

## 二次冷轧的中间退火温度对 2.3Si 无取向硅钢组织和性能的影响

苗 晓<sup>1,2</sup> 卫英慧<sup>1</sup> 张文康<sup>2</sup> 王新宇<sup>2</sup>

(太原理工大学材料学院,太原 030024;2 太原钢铁(集团)有限公司技术中心,太原 030003)

**摘 要** 试验 2.3Si 无取向硅钢(成分:0.003C,2.30Si,0.16Mn,≤0.020P,≤0.005S,0.54Al)冷轧板由常化和未常化的 2.5 mm 热轧板冷轧至 0.6 mm(压下率 76%),经 750~950 °C 2.5 min 中间退火后再冷轧至 0.5 mm(压下率 16.7%),成品板经 890 °C +960 °C 2.5 min 退火。研究了中间退火温度对该钢晶粒尺寸、组织和磁性能的影响。结果表明,随中间退火温度的升高,二次冷轧前晶粒和成品晶粒增大,成品中不利织构组分 {111} 和 {112} 减弱,磁性能得到改善。热轧板经过常化时的磁性能明显好于未经常化时的磁性能,但中间退火温度较高时常化对磁性能的有利作用减弱。

**关键词** 2.3Si 无取向硅钢 二次冷轧 中间退火 晶粒尺寸 织构 磁性能

## Effect of Intermediate Annealing Temperature between Double Cold Reduction on Structure and Performance of 2.3Si Non-Oriented Silicon Steel

Miao Xiao<sup>1,2</sup>, Wei Yinghui<sup>1</sup>, Zhang Wenkang<sup>2</sup> and Wang Xinyu<sup>2</sup>

(1 College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024;  
2 Technical Center, Taiyuan Iron and Steel (Group) Co Ltd, Taiyuan 030003)

**Abstract** The test cold sheet of 2.3Si non-oriented silicon steel (成分:0.003C, 2.30Si, 0.16Mn, ≤0.020P, ≤0.005S, 0.54Al) is first cold-rolled from normalized and un-normalizing 2.5 mm hot-rolled plate to 0.6 mm sheet (reduction 76%), then intermediate annealed at 750~950 °C for 2.5 min and double cold-rolled to 0.5 mm sheet (reduction 16.7%), the finished sheet annealed at 890 °C +960 °C for 2.5 min. Effect of the intermediate annealing temperature on grain size, texture and magnetic performance of the steel has been studied. Results show that with increasing intermediate annealing temperature the grain size before double cold-rolling and finished product increases, the adverse {111} and {112} texture components in finished products decrease and the magnetic performance improves. The magnetic performance of sheet cold-rolled by normalized hot-rolled plate is obviously better than that by un-normalized hot-rolled plate, but with higher intermediate annealing temperature the beneficial effect of normalizing on magnetic performance of sheet weakens.

**Material Index** 2.3Si Non-Oriented Silicon Steel, Double Cold-Rolling, Intermediate Annealing, Grain Size, Texture, Magnetic Performance

高牌号冷轧无取向硅钢主要用作大中型电机、发电机等的铁芯,主要磁性能指标是铁损和磁感。铁损和磁感属于组织敏感磁性<sup>[1]</sup>,化学成分、晶粒尺寸、夹杂物、晶体织构等因素都对磁性能有显著的影响。内部组织结构是由实际生产工艺决定的,尤其采用两次冷轧工艺生产高牌号无取向硅钢时,冷轧前的热轧板常化处理 and 轧制过程的中间退火处理对无取向硅钢组织结构的演变和磁性能的最优化起着直接而重要的作用。

### 1 试验过程

选取厚度为 2.5 mm、含 Si 量为 2.3% 的大生产热轧板(表 1)。其中一半试验料未经常化,另一半试验料在实验室箱式炉中进行常化,常化温度 900

°C,时间 3 min。2.5 mm 厚热轧板酸洗后冷轧到 0.6 mm,第 1 次冷轧压下率 76%。然后在连续退火炉中进行 750~950 °C 2.5 min 中间退火,中间退火后第 2 次冷轧到 0.5 mm,第 2 次冷轧压下率 16.7%,并进行 890 °C +960 °C 2.5 min 最终退火,两次退火的气氛都是干的分解氨。退火后的试样使用光学显微镜观察金相组织,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。

表 1 试验用无取向硅钢化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of test non-oriented silicon steel / %

C	Si	Mn	P	S	Al
0.003	2.30	0.16	≤0.020	≤0.005	0.54

使用西门子 D-5000 型 X 射线衍射仪对冷轧和退火后试样的织构进行测量,测量时使用 Cu 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)。

## 2 试验结果

### 2.1 中间退火后和成品的组织

从图 1 可以看出,0.6 mm 无取向硅钢板在第 2 次冷轧前晶粒大小随中间退火温度的升高增大。图 1 也显示对于相同的中间退火温度,热轧板在 900 °C 常化能增加第 2 次冷轧前的晶粒大小。

从图 2 可以看出,0.5 mm 试验 2.3Si 无取向硅钢板成品晶粒大小随中间退火温度的升高增大。图 2 显示对于相同的中间退火温度,热轧板在 900 °C 常化能增加成品的晶粒大小。

### 2.2 成品结构

由图 3 可以看出,成品结构的强度比较弱。随着中间退火温度的升高, $\{111\}$ 、 $\{112\}$  面织构减弱。图 3 也显示对于相同的中间退火温度,成品表面和中间的织构分布不同,例如,中间退火温度 750 °C 时,成品表面的主要织构组分是  $\{111\} \langle 112 \rangle$ 、 $\{112\} \langle 110 \rangle$  和  $\{100\} \langle 110 \rangle$ ,中间厚度处的主要织构组分是  $\{111\} \langle 110 \rangle$ ,说明织构在厚度方向的分布不均匀,由此可知,随着中间退火温度的升高,表面和中间的不利织构都减弱。

### 2.3 磁性能

从图 4 可以看出,0.6 mm 2.3Si 无取向硅钢板随中间退火温度的升高,铁损逐渐减小,磁感逐渐增加。在中间退火温度相同的情况下,热轧板经过常化时的磁性能明显好于未经常化时的磁性能,但中间退火温度较高时常化对磁性能的有利作用减弱。

## 3 讨论

冷轧板进行中间退火和成品退火实质是依靠激

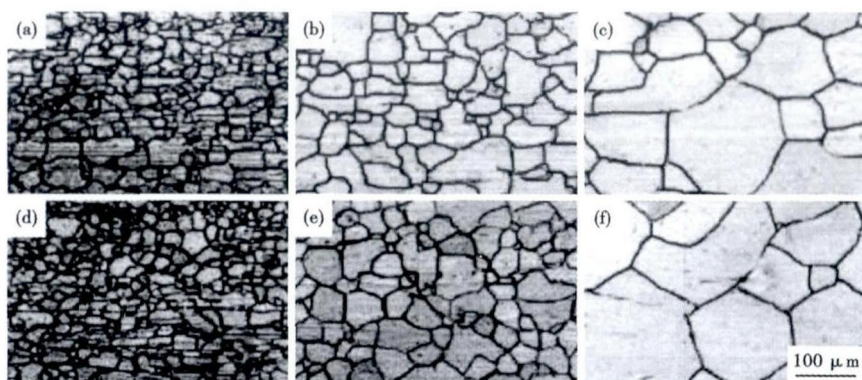


图 1 二次冷轧前 0.6 mm 试验 2.3Si 无取向硅钢板中间退火后组织形貌,常化-中间退火温度/°C:(a)未常化-750;(b)未常化-850;(c)未常化-950;(d)900-750;(e)900-850;(f)900-950

Fig. 1 Structure morphology of 0.6 mm test 2.3Si non-oriented silicon steel sheet after intermediate annealing for secondary cold rolling, normalizing-intermediate annealing temperature /°C:(a) un-normalizing-750;(b) un-normalizing-850;(c) un-normalizing-950;(d) 900-750;(e) 900-850;(f) 900-950

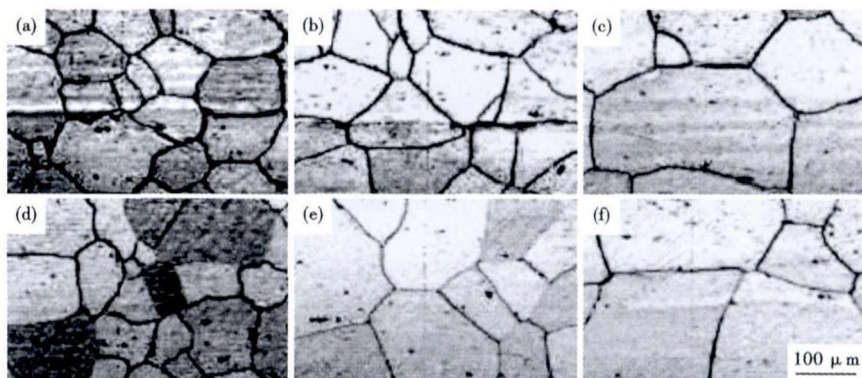


图 2 0.5 mm 试验 2.3Si 无取向硅钢板成品 890 °C + 960 °C 退火后组织形貌,常化-中间退火温度/°C:(a)未常化-750;(b)未常化-850;(c)未常化-950;(d)900-750;(e)900-850;(f)900-950

Fig. 2 Structure morphology of 0.5 mm test 2.3Si non-oriented silicon steel finished sheet after annealing at 890 °C + 960 °C, normalizing-intermediate annealing temperature /°C:(a) un-normalizing-750;(b) un-normalizing-850;(c) un-normalizing-950;(d) 900-750;(e) 900-850;(f) 900-950

活能使高储能不稳定的形变组织转化为低储能稳态的再结晶组织的过程,即发生回复、再结晶及晶粒长大的过程<sup>[2-3]</sup>。再结晶过程是通过形核和长大进行的,因此等温再结晶曲线为典型 S 型曲线。曲线的开始部分相当于形成稳定再结晶晶核的孕育期。然后是新晶粒以近似恒定速率的快速长大阶段。再延长时,当再结晶体积分数很大并接近完成时,由于许多新晶粒相遇,使再结晶速率(即新晶粒平均长大速率)下降<sup>[4]</sup>。

随退火温度的升高,完成再结晶所需的时间缩短,在退火时间不变的条件下,再结晶完成后晶粒长大的时间相对增加了。在二维晶粒长大情况下,等

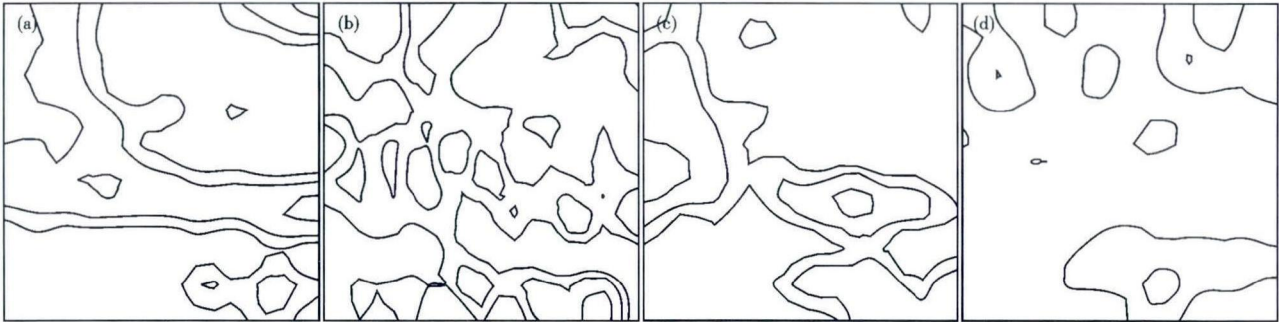


图 3 0.5 mm 试验 2.3Si 无取向硅钢成品板取向分布函数  $\Phi_2 = 45^\circ$  截面图(密度水平 1,2,4):未常化,中间退火- (a)750 °C,表面;(b)950 °C,表面;(c)750 °C,厚度1/2;(d)950 °C,厚度1/2

Fig.3 Orientation distribution function of 0.5 mm test 2.3Si non-oriented silicon steel finished sheet,  $\Phi_2 = 45^\circ$  section view (level 1, 2, 4): un-normalizing, intermediate annealing at (a) 750 °C, surface; (b) 950 °C, surface; (c) 750 °C, thickness 1/2; (d) 950 °C, thickness 1/2

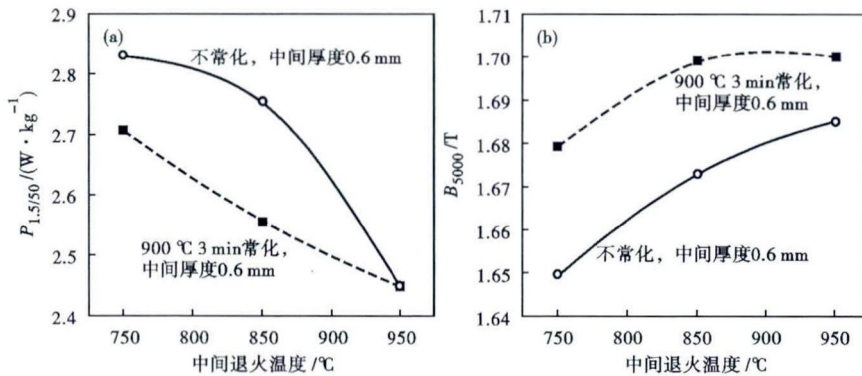


图 4 中间退火温度对 2.3Si 无取向硅钢成品板磁性能(a)  $P_{1.5/50}$  和(b)  $B_{5000}$  的影响

Fig.4 Effect of intermediate annealing temperature on magnetic performance  $P_{1.5/50}$  (a) and  $B_{5000}$  (b) of 2.3Si non-oriented silicon steel finishing sheet

晶粒长大动力学遵从经验公式(1)<sup>[5]</sup>:

$$D = Kt^\eta \quad (1)$$

式中: $D$ - 平均晶粒直径; $T$ - 退火时间; $K, \eta$ - 与材料和温度有关的参数。

在其他条件相同时,原始晶粒越细,再结晶后晶粒也越细。常化工艺可使热轧板原始组织变得粗大,因此,在中间退火温度相同的情况下,热轧板 900 °C 常化后二次冷轧前晶粒更粗大。

由于二次冷轧形变量只有 16.7%,冷轧储能较低,再结晶晶粒的择优取向不明显,所以成品中织构强度比较弱。冷轧时在整个板厚方向上变形程度不同,储能也不同,从而造成织构分布不均匀。中间退火温度高,二次冷轧前原始晶粒粗大,二次冷轧形变组织中易形成更多的剪切带。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。因此,随中间退火温度的升高,成品板中不利织构组分

减弱。

随着中间退火温度的升高,成品的晶粒尺寸增加,对磁性能不利的织构减弱,所以,磁性能随中间退火温度的升高而改善。中间退火温度高时,相对于常化温度而言,中间退火温度对一次冷轧后的组织影响更大,使未常化和常化热轧板二次冷轧前的组织趋于一致,所以常化对磁性能的有利作用减弱。

#### 4 结论

随中间退火温度的升高,成品晶粒增大,成品中不利织构组分减弱,磁性能得到改善。热轧板常化后的磁性能明显好于未经常化时的磁性能,但中间退火温度较高时常化对磁性能的有利作用减弱。

#### 参考文献

- [1] 何忠治. 电工钢[M]. 北京:冶金工业出版社,1997.
- [2] 毛卫民,张新明. 晶体材料织构定量分析[M]. 北京:冶金工业出版社,1995.
- [3] Hou Chun-Kan. Effect of Aluminum on the Magnetic Properties of Lamination Steels[J]. Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Magnetic Science, 1996, 32(2): 471-477.
- [4] Shiozaki M, Kurosaki Y. The Effects of Grain Size on the Magnetic Properties of Non-oriented Electrical Steel Sheets[J]. Journal of Materials Engineering, 1989, 11(1): 37-43.
- [5] 王波. 无取向电工钢晶粒长大对织构和磁性的影响[J]. 金属功能材料, 2004, 11(3): 16-18.

苗 晓(1979-),男,工程师,2004年四川理工大学毕业,磁性材料研究。E-mail: miaoxiao@tisco.com.cn

收稿日期:2013-09-27