

· 工艺技术 ·

## 50W1300 冷轧无取向电工钢带的工业试制

李士琦<sup>1</sup> 王忠诚<sup>1,2</sup> 赵宏<sup>1</sup> 刘润藻<sup>1</sup> 王玉刚<sup>1</sup>

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083; 2 中国国际工程咨询公司,北京 100044)

**摘要** 采用 40 t 氧气顶吹转炉-180 mm × 495 mm 板坯连铸-连轧工艺流程,试制了 0.5 mm × 480 mm 3 t 50W1300 冷轧电工钢带(铸坯成分%:0.04~0.06C,0.82~0.96Si,0.35~0.40Mn,0.015~0.017P,0.014~0.019S)。通过钢包吹氩,控制钢水终点温度 1 650~1 670 °C,钢中氧含量由 72.9 × 10<sup>-6</sup> 降至 22.9 × 10<sup>-6</sup>。试制的冷轧无取向电工钢带成品的电磁性能和力学性能均达到 GB/T2521-1996 中 50W1300 标准要求,适用于小型电动机转子的制造。

**关键词** 50W1300 冷轧电工钢 氧气顶吹转炉 成分设计 试制

## Commercial Pilot Production of 50W1300 Cold Rolled Non-Orientation Electrical Steel

Li Shiqi<sup>1</sup>, Wang Zhongcheng<sup>1,2</sup>, Zhao Hong<sup>1</sup>, Liu Runzao<sup>1</sup>, Wang Yugang<sup>1</sup>

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083; 2 China International Engineering Consultation Co, Beijing 100044)

**Abstract** The 0.5 mm × 480 mm 50W1300 non-oriented electrical steel sheet 3 t (0.04 ~ 0.06C, 0.82 ~ 0.96Si, 0.35 ~ 0.40Mn, 0.015 ~ 0.017P, 0.014 ~ 0.019S) has been researched and produced by using 40 t LD converter - 180 mm × 495 mm slab concasting - continuous rolling flow sheet. The molten steel temperature was controlled between 1 650 °C and 1 670 °C and the oxygen content in steel decreased from 72.9 × 10<sup>-6</sup> to 22.9 × 10<sup>-6</sup> by argon blowing in ladle. The electromagnetism properties and mechanical properties of pilot produced cold rolled non-orientation electric steel all met 50W1300 requirement of GB/T2521-1996 being suitable for manufacturing rotor of small motor.

**Material Index** 50W1300 Non-Oriented Electrical Steel, LD Converter, Composition Design, Pilot Production

采用普通钢铁生产流程,生产带宽 ≤ 500 mm 小电机用低成本冷轧电工钢带的工艺路线,作为宽带产品的补充。其技术核心为电工钢成分设计。

### 1 成分设计

试制的产品公称厚度为 0.5 mm 的冷轧电工钢窄带,其用途定位是小型电机铁芯,主要性能指标要求见表 1。产品使用性能主要考虑以下几点:

(1) 要求磁感应强度值高,以便节约材料减轻电机重量,降低成本<sup>[1]</sup>。因此,钢中硅含量不宜过高。

(2) 电机转子旋转速度方向,要求有较高的断裂强度( $\sigma_b$ )和屈服强度( $\sigma_s$ );电机的铁芯材料要有良好的冲片性能。以选择钢中硅含量较低为宜。

(3) 为保证铁芯叠片后的几何形状,用冷轧电工钢取代热轧电工钢,一般选用较低硅含量电工钢。

从生产工艺可操作性考虑,应注意下列几点:

(1) 转炉炼钢终点磷、硫成分尽可能接近普通碳素优质钢的要求;(2) 转炉炼钢终点碳的控制不宜过低;(3) 用硅合金化处理实际上有“沉淀脱氧”的效果,然而硅含量过高,要求较大地降低连铸坯速度,影响了炉-机匹配。

工业试验选定 GB/T2521-1996 中 50W1300 牌号的冷轧电工钢为试制目标,设计成分要求如表 2。

### 2 生产工艺设计

#### 2.1 工艺流程

表 1 GB/T2521-1996 冷轧无取向电工钢电磁和工艺特性

Table 1 Electromagnetism and process characteristics of cold rolled non-oriented electrical steel, GB/T2521-1996

牌号	公称厚度/ mm	理论密度/ (kg · m <sup>-3</sup> )	磁性能(50Hz)		最小弯 曲次数	最小叠 装系数/ %	抗拉强度/ MPa	伸长率/ %
			最大铁损(P <sub>1.5</sub> )/ (W · kg <sup>-1</sup> )	最小磁感(B <sub>500</sub> )/ T				
50W700	0.50	7 800	7.00	1.68	10	97	≥320	≥22
50W800	0.50	7 800	8.00	1.68	10	97	≥300	≥22
50W1000	0.50	7 850	10.00	1.69	10	97	≥290	≥22
50W1300	0.50	7 850	13.00	1.69	10	97	-	-

表 2 试验钢冶炼成品成分设计要求/%

Table 2 Chemical composition requirement of test steel / %

C	Si	S	P	金属残余元素
0.04 ~ 0.05	0.80 ~ 1.00	0.005 ~ 0.010	0.010 ~ 0.030	≤ 0.50

注:碳含量为氧气转炉终点碳

采用的工艺流程为:普通含铁原料→烧结、造球→高炉炼铁→氧气转炉炼钢→小板坯连铸→板坯加热→热连轧带卷→酸洗→冷轧→连续退火→成品,与一般的生产流程相比<sup>[2,3]</sup>,氧气转炉之前缺少了铁水脱硫工序,氧气转炉炼钢之后缺少了真空精炼工序。该流程的技术难度主要在于氧气转炉冶炼的成分和工艺操作控制。

## 2.2 氧气转炉冶炼和板坯连铸

选取含硫量较低的铁水,进行冶炼;提高转炉供氧强度,精心操作,严格控制终点碳含量;出钢过程二次挡渣,减少带入钢渣量;出钢过程加入优质 FeSi 和 SiMn 合金,使钢中硅含量达到设计值(0.80% ~ 1.00% Si);采用钢包吹氩,吹氩过程中测定钢水中氧含量,调整 Al 线、CaBaSi 线加入量和吹氩搅拌时间。

连铸过程需采用全程保护浇铸。钢包至中间包采用氩封长水口,中间包加硅钢专用覆盖剂。钢水过热度控制在 10 ~ 30 °C,导流墙控制流场,去除夹杂,中间包温度控制在 1550 ~ 1580 °C。结晶器需加硅钢专用保护渣以防止增碳,喂铝线,并要求液面保持稳定,以防止卷渣。硅钢导热性能比普通钢差,含硅量为 1.00% 的电工钢其导热系数为 0.385

W/(cm·°C),故应适当降低拉速,提高二冷水比水量。铸坯定尺(保障卷重)为 12 m。

## 2.3 带钢热轧

电工钢板坯低温段加热速度过快,内部会形成不可逆的裂纹,须严格控制加热炉温度制度。

试验电工钢 Ar<sub>3</sub> 温度为 870 °C 左右,设定终轧坯温度在 850 °C 左右<sup>[4]</sup>,并采用后段冷却和高温卷取方法,以达到常化和预退火改善织构及磁性的作用,设计卷取温度为 700 °C<sup>[5]</sup>。

试制电工钢的热态力学性能与低碳钢相近,可参考低碳钢的轧制制度。设定热轧后带卷的厚度 ≤ 3.0 mm,尺寸公差不得超过相关标准要求。

## 2.4 冷轧和成品退火

冷轧工艺要点为<sup>[6]</sup>:(1)冷轧总压下量 ≥ 80%,轧制过程中每道次应尽可能采用大压下量,最后一道相对较小;(2)轧制过程中,前后单位张力应适宜,控制为该钢种屈服强度的 40% 左右。

工业实验采用连续退火工艺,退火温度选定在 850 ~ 950 °C 范围之内<sup>[7]</sup>。退火过程采用分解氨保护气氛,并控制保护气氛的露点。

## 3 冷轧电工钢的试制工艺

采用 40 t 氧气顶吹转炉冶炼,冶炼 3 炉,共计 120 t。所用铁水碳含量 4.28% ~ 4.62%,硫含量 0.025% ~ 0.052%。

钢包吹氩终点温度 1650 ~ 1670 °C,氧含量由  $72.9 \times 10^{-6}$  降至  $22.9 \times 10^{-6}$ 。连铸坯成分见表 3。

采用连铸机的工艺装备及操作参数如下:

表 3 试制电工钢坯化学成分/%

Table 3 Chemical compositions of pilot produced electric steel billet / %

试验编号	C	Si	Mn	P	S	V	Cr	Ni	Cu	Als	Alt
1	0.06	0.96	0.40	0.015	0.019	0.006	0.02	0.015	0.015	0.004	0.006
2	0.04	0.82	0.35	0.017	0.017	0.005	0.02	0.007	0.012	0.005	0.007
3	0.05	0.91	0.40	0.016	0.014	0.010	0.03	0.009	0.014	0.015	0.024

铸机机型为 4 点矫直全弧形板坯连铸机;铸机流数为 1 机 2 流;弧形半径 6.5/8.6/12.8/25 m;流间距 650 mm;铸坯断面 180 mm × 495 mm;结晶器铜板高度 850 mm;冶金长度 18.03 m;拉速 0.8 ~ 1.0 m/min;比水量 0.8 L/kg;定尺 12 m。

试制所得铸坯表面质量良好,无裂纹、气孔、分层等缺陷。只是由于拉速较慢,振痕较 Q195 略深,铸坯内部没有明显缩孔和疏松。生产铸坯 22 块,共 110 t,内外部质量全部合格。

选用热轧机组主要工艺参数如表 4。设计经 9 道次粗轧,将钢带由 180 mm 轧至 60 mm,再经连轧机组 6 道次精轧轧成规格(mm)为 2.75 × 480 × L 的热卷钢带,高温卷取单卷重 4.5 t。

粗轧前(出钢前)用 100 MPa 高压水喷淋,第 1 次去除氧化铁皮。在粗、精轧中再进行第 2、3 次除鳞,使氧化铁皮去除更彻底,保证热钢带表面质量,为冷轧前的酸洗及冷轧创造条件。精轧机组 F1 机架轧制力约为 4500 kN。轧制过程一次成功,板型

表4 轧机工艺装备参数  
Table 4 Parameters of mill and rolling process

名称	轧机形式	轧辊直径/mm	辊身长度/mm	最大轧制速度/( $m \cdot s^{-1}$ )	最大允许轧制力/kN	
粗轧	平轧	二辊可逆式粗轧机	745	2 100	4.6	-
	立轧	四辊不可逆式轧机	550	48	13.149	6 000
精轧	精轧工作辊	四辊不可逆式轧机	340	620	13.149	6 000
	精轧支撑辊	四辊不可逆式轧机	600	670	13.149	6 000

和边部质量良好,无气孔、裂纹等缺陷。

冷轧前热轧钢卷用20%的盐酸溶液酸洗,酸洗温度70~90℃。钢带酸洗时间1~3 min。酸洗后喷水清除表面酸液和污垢,再经70~90℃的 $Na_2CO_3$ 碱性水溶剂钝化处理,最后清洗并吹干。

试制采用四辊可逆式轧机,轧成规格(mm)为0.5×480的冷轧无取向硅钢带。

轧机工艺装备参数为:支撑辊 $\Phi 520$  mm;工作辊 $\Phi 180$  mm;支撑辊长度600 mm;工作辊长度630 mm;最大轧制压力450 t;最大张力15 t;最大轧制速度70 m/min;试验料卷重1.5 t。

试验设计经6道次压下,严格控制轧制力及前后张力,将规格(mm)为2.75×480×L的卷带轧成规格(mm)为0.5×480×L的冷轧无取向硅钢带。轧后钢带平整,无裂边,无过氧化现象。

表面碱洗脱脂后的冷轧电工钢带,经连续式退火炉,在20%  $N_2$  + 80%  $H_2$  保护气氛下退火。气体流量15  $m^3/h$ 。均热炉温度控制在860℃,保温时间2.6 min,出炉温度60℃,空冷至室温。连续退火炉张力控制在1 kN左右。退火工艺流程见图1。

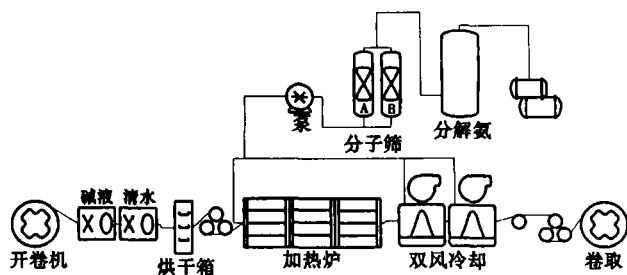


图1 连续退火流程图

Fig.1 Diagram of continuous annealing flow sheet

退火后成品表面质量良好,没有出现浪边和表面氧化发青的状况,韧性及硬度符合试验钢的要求。

#### 4 带钢的电磁和力学性能

成品符合 GB/T2521-1996、GB/T247-1988 板型、

形状和尺寸公差的要求,厚度允许偏差 $\pm 0.04$  mm,横向厚度差 $\leq 0.02$  mm,宽度允许偏差 $\leq 0.5$  mm。

冷轧电工钢成品在中国计量科学研究院电磁检测中心进行爱泼斯坦方圈磁性能检验,结果见表5。可以看出,其中两卷电磁性能中的铁损一项达到了国标50W1300的要求,另一卷带钢的铁损值略高;而成品磁感应强度均优于国标要求。

表5 电工钢成品磁性能检验结果

Table 5 Examination results of magnetic properties of electrical steel product

试样编号	样品重量/t	铁损/( $W \cdot kg^{-1}$ )		磁感/T		
		$P_{1.0}$	$P_{1.5}$	$B_{2\ 500}$	$B_{3\ 000}$	$B_{10\ 000}$
01	1.072	6.466	13.630	1.957	1.713	1.840
02	1.080	5.554	11.770	1.612	1.718	1.841
03	1.056	5.546	11.940	1.596	1.704	1.830

拉伸试验检测结果为:钢带抗拉强度 $\sigma_b$ 在460~560 MPa之间,力学性能达到国标最低牌号电工钢50W1300的要求。

#### 5 结论

(1) 试制冶炼3炉共120 t钢,连铸板坯22块;经热轧-酸洗-冷轧-热处理工艺,生产规格(mm)为0.5×480成品共3 t,生产工艺顺行。证明试验钢成分、工艺设计合理。

(2) 冷轧无取向电工钢带成品的电磁性能和力学性能均达到 GB/T2521-1996 中50W1300标准要求,适用于小电机转子的制造。

#### 参考文献

- Moseley D, Hu Y, Randle V, et al. Role of Silicon Content and Final Annealing Temperature on Microtexture and Microstructure Development in Non-oriented Silicon Steel. *Materials Science and Engineering A*, 2005(392):282
- 张新仁, 谢晓心. 低铁损高磁感无取向系列电工钢的研制. *钢铁研究*, 2000(1):19
- 李 军, 杜炳坤. 无取向硅钢带的研究. *金属功能材料*, 1997(2):79
- 储双杰. 生产工艺参数对无取向电工钢磁性能的影响. *特殊钢*, 2003, 24(2):37
- 周世春, 黄忘芽, 陈凌峰, 等. 热轧工序温度对中低牌号无取向电工钢电磁性能的影响. *宝钢技术*, 2004(2):29
- Huang B Y, Yamamoto K, Kaido C. Effect of Cold-Rolling on Magnetic Properties of Non-oriented Silicon Steel Sheets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2000(209):197
- Hou Chun-Kun. Effect of Properties Hot Band Annealing Temperature of Low-Carbon Electrical Steels. *ISIJ International*, 1996, 36(5):563

李士琦(1942-),男,博士生导师,冶金技术和工艺研究。

收稿日期:2006-01-06