

·专题讨论·

## 轧制条件对冷轧无取向硅钢组织的影响

金自力 徐向棋

(内蒙古科技大学材料与冶金工程学院, 包头 014010)

**摘 要** 除钢质的纯净度、夹杂物聚集程度、再结晶组织外, 织构分布和各组分强度对冷轧无取向硅钢的磁性能-磁感应强度和铁损亦具有显著的影响。从基础理论方面讨论了冷轧无取向硅钢的热轧、终轧温度和层流冷却条件对轧件织构形成的影响及冷轧压下率和冷轧轧制形状参数对其再结晶织构的影响。

**关键词** 冷轧硅钢 无取向 轧制工艺 织构

## Effect of Rolling Process on Texture Evolution of Cold Rolled Non-Oriented Silicon Steel

Jin Zili and Xu Xiangqi

(Materials and Metallurgy Engineering College, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010)

**Abstract** Besides cleanliness, degree of inclusion accumulation and recrystallization structure of steel, the texture distribution and intensity of each component have obvious influence on magnetic performance - magnetic induction strength and iron loss of cold rolled non-oriented silicon steel. The effect of hot rolling finishing temperature and laminar flow cooling condition of cold rolled non-oriented silicon steel on texture formation of rolling piece and the effect of cold rolling reduction and cold rolling shape parameters on recrystallization texture of steel are discussed in foundation theories.

**Material Index** Cold Rolled Silicon Steel, Non-Orientation, Rolling Process, Texture

无取向硅钢的电磁性能主要取决于钢质的纯净度、夹杂物聚集的程度、再结晶组织及各织构组分的强度。对前三个因素的研究相对较为成熟<sup>[1]</sup>, 并已应用于工业技术中。然而, 利用现代织构分析手段和理论, 研究生产过程中冷轧无取向硅钢织构形成和演变规律的工作尚不充分。织构分布及各组分强度对冷轧无取向硅钢的磁性能具有显著影响, 如何控制产品 {100}、{110}、{111} 及 {112} 织构的强度, 使 {100} 面织构在各组分中占优, 从而提高磁感, 是目前工业生产和新产品开发的首要追求目标。因此, 对织构形成及演变规律的研究成为热点问题<sup>[2-6]</sup>。

### 1 硅钢的织构

电工钢在加工过程中(热轧、冷轧)可滑移面为 {110}、{112} 和 {123} 滑移方向都为原子最密排的 <111> 方向。以任何一个 <111> 为晶轴的晶面都可能是滑移面, 都会产生交叉滑移, 特别是硅钢更容易产生交叉滑移。由于金属整体变形的连续性, 相邻晶粒间产生了相互牵制又彼此促进的协同动作, 因而会出现力偶, 造成晶粒间的相对转

动, 并促使原来位向不适合变形的晶粒开始变形, 或促使原来已变形的晶粒继续变形。当所承受的变形程度很大时, 大多数晶粒的某个滑移系最终都将转至同一方向或接近一致的方向, 其结果是使原来位向极其紊乱的晶粒出现有序化, 并有严格的位向关系<sup>[7]</sup>。

在电工钢的成品生产工序中, 为了得到完善的退火织构, 工业上常常采用大压下量冷轧和高温长时间退火的办法<sup>[8]</sup>。前者是为了得到很完善的冷变形织构, 后者是使某种有利位向的晶粒充分长大, 从而形成稳定、完善的退火织构。形成织构的特点是 (100) 或 (110) 面平行轧面, [001] 方向平行于轧向。

#### 1.1 无取向电工钢织构对磁感应强度的影响

织构是影响电工钢磁感应强度  $B_{25}$  和  $B_{30}$  的主要因素之一, 理想的晶体织构为 (100)[uvw] 面织构, 因为它是各向同性而且难磁化方向 [111] 不在轧面上。为改善电工钢的磁性能, 在生产过程中, 从热轧工序开始, 控制有利织构的形成是主要的技术手段之一<sup>[9]</sup>。在实际生产控制过程中不可能得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,其中(100)组分织构度只占约 20%,基本属于无取向混乱织构,也就是磁各向同性。由理论公式推导的结论为:按[100]和[111]单晶体的  $B_{25}$  值计算出的理想(100)[uvw]面织构具有最高的  $B_{25}$  值,比各向同性状态约高 0.16 T(10%),而(111)[uvw]和(110)[uvw]织构的  $B_{25}$  值比各向同性状态分别低 0.11 T(7%)和 0.04 T(2%)<sup>[10]</sup>。

## 1.2 无取向电工钢织构对铁损的影响

影响  $P_h$  (铁损)的因素也就是阻碍畴壁移动的主要因素,分别为晶体织构、杂质、夹杂物、内应力、晶粒尺寸、钢板厚度、钢板表面状态和主要化学成分。无取向电工钢(100)面织构高,  $P_h$  和  $P_{15}$  降低,因为在(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  $P_{15}$  较高,因为在此晶面上没有<001>轴,具有(112)面织构的  $P_{15}$  最高,因为在此晶面上有难磁化的<111>轴<sup>[9]</sup>。

## 2 轧制条件对无取向电工钢的织构影响

### 2.1 热轧工艺

对电工钢织构的形成,并对电工钢的最终铁磁性能起重要作用的基本组织参数是在轧件的热轧过程中形成的<sup>[11]</sup>。

#### 2.1.1 终轧温度

终轧温度越接近  $A_{r1}$ , 晶粒越大,且{100}<110>组分密度显著提高<sup>[12]</sup>。另外,终轧温度较低的钢( $A_{r1}-100$ )的晶粒度最小,这是因为材料中产生了较大比例的形核于晶界上的细小等轴晶粒。生产中发现,对热轧终轧温度的控制非常困难,往往带钢头部的温度没有达到目标值,因此,无取向电工钢的终轧温度应进一步提高,尽可能接近  $A_{r1}$ ,这对磁性的改善是非常重要的。

#### 2.1.2 层流冷却

无取向电工钢要求热轧后冷却速度慢,以使晶粒有充分长大的时间,因此,工艺应采取后段冷却方式。层流冷却对磁感的影响见图 1<sup>[11]</sup>。从图 1 知,B50A600 后段冷却比前段冷却的磁感要高 0.012 T。研究发现这是由于电工钢采用 560 °C 低温卷取,低温卷取后稳定性不好,为了使卷取温度波动小,热轧往往将层流后段冷却方式改为前段冷却方式,这对电工钢磁性是有害的。

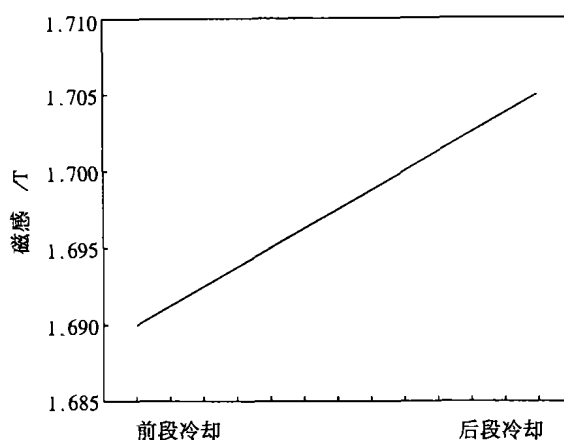


图 1 B50A600 层流冷却方式对磁感的影响  
Fig.1 Influence of B50A600 electrical steel laminar flow cooling method on magnetic induction strength of B50A600 electrical steel

### 2.2 冷轧工艺

无取向电工钢的磁性主要取决于它的织构。为改善磁性,必须提高{100}或{110}织构的强度和降低{111}织构强度<sup>[13]</sup>。{100}或{110}由带钢平面上易磁化<100>位向构成,而{111}由其平面附近的难磁化<111>位向构成。

#### 2.2.1 冷轧压下率对无取向电工钢织构的影响

为降低工序成本,提高产量,大多数生产厂均采用一次冷轧法生产中、低牌号冷轧电工钢。一次冷轧法要求大压下率( $\geq 75\%$ )来保证{100}<011>组分进一步增高,使磁性能提高<sup>[14]</sup>。

根据取向分布函数(ODF)定量计算,电工钢冷轧织构基本分为两类纤维织构,即<111>轴近似平行于法向(A类或称  $\gamma$  纤维织构)和<110>轴平行于轧向并在(100)[011]位向附近漫散(B类或称  $\alpha$  纤维织构)。主要低指数组为:{111}<112>、{111}<110>、{112}<110>和{001}<110>。也就是说,一类组分为<110>平行于轧向,(001)~(112)平行于轧面;另一类为{111}平行于轧面,而<110>~<112>平行于轧向。

在冷轧板微观结构分析中,压下率  $> 60\%$  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 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,即已形成明显的切变带。经压下率为 50%~90% 冷轧时都存在 A 和 B 两类纤维织构组分。压下率  $\leq 60\%$  时,冷轧时发生铅笔式的滑动,依靠

等量的  $\{110\}\langle 111\rangle$  和  $\{211\}\langle 110\rangle$  滑移系统而发展成 A 类织构组分,但有些偏离。压下率  $> 60\%$  时,冷轧时  $\{211\}\langle 111\rangle$  滑移系统起重要作用,使  $\{111\}\langle 121\rangle$  附近位向分解,并加强了  $\{211\}\langle 111\rangle$  滑移系统,因此  $\{211\}\langle 011\rangle$  和  $\{100\}\langle 011\rangle$  组分进一步提高,而  $\{111\}\langle 112\rangle$  强度保持不变。随形变量增加,  $\{100\}\langle 011\rangle$  组分加强,并绕  $\langle 011\rangle$  轧向漫散而形成 B 类纤维织构,漫散角度可达  $60^\circ$ ,这包括了  $\{111\}\langle 011\rangle$  位向; A 类纤维织构随形变量增高而单调地增高,但分布不均匀。

### 2.2.2 冷轧轧制形状参数对再结晶织构的影响

为确定冷轧过程中变形的不均匀性,在板材轧制时,采用轧制形状参数 RSF<sup>[15]</sup>:

$$RSF = 2[R(h_1 - h_0)]0.5/(h_1 + h_0)$$

式中 R 为工作辊半径;  $h_0$  和  $h_1$  分别为每道次前、后的带钢厚度。RSF 大则表示由轧制过程引起的应变分布较均匀; RSF 小则表示变形较不均匀。

只考虑轧制形状参数与织构形成之间的分析关系,以不同 RSF 取得的试样,用 Bunge 方法测定冷轧后、再结晶退火后以及消除应力退火后试样的 ODF 分析结论为: RSF 大时,表面和中间面织构发展成  $\gamma$  纤维,即它的组分  $\{111\}\langle 112\rangle$ ,并随着消除应力退火晶粒长大,该组分增强。 $\{111\}\langle 112\rangle$  取向在钢板平面上具有  $\langle 112\rangle$  轴,而且它接

近  $\langle 111\rangle$  难磁化取向,于是在消除应力退火之后, ND// $\langle 111\rangle$  织构的增强导致磁感下降<sup>[16]</sup>。

RSF 小时,无论是退火再结晶织构,还是消除应力退火晶粒长大织构, ND// $\langle 111\rangle$  织构在表面附近的积聚都受到抑制,织构的主要组分  $\{610\}\langle 001\rangle$  和  $\{410\}\langle 001\rangle$ , 分别为一个轧向易磁化  $\langle 001\rangle$  轴的组分和一个同带钢平面略倾斜的  $\langle 010\rangle$  轴组分,这样 RSF 小的试样表面织构在其钢板平面上具有两个易磁化  $\langle 001\rangle$  取向。因此,虽然中间面上 ND// $\langle 111\rangle$  织构增强,但在消除应力退火晶粒长大后,试样  $B_{50}$  值不变。

### 3 结语

电工钢的织构形态是影响磁性能的主要因素,有利织构的形成与各工序的工艺条件密不可分,即产品的织构形成与原始织构之间存在着继承关系;电工钢良好组分的获得还在于微量合金元素的采用及与相应工艺的配制,以期在组织回复的过程中阻碍  $\{111\}$  类组分的生长;随着终轧温度增加,铁损下降,磁感上升;热轧带钢出精轧后须有较慢的冷却速度,使晶粒充分长大,工艺上应采取后段冷却方式,磁感上升。冷轧时,板厚增加,铁损与磁感提高。

内蒙古自然科学基金资助项目(200308020202)

### 参考文献

- Arrott A S. The Past, the Present and Future of Soft Magnetic Materials, *J. Magnetism and Magnetic Materials*, 2000, 215-216: 6
- Raabe D. Rolling and Annealing Textures of BCC Metals, *ICOTOM 10, Japan*, 1994: 597
- Tomida T. A New Process to Develop (100) Texture in Silicon Steel Sheets, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1996, 5 (1): 316
- 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
- 何忠治. 电工钢的最近发展. *金属功能材料*, 1997, 4(6):
- Bunge H J. General Outline and Series Expansion Method. *Quantitative Texture Analysis*. DGM-Informationsgesellschaft. 1981, 1
- 高振远, 王道远, 郭晓宏. 冷轧电工钢织构演变与磁性能的关系. *鞍钢技术*, 2003(2): 14
- 柳璞如, 李福林. 无取向硅钢织构的研究. *钢铁研究论文选集*. 北京: 科学技术出版社, 1994. 12
- 何忠治. 电工钢. 北京: 冶金工业出版社, 1997
- Boc I, Cziraki A, Grof T, et al. Analysis of Inclusion in Cold-Rolled N. O. Si-Fe Strips. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1990(83): 381
- 韦峻. 热轧工艺对冷轧无取向电工钢组织结构和性能的影响. 北京: 清华大学出版社, 1999
- 储双杰. 生产工艺参数对无取向电工钢磁性的影响. *特殊钢*, 2003, 24(2): 37
- Tomida T, Tanaka T. Development of (100) Texture in Silicon Steel Sheets by Removal of Manganese and Decarburization. *ISIJ International*, 1995, 35(5): 548
- Lyudkovsky G, Shapiro J M. Effect of Aluminum Content and Processing in Texture and Permeability of Lamination Steels. *Journal of Applied Physics*, 1985, 57(1): 4235
- Kawamata R(日)等. 冷轧参数对无取向电工钢再结晶织构的影响. *世界钢铁*, 1999(4): 18
- Minoru Takashima, Michiro Komatsubara.  $\{001\}\langle 210\rangle$  Texture Development by Two-Stage. Cold. Rolling. Method. in. Non-oriented. Electrical. Steel. *ISIJ International*. 1997, 37(12): 1263

金自力, 男, 41 岁, 硕士, 教授, 1991 年毕业于北京科技大学。从事材料成型过程中组织与性能控制的数值模拟研究。