

## Cr对无取向硅钢磁性能的影响

张峰<sup>1,2</sup> 李光强<sup>1</sup>

(1 武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081;  
2 宝山钢铁股份有限公司硅钢部, 上海 200941)

**摘要** 分析了钢中Cr的氧化、氮化反应热力学, 试验研究了0.025%~0.045% Cr对900℃退火+750~1050℃二次退火的0.5 mm无取向硅钢(%: 0.0018C, 0.45Si, 0.45Mn, 0.106P, 0.003S, 0.0012N)磁性能的影响。结果表明, 钢中含Cr氮化物析出温度为913 K, 在热轧精轧和卷取过程中析出; 随钢中Cr含量的增加, 钢的晶粒尺寸减少, 铁损中的磁滞损耗增加, 而涡流损耗变化不大, 为保证钢的电磁性能, 应控制钢中Cr含量≤0.03%。

**关键词** 铬 无取向硅钢 二次退火 磁性能

## Effect of Cr on Magnetic Properties of Non-Oriented Silicon Steel

Zhang Feng<sup>1,2</sup> and Li Guangqiang<sup>1</sup>

(1 Key Lab for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 2 Silicon Steel Department, Baoshan Iron and Steel Co Ltd, Shanghai 200941)

**Abstract** The thermodynamics of oxidizing and nitriding reaction of Cr in steel is analyzed and the effect of 0.025%~0.045% Cr on magnetic properties of 0.5 mm non-oriented silicon steel (%: 0.0018C, 0.45Si, 0.45Mn, 0.106P, 0.003S, 0.0012N) annealed at 900℃ + secondary annealed at 750~1050℃ is tested and studied. Results show that the precipitation temperature of nitride of Cr in steel is 913 K, i. e. it precipitates during hot finishing rolling and coiling process; with increasing Cr content in steel, the grain size of steel decreases, for core loss the hysteresis loss increases, while change of vortex loss is little, in order to ensure the magnetic properties of steel, the Cr content in steel should be controlled ≤0.03%.

**Material Index** Chromium, Non-Oriented Silicon Steel, Secondary Annealing, Magnetic Properties

Cr元素与溶解在钢中的O、N等元素具有一定的亲和力,三者会以CrN、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等夹杂物的形式残留在钢中<sup>[1]</sup>。这类夹杂物在退火过程中会抑制带钢中的晶粒长大,进而降低钢的磁感,升高钢的铁损。

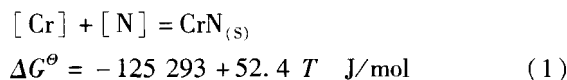
### 1 实验材料与方法

实验用钢取自连续退火后的0.5 mm厚成品硅钢卷,钢的目标硅含量为0.45%,钢中Cr含量在0~0.045%,其余成分(%):0.0018C、0.45Mn、0.106P、0.003S、0.0012N。以30% H<sub>2</sub>+70% N<sub>2</sub>的干气氛退火,退火温度900℃,退火时间为20 s。成品钢卷经剪板机剪切后,分别加工成平行于轧制方向(L向)和垂直于轧制方向(C向)尺寸为320 mm(长)×30 mm(宽)试样。

采用箱式炉进行二次退火,炉温采用PID自动调节,±2℃;30% H<sub>2</sub>+70% N<sub>2</sub>的干气氛;退火温度和时间750~1050℃ 2 h。退火后,采用爱泼斯坦方圈法测试试样的电磁性能,每付试样为16片,沿轧制方向纵向(L向)、横向(C向)各8片;采用截线法测量钢的晶粒尺寸。

### 2 Cr元素的氧化、氮化反应热力学

冶炼过程溶解在钢中的Cr发生下述反应<sup>[2-5]</sup>:



反应的平衡常数(K)可以表示为:

$$K = \frac{a_{\text{CrN}_{(s)}}}{a_{\text{Cr}} \cdot a_{\text{N}}} = \frac{1}{f_{\text{Cr}} \cdot [\text{Cr}] \cdot f_{\text{N}} \cdot [\text{N}]} \quad (2)$$

联立式(1)、(2)得:

$$\lg[\text{Cr}] \cdot [\text{N}] = -\frac{6\,552}{T} - \lg f_{\text{Cr}} - \lg f_{\text{N}} + 2.74 \quad (3)$$

由于lgf<sub>Cr</sub>、lgf<sub>N</sub>数值较小,且对上式的平衡关系影响不大,因此式(3)可以简化为:

$$\lg[\text{Cr}] \cdot [\text{N}] = -\frac{6\,552}{T} + 2.74 \quad (4)$$

式中:ΔG<sup>θ</sup>-标准吉布斯自由能/(J·mol<sup>-1</sup>);T-温度/K;a<sub>i</sub>-组分i的活度;f<sub>i</sub>-组分i的活度系数。

对公式(4)进行作图,可以得出钢中含Cr氮化

物的析出,只有在钢液凝固后, Cr、N 元素实际溶度积大于平衡溶度积的条件下发生,这个温度约为 913 K,略高于热轧终轧温度。

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 Cr 元素对钢的磁感影响

从图 1(a)可以看出,随二次退火温度的升高,含 0.025% Cr 和 0.045% Cr 钢的磁感均显著降低。在 750 °C、850 °C 的二次退火温度下,0.045% Cr 钢的磁感要明显低于 0.025% Cr 钢的磁感,而在退火温度达到 950 °C 以后,两者的磁感基本相当。

#### 3.2 Cr 元素对钢的铁损影响

从图 1(b)可以看出,随二次退火温度的升高,含 0.025% Cr 和 0.045% Cr 钢的铁损先是降低并在 850 °C 时达到最低,而后在二次退火温度大于 850 °C 以后又逐渐升高。不同二次退火温度下,含 0.045% Cr 钢的铁损均显著高于含 0.025% Cr 钢的铁损,两者相差为 0.1 ~ 0.3 W/kg。

#### 3.3 磁滞损耗与涡流损耗的关系

Cr 与 [O]、[N] 结合生成 CrN、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等夹杂物,致使钢的磁滞损耗增加。随二次退火温度提高,0.045% Cr 钢的磁滞损耗显著增加,而钢的涡流损耗变化不大,如图 2(a) 所示。

#### 3.4 钢的显微组织和晶粒尺寸

相同的二次退火温度下,0.045% Cr 钢的晶粒尺寸均小于含 0.025% Cr 钢。不同的二次退火温度下,含 0.025% Cr 和 0.045% Cr 钢的晶粒尺寸变化情况如图 2(b) 所示。

### 4 结论

(1) 钢中含 Cr 氮化物的析出温度约为 913 K,析出行为会发生在热轧精轧后机架以及卷取过程中。

(2) 随退火温度和 Cr 含量的增加,钢的晶粒细化,磁滞损耗显著增加,而涡流损耗变化不大。控制钢中 Cr 含量 ≤ 0.03%。

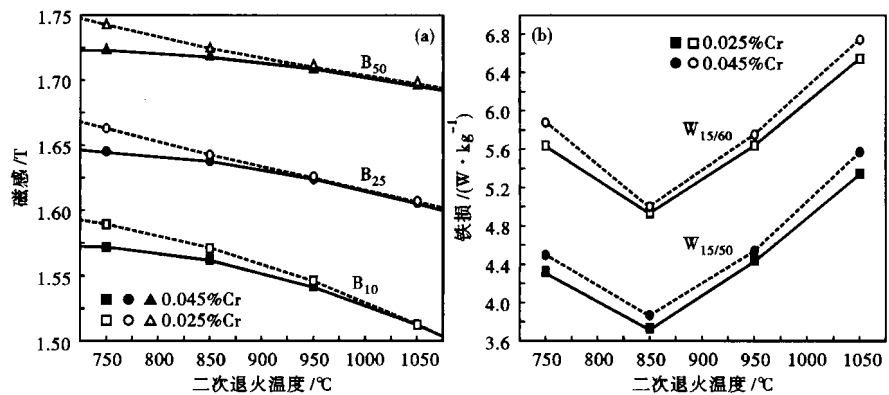


图 1 Cr 含量和二次退火温度对无取向硅钢的磁感(a)和铁损(b)的影响  
Fig.1 Effect of Cr content and secondary annealing temperature on magnetic induction (a) and core loss (b) of non-oriented silicon steel

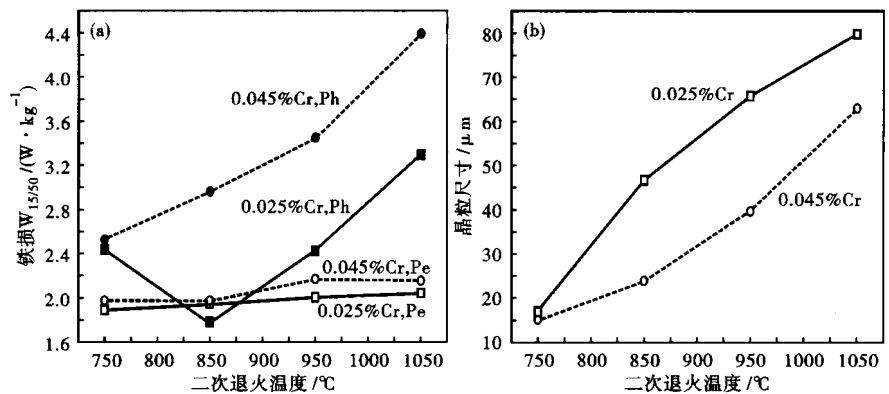


图 2 Cr 含量和二次退火温度对无取向硅钢的磁滞损耗和涡流损耗(a)和晶粒尺寸(b)的影响  
Fig.2 Effect of Cr content and secondary annealing temperature on hysteresis loss and vortex loss (a) and grain size (b) of non-oriented silicon steel

国家 863 计划资助项目(2008AA1A108)

#### 参考文献

- 王海川,董元箴,王世俊. 转炉吹炼中低碳铬铁的热力学分析. 铁合金,2000(3):5
- Sliger R N, Kramlich J C, Marinov N M. Towards the Development of a Chemical Kinetic Model for the Homogeneous Oxidation of Mercury by Chlorine Species. Fuel Processing Technology, 2000, 65-66(5):423
- 大村健,河野雅昭,河野正树. 高周波磁気特性に優れた Fe-Cr-Si 系無方向性電磁鋼板. 特開 2004-84031
- 张峰. 高氮钢中氮的行为:[学位论文]. 湖北:武汉科技大学,2005
- 石井不二夫,谷志郎,不破祐. 溶鉄の窒素溶解度および窒素溶解度におよぼす VIA 族元素の影響. 鉄と鋼,1982,68(5):946

张峰(1976-),男,博士研究生,工程师,2005 年武汉科技大学毕业,纯净钢和高效硅钢研发。

收稿日期:2009-11-04