

## 成品厚度对无取向硅钢织构和磁性能的影响

董爱锋 苗晓申 毅 张文康

(太原钢铁(集团)有限公司技术中心,太原 030003)

**摘要** 研究了成品板厚度(0.35~0.65 mm)对0.003% C-2.40% Si-0.32% Al无取向硅钢织构演变、磁感和铁损的影响。结果表明,随着钢板厚度的减薄,成品中对磁性不利的织构组分增加,有利织构组分减少,磁感降低。在化学成分和晶粒尺寸一定的情况下,影响铁损的主要因素是钢板厚度,钢板厚度从0.65 mm减薄至0.35 mm时,铁损显著降低。

**关键词** 无取向硅钢 成品厚度 冷轧压下率 织构 磁性能

## Effect of Product Thickness on Texture and Magnetic Properties of Non-Oriented Silicon Steel

Dong Aifeng, Miao Xiao, Shen Yi and Zhang Wenkang

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

**Abstract** The effect of product thickness (0.35~0.65 mm) of sheet on texture, magnetic induction and core loss of 0.003% C-2.40% Si-0.32% Al non-oriented silicon steel sheet have been studied. Results showed that with decreasing the thickness of sheet, the component of unfavorable texture in products to magnetic properties increased, the component of favorable texture decreased led to decreasing magnetic induction; in conditions of definite chemical composition and grain size of steel, the major factor to influence core loss was thickness of steel sheet, as the thickness decreased from 0.65 mm to 0.35 mm, the core loss decreased obviously.

**Material Index** Non-Oriented Silicon Steel, Product Thickness, Cold Rolling Reduction Ratio, Texture, Magnetic Properties

无取向硅钢的成品织构和磁性能与成品板厚度和冷轧工艺密切相关,特别是在化学成分一定的情况下,成品板厚度对磁性能起着重要作用。本文研究了成品板厚0.35、0.50、0.65 mm(对应的冷轧压下率分别为86%、80%、74%)对2.40% Si无取向冷轧硅钢织构和磁性能的影响。

### 1 试验过程

初始材料取自工业生产2.5 mm厚的热轧硅钢板,经常化处理。主要化学成分(%):0.003C、2.40Si、0.32Al、0.25Mn、0.015P、0.004S。初始材料经酸洗后使用四辊轧机分别将热轧板一次冷轧至最终尺寸0.35、0.50、0.65 mm,对应冷轧压下率分别为86%、80%、74%。然后在小型连续退火炉中进行连续退火,退火温度950℃。为了排除退火后晶粒尺寸对试样磁性能影响的因素,适当调整退火速度,以保证试样晶粒度一致。用线切割方法将退火后的试样切成24 mm×14 mm的矩形样品,再用光学显微镜观察金相组织,观察面为与轧制方向平行的纵截面。使用Siemens的D-5000型X射线衍射仪测量退火后样品表层的 $\{110\}$ 、 $\{200\}$ 和 $\{211\}$ 三

张不完整极图( $\alpha=0^\circ\sim70^\circ$ ),以级数展开法计算试样的取向分布函数(ODF),测量时使用Mo靶。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100 mm×100 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5000 A/m条件下测量磁感应强度 $B_{30}$ ,纵横向分别测量,最后取平均值。

### 2 试验结果

#### 2.1 再结晶金相组织

图1选取最终厚度尺寸为0.65 mm样品的再结晶金相组织作为典型金相照片。试验表明,通过适当调整退火速度,不同成品厚度下的再结晶晶粒大小相近,晶粒度均为4级。

#### 2.2 再结晶织构分布

图2显示样品经不同冷轧压下率后再结晶取向分布函数 $\Phi_2=45^\circ$ 的截面图。从图2可以看出,再结晶织构主要由 $\gamma$ 纤维组成, $\gamma$ 纤维包括 $\{111\}$ 、 $\langle 110 \rangle$ 和 $\{111\}$ 、 $\langle 112 \rangle$ 织构分量,其中 $\{111\}$ 、 $\langle 112 \rangle$ 分量的强度最高。另外,再结晶织构中还包含分量为 $\{111\}$ 、 $\langle 110 \rangle$ 、 $\{112\}$ 、 $\langle 110 \rangle$ 、 $\{100\}$

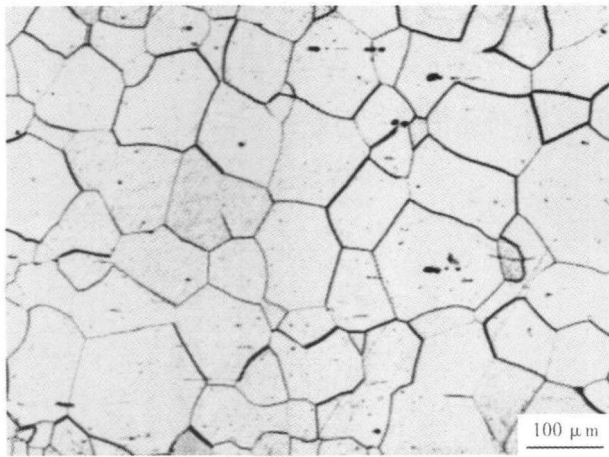


图1 0.65 mm 无取向硅钢板的典型再结晶组织

Fig. 1 Morphology of typical recrystallization structure of 0.65 mm non-oriented silicon steel sheet

<110>的 $\alpha$ 纤维组织和 $\{110\} \langle 001 \rangle$  Goss 组织,但这两种组织的强度都较弱。为了便于直接观察和对比材料组织变化的细节过程,借助取向线密度分布的变化展示经不同冷轧压下率退火后样品组织组分的形成和演变情况。图3给出了退火后样品的 $\alpha$ 及 $\gamma$ 取向线密度分布变化情况。这两个取向线通常可以展示体心立方金属冷轧变形过程或再结晶过程中组织变化的主要特征<sup>[1]</sup>。从图3可以看出,随着成品厚度的减薄和冷轧变形量的增加, $\alpha$ 取向线上的取向密度有所增强,主要形成了 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 和 $\{112\} \langle 110 \rangle$ 组织; $\gamma$ 取向线上的取向密度显著增强,主要形成了 $\{111\} \langle 211 \rangle$ 组织。

### 2.3 磁性能

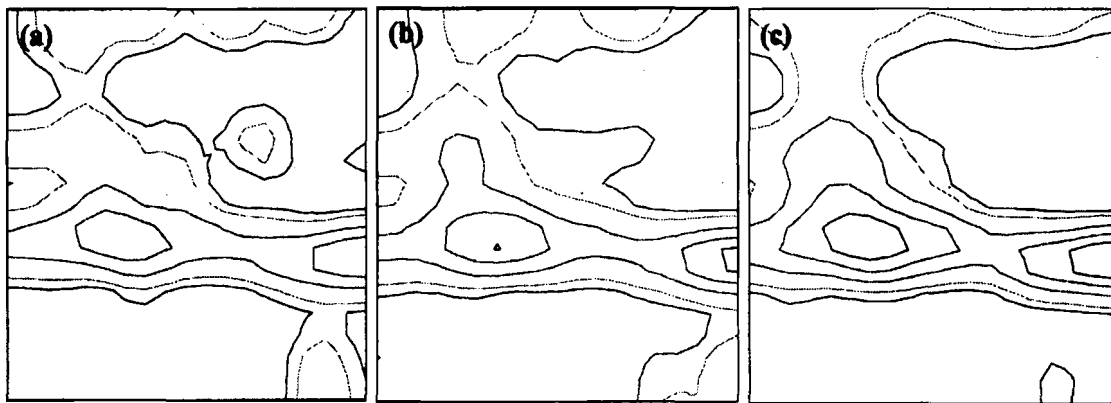


图2 不同冷轧压下率(a-74%;b-80%;c-86%)及对应成品厚度(a-0.65 mm;b-0.50 mm;c-0.35 mm)无取向硅钢再结晶取向分布函数 $\Phi_2 = 45^\circ$ 截面图(密度水平1,2,4,6,8)

Fig. 2  $\Phi_2 = 45^\circ$  sections of recrystallized texture oriented distribution function of non-oriented silicon steel with different cold-rolled reduction ratio (a-74%; b-80%; c-86%) and different thickness (a-0.65 mm; b-0.50 mm; c-0.35 mm), (density levels: 1, 2, 4, 6, 8)

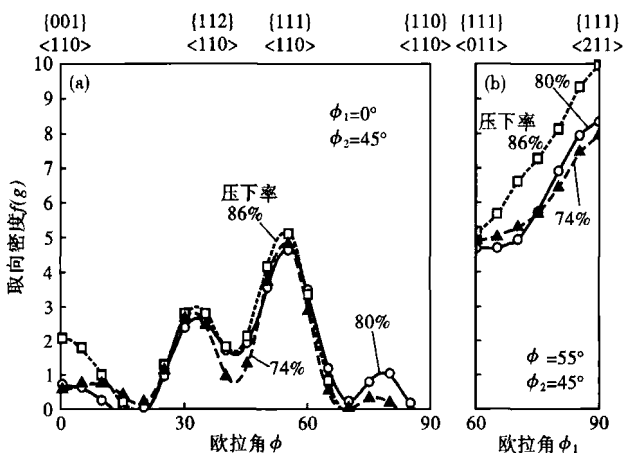


图3 再结晶组织的 $\alpha$ 取向线(a)和 $\gamma$ 取向线(b)的密度分析  
Fig. 3 Analysis of recrystallized texture orientation densities a-long  $\alpha$  fibers (a) and  $\gamma$  fibers (b)

表1 成品板厚对无取向硅钢磁性的影响

Table 1 Influence of sheet thickness on magnetic properties of non-oriented silicon steel

| 板厚/mm | 冷轧压下率/% | 铁损/(W·kg <sup>-1</sup> ) | 磁感/T  |
|-------|---------|--------------------------|-------|
| 0.65  | 74      | 3.604                    | 1.712 |
| 0.50  | 80      | 3.040                    | 1.698 |
| 0.35  | 86      | 2.705                    | 1.680 |

寸确定时,随着成品板厚的减薄和冷轧压下率的增加,铁损显著降低,磁感也降低。当板厚从0.65 mm减薄至0.35 mm时,铁损降低了0.899 W/kg,磁感降低了0.032 T。

### 3 讨论

影响无取向硅钢磁感应强度的主要因素是化学成分和晶体组织<sup>[2]</sup>。因为试验钢的化学成分相同,所以晶体组织就成为影响无取向硅钢磁感应强度的主要因素。对于无取向硅钢,理想的晶体组织为

表1 给出成品的铁损和磁感随不同成品厚度的变化情况。从表1可以看出,在化学成分和晶粒尺

(100)[uvw]面织构,因为它是各向同性且难磁化方向[111]不在轧面上。实际上得不到这种单一的面织构,一般存在有(100)[011],(111)[112],(110)[001]和(112)[011]等织构组分。在(100)晶面上有两个易磁化的<001>轴。其次是(110)面织构,在此晶面上有一个<001>轴。具有(111)面织构的铁损较高,因为在此晶面上没有<001>轴。具有(112)面织构的铁损最高,因为在此晶面上有难磁化的<111>轴。

再结晶织构与冷轧压下率有明显关系。成品板厚度越薄,冷轧压下率越大,再结晶织构中对磁性能不利的 $\gamma$ 纤维织构组分 $\{111\}$ <211>就越强。这是因为,当冷轧压下率 $\geq 60\%$ 时,冷轧时微观带与轧向的偏离角逐渐减少,直到与轧向近似平行,其 $\{211\}$ <011>组分逐渐加强。压下率为90%时,冷轧时微观带的 $\{211\}$ <011>位向是冷轧织构中最强组分,微观带边界已不是 $\{110\}$ 面,即已经形成明显的切变带<sup>[3]</sup>。由于无取向硅钢冷轧后各位向组分的储能是不相同的,从大到小的顺序为 $\{110\} \rightarrow \{111\} \rightarrow \{112\} \rightarrow \{100\}$ <sup>[4,5]</sup>,因此在退火时 $\{110\}$ <001>晶粒首先回复和再结晶; $\{100\}$ <110>晶粒最易滑动,位错密度低,所以最难再结晶。因此,退火后 $\{111\}$ <110>与 $\{112\}$ <110>取向基本消失,绝大多数取向聚集到 $\{111\}$ <112>上。 $\{111\}$ <112>取向在钢板平面上具有<112>轴,而且它接近<111>难磁化取向,ND//<111>织构的增强导致磁感下降<sup>[6]</sup>。由图3和表1可见,板厚为0.35 mm、冷轧压下率为86%的样品退火后 $\{111\}$ <112>织构占有率最高,磁感最低。此外,从图2还可以看到,随着成品板厚的减薄和冷轧压下率的增加,再结晶织构中对磁性有利的Goss织构在逐步减弱,这也是造成磁感降低的另外一个原因。

无取向硅钢的铁损主要由磁滞损耗和涡流损耗两部分组成。影响无取向硅钢铁损的主要因素是化学成分、晶体织构、夹杂物、晶粒尺寸、钢板厚度和钢板表面状态等。本次试验中各试样的化学成分、夹杂物、晶粒尺寸等基本相同,主要差别是晶体织构和试样厚度。晶体织构是影响磁滞损耗的主要因素。无取向硅钢(111)或(112)面织构高,轧向上就存在较多难磁化的<112>和<111>轴,这些难磁化轴阻碍了畴壁的移动,使磁通变化受阻,造成磁滞损耗,进而使无取向硅钢的铁损增加。板厚是影响涡流损耗的主要因素。根据麦克斯韦方程推导出的涡流损耗经典公式:

$$P_e = \frac{1}{6} \cdot \frac{\pi^2 t^2 f^2 B_m^2 k^2}{\gamma \rho} \times 10^{-3}$$

式中: $t$ - 钢板厚度; $f$ - 频率; $B_m$ - 最大磁感应强度; $\rho$ - 材料的电阻率; $\gamma$ - 材料的密度; $k$ - 波形系数。

可以看出,在材料和外加磁场一定的情况下,涡流损耗与板厚的平方成正比,即板厚减薄,涡流损耗急剧减小,进而使无取向硅钢的铁损降低。结合图2和表1可以看出,0.35 mm厚的成品退火后不利织构组分 $\{111\}$ 强度最大,有利的高斯织构强度最弱,磁滞损耗应最大,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,在化学成分、晶粒尺寸等基本相同条件下,影响铁损的主要因素是钢板厚度。钢板厚度从0.65 mm减薄至0.35 mm时,根据涡流损耗经典公式,材料的涡流损耗明显降低,进而使铁损显著降低。

#### 4 结论

成品板厚度和冷轧压下率对无取向硅钢的织构和磁性能有显著的影响。随着钢板厚度的减薄和冷轧压下率的增加,再结晶织构中对磁性不利的织构组分增加,有利织构组分减少,磁感降低,晶体织构是影响磁感的主要因素,但晶体织构对铁损的影响没有成品厚度对铁损的影响显著。在化学成分和晶粒尺寸一定时,影响铁损的主要因素是钢板厚度,钢板厚度从0.65 mm减薄至0.35 mm时,铁损显著降低。

太原市科技项目技术创新计划基金资助项目(编号:080503)

#### 参考文献

- 1 毛卫民,张新明. 晶体材料织构定量分析. 北京:冶金工业出版社,1995
- 2 何忠治. 电工钢. 北京:冶金工业出版社,1997
- 3 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
- 4 Sidor Y, Dzubinsky M, Kovac F. Characterization of Microstructures in Non-oriented Electrical Steels Utilizing Weighted Sum of Elementary Data. Czechoslovak Journal of Physics, 2004(54):105
- 5 Mao W. Modeling of Rolling Texture in Aluminum. Materials Science and Engineering, 1998, A257(12):171
- 6 Minoru Takashima, Michiro Komatsubara.  $\{001\}$ <210> Texture Development by Two-Stage Cold Rolling Method in Non-oriented Electrical Steel. ISIJ International, 1997, 37(12):1263

董爱锋(1976-),女,博士,工程师,冷轧无取向和取向硅钢产品开发和工艺研究。

收稿日期:2009-03-10