

## 退火温度对冷轧无取向硅钢组织结构和磁性能的影响

张文康<sup>1,2</sup> 毛卫民<sup>2</sup> 白志浩<sup>3</sup>

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

3 上海电大南汇分校,上海 201300)

**摘要** 研究了成分为0.003%C-1.6%Si的0.5 mm无取向冷轧板850~1 000℃退火后的晶粒、织构、铁损和磁感应强度。试验结果表明,随退火温度增高,晶粒的平均尺寸由850℃23 μm增加至1 000℃115 μm,铁损由850℃4.36 W/kg降低至1 000℃3.35 W/kg,磁感应强度在920℃退火达到最大值1.732 T。随退火温度继续升高,磁感应强度逐渐降低至1 000℃1.717 T。

**关键词** 无取向硅钢 退火温度 磁性能 晶粒 织构

## Influence of Annealing Temperature on Structure, Texture and Magnetic Properties of Cold Rolled Non-Oriented Silicon Steel

Zhang Wenkang<sup>1,2</sup>, Mao Weimin<sup>2</sup> and Bai Zhihao<sup>3</sup>

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

2 Department of Materials and Science, University of Science and Technology, Beijing 100083;

3 Nanhui School, Shanghai Television University, Shanghai 201300)

**Abstract** The grain size, texture, iron loss and magnetic induction of 0.5 mm 0.003C-1.6Si non-oriented silicon steel cold rolled sheet annealed at 850~1 000℃ have been studied. The test results showed that with annealing temperature increasing the average grain size increased from 23 μm at 850℃ to 115 μm at 1 000℃, the iron loss decreased from 4.36 W/kg at 850℃ to 3.35 W/kg at 1 000℃; and the magnetic induction was up to maximum value 1.732 T at 920℃, with annealing temperature further increasing the magnetic induction gradually decreased to 1.717 T at 1 000℃.

**Material Index** Non-Oriented Silicon Steel, Annealing Temperature, Magnetic Properties, Grain Size, Texture

冷轧无取向硅钢主要用作大中型电机、发电机以及微电机、镇流器和小型变压器等的铁芯,主要磁性能指标是铁损和磁感。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,尤其最终连续退火温度对无取向硅钢组织结构的演变和磁性能的最优化起着重要作用。本实验研究了连续退火温度对1.6%Si无取向硅钢晶粒尺寸、晶体织构以及磁性能的影响,并对有关机理进行了分析。

### 1 试验过程

选取厚度为0.5 mm、0.003%C-1.6%Si的大生产冷轧板,在小型连续退火炉中进行连续退火,退火温度分别为850,880,920,960,1 000℃,退火时间均为2 min。由于原始碳含量较低,退火气氛使用干的分解氨。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,然后采用极数展开法计算试样的取向分布函数(ODF)。磁性能采用单片试验测量方法测试,从退火后的钢板中沿纵横向切取50 mm×50 mm的试样,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 退火温度对晶粒大小及均匀性的影响

图1显示不同温度退火后钢板的再结晶组织。对应于温度850,880,920,960,1 000℃的平均晶粒尺寸分别为23,42,65,83,115 μm。从图1可看出,随着退火温度的升高,平均晶粒尺寸增加,并且晶粒尺寸的均匀性也随退火温度的升高而提高。

#### 2.2 退火温度对成品织构的影响

图2显示冷轧板和不同温度退火后成品的取

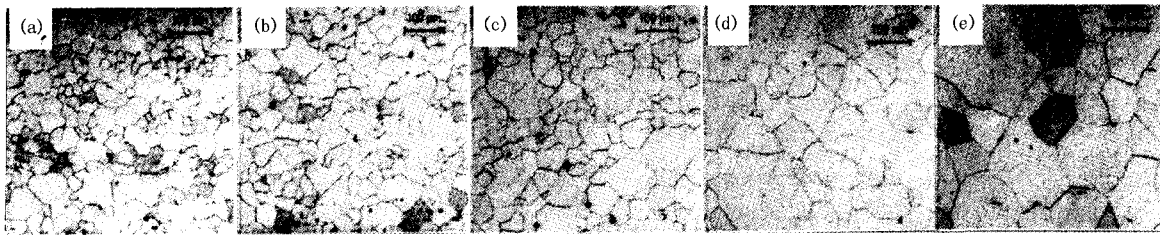


图 1 退火温度对无取向硅钢晶粒尺寸的影响: (a) 850 °C; (b) 880 °C; (c) 920 °C; (d) 960 °C; (e) 1000 °C  
 Fig.1 Effect of annealing temperature on grain size of non-oriented silicon steel: (a) 850 °C; (b) 880 °C; (c) 920 °C; (d) 960 °C; (e) 1000 °C

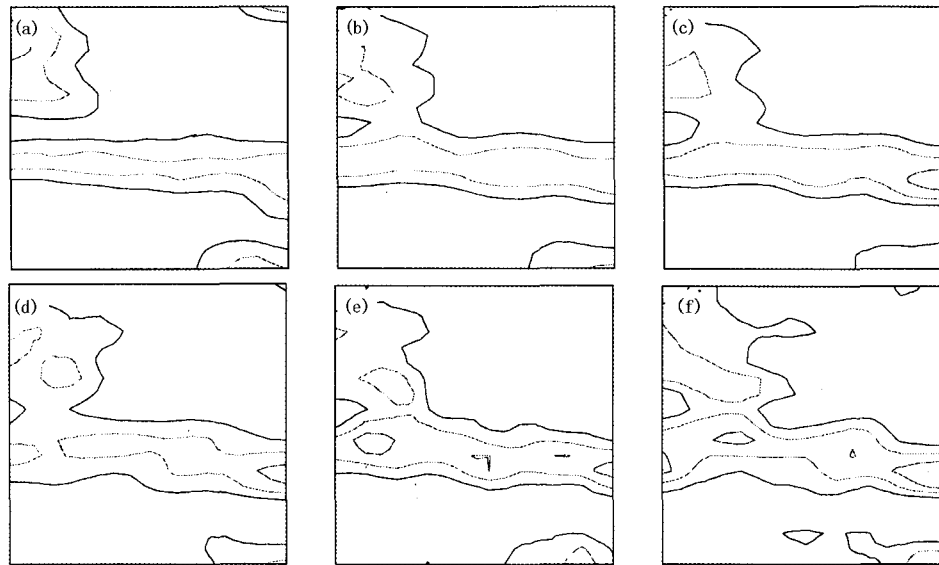


图 2 无取向硅钢冷轧及不同温度退火后取向分布函数  $\Phi_2 = 45^\circ$  截面图(级别: 2, 4, 6, 8): (a) 冷轧板; (b) 850 °C; (c) 880 °C; (d) 920 °C; (e) 960 °C; (f) 1000 °C  
 Fig.2  $\Phi_2 = 45^\circ$  section of oriented distribution function showing cold-rolled and recrystallization textures at different annealing temperature (levels: 2, 4, 6, 8): (a) cold rolled; (b) 850 °C; (c) 880 °C; (d) 920 °C; (e) 960 °C; (f) 1000 °C

向分布函数  $\Phi_2 = 45^\circ$  截面图。从图 2(a) 可以看出, 冷轧结构主要由  $\gamma$  纤维和  $\alpha$  纤维组成,  $\gamma$  纤维包括  $\{111\}\langle 112\rangle$  和  $\{111\}\langle 110\rangle$  织构分量,  $\alpha$  纤维包括  $\{111\}\langle 110\rangle$ 、 $\{112\}\langle 110\rangle$  和  $\{100\}\langle 110\rangle$  织构分量, 其中  $\{112\}\langle 110\rangle$  分量的强度最高。此外, 冷轧结构中包含高斯织构, 但强度较弱。退火后的结构与冷轧结构相比, 退火后  $\alpha$  纤维织构明显减弱, 特别是  $\{100\}\langle 110\rangle$  织构组分基本消失, 高斯织构附近的组分变化不大。退火后的主要织构组分是  $\gamma$  纤维织构, 但  $\{111\}\langle 112\rangle$  和  $\{111\}\langle 110\rangle$  组分的强度随退火温度的变化不同。从图 2 可看出, 随着退火温度的提高,  $\{111\}\langle 112\rangle$  组分强度逐渐加强, 但  $\{111\}\langle 110\rangle$  组分强度不是随着退火温度的提高而单调变化。在低温段 (小于 920 °C),  $\{111\}\langle 110\rangle$  组分强度随退火温度的升高而减弱; 在高温段 (大于 920 °C),  $\{111\}\langle 110\rangle$  组分强度随退火温

度的升高而加强, 退火温度为 920 °C 时,  $\{111\}\langle 110\rangle$  组分强度最弱。由于 920 °C 退火时  $\{111\}\langle 110\rangle$  组分强度明显减弱, 920 °C 退火时  $\gamma$  纤维织构 ( $\{111\}\langle 112\rangle + \{111\}\langle 110\rangle$ ) 强度最弱。退火温度为 1000 °C 时,  $\gamma$  纤维织构组分最强。

### 2.3 退火温度对磁性能的影响

图 3(a) 显示铁损  $P_{1.5}$  与退火温度的关系。从图 3(a) 可看出, 随着退火温度的提高, 铁损逐渐降低。对应于最低退火温度 850 °C 和最高温度 1000 °C 的铁损分别是 4.36 W/kg 和 3.35 W/kg。

从图 3(b) 可看出, 磁感与退火温度的关系与铁损不同, 铁损随退火温度的升高单调降低, 而磁感与退火温度的关系不是单调变化关系。在低温段, 磁感随退火温度的升高而增加; 在高温段, 磁感随退火温度的升高而降低。920 °C 退火时, 磁感达到最大值 1.732 T, 1000 °C 退火时, 磁感值最

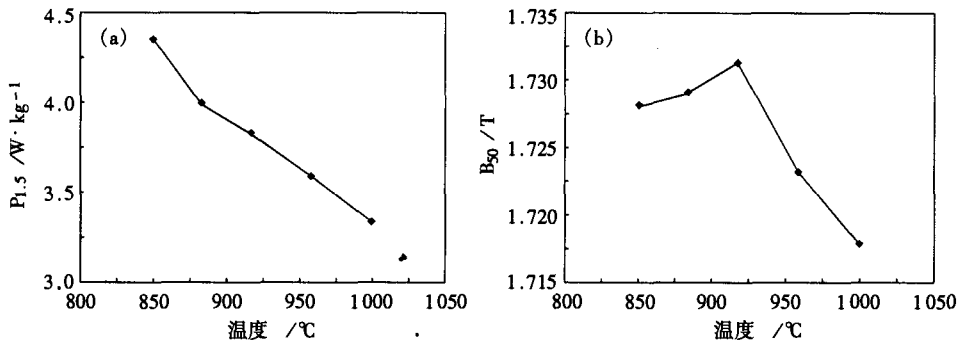


图 3 铁损(a)和磁感(b)随退火温度的变化  
Fig.3 Variation of ironloss (a) and magnetic induction (b) with annealing temperature

小,大约 1.717 T。

### 3 讨论

影响冷轧无取向硅钢磁性能的主要因素有<sup>[1]</sup>:晶粒尺寸、夹杂物、晶体织构、内应力、钢板厚度、钢板表面状态和化学成分等。本次试验中各试样的化学成分、夹杂物、内应力等基本相同,主要差别是晶粒尺寸和晶体织构。晶界越多,磁滞损耗越大,随着晶粒的长大,磁滞损耗降低。另一方面,随着晶粒的长大,反常涡流损耗都增加。因此,要获得最低铁损有一个合适的临界晶粒尺寸。晶粒尺寸对磁感的影响比较复杂,如果仅从晶界阻碍磁化的角度讲,晶粒越大,晶界越少,磁感应该越高。在强磁场下,由于磁化进入转动磁化阶段,晶体织构对磁化难易程度的影响较大,由于晶粒尺寸变化通常导致晶体织构也发生变化,磁感不一定随着晶粒尺寸的增加而提高<sup>[2,3]</sup>。无取向硅钢的织构控制要减少对磁性能不利的{111}和{112}织构,增加对磁性能有利的{100}和{110}织构。

对比图 1 和图 3(a)可看出,铁损随着晶粒尺寸的增加而降低。由于涡流损耗随晶粒尺寸的增大而增加,铁损的降低实际上是磁滞损耗的降低。如前所说,晶粒尺寸超过临界尺寸时,铁损会随晶粒尺寸的增大而增加。本次试验没有出现铁损随晶粒尺寸的增大而增加的现象,说明1 000 °C退火时达到的晶粒尺寸 115 μm 没有超过临界尺寸。

对比图 2 和图 3(a)可以看出,920 °C退火时不利织构组分{111}强度最弱,但对应的铁损并不是最小,说明铁损与晶体织构没有明显的对应关系,影响铁损的主要因素是晶粒尺寸。比较图 1、图 2 和图 3(b)可看出,B<sub>50</sub>与晶粒尺寸没有明显的对应关系,但与晶体织构的对应关系比较明显,920 °C退火时不利织构强度最弱,相应的磁感也最高。

### 4 结论

0.5 mm 0.003% C-1.6% Si 冷轧无取向硅钢随着退火温度的升高,平均晶粒尺寸增加。在低温段,随着退火温度的升高,不利织构组分减弱,但在高温段,织构随退火温度变化正好与低温段相反。铁损随退火温度的提高而降低,但磁感与退火温度的关系不是单调变化关系。影响铁损的主要因素是晶粒尺寸,晶体织构是影响磁感的主要因素。

### 参考文献

- 1 Hou Chun-Kan. Effect of Aluminum on the Magnetic Properties of Lamination Steels. IEEE Trans. Magn., 1996, 32(2): 471
- 2 Shiozaki M, Kurosaki Y. The Effects of Grain Size on the Magnetic Properties of Nonoriented Electrical Steel Sheets. J. Mater. Eng., 1989, 11(1): 37
- 3 王 波. 0.1% Si 无取向电工钢晶粒长大对织构和磁性的影响. 金属功能材料, 2004, 11(3): 16

张文康(1965-),男,博士,高级工程师,2003 年上海交通大学毕业,从事冷轧硅钢的研究与开发。

收稿日期:2005-07-15

=====

·告作者、读者·

本刊与《万方数据—数字化期刊群》《中国学术期刊(光盘版)》等数据库有合作关系,1995 年以来过刊全文资料已入网“万方数据—数字化期刊群”,并向读者提供信息服务,本刊所付稿酬已含上述服务的报酬。凡来稿时未及时声明不同意将其论文收录数据库的,均视为将入编数据库权利授予本刊编辑部。