

· 工艺材料进展 ·

## 取向硅钢生产工艺技术分析和发展趋势

董爱锋<sup>1</sup> 张文康<sup>2</sup>

(太钢不锈钢股份有限公司 1 技术中心;2 冷轧硅钢厂,太原 030003)

**摘要** 介绍了普通取向硅钢(CGO)和高磁感取向硅钢(Hi-B)铸坯高温加热两次冷轧、一次冷轧和铸坯低温加热两次冷轧、一次冷轧法 4 种成熟生产工艺的主要技术参数,取向硅钢理论研究(Goss 晶核和抑制剂)和生产技术现状。取向钢的发展趋势为:提高(110)[001]晶粒取向度,降低取向硅钢铁损,发展铸坯低温加热(≤1 300 ℃)和薄板坯连铸连轧流程生产取向硅钢工艺。

**关键词** 取向硅钢 铸坯加热 抑制制 二次再结晶 发展趋势

## Analysis on Process and Technology of Grain Oriented Silicon Steel and Development Trend

Dong Aifeng<sup>1</sup> and Zhang Wenkang<sup>2</sup>

(1 Technical Center; 2 Silicon Steel Plant, Taiyuan Iron and Steel (Group) Co Ltd, Taiyuan 030003)

**Abstract** Main technology parameters of four developed process: cast bloom higher temperature heating-double cold rolling or single cold rolling, lower temperature heating-double cold rolling or single rolling process for production of common grain oriented silicon steel (CGO) and high magnetic induction grain oriented silicon steel (Hi-B), theory research on grain oriented steel (Goss nucleus and inhibitor) and present situation of process are summarized in this paper. The development trend of grain oriented silicon steel is increasing (110)[001] grain oriented degree, decreasing iron loss of grain oriented silicon steel, developing cast bloom lower temperature heating (≤1 300 ℃) and thin slab concasting and continuous rolling flow sheet to produce grain oriented silicon steel.

**Material Index** Grain Oriented Silicon Steel, Casting Bloom Heating, Inhibitor, Secondary Recrystallization, Development Trend

硅钢占磁性材料用量的 90% 以上<sup>[1]</sup>,其中取向硅钢组织以高度趋于(110)[001]位向,即高斯方向的晶粒为主要特征,是唯一经过二次再结晶得到的钢铁制品<sup>[2]</sup>,其生产工艺复杂、制造技术严格。

### 1 取向硅钢的分类和生产工艺技术对比

取向硅钢按{110}<001>取向度和磁性的不同分为两大类,即普通取向硅钢(CGO)和高磁感取向硅钢(Hi-B)。由于 Hi-B 钢的易磁化轴在轧制方向上的取向度比 CGO 钢高,而且 Hi-B 钢铁损和磁致伸缩 λS 值比 CGO 钢明显降低,且应力敏感性更小,故其铁损比 CGO 钢至少降低 15%,相当于提高 3~4 个牌号,两者在性能上的差异见表 1<sup>[1]</sup>。

取向硅钢按制造工艺特点和铸坯加热温度的不

同可分为高温加热法(1 380 ℃以上)和低温加热法(1 280 ℃以下)。目前,世界上主要的取向硅钢生产工艺有 4 种,分别是高温加热两次冷轧法、高温加热一次冷轧法、低温加热两次冷轧法、低温加热一次冷轧法(表 2)。

### 2 取向硅钢理论研究

取向硅钢的制造流程设计和工艺参数调控的核心目标是在高温退火中通过二次再结晶过程形成全 Goss 织构({110}<001>),这需要 3 个前提条件:(1)初次再结晶组织中有足够强度的 Goss 取向晶粒,作为二次再结晶晶核;(2)具有可促进 Goss 取向晶粒异常长大的环境,如细小的初次再结晶晶粒、有利的初次再结晶织构(特别是 Goss 晶粒毗邻的晶粒取向),如{111}<112>、{554}<225>织构等;(3)具有合适数量和尺寸的弥散分布的抑制剂(通常为 MnS、AlN),以保持高温退火时升温阶段二次再结晶开始前初次再结晶晶粒细小,并在约 1 200 ℃均热使抑制剂粗化分解将 S、N 去除。

#### 2.1 取向硅钢中 Goss 晶核的起源与发展

表 1 CGO 和 Hi-B 钢的性能比较

Table 1 Comparison of characteristic of CGO and Hi-B silicon steel

硅钢	$B_s/T$	[001]平均 偏离角/°	[001]偏离 角<10°所占 的比例/%	二次晶粒 直径/mm	晶粒取向 度/%
CGO	1.82~1.85	约 7	75	3~5	85~90
Hi-B	1.92~1.95	约 3	100	10~20	95

研究表明由二次再结晶形成的高斯织构继承于热轧板表层1/10处的 Goss 晶粒,而其形成是由于热轧时板面与轧辊之间强烈的摩擦作用所产生的剪切应变而引起。从(100)[001]至(100)[011]位向的单晶,在热轧压下率超过 85% 时,就可以稳定产生(110)[001]位向 Goss 晶粒,随热轧温度的降低,热轧板面与轧辊之间摩擦系数增加,再结晶率减小,Goss 位向强度增加。在热轧板次表层下沿轧向伸长并具有(110)[001]位向的粗大形变铁素体晶粒内,有一些长 100 ~ 1 000 μm,宽 100 μm 的无应变区域,其(110)[001]位向比周围晶粒更为准确,如图 1<sup>[3]</sup>所示,这就是初次再结晶组织中 Goss 位向二次晶核的发源地。

目前,对于在高温退火升温过程的二次再结晶,具有(110)[001]位向 Goss 晶粒选择性长大机理的研究尚无统一的认识<sup>[4]</sup>,至今已发展出 4 种主要理论:①尺寸优势理论;②同位点阵晶界 CSL(Coincident Site Lattice Boundaries)理论;③高能晶界 HE(High Energy Boundaries)理论;④取向钉扎 OP(Orientation Pinning)理论。目前最著名的是同位点

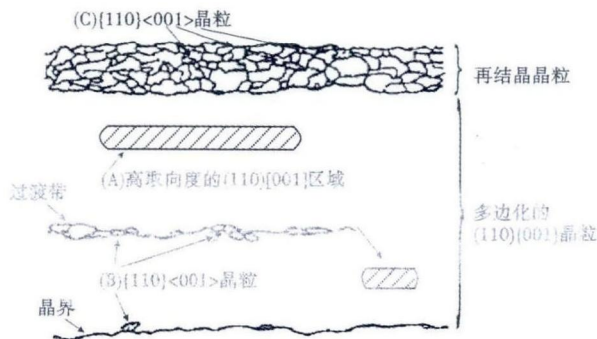


图 1 热轧板表面 Goss 晶粒取向  
Fig. 1 Orientation of Goss grains on surface of hot rolled plate

阵 CSL 理论与高能晶界 HE 理论<sup>[5-13]</sup>。但德、法和韩国一些研究都通过实验基本不支持同位点阵晶界机理。

### 2.2 取向硅钢中抑制剂的研究现状

为了在取向硅钢中获得(110)[001]位向的二次再结晶晶粒,必须在脱碳退火和最终高温退火(900 ~ 1 100 °C)升温过程中有力地抑制初次再结晶晶粒的正常生长和促进(110)[001]取向晶粒迅速长大。因此,取向硅钢中需要有一些称为抑制剂的细小、弥散析出相质点或晶界偏聚元素,其作用是为了抑制初次晶粒正常长大,使具有{110} <001>位向的初次晶粒(二次晶核)能够吞并周围的其它初次晶粒而发生异常长大,即发生二次再结晶。

因此,取向硅钢中需要有一些称为抑制剂的细小、弥散析出相质点或晶界偏聚元素,其作用是为了抑制初次晶粒正常长大,使具有{110} <001>位向的初次晶粒(二次晶核)能够吞并周围的其它初次晶粒而发生异常长大,即发生二次再结晶。

硅钢中的主要抑制剂有化合物 MnS、Cu<sub>2</sub>S、AlN、MnSe、MnTe 等,单元素 B、N、S、Se、Te、Sb 等。抑制相(化合物或单元素)本身对磁性有害,还可能抑制二次再结晶晶粒长大,因此抑制相的选用必须具备两个条件<sup>[14]</sup>:①细的弥散抑制相均匀地分布或富集于初次晶粒晶界;②二次再结晶开始后(950 °C左右),随着温度的升高,抑制相质点先通过 Ostward 效应粗化,随后溶解丧失抑制作用,从而促进二次晶粒进一步长大,最终在 1 180 ~ 1 200 °C 纯干氢气下去除对磁性有害的 S 和 N 等元素,即所选用抑制剂应为亚稳定性的。

表 2 4 种主要取向硅钢生产工艺技术

Table 2 Four kinds of main process for production of grain oriented silicon steel

工艺流程和特点	高温加热 两次冷轧法	高温加热 一次冷轧法	低温加热 两次冷轧法	低温加热 一次冷轧法
流程	转炉-RH-连铸	转炉-RH-连铸	转炉-RH-连铸	转炉-RH-连铸
铸坯加热	高温(1 380 °C)	高温(1 400 °C)	低温(1 260 °C)	低温(1 150 °C)
热轧后常化	-	常化	-	常化
冷轧	一次	一次	一次	一次
成品退火	脱碳	脱碳	低温回复	脱碳
渗氮	-	-	-	渗氮
工艺特点	高温加热 二次冷轧	高温加热 + 常化 一次冷轧	低温加热 二次冷轧	低温加热 + 常化 一次冷轧
优缺点	抑制剂 成品厚度 冶炼	MnS 脱碳 容易	MnS + AlN 脱碳 难度不大	AiN 脱碳 + 渗氮 难度大
热轧	难度大,作业 率和成材率 低,裂边严重, 能耗高,需专 用加热炉	难度大,作业 率和成材率 低,裂边严重, 能耗高,需专 用加热炉	容易,作业率 和成材率高, 能耗低,不需 要专用热轧加 热炉	容易,作业率 和成材率高, 能耗低,不需 要专用热轧加 热炉
冷轧	容易断带	容易断带	断带很少	断带很少
脱碳退火	效率高,工艺 简单	效率较高,工 艺较简单	效率低,工艺 较简单,中间 厚度脱碳退火	效率较高,工 艺复杂,增加 渗氮工序
高温退火	工艺简单	工艺简单	工艺复杂	工艺复杂
表面质量	容易控制	较难控制	最难控制	难控制
产品磁性能	CGO 产品,性 能最差	Hi-B 产品,性 能好	CGO 产品,性 能较好	Hi-B 产品,性 能好,也可以生 产 CGO 产品
生产成本	高	最高	低	最低
技术难度	最简单	难度大	较难	难度最大
产品竞争力	最弱	强	较强	最强

注:成品退火后各工艺均进行涂敷 MgO + 烘干,罩式炉或环形炉高温退火,平整拉伸退火,涂敷绝缘涂层(或激光刻痕)等。

表 3 化合物抑制剂有关工艺参数  
Table 3 Relative process parameters for compound inhibitor

抑制剂	固溶温度/℃	沉淀析出处理	净化气氛	净化温度/℃	抑制剂形态和有效尺寸	抑制剂元素合适含量/%
MnS	1 280 ~ 1 350	900 ~ 1 000 °C 热轧和随后冷却	干氢	> 1 200	球形 26 nm, 10 <sup>12</sup> ~ 10 <sup>14</sup> 个/cm <sup>3</sup>	Mn = 0.06 ~ 0.10 S = 0.018 ~ 0.025
AlN	1 250 ~ 1 300	950 ~ 1 200 °C (950 ~ 1 400 °C) 急冷	干氢中性还原	1 150 ~ 1 200	针状、杆状 100 nm, 10 <sup>22</sup> 个/cm <sup>3</sup>	Al = 0.003 ~ 0.025 N = 0.006 ~ 0.013
Cu <sub>2</sub> S	1 200 ~ 1 250	热轧和随后急冷	干氢	1 180 ~ 1 200	球形 50 nm	Cu = 0.1 ~ 0.7 S = 0.018 ~ 0.025
VN	> 1 000	热轧和随后急冷	2/3 N <sub>2</sub> + 1/3 H <sub>2</sub> 干氢	1 100 ~ 1 150	-	V = 0.10 ~ 0.15 N = 0.002 ~ 0.003
MnTe	1 150 ~ 1 200	热轧和随后急冷	干氢	1 150	球形 80 ~ 100 nm	Mn = 0.04 ~ 0.15 Te = 0.035 ~ 0.08 S/Te = 0.1 ~ 0.6
MnSe	1 360	冷轧前 1 050 °C 沉淀处理	干氢还原气体	1 150	-	Mn = 0.045 ~ 0.07 Se = 0.02 ~ 0.08
TiN	1 250 ~ 1 350	热轧和随后急冷	N <sub>2</sub> + H <sub>2</sub>	1 000 ~ 1 300	球形 100 nm	Ti = 0.01 ~ 0.10 N > 0.005

表 4 化合物抑制剂有关特征参数

Table 4 Relative characteristic parameters for compound inhibitor

抑制剂	初次晶粒 平均直径 (d)/mm	二次晶粒 平均直径 (D)/mm	最佳磁性 (B <sub>s</sub> )/T	(100)[001] 取向度/%	[001]与 轧向平均 偏角/°
MnS	0.01 ~ 0.03	3 ~ 5	1.82	84 ~ 90	7
AlN	0.01 ~ 0.02	10 ~ 20	1.92	95	3
MnTe	0.01 ~ 0.03	3 ~ 4	1.89	93	3.5
MnSe	0.01 ~ 0.03	2 ~ 4	1.90	93	3.5

表 5 世界主要取向硅钢生产厂采用的工艺

Table 5 Process for grain oriented silicon steel at steel works in the world

生产厂	工艺
日本新日铁	八幡采用低温加热一次冷轧生产 Hi-B 和 CGO 产品; 广畑采用高温加热一次冷轧生产 Hi-B 产品, 高温加热两次冷轧生产 CGO 产品
韩国浦项	采用低温加热一次冷轧工艺生产, 绝大部分为 Hi-B 产品
德国蒂森	高温加热一次冷轧工艺正逐步淘汰, 向低温加热一次冷轧工艺转变
美国 AK	高温加热两次冷轧 CGO, 高温加热一次冷轧 Hi-B
俄罗斯 新利钢	只生产 CGO 产品
俄罗斯 维兹	只生产 CGO 产品(热轧卷外购)
中国 武钢	主要采用低温加热两次冷轧工艺生产 CGO 产品; 主要采用低温加热一次冷轧工艺生产 Hi-B 产品
宝钢	采用高温加热两次冷轧工艺生产 CGO 产品; 主要采用低温加热一次冷轧工艺生产 Hi-B 产品
鞍钢	目前没有 Hi-B 产品, 只生产低牌号 CGO 产品, 脱碳退火线没有渗氮功能
首钢	规划采用高温加热两次冷轧 CGO, 高温或低温加热一次冷轧 Hi-B, 目前正在建设, 没有产品

MnS 是制造取向硅钢最早采用的抑制剂, AlN 作为抑制剂在生产取向硅钢中应用首先是从日本开始的, 与 MnS 用于生产 Hi-B 钢。在取向硅钢生产中, 作为抑制剂的化合物还有 VN、MnTe、MnSe、TiN 和 VC 等。表 3 和表 4 给出了部分抑制剂的特征参数。

### 3 取向硅钢生产技术现状

目前世界仅有 16 家企业可以生产取向硅钢<sup>[15-17]</sup>。高端取向硅钢产品主要分布在日本、韩国和德国。表 5 给出了世界主要取向硅钢生产厂采用的工艺和主要产品类型。

取向硅钢最先进的生产厂是新日铁的广畑厂和八幡厂, 主要生产 Hi-B 取向硅钢。广畑率先开发了以 MnS + AlN 为抑制剂的高磁感取向硅钢, 一举确立了领先地位。广畑采用高温加热法生产取向硅钢, 配备了电磁感应短时间快速加热装置。1996 年八幡厂采用新的低温加热工艺生产 Hi-B 取向硅钢。其特点是以 AlN 作为抑制剂, 铸坯加热温度降到 1 150 ~ 1 200 °C, 热轧板经过常化, 采用一次大压下冷轧, 冷轧过程中进行时效处理, 脱碳退火后在含 NH<sub>3</sub> 的 H<sub>2</sub> + N<sub>2</sub> 气中进行渗氮处理。磁性能达到高温加热 Hi-B 取向硅钢的水平。

韩国浦项主要是仿照日本新日铁低温渗氮工艺, 全部产品采用低温加热一次冷轧工艺生产, 而且绝大部分产品为 Hi-B。

德国蒂森克虏伯开发了以 Cu<sub>2</sub>S + AlN 为主, 并以 MnS + Sn 为辅作为抑制剂的低温加热一次冷轧法, 生产 Hi-B 取向硅钢。其工艺特点是高温常化处理 + 一次大压下率冷轧工艺, 并采取冷轧时效处理。

俄罗斯采用低温加热两次冷轧法主要生产 CGO, 采用 AlN + CuS 为抑制制, 其特点是 Cu 含量(约 0.50%) 和 Mn 含量(约 0.20%) 较高, 虽然采用 AlN 为抑制剂, 但不需要常化处理, 仍采用二次冷轧法, 中间退火即将 C 脱到 0.003% 以下。

国内武钢一硅钢引进日本新日铁技术, 采用高

温加热两次冷轧法生产 CGO 产品、高温加热一次冷轧法生产 Hi-B 产品,但 Hi-B 产量少;二硅钢采用低温加热两次冷轧法生产 CGO 产品;三硅钢主要采用高温加热一次冷轧法生产 Hi-B 产品。

宝钢一期主要采用高温加热两次冷轧法生产 CGO 产品和高温加热一次冷轧法生产少量 Hi-B 产品。

鞍钢 2009 年 8 月一期建设完成,一期采用两种工艺,高温加热两次冷轧法生产 CGO 产品,高温加热一次冷轧法生产 Hi-B 产品。目前,没有 Hi-B 产品,只生产低牌号 CGO 产品。

#### 4 取向硅钢生产技术的发展趋势

目前取向硅钢工业研究的主要方向是:(1)改善取向硅钢产品的磁性能,采用磁畴壁移动均匀化和细化磁畴等方法降低铁损、减小磁滞伸缩系数,减少能耗并降低变压器的噪声;(2)采用低温加热工艺和更紧凑的生产流程(如薄板坯连铸和双辊薄带连铸工艺生产取向硅钢等),降低生产成本,保持产品市场竞争力。

取向硅钢生产技术未来发展趋势主要集中在以下 4 方面:

(1)提高(110)[001]晶粒取向度的研究。

取向硅钢的磁感强度只与(110)[001]晶粒取向度或(110)[001]位向偏离角有关,为提高晶粒取向钢的取向度,选用对初次再结晶晶粒长大具有高抑制能力的抑制剂将起关键作用。美国首先采用 MnS 作抑制剂,后工序采用二次冷轧法制成了(110)[001]织构位向与轧向平均偏离角 $\leq 7^\circ$ 的普通取向硅钢。

1968 年新日铁公司在 Goss 专利基础上开发了用 AlN + MnS 作抑制剂,高温常化后析出细小 AlN 粒子,对初次再结晶具有更强的抑制能力。后工序采用一次冷轧法,配合其它工序的特殊处理,使(110)[001]织构位向与轧向平均偏离角降低到 $\leq 3^\circ$ 、生产出铁损更低、磁感更高的 Hi-B 取向钢。

近年来日本新日铁公司采用 AlN 作抑制剂,脱碳退火后在 $> 1000 \times 10^{-6} \text{NH}_3$ 的 $> 75\% \text{H}_2 + \text{N}_2$ 的连续炉内渗氮处理,控制 $\text{PH}_2\text{O}/\text{PH}_2 \leq 0.04$ ,渗氮量为 $(120 \sim 200) \times 10^{-6}$ ,渗氮处理后在 $> 10\% \text{N}_2 + \text{H}_2$ 中以 $15 \sim 25 \text{ }^\circ\text{C}/\text{h}$ 速度升温到 $(1000 \sim 1100 \text{ }^\circ\text{C}) \times (10 \sim 20 \text{ h})$ 退火,使二次再结晶完善后再升温至 $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ , $0.2 \text{ mm}$ 厚板的 $B_8$ 达 $1.94 \sim 1.95 \text{ T}$ ,该法生产的 Hi-B 钢中 AlN 对初次再结晶晶粒长大的抑制能力较 AlN + MnS 抑制剂方案更强,磁感更高。

(2)降低取向硅钢铁损的研究。

进一步降低取向硅钢铁损的措施主要有细化磁畴(这对降低 Hi-B 钢和 $\leq 0.23 \text{ mm}$ 厚产品的铁损更有效)、提高硅含量、减小钢板厚度以及减小二次再结晶晶粒尺寸等,由于硅钢中硅含量过高,易导致冷加工性变坏,因此通过提高硅含量降低铁损程度有限,因此目前降低铁损的主要目标在细化磁畴、减小钢板厚度以及减小二次再结晶晶粒尺寸方面。

通过在抑制剂中添加 Sn、Sb 等单质元素<sup>[18-19]</sup>,冷轧过程中采用时效轧制工艺可使 Hi-B 取向硅钢二次再结晶晶粒尺寸由 $10 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 约减小至 $4 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ ,可以使涡流损耗 $P_{17/50}$ 下降 $0.1 \sim 0.2 \text{ W/kg}$ 。

减薄厚度的前提条件是应使二次再结晶发展稳定,减薄厚度可使经典涡流损耗下降,如 Hi-B 钢由 $0.30 \text{ mm}$ 减薄到 $0.23 \text{ mm}$ ,磁滞损耗与异常涡流损耗不变,但经典涡流损耗由 $0.36 \text{ W/kg}$ 降到 $0.21 \text{ W/kg}$ ,下降了 $41.7\%$ 。

用物理及化学方法可使取向硅钢磁畴细化,明显降低异常涡流损失。如 $0.23 \text{ mm}$  Hi-B 取向硅钢,经激光照射(ZDKH)处理,磁滞损耗与经典涡流损耗不变而使异常涡流损耗由 $0.40 \text{ W/kg}$ 降至 $0.30 \text{ W/kg}$ ,下降 $25\%$ ,从而使总损耗降低。

(3)铸坯低温加热生产取向硅钢工艺<sup>[20-21]</sup>。

近年来许多取向硅钢生产厂为降低生产成本,提高生产效率,竞相开发了多种低温加热( $\leq 1300 \text{ }^\circ\text{C}$ )生产工艺,如:新日铁八幡厂抑制剂采用 AlN (Als $0.025\% \sim 0.035\%$ )为主,添加单元素 Cr ( $0.15\% \sim 0.20\%$ )、B ( $0.003\% \sim 0.004\%$ )或 Sn ( $0.05\% \sim 0.10\%$ )、Bi ( $0.005\% \sim 0.10\%$ )等方案生产 Hi-B 钢,铸坯加热温度降到 $1250 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下。控制热轧最后 3 道次总压下率 $> 40\%$ ,最后 1 道次压下率 $> 20\%$ ,经常化后,采用 $80\% \sim 90\%$ 压下率的一次冷轧法,冷轧过程中采用时效处理;脱碳退火后经渗氮处理(含 $\text{NH}_3$ 的 $\text{H}_2 + \text{N}_2$ 混合气),控制初次晶粒的平均尺寸 $d = 18 \sim 30 \text{ } \mu\text{m}$ ,可生产厚 $0.18 \sim 0.50 \text{ mm}$ 产品,AlN 的抑制作用比普通 Hi-B 钢中 AlN 的抑制作用更强,二次再结晶发展更稳定,适用于制造节能变压器,而且更有利于生产表面光滑(无玻璃膜)取向硅钢,这使 $P_{17}$ 可进一步降低。

日本 JFE 不利用抑制剂,将钢中 C 和 Al 含量均控制在小于 $0.01\%$ ,S、N、O 均控制在小于 $0.003\%$ 。铸坯加热温度降至 $1150 \sim 1250 \text{ }^\circ\text{C}$ ,热轧后经 $900 \sim 950 \text{ }^\circ\text{C}$  60 s 常化处理,冷轧前晶粒尺寸控制在 $200$

$\mu\text{m}$  以下,冷轧压下率控制在 70% ~ 91%,在干的 ( $\text{H}_2 + \text{N}_2$ ) 混合气氛中以 950 °C 初次再结晶退火,省去脱碳退火并采用 1 050 ~ 1 100 °C 低温最终退火(不需高温净化处理),制造成本明显降低,产品轧向磁性较低,但横向磁性有所提高,而且冲片性好,主要用于制作 EI 型变压器、镇流器、大型发电机和 T 型小电机。

韩国浦项采用以  $\text{Cu}_2\text{S}$  (Cu 0.3% ~ 0.7%) 和  $\text{AlN}$  (Als 0.013% ~ 0.019%) 为主抑制剂, Ni (0.03% ~ 0.07%) 和 Cr (0.03% ~ 0.07%) 的方案生产 Hi-B 钢,铸坯加热温度为 1 050 ~ 1 250 °C,热轧板经 900 ~ 1 150 °C 常化后进行一次冷轧(压下率为 84% ~ 90%),冷轧板厚度为 0.23 ~ 0.35 mm,经脱碳退火后,再进行渗氮处理。钢中添加适量的 B 元素 (0.005 5% ~ 0.006 5%) 可形成 BN,进一步加强抑制能力。

德国 Thyssen 采用  $\text{Cu}_2\text{S} + \text{AlN} + \text{Sn}$  作抑制剂,控制  $(\text{Mn}) \times (\text{Cu}) / (\text{S}) = 0.1 \sim 0.4$ 。铸坯加热温度为 1 050 ~ 1 250 °C,高温常化处理,采用冷轧时效

处理的一次大压下率冷轧。最终退火在  $< 10\%$   $\text{H}_2 + \text{N}_2$  混合气氛中缓慢升温,防止  $\text{Cu}_2\text{S}$  过早分解,成品磁性好。

(4) 短流程生产取向硅钢工艺<sup>[22-23]</sup>。

继德国蒂森 1999 年首次利用 CSP 流程生产无取向硅钢之后,意大利 AST 钢铁公司在特尔尼 (TERNI) 建成的 CSP 流程还生产过普通取向硅钢和高磁感取向硅钢。

## 5 结语

板坯低温加热技术是生产取向硅钢的主要发展趋势,低温加热一次冷轧法可以生产 Hi-B 产品,代表取向硅钢领域当今世界最高技术水平,由于成本最低,性能好,产品的市场竞争力最强。

因此,开发与应用世界最先进的低温加热 Hi-B 取向硅钢生产工艺技术,可以大力推动取向硅钢生产技术的进步,提升 Hi-B 产品的数量、质量和品种,缓解世界能源供应日益紧张的局面,对节约能源和保护环境起到重要的推动作用。

## 参考文献

- [1] 何忠治,赵宇,罗海文. 电工钢[M]. 北京:冶金工业出版社, 2012.
- [2] May J E, Turnbull D. Secondary Recrystallization in Silicon Iron[J]. Transactions of the Metallurgical Society of AIME, 1958, 212: 769-781.
- [3] Inokuti Y, Maeda C, Ito Y, et al. Transmission Kossel Study of Origin of Goss Texture in Grain Oriented Silicon Steel[J]. Transactions of Iron and Steel Institute of Japan, 1983, 23(5): 440-449.
- [4] Morawiec A. Grain Misorientations in Theories of Abnormal Grain Growth in Silicon Steel[J]. Scripta Materialia, 2000, 43(3): 275-278.
- [5] Harase J, Shimizu R. Texture Evolution by Grain Growth in the Presence of MnS and AlN Precipitates in Fe-3% Si Alloy[J]. Acta Metallurgica Et Materialia, 1990, 38(8): 1395-1403.
- [6] 周谊军,倪献娟,夏兆所,等. EBSD 研究取向硅钢晶粒取向和晶界结构[J]. 电子显微学报, 2009, 28(1): 15-19.
- [7] Harase J, Shimizu R, Dingley D J. Texture Evolution in the Presence of Precipitates in Fe-3% Si Alloy[J]. Acta Materialia, 1991, 39(5): 763-770.
- [8] Yoshitomi Y, Iwayama K, Nagashima T, et al. Coincidence Grain Boundary and Role of Inhibitor for Secondary Recrystallization in Fe-3% Si Alloy[J]. Acta Metall Materialia, 1993, 41(5): 1577-1585.
- [9] Lin P, Palumbo G, Harase J, et al. Coincidence Site Lattice (CSL) Grain Boundaries and Goss Texture Development in Fe-3% Si Alloy[J]. Acta Materialia, 1996, 44(12): 4677-4683.
- [10] Hayakawa Y, Szpunar J A. The Role of Grain Boundary Character Distribution in Secondary Recrystallization of Electrical Steels[J]. Acta Materialia, 1997, 45(3): 1285-1295.
- [11] Hayakawa Y, Szpunar J A. A New Model of Goss Texture Development during Secondary Recrystallization of Electrical Steel[J]. Acta Materialia, 1997, 45: 4713-4720.
- [12] Hayakawa Y, Muraki M, Szpunar J A. The Changes of Grain Boundary Character Distribution during the Secondary Recrystallization of Electrical Steel[J]. Acta Materialia, 1998, 46(3): 1063-1073.
- [13] Hayakawa Y, Kurosawa M. Orientation Relationship Between Primary and Secondary Recrystallized Texture in Electrical Steel[J]. Acta Materialia, 2002, 50(18): 4527-4534.
- [14] 魏天斌. 国外取向电工钢工艺发展新趋势[J]. 钢铁研究, 2007, 35(1): 55-58.
- [15] 李军,孙颖,赵宇,等. 取向硅钢低温铸坯加热技术的研发进展[J]. 钢铁, 2007, 42(10): 72-75.
- [16] 张琼予. 武钢冷轧硅钢新产品简介[J]. 电工钢, 2003(2): 2-4.
- [17] 李炳南. 武钢冷轧电工钢新产品简介[A]. 第九届全国电工钢专业学术年会论文集[C]. 宁波: 电工钢专业学术委员会, 2006: 43-48.
- [18] 刘治斌,刘宗斌,李军,等. Sn 或 Sb 对高磁感取向硅钢组织和磁性的影响[J]. 金属学报, 1991, 27(4): A282-A286.
- [19] 赵宇,何忠治,翁宇庆,等. 微量 Sn 在高磁感取向硅钢中的晶界偏聚[J]. 金属学报, 1992, 28(8): A327-A332.
- [20] 李军,孙彤. 取向硅钢铸坯低温加热技术的开发进展[A]. 第九届全国电工钢专业学术年会论文集[C]. 宁波: 电工钢专业学术委员会, 2006: 151-155.
- [21] 陈妍,许营,王赫男. 新日铁公司在中国申请电工钢专利技术综述[J]. 冶金信息导刊, 2004(6): 8-10.
- [22] 于永梅,李长生,王国栋. 薄板坯连铸连轧生产取向硅钢技术的研究[J]. 钢铁, 2007, 42(11): 45-47.
- [23] 仇圣桃,项利,岳尔斌,等. 薄板坯连铸连轧流程生产取向硅钢技术分析[J]. 钢铁, 2008, 43(9): 1-7.

董爱锋(1976-),女,博士(中科院物理所),高级工程师, 1999 年北京科技大学本科毕业,取向硅钢新产品的开发。  
E-mail: dongaf@tisco.com.cn

收稿日期: 2013-04-22