

退火温度和再结晶比例对0.58Si无取向硅钢0.50 mm 冷轧板性能的影响

林媛¹ 张文康²

(山西太钢不锈钢股份有限公司1技术中心;2冷轧硅钢厂,太原030003)

摘要 无取向硅钢(0.003C,0.58Si,0.20Mn,0.010P,0.002S,0.25Al,0.003ON)0.5 mm冷轧薄板由2.6 mm热轧板冷轧而成。研究了390~820℃退火再结晶组织比例对该钢磁性能、抗拉强度和硬度的影响。结果表明,未发生再结晶时(390~480℃退火),退火温度对抗拉强度和硬度的影响很小;当再结晶组织比例≥70%时(560~820℃退火),降低退火温度能够有效提高抗拉强度,同时不显著恶化磁性能,但对硬度没有影响;当再结晶组织比例<70%时(>480~<560℃退火),降低退火温度使磁性能剧烈恶化,但能够大幅提高抗拉强度和硬度;当退火温度560℃,再结晶比例70%时无取向硅钢的性能为抗拉强度 R_m 470 MPa, HV1硬度值140,铁损 $P_{1.5/50}$ 7.5 W/kg,磁极化强度 J_{50} 1.70 T,综合性能最佳。

关键词 0.58Si无取向硅钢 0.50 mm冷轧板 退火温度 再结晶比例 磁性能 抗拉强度 硬度

Effect of Annealing Temperature and Recrystallized Grain Rate on Properties of 0.50 mm Cold-Rolled Sheet of 0.58Si Non-Oriented Silicon Steel

Lin Yuan¹ and Zhang Wenkang²

(1 Technical Center; 2 Cold Rolling Silicon Works, Shanxi Taigang Stainless Steel Co Ltd, Taiyuan 030003)

Abstract The 0.5 mm cold-rolled sheet of non-oriented silicon steel (0.003C, 0.58Si, 0.20Mn, 0.010P, 0.002S, 0.25Al, 0.003ON) is cold-rolled by 2.6 mm hot-rolled plate. The effect of recrystallized grain rate in sheet annealed at 390~820℃ on magnetic performance, tensile strength and hardness of the steel has been studied. Results show that before crystallization of steel (annealed at 390~480℃), the effect of annealing temperature on tensile strength and hardness of steel is minor; as recrystallized grain rate is ≥70% (annealed at 560~820℃), decreasing annealing temperature is available to effectively increase tensile strength of steel while deterioration of steel's magnetic performance is no-obvious, but has no-effect on hardness of steel; as recrystallized grain rate is less than 70% (annealed at >480~<560℃), with decreasing annealing temperature the steel's magnetic performance deteriorates sharply, but the tensile strength and hardness of steel increase obviously; as the steel anneals temperature at 560℃ with recrystallized grain rate 70%, the comprehensive properties of non-oriented silicon steel are best i. e. tensile strength R_m 470 MPa, HV1 hardness value 140, iron loss $P_{1.5/50}$ 7.5 W/kg and magnetic pole intensity J_{50} 1.70 T.

Material Index 0.58Si Non-Oriented Silicon Steel, 0.50 mm Cold-Rolled Sheet, Annealing Temperature, Recrystallized Grain Rate, Magnetic Performance, Tensile Strength, Hardness

高速电机转子因其转速高故对铁芯用冷轧无取向硅钢的强度和硬度都有很高的要求^[1],考虑到成本和设计因素,对磁性能要求一般比较宽松。固溶强化是目前提高硅钢力学性能最有效的方法,但会显著增加冷轧生产难度和生产成本^[2],前期也曾通过细化晶粒来提高冷轧无取向硅钢的力学性能^[3],但由于工业生产退火温度均在800℃以上,退火组织为再结晶组织,抗拉强度最多提高30~40 MPa,增幅有限。本文将退火温度设定在390~820℃的相对低温区,研究再结晶前、后和完全再结晶后晶粒长大等3个阶段,再结晶组织比例对冷轧无取向硅钢抗拉强度、硬度和磁性能的影响规律。

1 试验方法

试验用无取向硅钢成分(%):0.003C,0.58Si,

0.20Mn,0.010P,0.002S,0.25Al,0.003ON。2.6 mm热轧板一次冷轧至0.50 mm。将冷轧板裁成30 mm×300 mm的试料,插入试料架中,放置在箱式电加热炉内模拟退火,退火气氛为100% N₂,退火时间2 min(表1)。

试验结束后,采用爱泼斯坦方圈检测每套成品试样的磁性能,其中每套试料包含横向、纵向各10片。另外,每组成品试样各取抗拉(30 mm×240 mm,横向),硬度(45 mm×45 mm,维氏硬度HV1)和金相试样(观察面为轧向,光学显微镜,图像分析软件统计)1片。

2 试验结果

2.1 组织

当退火温度在390~480℃时,随着退火温度的

升高,显微组织几乎没有变化,整个断面均为冷轧形变组织,未发生再结晶,见图 1(a,b)。

当退火温度升高至 500 ℃ 时,局部形变带上开始出现再结晶颗粒。随着退火温度的增加,再结晶比例迅速增长;退火温度由 500 ℃ 升至 520 ℃ 时,再结晶比例由 5% 增长至 40%,增幅最高;之后随着退火温度的增加,再结晶比例增幅渐缓。再结晶位置呈现出“先表面,后中间”的顺序。已发生再结晶的晶粒尺寸随退火温度的升高缓慢增大,但整体较小,

表 1 试验无取向硅钢冷轧板的退火温度
Table 1 Annealing temperature of tested cold-rolled sheet of non-oriented silicon steel

样品编号	退火温度/℃	样品编号	退火温度/℃
1#	390	10#	600
2#	420	11#	620
3#	450	12#	650
4#	480	13#	680
5#	500	14#	720
6#	520	15#	750
7#	540	16#	780
8#	560	17#	820
9#	580		

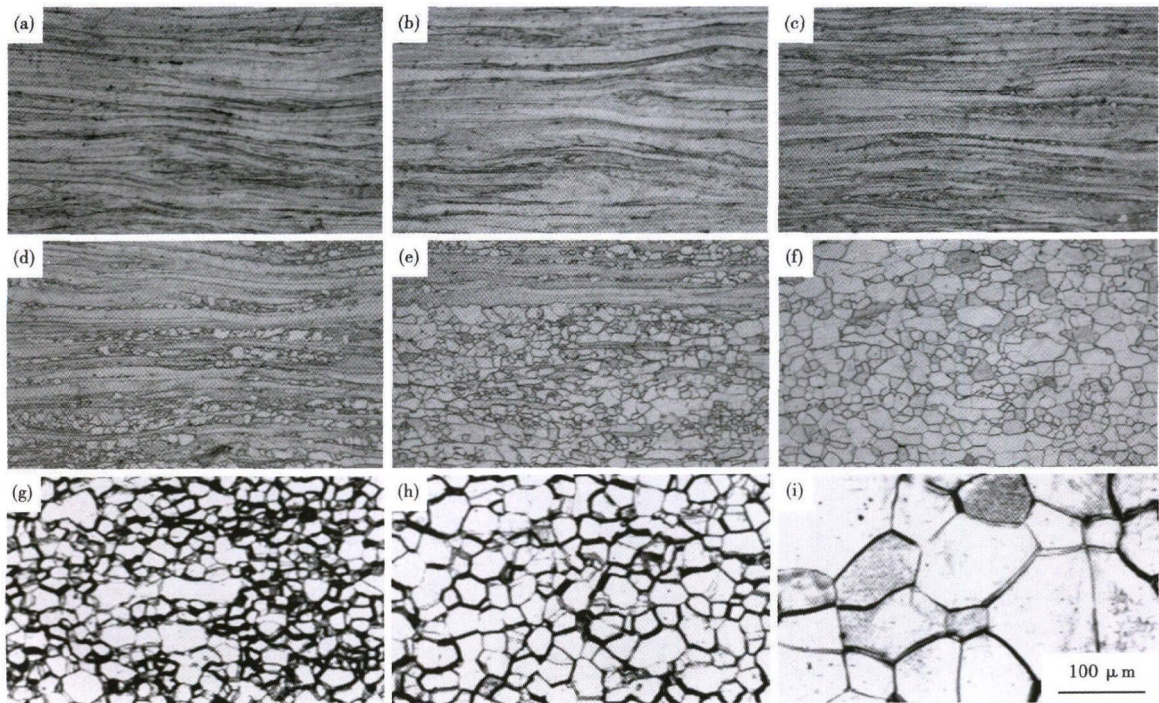


图 1 1#,390 ℃(a),3#,450 ℃(b),5#,500 ℃(c),7#,540 ℃(d),9#,580 ℃(e),11#,620 ℃(f),13#,680 ℃(g),14#,720 ℃(h)和17#,820 ℃(i)退火后无取向硅钢冷轧板的组织形貌

Fig. 1 Morphology of structure of non-oriented silicon steel cold-rolled sheet annealed at 390 ℃, No1 (a), 450 ℃, No3 (b), 500 ℃, No5 (c), 540 ℃, No7 (d), 580 ℃, No9 (e), 620 ℃, No11 (f), 680 ℃, No13 (g), 720 ℃, No14 (h) and 820 ℃, No17 (i)

平均尺寸小于 20 μm,见图 1(c~e)、图 2(a,b)。

当退火温度升高至 620 ℃ 时发生完全再结晶,但断面中间位置仍有部分颗粒呈拉伸变形状态,而且晶粒尺寸不均匀,见图 1(f,g)。当退火温度升高至 720 ℃ 时,晶界恢复平直,晶粒尺寸均匀,平均晶粒尺寸 30 μm,见图 1(h)和图 2(b)。

晶界恢复平直后,退火温度由 720 ℃ 升高至 820 ℃ 区间,晶粒迅速长大;退火温度由 800 ℃ 升至 820 ℃ 时,晶粒平均尺寸由 52 μm 增长至 112 μm。该退火温度区间晶粒尺寸再次变得不均匀,局部出现非常大的晶粒,见图 1(i) 和图 2(b)。

2.2 抗拉强度和硬度

图 3(a,b)为退火温度和再结晶比例对无取向

硅钢冷轧板抗拉强度(R_m)和硬度的影响。再结晶开始前,断面为冷轧变形组织,冷轧板的抗拉强度和硬度非常高。退火温度小于 500 ℃ 时,随着退火温度的增加,再结晶比例均为 0,抗拉强度随着退火温度的增加逐渐降低:390 ℃ 和 420 ℃ 时冷轧板抗拉强度 845 MPa 和 850 MPa,450 ℃ 时抗拉强度降低至 825 MPa,480 ℃ 时降低至 771 MPa;冷轧板的 HV1 硬度值为 220~230。

退火温度升高至 500 ℃ 时再结晶开始,冷轧板的抗拉强度剧烈降低至 590 MPa;与 420 ℃ 时相比平均降低 250 MPa,与 480 ℃ 时相比平均降低 180 MPa。完全再结晶前,随着再结晶比例的增加,抗拉强度继续下降;每升高 20 ℃,抗拉强度平均下降

37 MPa, 再结晶比例达到 95% 时, 抗拉强度降低至 400 MPa。完全再结晶时, 抗拉强度 404 MPa。随着退火温度的增加, 抗拉强度以非常小的幅度下降, 进入平台期。因此, 95% 的再结晶比例是再结晶后抗拉强度的转折点。

再结晶比例为 5% 和 40% 时, 与再结晶前相比, 硬度未发生变化; 再结晶比例增加至 55% 时, 硬度由 230 剧烈降低至 163;

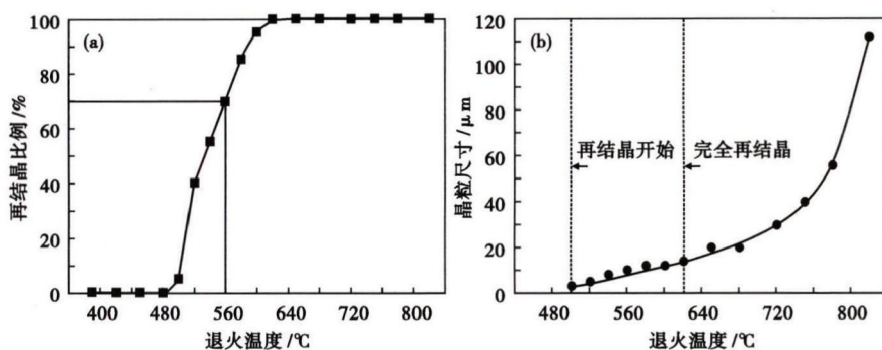


图2 退火温度对无取向硅钢冷轧板再结晶比例(a)和晶粒尺寸(b)的影响
Fig.2 Effect of annealing temperature on recrystallized grain rate (a) and grain size (b) in cold-rolled sheet of non-oriented silicon steel

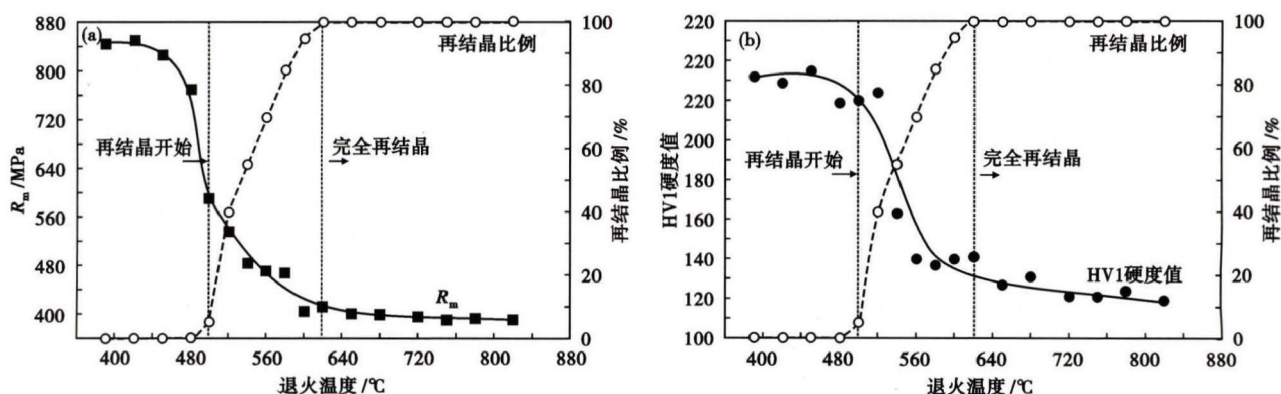


图3 退火温度和再结晶比例对无取向硅钢冷轧板抗拉强度(a)和硬度(b)的影响

Fig.3 Effect of annealing temperature and recrystallized grain rate on tensile strength (a) and hardness (b) of cold-rolled sheet of non-oriented silicon steel

再结晶比例增加至 70% 时, 硬度小幅跌至 140; 随着再结晶比例的继续增加, 硬度值保持不变, 进入第一个平台期, 直到完全再结晶。因此, 70% 的再结晶比例为再结晶后硬度的转折点。完全再结晶时, HV1 硬度值小幅下跌: 由 139 下降至 126, 并随着退火温度的增加基本保持不变, 进入第二个平台期。

2.3 磁性能

图 4(a, b) 显示了退火温度和再结晶比例对该钢冷轧板磁极化强度 J_{50} 和铁损 $P_{1.5/50}$ 的影响规律。再结晶前的退火温度范围内, 磁极化强度和铁损都很差, 随着退火温度的升高, 磁极化强度和铁损都得到大幅改善: J_{50} 增加 0.09 T, $P_{1.5/50}$ 降低 2.7 W/kg。

当再结晶比例小于 70% 时, 磁极化强度和铁损随着再结晶比例的增加而得到改善; 与未发生再结晶阶段相比, 改善幅度减小; 当再结晶比例达到并超过 70% 后, 随着再结晶比例的增加, 磁极化强度和铁损的改善幅度继续减少并趋于平缓, 分别进入各自的第一平台期: J_{50} 增幅不足 0.01 T, $P_{1.5/50}$ 降幅

0.7 W/kg。因此, 70% 的再结晶比例为再结晶后磁性能的转折点。

完全再结晶初期, 磁极化强度随着退火温度的升高由 1.71 T 快速增加至 1.76 T, 铁损则随着退火温度的升高而继续下降; 当退火温度升高至 720 °C 时, 磁极化强度和铁损随着退火温度的继续升高改善幅度很小: J_{50} 一直保持在 1.76T 左右, $P_{1.5/50}$ 由 4.7 W/kg 缓慢降低至 4.3 W/kg, 降幅仅有 0.4 W/kg, 进入磁极化强度和铁损的第二平台期。

3 讨论

冷轧无取向硅钢最终退火工艺的目的是通过再结晶消除冷轧过程中产生的应变, 并促使晶粒长大, 以保证磁性能满足用户要求, 另外, 通过退火的小张力控制可以保证钢带更加平整。

回复阶段即未发生再结晶的阶段, 它是空位迁移消失、位错聚合、互相抵消的过程^[4], 见图 1(a, b)。经冷加工变形的金属通常在较低的温度范围就开始回复, 冷轧板中点缺陷(空位)和加工应变通

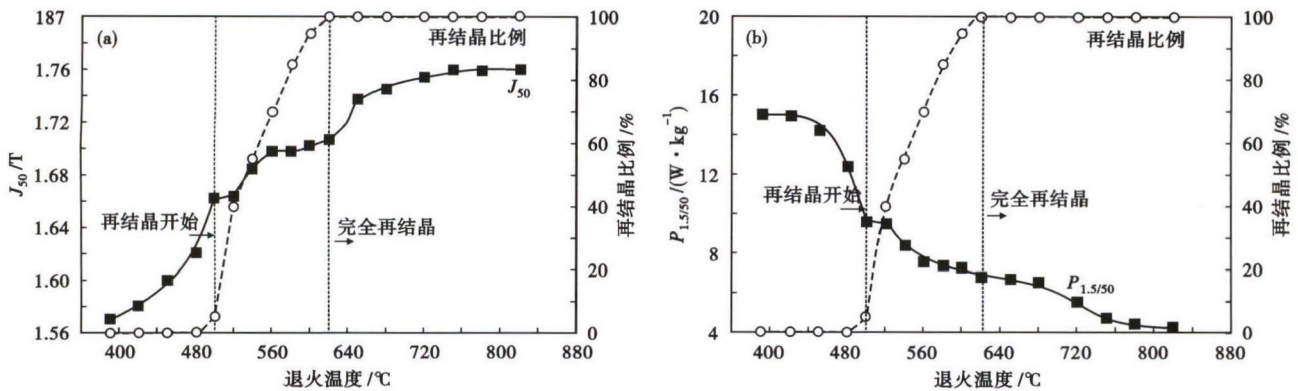


图 4 退火温度和再结晶比例对无取向硅钢冷轧板磁极化强度 J_{50} (a) 和铁损 $P_{1.5/50}$ (b) 的影响

Fig. 4 Effect of annealing temperature and recrystallized grain rate on magnetic pole intensity J_{50} (a) and iron loss $P_{1.5/50}$ (b) of cold-rolled sheet of non-oriented silicon steel

过低温回复能够基本消除^[5],但由于机械性能对点缺陷不敏感,而且再结晶开始前位错密度因退火温度的增加降幅不大,所以该阶段抗拉强度和硬度虽有所下降,但下降不大或基本保持不变,见图 3(a, b)。回复阶段冷轧板大部分应力得以消除,使得硅钢磁性能得到大幅改善,见图 4(a, b)。

钢板在轧制过程中,表层主要是通过剪切发生变形,位错密度大,储能高,中间部分则只是受到压缩^[4];另外退火时表层区域优先受热;因此,再结晶时首先在表层附近区域形核,中心区域形核要稍晚一些,见图 1(c~e)。再结晶比例不超过 70% 时,能同时获得比较高的抗拉强度和硬度,见图 3(a, b)。再结晶后,由于产品内部仍有残余应力,同时晶粒缺陷多且晶粒拉长变形,和再结晶前相比,磁极化强度和铁损将随着退火温度的升高继续得到改善,并随着应力和晶粒缺陷的减少,改善幅度趋于平缓直至完全再结晶,其中 70% 的再结晶比例为磁性能平台开始点,见图 4(a, b)。

当退火温度升高至 720 °C 时,变形颗粒消失,晶界恢复平直,晶粒大小分布均匀,晶粒变形缺陷完全消失,磁性能均达到再结晶后的最优值。随着退火温度的继续增加,晶粒开始长大,磁滞损耗降低,铁损 $P_{1.5/50}$ 降低。这个阶段由于晶粒缺陷和应力已基本消除,所以铁损降幅有限;磁极化强度的大小主要和织构及成分相关,晶粒尺寸对其影响较小,而且本实验最高温度仅 820 °C,所以完全再结晶、晶界平直后,磁极化强度波动很小。

综合考虑再结晶比例对机械性能和磁性能的影响,认为再结晶比例为 70% 时为最佳选择,该点为抗拉强度和磁性能的转折点:抗拉强度 (R_m) 为 470 MPa, HV1 硬度值为 140, 铁损 $P_{1.5/50}$ 为 7.5 W/kg, 磁

极化强度 J_{50} 为 1.70 T。与 820 °C 工业生产退火相比,铁损 $P_{1.5/50}$ 增加 3.3 W/kg, 磁极化强度 J_{50} 降低 0.06 T, 但抗拉强度增加 83 MPa, 硬度值增加 21。当再结晶比例小于 70% 时,强度和硬度大幅增高,但磁性能跌出平台期急剧恶化;当再结晶比例大于 70% 时,磁性能改善,但强度开始快速降低。

4 结论

(1) 未发生再结晶时,无取向硅钢冷轧板的抗拉强度随着退火温度的降低缓慢下降,但降幅很小;硬度基本不变。

(2) 退火温度为 560 °C 再结晶比例 70% 时是高速电机转子用钢最佳性能点:抗拉强度 470 MPa, HV1 硬度值 140, 铁损 $P_{1.5/50}$ 7.5 W/kg, 磁极化强度 J_{50} 为 1.70 T。当再结晶比例小于 70% 时,强度和硬度大幅增高,但磁性能急剧恶化;当再结晶比例大于 70% 时,磁性能改善,但强度开始快速降低。

参考文献

- [1] 王凤翔. 高速电机的设计特点及相关技术研究[J]. 沈阳工业大学学报, 2006, 28(3): 258-264.
- [2] 龚 坚, 罗海文. 新能源汽车驱动电机用高强度无取向硅钢片的研究与进展[J]. 材料工程, 2015, 43(6): 102-112.
- [3] 林 媛, 苗 晓. 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[J]. 特殊钢, 2014, 35(3): 65-67.
- [4] 张正贵. 无取向硅钢织构与性能的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2007: 31-105.
- [5] 何忠治. 电工钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012: 77-110.

林 媛(1982-), 女, 硕士(2008 年东北大学), 工程师, 2004 年东北大学(本科)毕业, 高效硅钢薄板开发。

E-mail: linyuan@tisco.com.cn

收稿日期: 2017-02-05