

取向硅钢热轧钢带 BTQ001 研制与开发

卢晓禹 王少炳 黄利 董丽丽
(包钢钢联股份有限公司技术中心, 包头 014010)

摘要 BTQ001 钢的生产流程为 230 mm 铸坯-2.3 mm 热轧板-0.63 mm 一次冷轧板-850 °C 退火-0.27 mm 二次冷轧板-1 200 °C 退火, 分析各阶段产品显微组织的变化, 同时对取向硅钢成品磁性能进行统计。试验研究结果表明, BTQ001 取向硅钢热轧加热温度为 1 280 ~ 1 300 °C, 精轧终轧温度控制在 950 °C、卷取温度为 550 °C 为最佳生产工艺。

关键词 BTQ001 取向硅钢 热轧 显微组织 铁损值

Research and Development of Hot Rolled Strip of BTQ001 Oriented Silicon Steel

Lu Xiaoyu, Wang Shaobing, Huang Li and Dong Lili
(Technology Center of Steel Union Co. Ltd. of Baotou Steel(Group) Corp., Baotou 014010)

Abstract The production flowsheet of BTQ001 steel is 230 mm cast slab-2.3 mm hot rolled plate-0.63 mm first cold rolled sheet-850 °C annealing-0.27 mm second cold rolled sheet-1 200 °C annealing, the changes of microstructure of the products in each phase are analyzed, and the magnetic properties of the finished products of oriented silicon steel are statistically analyzed. The experimental results show that the BTQ001 oriented silicon steel optimum production process is to control the heating temperature at 1 280 ~ 1 300 °C for hot rolling, the finishing rolling at 950 °C and coiling at 550 °C.

Material Index BTQ001 Oriented Silicon Steel, Hot Rolling, Microstructure, Iron Loss Value

取向硅钢是一种重要软磁合金材料, 主要被用于各种变压器产品中的铁芯材料, 广泛应用于电力行业。取向硅钢根据工艺特点和磁性能的不同, 分为一般取向硅钢 (CGO) 和高磁感取向硅钢 (Hi-B) 两类。CGO 钢的生产工艺特点是以 MnS 为抑制剂和二次中等压下率冷轧法。高磁感取向硅钢 (Hi-B) 按采用的抑制剂和制造工艺不同有两种截然不同的生产方式^[1]。

取向硅钢国内主要生产企业有武钢、宝钢、首钢等, 均已经实现高等级取向硅钢产品全品类的稳定供货。包钢生产硅钢起步较晚, 目前生产产品级别较低。为填补包钢取向硅钢热轧产品的空白, 包钢根据现有生产线特点及生产装备能力, 采用 2 250 mm 热轧生产线生产取向硅钢热轧钢带 BTQ001, 进行化学成分体系设计和生产工艺路线设计, 在冷轧硅钢厂进行后续冷轧、退火等工序生产取向硅钢成品。

1 成分及工艺流程设计

1.1 取向硅钢化学成分设计

取向硅钢产品对化学成分体系的要求较为严格, 生产中规定的成分范围较窄。生产过程中, 成分略有波动都会对产品的性能产生较大的影响。其中最为基础的元素有 C、

Si、Mn、P、S、Als、N、Cu, 这些元素是形成抑制剂的基。钢板经过热轧后 C 元素析出细小弥散的 Fe₃C, 可阻碍初次晶粒长大; 适当增高 Si 含量, 可以降低铁损; MnS 作为取向硅钢中比较重要的抑制剂元素, Mn 元素与 S 元素的含量对取向硅钢二次再结晶有很大影响^[2]; AlN 为主要抑制剂, 性能不稳定, 命中率较低, 通常与 MnS 等抑制剂配合使用; Cu₂S 更容易析出, 可以增加硫化物总析出量, 同时细化硫化物质点, 利于高斯晶粒长大。另外, As、Sn、Ni、Ti、V 等作为残余元素存在于钢液中, 这些元素含量一般控制在 0.01% 以下。

基于各化学元素对取向硅钢成品磁性能的影响, 制定取向硅钢 BTQ001 的化学成分。主要化学成分设计如表 1 所示。

1.2 取向硅钢热轧钢带生产工艺

铁水预处理 → 260 t 转炉冶炼 → RH 精炼 → 连铸 → 热送热装 → 加热 → 高压水除鳞 → E1R1 粗轧 →

表 1 BTQ001 钢的化学成分 / %
Table 1 Chemical composition of BTQ001 steel / %

C	Si	Mn	P	S	Als	Cu	N	O
0.025 ~ 0.040	3.00 ~ 3.25	0.15 ~ 0.25	≤ 0.015	0.009 ~ 0.013	0.010 ~ 0.025	0.45 ~ 0.55	0.008 0 ~ 0.013 0	≤ 0.003 0

E2R2 粗轧→保温罩→飞剪→精轧高压水除鳞→F1~F7 精轧→层流冷却→卷取→托盘运输→取样、检验。

1.3 取向硅钢后续生产工艺

热轧硅钢原料→脱碳退火→渗氮炉→纵剪分卷→二次轧制→钢带表面涂氧化镁→罩式炉热退火→拉伸平整退火→纵剪及激光刻痕→包装称重出厂。

2 取向硅钢工业化生产试验

2.1 冶炼工艺

采用 260 t 顶底复吹转炉冶炼,转炉终点控制 $C \leq 0.035\%$ 、 $P \leq 0.014\%$ 、 $S \leq 0.010\%$ 、 $Mn \leq 0.20\%$,控制 Mn 含量是为了出钢、真空处理和浇铸过程中避免 MnO 与 Si 反应回锰。出钢过程中全程底吹氩气,使钢液保持沸腾状态,加入硅铁并确保出钢前全部熔化。在 RH 工序采用微碳硅铁、锰铁、铝粒、硫铁和氮化硅锰进行成分微调,其中氮含量采用环流氮气和氮化硅锰合金相结合的方式控制,此方法可以节省合金成本。

连铸工序采用扇形段电磁搅拌,铸坯厚度为 230 mm,过热度控制在 10~25 °C,拉速控制在 0.70~0.85 m/min,确保铸坯等轴晶比例 $\geq 50\%$,消除或减轻硫的中心偏聚,减轻白带区。

2.2 热轧加热工艺

在取向硅钢热轧钢带的生产过程中,细小弥散的 AlN、MnS 等作为抑制剂粒子,或是作为晶界偏聚元素,对抑制初次再结晶晶粒形成高斯织构($\{110\} \langle 001 \rangle$)起着至关重要的作用^[3]。为了保证 AlN 等抑制剂元素的固溶,并且保证其在接下来的热轧轧制过程中重新析出,进而获得大量细小弥散分布的抑制剂粒子,采用高温加热的铸坯是加热工艺的关键。热轧生产过程中的加热制度如表 2 所示。

2.3 热轧轧制工艺

在热轧精轧轧制过程中细小 MnS 粒子析出,因此必须控制好中间坯的厚度和粗轧出口温度,严格控制精轧过程中终轧温度和卷取温度^[4]。热轧工艺参数要求见表 3。

热轧精轧轧制过程中,采用高速轧制,加大冷却水量保证冷却速度。1200 °C 时, MnS 开始析出,在 950 °C 时析出行为基本停止。为保证粗轧出口温度、精轧终轧温度,粗轧采用 1+3 模式,精轧采用升速轧制,精轧轧制后进入

表 2 BTQ001 钢加热炉温度及加热时间控制

Table 2 Furnace temperature and heating time control for BTQ001 steel

均热时间/ min	加热时间/ min	均热温度/ °C	出炉温度/ °C
≥ 50	240	> 1280	1280~1300

表 3 BTQ001 钢热轧工艺控制要求

Table 3 Hot rolling process control requirements for BTQ001 steel

中间坯 厚度/mm	精轧出口 厚度/mm	粗轧出口 温度/°C	终轧温度/ °C	卷取温度/ °C	冷却模式
40	2.3	≥ 1110	950 ± 15	550 ± 15	前部冷却

层流冷却,冷却至 550 °C 进行卷取,这可使碳化物弥散分布在晶粒内,对最终获得细小均匀的初次晶粒有利。

2.4 冷轧及退火工艺

取向硅钢热轧原料厚度为 2.3 mm,经酸洗后经过 4 道次冷轧,一次冷轧到 0.63 mm,总压下率为 72.6%。一次冷轧到 0.63 mm 的取向硅钢产品在连续退火炉内进行脱碳退火,退火温度 850 °C 左右,脱碳退火后经过 2 道次二次冷轧到 0.27 mm,表面涂 MgO 隔离剂,在 1200 °C 左右进行高温再结晶退火,然后进行平整拉伸退火消除钢带的应力。

3 取向硅钢生产试验结果分析

3.1 取向硅钢热轧钢带显微组织

取向硅钢产品的织构具有遗传性,取向硅钢热轧板次表面高斯取向晶粒具有组织遗传继承性,因此,探究热轧产品组织和织构对保证成品磁性能有着极为重要的作用。取向硅钢热轧原料显微组织如图 1 所示。取向硅钢表面均为再结晶晶粒,组织心部出现较长的变形带。再结晶组织越多,高斯织构的形核带越多,得到的高斯织构越多,磁性能越好。

热轧轧制过程中,轧辊对轧件之间存在摩擦作用,使取向硅钢热轧钢带产生较大的剪切变形,取向硅钢热轧钢带表面的晶粒发生再结晶从而得到细小的等轴晶粒。随着轧制过程的进行,剪切变形逐渐

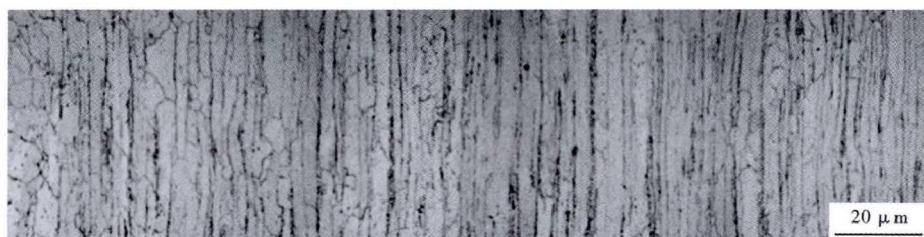


图 1 2.3 mm BTQ001 取向硅钢热轧组织

Fig. 1 Hot rolling structure of 2.3 mm BTQ001 oriented silicon steel

减小,故热轧钢带表面为较为均匀的铁素体等轴晶粒。取向硅钢热轧钢带的心部为变形的铁素体晶粒,在晶界上分布着少量的渗碳体。渗碳体产生的原因在于高温时的奥氏体相变。

3.2 取向硅钢热轧钢带织构

取向硅钢热轧钢带中的织构分布状态直接决定了后续冷轧过程产品和取向硅钢成品的织构。高斯织构($\{110\} \langle 001 \rangle$)起源于取向硅钢热轧钢带的表面,因此热轧产品表面高斯织构的强弱分布也影响着取向硅钢成品最终的高斯织构,热轧钢带表面处的高斯织构越强,最终取向硅钢成品磁性能越好^[5]。对取向硅钢热轧板表面织构进行了检测,取向硅钢热轧织构如图 2 所示。

由图 2 可以看出,主要织构类型为高斯织构($\{110\} \langle 001 \rangle$),还有一部分黄铜织构($\{111\} \langle 112 \rangle$)。取向硅钢热轧钢带在轧制过程中,由于轧辊和轧件表面产生强烈的摩擦,由此产生较大的剪切变形使取向硅钢热轧钢带表层形成强的 $\{110\} \langle 001 \rangle$ 择优取向。取向硅钢热轧板表面织构分布如表 4 所示。

3.3 热轧钢带析出物

图 3 为取向硅钢热轧钢带中的析出物 TEM 照片及能谱图,热轧板中的析出物主要是 AlN 颗粒,AlN 是取向硅钢所采用的主抑制剂,所以钢中均存在大量弥散分布的 AlN 粒子^[6]。脱碳退火后抑制剂平均尺寸为 21.63 μm ,分布密度为 $4.25 \times 10^{14}/\text{cm}^3$ 。在热轧轧制过程中,AlN 粒子主要是沿着晶界析出,晶粒内部析出很少,所以 AlN 分布不均匀。

3.4 冷轧及退火后显微组织

由图 4 可见,一次冷轧后的取向硅钢钢带保留了一定的热轧钢带组织特点。热轧钢带表层的等轴铁素体晶粒经过一次冷轧后转变为扁平的形状,晶粒沿轧制方向被拉伸,渗碳体分布不均匀。钢带心

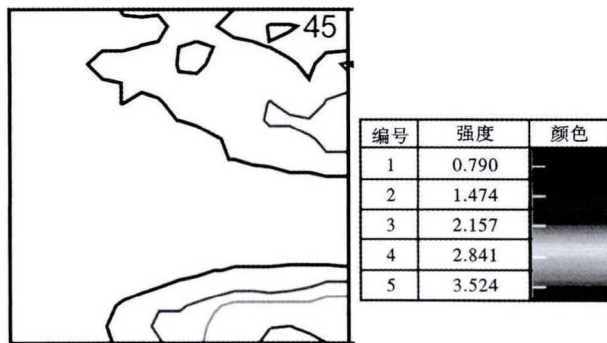


图 2 2.3 mm BTQ001 取向硅钢热轧产品织构
Fig. 2 Texture of 2.3 mm BTQ001 oriented silicon steel hot-rolled product

表 4 2.3 mm BTQ001 取向硅钢热轧板表面织构
Table 4 Surface texture of 2.3 mm BTQ001 hot rolled silicon steel plate

编号	高斯织构 $\{110\} \langle 001 \rangle$ 比例/%	黄铜织构 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 比例/%
1	6.91	-
2	5.23	-
3	6.15	-
4	3.41	5.64
5	5.75	9.68
6	3.99	2.58
7	4.53	7.33

部的形变组织经过一次冷轧后被进一步拉长,晶粒转变为纤维组织。20 μm 脱碳退火后为完全铁素体组织,发生了比较完善的再结晶,形成的形状规则的再结晶晶粒,尺寸较为均匀。铁素体平均晶粒尺寸约为 18.29 μm 。晶界非常干净,大部分为大角度晶界。

图 4(c)为二次冷轧后的取向硅钢钢带显微组织。二次冷轧后的取向硅钢钢带显微组织为纤维状,与一次冷轧板的纤维状组织较为类似。但由于二次冷轧中压下率较与一次冷轧相比较低,轧制过程中变形量较小,沿着轧制方向的晶粒伸长并不明显,与一次冷轧的组织有明显的区别。在这些纤维

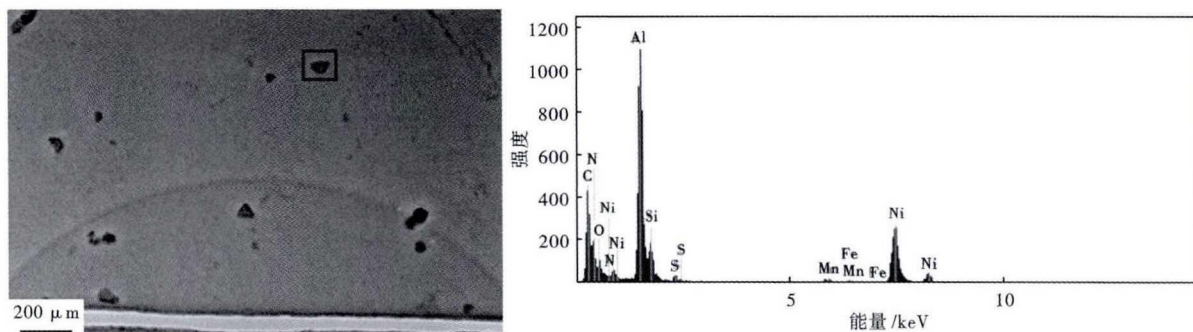


图 3 2.3 mm BTQ001 取向硅钢 TEM 及能谱图
Fig. 3 TEM and EDS of 2.3 mm BTQ001 oriented silicon steel

组织中夹杂着变形晶粒,晶界不够清晰,难以辨认^[7]。

图4(d)为取向硅钢成品照片。图4中可以看出,取向硅钢成品晶粒尺寸为200 μm左右。取向硅钢成品晶粒尺寸与热轧原料中高斯织构数量和抑制剂有关^[8],热轧原料中高斯织构越多,抑制剂含量越多,尺寸越细小,成品的晶粒尺寸越大,磁性能越好。

3.5 成品磁性能

取向硅钢产品是以其铁芯损耗和磁感应强度作为产品磁性能的保证值。对于电工钢板要求低铁芯损耗和高的磁感应强度。生产的取向硅钢产品成品磁性能如表5所示。取向硅钢成品铁损为1.05~1.17 W/kg(标准要求≤1.20 W/kg),磁感应强度为1.88~1.89 T(标准要求≥1.88 T),取向硅钢成品磁性能满足标准要求且控制稳定。

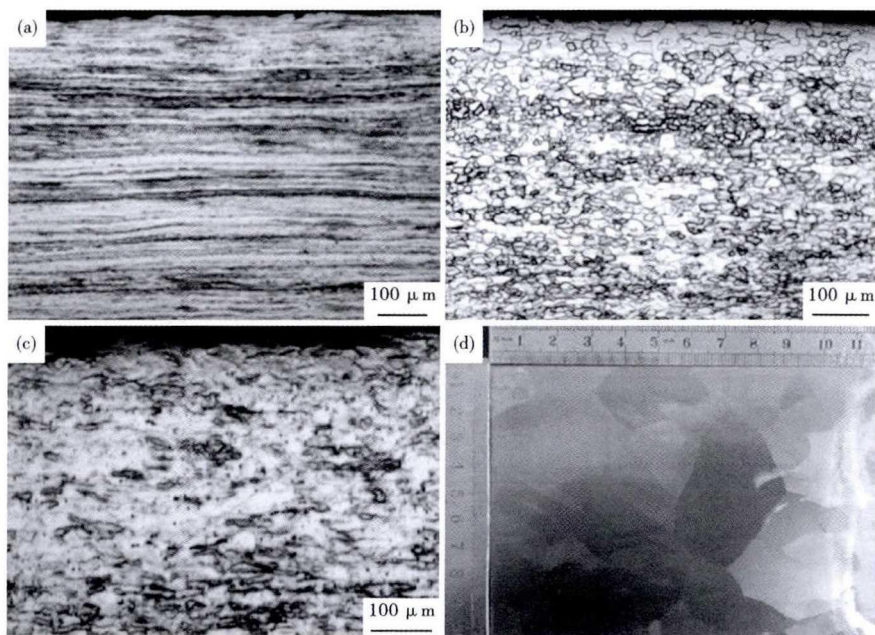


图4 BTQ001钢一次冷轧后0.63 mm板(a)和850 °C退火(b);二次冷轧后0.27 mm板(c)和1200 °C退火(d)的组织形貌

Fig.4 Morphology of structure of BTQ001 steel first cold rolled 0.63 mm plate (a) and annealed at 850 °C (b); second cold rolled 0.27 mm plate (c) and annealed at 1200 °C (d)

表5 BTQ001取向硅钢产品磁性能
Table 5 Magnetic properties of finished products of BTQ001 oriented silicon steel

编号	铁损 $P_{1.7/50}/(W \cdot kg^{-1})$	磁感 J_{800}/T
1	1.17	1.88
2	1.13	1.88
3	1.17	1.88
4	1.17	1.88
5	1.07	1.88
6	1.07	1.88
7	1.16	1.88
8	1.13	1.88
9	1.16	1.89
10	1.12	1.89
11	1.12	1.89
12	1.05	1.89
GB/T 2521.2-2016	≤1.20	≥1.88

4 结论

(1)包钢采用2250 mm热轧生产线生产取向硅钢热轧钢带 BTQ001 产品显微组织为铁素体,热轧钢带主要织构类型为高斯织构($\{110\} \langle 001 \rangle$),还有一部分黄铜织构($\{111\} \langle 112 \rangle$)。热轧板中的析出物主要是 AlN 颗粒。

(2)取向硅钢成品铁损为1.05~1.17 W/kg(标准要求≤1.20 W/kg),磁感应强度为1.88~

1.89 T(标准要求≥1.88 T),取向硅钢成品磁性能满足标准要求且控制稳定。

(3)本次试验采用的成分体系和生产工艺路线合理,生产的取向硅钢热轧钢带及取向硅钢热轧产品性能符合标准要求且控制稳定。

参考文献

- [1] 夏强强,李莉娟,刘立华,等.取向硅钢生产工艺研究进展[J].材料导报,2010,24(3):86-89.
- [2] 褚双杰,翟标,戴元远,等.合金元素对硅钢性能的影响[J].特殊钢,1998,19(1):7-11.
- [3] 张颖,傅耘力,汪汝武,等.高磁感取向硅钢中的抑制剂[J].中国冶金,2008(11):33-35.
- [4] 裴英豪,陈其安,唐广波,等.合金元素对取向硅钢高温组织中奥氏体含量的影响[J].钢铁,2010,45(3):16-19.
- [5] 颜建新,凌晨,付兵,等.钒钛对取向硅钢组织、织构和析出物的影响[J].金属热处理,2014,39(6):3-6.
- [6] 王新宇,项利,张晨,等.二次冷轧压下率对含钒钛取向硅钢组织和织构的影响[J].材料导报B:研究篇,2015,29(2):100-105.
- [7] 吴忠旺,赵宇,李军,等.低温取向硅钢热轧析出物与织构的研究[J].金属功能材料,2011,18(4):1-5.
- [8] 李晓强,李智彪,刘志坚,等.多元抑制剂对高磁感取向硅钢性能的影响[J].南方金属,2013(1):4-9.

卢晓禹(1985-),男,硕士(内蒙古科技大学),高级工程师,河北工业大学(本科)毕业,金属材料研究。

E-mail:18747297991@163.com

收稿日期:2020-04-28