

## 热轧工艺对冷轧无取向硅钢 50W600 磁性能的影响

夏兆所 康永林

(北京科技大学新金属材料国家重点实验室,北京 100083)

**摘要** 试验了 180 mm 铸坯加热温度(1 200 ℃、1 180 ℃)、2.3 mm 热轧卷轧制道次(7 道次、5 道次)、精轧终轧温度(780 ~ 860 ℃)和卷取温度( $\leq 710$  ℃)对 0.5 mm 冷轧无取向硅钢 50W600 的铁损和磁感应强度的影响。结果表明,降低铸坯加热温度,提高终轧温度和卷取温度,有利于改善该冷轧无取向硅钢成品的磁性能;而粗轧道次对成品磁性能无明显影响。

**关键词** 热轧工艺 冷轧无取向硅钢 磁性能

## Influence of Hot Rolling Process on Magnetic Properties of Cold Rolled Non-Oriented Silicon Steel 50W600

Xia Zhaosuo and Kang Yonglin

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

**Abstract** The influence of heating temperature (1 200 ℃, 1 180 ℃) of 180 mm cast slab, rolling passes for 2.3 mm hot coil (7 pass and 5 pass), finishing rolling temperature (780 ~ 860 ℃) and coil temperature ( $\leq 710$  ℃) on iron loss and magnetic intensity of 0.5 mm cold rolled non-oriented silicon steel 50W600 has been tested. The results showed that decreasing heat temperature of cast slab, increasing finishing rolling temperature and coiling temperature were available to improve magnetic properties of the cold rolled non-oriented silicon steel; while the rolling passes had no significant influence on magnetic properties of steel products.

**Material Index** Hot Rolling Process, Cold Rolled Non-Oriented Silicon Steel, Magnetic Properties

冷轧硅钢主要用作各种电动机、发电机和变压器的铁芯,同时也是电子、机械等行业不可或缺的重要功能材料。良好的磁性能,即较高的磁感应强度和低的铁损,是区别于其它钢铁材料的主要特点。冷轧硅钢分无取向硅钢和取向硅钢。2005 年我国冷轧硅钢产量仅为 188.19 万 t(其中取向硅钢 13.208 6 万 t),进口达 120.82 万 t(其中取向硅钢 25.81 万 t)<sup>[1]</sup>。随着国民经济的发展,冷轧硅钢的需求量将不断增大;另一方面,由于节能的需要,机电产品正朝着小型、高精度、高效率化方向发展,这要求冷轧硅钢具有更高的磁性能。

传统认为冷轧无取向硅钢的磁性能主要取决于冶炼工序、钢的化学成分和纯净度及冷轧工序的热处理工艺。实际上,影响冷轧无取向硅钢磁性能的因素较多,根据对低牌号冷轧无取向硅钢生产数据分析及现场生产工艺试验发现,热轧工序对成品磁性能有着较大的影响。近来,国外有人也将热轧工艺优化与热轧板预退火和带中间退火的二次冷轧法,一起列为改善冷轧无取向硅钢磁性能的措施之一<sup>[2]</sup>。

本实验所研究的冷轧无取向硅钢工艺流程为:

铁水经预处理脱硫后,入 75 t LD 转炉冶炼,经 80 t RH 真空处理装置脱碳、合金化等,随后连铸成(mm)180 × 1 080 × 8 500 的铸坯;在热轧工序,经加热、粗轧、精轧成厚 2.3 mm、宽 1 050 mm 的热轧卷;在冷轧工序,酸洗后经二十辊轧机冷轧至 0.5 mm 厚,通过退火、涂层,最后切边为 1 000 mm 宽的带卷。

热轧工序的任务由 1 套 1 549 mm 连轧机组完成,该机组由 3 座步进式加热炉、三机架粗轧机、六机架精轧机和 2 台卷取机组成。主要热轧工艺参数有铸坯加热温度、粗轧道次、精轧终轧温度、卷取温度等。

### 1 铸坯加热温度

对于冷轧硅钢,铸坯加热温度的高低一方面关系到热轧塑性:加热温度高,铸坯的热轧塑性好,加热温度低,则塑性差,轧机负荷增加,寿命缩短;同时对成品磁性能也有较大的影响。

为摸索铸坯加热温度对成品磁性能的影响,采用同一化学成分范围的低牌号 50W600 铸坯,进行生产工艺试验。试验组的温度为设备能力允许的最低温度,对比组为正常生产工艺温度(见表 1)。从

表 1 铸坯加热温度对 50W600 冷轧无取向硅钢成品磁性能的影响

Table 1 Influence of heating temperature of cast slab on magnetic properties of 50W600 cold rolled non-oriented silicon steel products

工艺	加热温度/℃	数量/炉	$P_{15}/(W \cdot kg^{-1})$	$B_{50}/T$
正常	1 200	37	5.656	1.730
试验	1 180	20	5.494	1.745

注: $P_{15}$ 为 1.5 T 磁感应强度下的铁损; $B_{50}$ 为 5 000 A/m 磁场下的磁感应强度,二者为冷轧无取向硅钢成品出厂磁性能指标。

试验结果可以看出:成品磁性能与铸坯加热温度有较大的相关性,随铸坯加热温度降低,磁性能得到明显改善,不但磁感应强度得到了提高,而且铁损也有所降低;反之,铸坯加热温度增高,磁性能恶化。

冷轧硅钢冶炼过程中存在的硫、氮等杂质元素,它们与合金元素锰、铝分别化合生成 MnS 和 AlN 等夹杂物。铸坯加热时,这些夹杂物固溶,在随后的热轧过程中,由于温度的降低,其固溶度下降,又沉淀析出。铸坯加热温度越高,其固溶量越多,沉淀析出物数量也越多,而且越细小;铸坯加热温度越低,不但沉淀析出物数量越少,而且析出物尺寸较粗大。在对大角晶界迁移的阻碍方面,细小的沉淀析出物要比粗大的阻碍力大。因此,在成品退火时阻碍晶粒长大,使成品晶粒细小,从而使铁损中的磁滞损耗增加<sup>[3]</sup>。而对低牌号无取向硅钢来说,磁滞损耗占总铁损的 75%~80%,因此导致总铁损升高。另外,较高的铸坯加热温度也使得对磁性能不利的 {111} 组份增多<sup>[4]</sup>,从而使产品磁感应强度变坏。

## 2 粗轧道次

一般粗轧多用大压下量和减少道次的办法来减少散热和热轧卷头尾温度差。一段时期,为保板形由 5 道次增为 7 道次。为了解粗轧道次对成品磁性能的影响,进行了同一牌号 50W600 铸坯采用不同道次的生产工艺试验(表 2),试验组采用 5 道次,对比组为 7 道次。从试验结果看,粗轧道次对成品磁性能的影响不大。

粗轧阶段由于温度高、变形量大、道次间隔时间长,因此动态回复、再结晶及静态再结晶等比精轧阶

表 2 热轧道次对 50W600 冷轧无取向硅钢成品磁性能的影响

Table 2 Influence of hot rolling passes on magnetic properties of 50W600 cold rolled non-oriented silicon steel products

工艺	粗轧道次/次	数量/卷	$P_{15}/(W \cdot kg^{-1})$	$B_{50}/T$
正常	7	14	5.075	1.719
试验	5	16	5.075	1.720

段完全;加之中间坯厚度一定,即粗轧和精轧的总压下率一定,因此道次不同而造成的差异,经精轧 6 道次的轧制也被稀释殆尽,所以对成品磁性能的影响微小。另一方面,由于冷轧无取向硅钢粗轧期间,同时存在着动态回复、动态再结晶、静态回复、静态再结晶及亚动态再结晶等多种组织转变方式,它们的发生规律及相互关系,尤其是对成品晶粒尺寸及织构的影响规律相当复杂,相关的研究工作及文献极少,还有待进一步探索。

## 3 精轧终轧温度

### 3.1 生产数据

对终轧温度波动较大的 50W600 钢生产数据进行了统计分析,得出终轧温度对成品的磁感应强度有较大的影响。终轧温度与  $B_{50}$  关系(图 1 及公式 1)较好地说明了高的终轧温度有利于磁感应强度的提高。统计分析得出的终轧温度  $T$  与磁感应强度

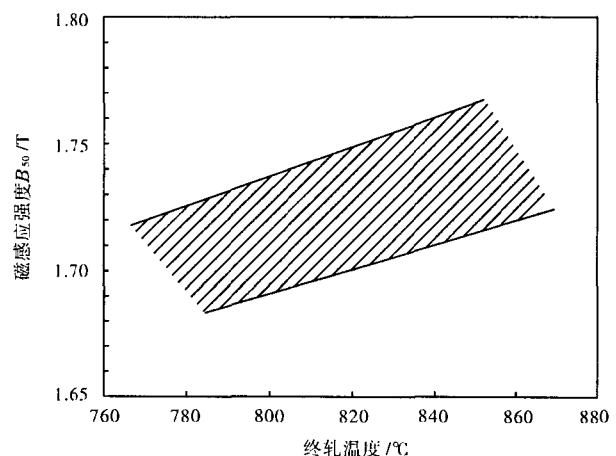


图 1 精轧终轧温度与 50W600 冷轧无取向硅钢磁感应强度  $B_{50}$  的关系

Fig. 1 Relation between finishing rolling temperature and magnetic intensity  $B_{50}$  of 50W600 cold rolled non-oriented silicon steel

度  $B_{50}$  的关系为:

$$B_{50} = 0.0004 T + 1.4228 \quad (1)$$

根据公式(1),终轧温度每提高 40 °C,  $B_{50}$  可增加 0.01 T。

### 3.2 工艺试验

试料为低牌号 50W600 铸坯,终轧温度分 3 档(表 3),其中最高的 1 档为在铸坯加热温度相同,粗轧与精轧间辊道保温罩等条件投入的情况下,设备能力所能达到的最高温度。结果表明,提高终轧温度确实能明显地改善磁性能,尤其是磁感应强度的

表3 精轧终轧温度对50W600冷轧无取向硅钢成品磁性能的影响

Table 3 Influence of finishing rolling temperature on magnetic properties of 50W600 cold rolled non-oriented silicon steel products

工艺	终轧温度/℃	数量/卷	$P_{15}/(W \cdot kg^{-1})$	$B_{50}/T$
正常	815	148	5.377	1.726
试验1	830	28	5.369	1.728
试验2	860	41	5.359	1.736

提高十分显著。Fischer 等人的研究结果也表明<sup>[2]</sup>,对低牌号冷轧无取向硅钢,较高温度的两相区精轧比低温的铁素体区精轧的磁感应强度高,因为 $\{100\} \langle 001 \rangle$ 立方织构组分增多。

终轧温度对成品磁性能的影响主要有两种方式:

(1)影响着热轧板的再结晶。在相同的工艺条件下,终轧温度高,卷取温度相应也高,热轧板发生再结晶的驱动力大,有利于热轧板再结晶的发生及再结晶晶粒的长大;相反,终轧温度低,卷取温度也低,再结晶的驱动力小,再结晶不充分,晶粒较小。因为冷轧无取向硅钢的磁性能主要取决于成品的晶粒尺寸和织构,而热轧板的再结晶情况对成品组织及磁性能具有很大的影响作用,热轧板晶粒粗大可使成品退火织构中不利的(222)和(211)组分减少,有利的(110)组分增多,而(110)组分能提高轧向的磁感应强度<sup>[4]</sup>。

(2)终轧温度还影响着卷取过程中夹杂物沉淀析出的尺寸、数量,而这些因素对成品退火过程中的晶粒长大及织构也有较大的影响。研究表明<sup>[5]</sup>:低牌号硅钢热轧卷取过程中会出现 AlN 等析出物,终轧温度高,卷取过程中析出物尺寸较大,体积分数高;终轧温度低,析出物尺寸较小,体积分数低。而冷轧前,热轧板中的析出物数量越多,冷轧后再结晶退火过程中析出物的数量就越少,最终成品中有害织构组分也随之减少。因此,较高的终轧温度使成品退火过程中的析出物数量减少,有害织构组分减少,从而也使磁感应强度得以提高。

#### 4 卷取温度

为防止因卷取温度高可能导致的塌卷现象发生,采用了卷取后立卷放置的方式。

50W600 牌号钢的试验结果(表4)表明,卷取温度的提高对磁性能的改善有一定的作用,尤其是对磁感应强度的改善程度更大一些。但由于装备条件的限制,工艺试验时,最高卷取温度只有 710 ℃。

卷取温度对成品磁性能的作用方式与精轧终轧温度相似。由于较高的卷取温度可为热轧板发生再

表4 卷取温度对50W600冷轧无取向硅钢成品磁性能的影响

Table 4 Influence of coiling temperature on magnetic properties of 50W600 cold rolled non-oriented silicon steel products

卷取温度/℃	数量/卷	$P_{15}/(W \cdot kg^{-1})$	$B_{50}/T$
≤650	2	5.273	1.710
651~670	3	5.252	1.715
671~690	10	5.184	1.716
691~710	4	5.211	1.720

结晶提供驱动力,使热轧板发生再结晶且晶粒尺寸大,从而使成品退火织构得到改善,磁感应强度得到提高。同时卷取温度也对夹杂物的沉淀析出有着重要影响。研究表明<sup>[6]</sup>,卷取温度低,热轧板中沉淀析出物数量少但细小,成品退火后再结晶织构度低;而卷取温度高,析出物数量多但较粗大,成品退火后再结晶织构度高。对无取向硅钢而言,织构度高可改善磁性能。

由于热轧板再结晶可显著改善冷轧硅钢的磁性能,因此,在生产高牌号无取向硅钢和高性能无取向硅钢时都要对热轧板进行预退火或常化,而提高卷取温度使热轧板实现自退火可起到相似的效果。

#### 5 结论

(1)铸坯加热温度对50W600钢成品磁性能有明显的影响,降低铸坯加热温度能够改善成品磁性能。

(2)提高终轧温度能提高成品磁感应强度。提高卷取温度可改善成品磁性能,尤其是磁感应强度。

(3)粗轧道次的多少对成品磁性能的影响不大。

#### 参考文献

- 1 陈卓. 国内电工钢产量回顾及需求预测. 冶金管理, 2006(2): 28
- 2 Fischer O, Schneider J. Influence of Deformation Process on the Improvement of Non-oriented Electrical Steel. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2003, 254-255: 302
- 3 De Paepe A, Eloot K, Dilewijn J, et al. Effect of Hot Rolling Parameters on the Magnetic Properties of a Low-silicon Ultra-low-carbon Steel. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1996, 160: 129
- 4 何忠治. 电工钢. 北京: 冶金工业出版社, 1997: 291
- 5 鲁锋, 李友国, 桂福生, 等. 热轧终轧温度对冷轧无取向电工钢析出物的影响. 钢铁研究学报, 2002, 14(1): 34
- 6 Shin E J, Seong B S, Han Y S, et al. Study of Precipitate and Texture in Low-carbon Steels by Neutron Scattering Techniques. Physica B, 2004, 350: e475

夏兆所(1966-),男,博士,高级工程师,从事冷轧硅钢研究与开发。