硅钢组织结构的影响[J]. 太钢科技, 2006(1): 16-18.
- [4] 翁宇庆. 超细晶钢-钢的组织细化理论与控制技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003: 4-9.
- [5] 何忠治. 电工钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012: 51-59.

林媛(1982-),女,硕士(东北大学),工程师,2004年东北大学(本科)毕业,电动汽车电机转子用硅钢的研发。

E-mail: Linyuan@tissco.com.cn

收稿日期:2013-12-09