

## 冷轧 0.02C-6.56Si 高硅钢薄板的力学和磁性能

刘 艳 梁永锋 叶 丰 林均品 陈国良

(北京科技大学新金属材料国家重点实验室, 北京 100083)

**摘 要** 通过 25 kg 真空感应炉熔炼, 锻造开坯, 1 050 ~ 850 °C 热轧至 1 mm, 650 °C 温轧至 0.3 mm, 再冷轧成 0.05 mm 高硅钢 (% : 0.02C, 6.56Si, 0.14Mn, 0.013P, 0.004S, 0.02Al) 薄板。冷轧板经过 1 200 °C 1.5 h 真空退火后, 得到无取向硅钢。与普通取向硅钢相比, 在 0.07 T, 20 kHz 的高硅钢薄板铁损降低 14.7%, 30 kHz 的铁损降低 19.7%, 40 kHz 的铁损降低 28.1%; 该钢是一种优良的软磁材料, 在冷轧后的强度达 1 480 MPa。

**关键词** 高硅钢 冷轧 磁性能

## Mechanical and Magnetic Properties of Cold Rolled 0.02C-6.56Si High Silicon Steel Sheet

Liu Yan, Liang Yongfeng, Ye Feng, Lin Junpin and Chen Guoliang

(State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, University of Science and Technology, Beijing 100083)

**Abstract** The manufacture process of sheet of high silicon steel 0.02C, 6.56Si, 0.14Mn, 0.013P, 0.004S, 0.02Al was melting by 25 kg vacuum induction furnace, forging breakdown, hot rolling to 1 mm at 1 050 ~ 850 °C, warm rolling to 0.3 mm at 650 °C, and cold rolling to 0.05 mm. The non-oriented silicon steel was got by vacuum annealing of the cold rolled sheet at 1 200 °C for 1.5 h. Compared with conventional oriented silicon steel, the iron loss of high silicon steel sheet decreased by 14.7% with 0.07 T and 20 kHz, by 19.7% with 30 kHz and by 28.1% with 40 kHz, it is an excellent soft magnetic material. The tensile strength of the steel sheet cold rolled was up to 1 480 MPa.

**Material Index** High Silicon Steel, Cold Rolling, Magnetic Property

在 0.02C-6.56Si 合金中, 一般认为含有  $DO_3$  和 B2 有序相, 除了这两相外, 还有  $Fe_{14}Si_2$  和大 B2 相<sup>[1,2]</sup>。随着这些有序相的出现, 硅钢变得既硬又脆, 难以通过常规的冷轧法加工成薄板, 所以人们特别关注轧制法生产高硅钢<sup>[3-5]</sup>。

### 1 实验原料

以纯铁、单晶硅、硼铁为原料, 在真空感应炉中熔炼, 浇 25 kg 铸锭。铸锭在 1 000 ~ 900 °C 锻造开坯, 在 1 050 ~ 850 °C 热轧至 1 mm, 然后在 650 °C 下温轧, 轧制成 0.3 mm 以下的薄板, 将得到的薄板在室温下冷轧, 可得到厚 0.05 mm 宽 45 mm 的高硅钢薄板, 将冷轧后的薄板去油, 涂 MgO 后在 1 200 °C 1.5 h 高温退火。原料和铸锭的化学成分列于表 1。

表 1 原料和高硅钢铸锭的化学成分/%

Table 1 Analysis of charge and ingot of high Si steel / %

类别	Si	B	C	Mn	P	S	Al	Fe
工业纯铁	0.01	-	0.01	0.10	0.011	0.007	-	99.5
硼铁	0.49	20.43	0.07	-	0.021	0.004	0.22	余量
铸锭	6.56	0.057	0.02	0.14	0.013	0.004	0.02	余量

注: 原料单晶硅含 99.999% Si。

### 2 实验结果及分析

#### 2.1 显微组织与结构

首先用 X-射线织构衍射仪测量试样的  $\{110\}$ 、 $\{200\}$  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)。

图 1 所示冷轧和退火后薄板取向分布函数  $\Phi_2 = 45^\circ$  截面图。从图 1(a) 可见, 冷轧得到薄板的  $\{001\}$  面织构比较发达, 而退火后的织构和冷轧织构相比,  $\{001\}$  面织构消失,  $\{111\}$  面织构出现, 如图 1(b)。运用衍射仪所带数据处理软件, 算出试样立方织构含量为轧态  $\{100\}$  面和立方分别为 36.535% 和 21.876%, 退火后分别为 1.349% 和 0.038%, 可以认为最终退火得到的为无取向硅钢。在板面形成等轴晶, 晶粒大小为 120  $\mu\text{m}$ 。

#### 2.2 力学性能

冷轧之后得到的 0.05 mm 高硅钢薄板的强度为 1 480 MPa, 并且具有一定的塑性。将冷轧得到的 0.05 mm 薄板进行弯折, 可以弯曲 180° 而不断裂。

用 Nano Indenter XP 纳米力学探针测量薄板的硬度。如图 2(a) 为冷轧后薄板的硬度 6.8 GPa, 薄

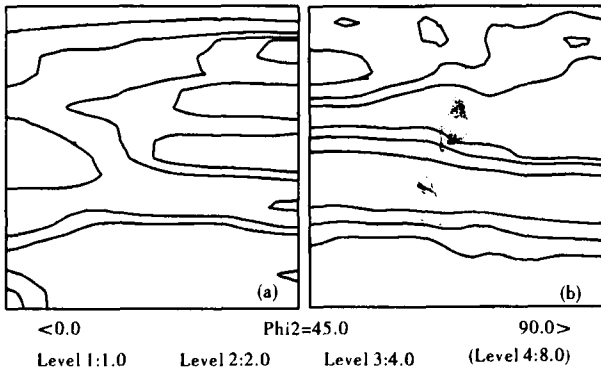


图 1 冷轧及退火后高硅钢薄板取向分布函数  $\Phi_2 = 45^\circ$  截面图:(a) 冷轧;(b) 退火  
Fig. 1  $\Phi_2 = 45^\circ$  sections of orientation distribution figure of cold and annealed high silicon steel sheet; (a) cold rolled; (b) annealed

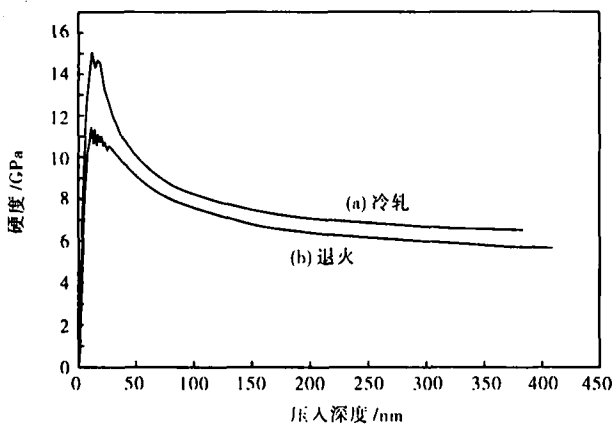


图 2 冷轧及退火后高硅钢薄板的显微硬度  
Fig. 2 Micro hardness of cold rolled and annealed high silicon steel sheet

板经过高温退火后,硬度降低至 6.6 GPa。由图 2 可以看出,高温退火后薄板硬度下降。退火后薄板的硬度比冷轧后的硬度低,这与薄板在退火过程中的有序-无序转变有关,还需进一步的研究。

### 2.3 磁性能

将冷轧后的薄板卷成内径为 10 cm 的环,在 1 200 °C 1.5 h 真空下退火后,测量其直流与交流性能。由表 2 可见,退火后薄板具有矫顽力低、磁感应强度高和最大磁导率高等优点。

轧制所得的高硅钢薄板高温退火后,在高频下

表 2 高硅钢 0.05 mm 薄板直流磁性能

Table 2 DC magnetic properties of annealed high silicon steel 0.05 mm sheet

矫顽力 Hc/ Oe	磁感应强度 B <sub>s</sub> / T	最大磁导率 $\mu_m$ / (Gs · Oe <sup>-1</sup> )
0.2	1.38	25 000

具有低的铁损,与取向硅钢相比<sup>[6]</sup>,在 0.07T 下,20 kHz 的铁损降低 14.7%,30 kHz 的铁损降低 19.7%,40 kHz 的铁损降低 28.1% (图 3)。

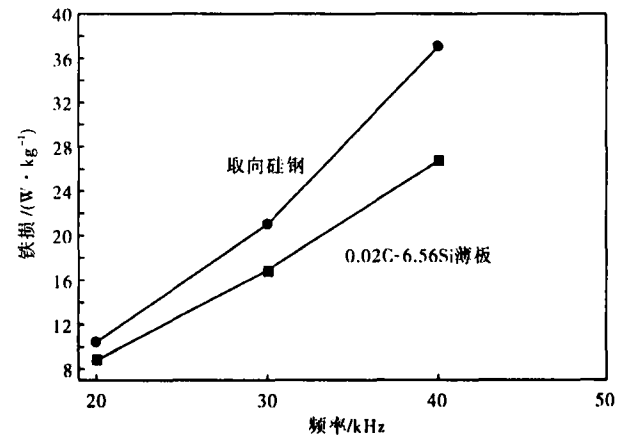


图 3 0.07T 下高硅钢薄板与取向硅钢铁损  
Fig. 3 Iron loss of high silicon steel sheet and oriented silicon steel sheet with 0.07T

### 3 结论

通过热轧、温轧和冷轧可得到厚 0.05 mm 的高硅钢薄板,经过高温退火后,得到的为无取向硅钢。与普通取向硅钢相比,在 0.07T,20 kHz 的铁损降低 14.7%,30 kHz 的铁损降低 19.7%,40 kHz 的铁损降低 28.1%,是一种优良的软磁材料。

“973”国家重点基础研究发展计划(2006CB605205-2)和“北京科技大学 422 高层次创新人才工程(00007425)”基金联合资助项目。

### 参考文献

- 1 金吉男. Fe14Si2 有序合金薄板制备新技术与组织性能的研究 [博士论文]. 北京科技大学,2004
- 2 Ruiz D, Ros-Yañez T, Vandenberghe R E, et al. Magnetic Properties of High Si Steel with Variable Ordering Obtained through Thermomechanical Processing. J. Appl. Phys, 2003, 93(10): 7112
- 3 刘海明, 彭长平, 李玉国. Fe-6.5% Si 快速凝固极薄带. 钢铁, 1993, 28(7): 55
- 4 Yamadji T, Abe M, Takada Y, et al. Magnetic Properties and Workability of 6.5% Silicon Steel Sheet Manufactured in Continuous CVD Silicizing Line. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1994, 133: 187
- 5 Haiji H, Okada K, Hiratani T, et al. Magnetic Properties and Workability of 6.5wt% Si Sheet. Journal of Magnetism and Magnetic Material, 1996, 160(3): 109
- 6 何忠治. 电工钢. 北京: 冶金工业出版社, 1997

刘 艳(1982-),女,硕士,高硅钢薄板的轧制及其磁性能研究。

收稿日期:2006-11-21