

电工钢的生产开发现状和发展趋势

刘光穆

(上海大学材料学院, 上海 200072)

刘继申 谌晓文 刘新和

(涟源钢铁集团有限公司, 湖南娄底 417009)

摘 要 电工钢包括普通($\leq 0.03\% \text{C}$, $\leq 2\% \text{Si}$)、无取向和取向($\sim 3\% \text{Si}$)电工钢。主要通过冶金工艺降低 C 含量($\sim 0.03\% \text{C}$)和钢中 O、N 含量, 控制钢中夹杂物、轧制和热处理工艺提高电工钢的磁性能。电工钢的发展趋势为简化工序, 利用薄板坯连铸连轧工艺和薄带铸带工艺生产电工钢。叙述了电工钢的发展历史和现行生产工艺及新品种和冶金工艺的发展。

关键词 电工钢 冶金工艺 发展

Current Status and Future Prospectus of Production and Development of Electrical Sheet Steel

Liu Guangmu

(Metallic Material School, Shanghai University, Shanghai 200072)

Liu Jishen, Chen Xiaowen and Liu Xinhe

(Lianyuan Iron and Steel Group Co Ltd, Loudi, Hunan 417009)

Abstract The magnetic properties of electrical sheet steel including general ($\leq 0.03\% \text{C}$, $\leq 2\% \text{Si}$), oriented and nonoriented ($\sim 3\% \text{Si}$) steels increase mainly by steelmaking process – decreasing C (to $\sim 0.003\%$), O and N content and controlling inclusion in steel, rolling and heat treatment process. The development trend of electrical sheet steel is to simplify production procedure, use thin slab concasting continuous rolling process and strip casing process to produce electric steel. The history on production and development, current production process and development of grade and metallurgical technology of electrical sheet steel are summarized in this paper.

Material Index Electrical Sheet Steel, Metallurgical Technology, Development

电工钢包括低碳低硅电工钢、无取向电工钢和取向电工钢。1974 年以前世界电工钢板的总产量增长速度很快, 1959 年约 200 万 t, 1969 年约 350 万 t, 1974 年约 450 万 t^[1]。从 1998 年至 2002 年, 日本的电工钢年产量维持在 200 万 t 左右^[2]。我国冷轧电工钢的生产始于 20 世纪 70 年代末。到 2003 年我国冷轧电工钢的生产量约为 130 万 t。

1 电工钢的发展历程

自 1903 年美国取得哈德菲尔德(R. H. Hadfield)电工钢专利使用权, 并于同年在德国和美国开始生产热轧电工钢片以来, 电工钢经历了三个发展阶段: (1) 热轧电工钢发展阶段(1882 ~ 1955 年), 这一阶段主要是考虑降低碳含量和提高硅含量来提高磁性, 减轻磁时效, 进一步降低铁损和改进绝缘膜, 以改进产品质量; (2) 冷轧电工钢发展阶段(1930 ~ 1967 年), 1934 年高斯(Goss)发明了

冷轧电工钢生产方法的专利, 该生产方法的最大特点是在热轧前于高温中加热板坯来提高取向性, 并且使产品磁性稳定下来, 从而取代热轧电工钢片; (3) 高磁感取向电工钢发展阶段(1961 ~ 1994 年), 由田口悟和坂仓昭等人发明的 ORIENT-CORE·Hi-B 的高磁感取向电工钢片(简称 Hi-B)生产技术使取向电工钢的生产发生了巨大变化, 它从 1964 年开始工业性生产试验, 1968 年正式生产销售, 这一技术的发明为以后高磁感取向电工钢的生产奠定了基础。

1.1 无取向电工钢

美国的 Armco 公司从 20 世纪 40 年代初开始生产无取向电工钢, 新日铁公司于 1958 年开始生产冷轧无取向电工钢。无取向电工钢的生产经历了电弧炉炼钢、平炉炼钢和顶底复合吹炼转炉炼钢的历程。20 世纪 50 年代末, 由于氧气顶吹转炉和真空处理等冶炼技术的发展, 钢中的 C、N、O 可降至 50×10^{-6} 以下, 故无取向电工钢磁时效明

显减轻,磁性大幅度提高。从1978年开始,新日铁公司和川崎钢公司采用顶底复合吹炼和三次脱硫工艺来冶炼纯净钢水以后,陆续生产出H8(RM8)、H7(RM7)、H6(RM6)高牌号无取向电工钢。1983年以来,新日铁公司采用同样的工艺生产了高效小电机用NC-M3和NC-M4低碳电工钢,基本解决了无取向电工钢铁损与磁感应强度这两个参量相互矛盾的问题。

无取向电工钢的发展与涂层技术的发展紧密相关。最初生产无取向电工钢片时,电工钢片表面只涂一层清漆,后来又发展到涂有机绝缘漆。

1.2 取向电工钢

1934年美国的高斯(Goss)发明了取向电工钢片生产方法的专利。它是高斯在Armco公司一次热轧事故中发现的:由于热轧事故,铸坯在炉内时间延长,板坯温度上升,结果发现这批料的磁性好且稳定。它的主要特点是采用MnS作为抑制剂,利用二次冷轧法;其难点为必须采取铸坯的高温加热工艺。在取向电工钢的生产开发中,具有划时代意义的是高磁感取向电工钢(Hi-B)的生产。Hi-B钢生产的核心为AlN的控制,包括冶炼成分和热轧板退火条件的控制^[2]。

2 电工钢的现行生产工艺

2.1 冷轧无取向电工钢

冷轧无取向电工钢的生产主要有两种类型:一次冷轧法和二次冷轧法。一次冷轧法一般用于低牌号(含硅量小于2.0%)无取向电工钢的生产。其特点是利用冷轧制度与热处理退火工艺来获得(111)[112]类型或者(110)[h,k,l]类型磁各向异性好的钢板。这种方法的优点是减少一次冷轧,工艺设备简单。但由于没有中间退火,脱碳能力差,所以必须选用含碳量低的电工钢原料卷,才能获得良好的磁性与高的生产率。二次冷轧法包括调质轧制法(临界变形法)和中间压下率法,主要用来生产高牌号无取向电工钢。它与一次冷轧法比较多了中间退火工艺,因而脱碳能力强。采用临界变形法的目的在于破坏冷轧或中间退火过程中所引起的取向织构,以获得无取向的钢板。

近年来,由于冶炼技术的发展,炼钢工序能够生产出碳含量小于 30×10^{-6} 的超低碳钢水,同时由于电磁搅拌技术在连铸中的成功应用,高牌号无取向电工钢的二次冷轧法逐渐被一次冷轧法取

代。目前,新日铁公司和川崎钢公司以及武钢主要用一次冷轧法生产无取向电工钢。

2.2 取向电工钢

冷轧取向电工钢的生产包括一次冷轧法和二次冷轧法。二次冷轧法通常用于生产一般牌号的取向电工钢,它由热轧带钢冷轧至中间厚度并进行退火,然后经过二次冷轧成最终厚度后进行最终退火等工序组成。其基本特点为:(1)以MnS或MnSe作为有利的夹杂来抑制初次晶粒的长大;(2)采用中等压下率的冷轧来形成形变织构(111)[112]。

一次冷轧法用于生产高磁感取向电工钢,它是将热轧带钢通过常化处理后一次冷轧至成品厚度,再进行脱碳退火。其生产特点为:(1)以AlN+MnS(以AlN为主)作为有利的夹杂来抑制初次晶粒的长大,促进(110)[001]晶粒长大;(2)以85%的大压下率形成再结晶的(110)[001]的冷轧形变织构。

3 电工钢生产工艺进展

3.1 取向电工钢

工业生产取向电工钢一直采用铸坯高温加热工艺,以保证获得稳定的高磁性,其缺点有:(1)化渣多,烧损量达5%,成材率低;(2)经常清理炉底,产量降低;(3)燃料费用高;(4)炉子寿命短;(5)制造成本高;(6)产品表面缺陷多。

为此人们一直想方设法降低铸坯的加热温度。目前所采取的方法主要有:

(1) Mn代Si。高锰电工钢用Mn部分代Si以及添加微量Al作为抑制剂,可降低板坯加热温度、降低最终成品退火温度和省略脱碳退火工序。1989年,日本住友金属公司屋铺裕义等提出了新型简单的无碳加工Si-Mn电工钢的想法。1995年新日铁公司吉富康成等开始研究这种新型Si-Mn钢。近年来,日本一直在研究这种新型钢种^[2]。

(2) 电工钢中加Cu。Cu对取向电工钢性能的影响是多方面的,其中重要的一条是起辅助抑制剂的作用,降低板坯加热温度^[1]。

(3) 脱碳退火后渗氮处理。新日铁公司一直在开展此方面的研究工作,并将其应用于生产高磁感取向电工钢。最近,意大利Terni公司Stefano Fortunati等人提出了利用CSP工艺和渗氮法生产高磁感取向电工钢的方法,并应用于工业生

产^[3,4]。

近年来,日本为了进一步降低取向电工钢的铁损,开发了细化磁畴技术,它包括用 Q 开关 YAG 或 CO₂ 激光沿横向照射 Hi-B 钢表面的不接触法、等离子喷射法、机械刻痕法、化学蚀刻法、放电处理法、电子束照射法、局部加热法、超声波振动和喷射流体法等^[1],它们对降低 Hi-B 钢和小于 0.23 mm 厚薄带的铁损很有效。

取向电工钢的发展有:(1) 为了进一步降低铁损,厚度(mm)已从常规的 0.30、0.27、0.23 向 0.20、0.18、0.15 发展;(2) 为适应小型化要求,磁感从 $B_8 = 1.80\text{ T}$ 、 1.90 T 向 $\geq 1.95\text{ T}$ 发展;(3) 进一步提高磁畴控制水平,开发细化磁畴、张力涂层、表面平滑化(镜面化)技术,进一步降低铁损;(4) 开发三次再结晶等工艺技术,研制磁感高、铁损低的产品。

一般取向电工钢生产的工艺流程以及新日铁、武钢、川崎生产 Hi-B 钢的工艺流程见表 1。

3.2 无取向电工钢

无取向电工钢的工艺进展主要表现在钢水的净化技术与工艺方面。减少和去除钢中杂质物的工艺进展为:(1) 采用优质的造渣材料和铁合金,设法减少炉衬和包衬中的 Ti、Zr 等进入钢水;(2) 利用真空精炼设施去除钢水中的 C、H、N、O、S 等

表 1 新日铁、武钢、川崎 Hi-B 高磁感取向电工钢和一般取向电工钢的工艺流程

Table 1 Flow sheet of Hi-B high magnetic induction oriented electrical sheet steel produced at Nippon Steel, Wuhan Steel, and Kawasaki Steel, and general oriented electrical sheet steel

Hi-B 高磁感取向电工钢		一般取向电工钢
新日铁及武钢	川崎	
炼钢 (3% Si, Al, N, Mn, S)	炼钢 (3% Si, Mn, Se, Sb)	炼钢 (3% Si, Mn, S 或 Se)
热轧	热轧(板厚 3 mm)	热轧
常化	常化	无
一次大压下冷轧 (> 80%)	第一次冷轧	第一次冷轧
	中间退火	中间退火
	第二次冷轧压下率 60% ~ 70%	第二次冷轧
脱碳退火	脱碳退火	脱碳退火
最终高温退火	最终高温退火(820 ~ 900 °C 二次再结晶退火, 1 100 °C 以上纯净退火)	最终高温退火(通常 1 100 °C 罩式退火)
平整退火	平整退火	平整退火
涂层	涂层	涂层

杂质元素^[5,6]; (3) 用中间包冶金^[7]和连铸技术^[8-10]进一步净化钢水。

对于无取向电工钢,新的成品退火方法采用二段式成品退火方式,即采用低温均热(750 ~ 850 °C)以改善织构;采用高温短时退火以促进晶粒长大;采用快速升温 and 慢速冷却的新型退火工艺来改善磁性。无取向电工钢生产主要工艺流程:

铁水脱硫→顶底复合转炉炼钢→真空精炼→连铸及电磁搅拌→热轧→(常化)酸洗→一次冷轧→成品退火及涂绝缘层→性能检测。

4 电工钢生产工艺和新品种的发展趋势

4.1 简化工序降低成本

在传统的“连铸厚板坯-热轧-冷轧”工艺中,减少工序是降低成本的有效措施。对于无取向电工钢,采用一次冷轧法轧制;对于一般取向电工钢,开发不常化的一次冷轧法和高温环形退火工艺等生产方法。

4.2 利用薄板坯连铸连轧工艺生产电工钢

薄板坯连铸连轧是近年来开发并得到快速发展的生产薄带材新技术。生产实践表明该技术在缩短生产周期、节约能源、减少基建投资以及降低成本等方面具有明显的优势。

日本钢管株式会社西本昭彦等人^[11]和住友金属公司屋铺裕义与冈本笃树^[12]发明了利用薄板坯生产无取向电工钢的方法。意大利 Terni 公司于 2000 年利用 CSP 薄板坯连铸连轧工艺生产取向和无取向电工钢,2003 年电工钢月产能力达 2 ~ 5 万 t,占该公司产品大纲的 13%^[13]。美国 Armco 公司也采用中等厚度薄板坯连铸连轧工艺生产少量电工钢^[14]。取向电工钢和深冲薄板钢成分对比见表 2。薄板坯和传统板坯电工钢性能和成分对比见表 3。

4.3 薄带铸轧生产电工钢工艺

薄板坯和中等厚度薄板坯连铸连轧工艺生产电工钢的工序中存在热轧工序。在薄带铸轧生产电工钢的工艺中,薄铸坯以 $1 \sim 10^5\text{ °C/s}$ 的速度冷却后直接轧制,制造成本降低,成品性能均匀稳定^[15],此工艺还处在研究开发之中。

4.4 电工钢新品种开发

在直流磁场中使用的电工钢方面,日本钢管公司开发了 FERROPERM(1% Al-Fe)热轧板。该钢的特点是无相变,为单一的铁素体相,因而退火

表 2 取向电工钢和深冲薄板钢成分对比/%

Table 2 Comparison of chemical composition between oriented electrical sheet steel and deep-drawing sheet steel /%

钢种	板厚/mm	C	Si	Mn	P	S	Als	N
GOSS(电工钢)	0.30	0.038 ~ 0.053	3.05 ~ 3.25	0.055 ~ 0.067	≤0.020	0.018 ~ 0.025	0.001 ~ 0.006	≤0.005 5
08Al(深冲钢)	0.2 ~ 0.4	0.05 ~ 0.12	≤0.03	0.25 ~ 0.65	≤0.035	≤0.035	0.015 ~ 0.065	-

表 3 55 mm 薄板坯和 230 mm 传统板坯冷轧电工钢板(0.35 mm)性能和成分(%)对比

Table 3 Comparison of chemical compositions (%) and magnetic properties of 0.35 mm sheet produced by 55mm thin slab and 230mm conventional slab

板坯	$P_{150/50}/W \cdot kg^{-1}$	B_{50}/T	C	Si	Mn	P	S	Als	N	O	Ti
55 mm 薄板坯	3.959	1.737	0.003 4	1.26	0.23	0.038	0.001	0.12	0.003	0.001	0.007
230 mm 板坯	3.661	1.688	0.001 8	1.25	0.21	0.016	0.003 5	0.25	0.001 8	0.001 5	<0.002

温度可提高至1 000 ℃以上,利用晶粒长大可得到极高的最大磁导率和很低的矫顽力。新日铁公司制成了取向纯铁,其饱和磁感度高,沿轧向磁性优良、导磁率高。

在工频下应用的电工钢方面,主要往低铁损、高磁通密度和薄规格化方向发展。川崎制铁通过净化钢质,适量添加 Si 和 Al,控制夹杂物形态以及利用织构控制技术等,开发了 35RM200 超低铁损的无取向电工钢。为了满足小型化和高效化的要求,继新日铁早期开发的 NC-M1-M4 之后,通过

采取净化钢质,调整 Si、Al 成分,添加 Sb、Sn 等微量元素等措施,川崎制铁又开发了高磁通密度的 RP 钢系列。

在中、高频下应用的电工钢方面:一般采用小于 0.20 mm 的薄带形式。无取向电工钢主要开发 6.5%Si 钢钢种,日本钢管公司首先用温轧和 CVD 渗硅法成功生产了 0.05 ~ 0.30 mm SUPERE CORE 牌号的 6.5%Si 钢;取向电工钢主要利用高 B_0 的原料,通过三次再结晶工艺,采用温轧法生产 6.5%Si 钢的取向电工钢薄带^[16]。

参考文献

- 何忠治. 电工钢. 北京:冶金工业出版社,1996,13
- 卢凤喜. 以 Mn 部分代 Si 生产晶粒取向电工钢片的探讨. 电工钢,2003(2):22
- Fortunati S, Cicale S and Abbruzzese G. Process for the Production of Grain Oriented Electrical Steel Strip Starting from Thin Slab. US Patent, 6273964B1, August 2001
- Fortunati S, Cicale S and Abbruzzese G. Process for the Production of Grain Oriented Electrical Steel Strip Having High Magnetic Characteristics, Starting from Thin Slab. US Patent, 6296719B1, October 2001
- Lee J and Morita K. Interfacial Phenomena Between Gas, Liquid Iron and Solid Lime during Desulfurization. CAMP-ISIJ, 2002, 15, 816
- Yang J, Okumura K, Kuwabara M and Sano M. Improvement on Desulfurization Efficiency of Molten Iron With Magnesium Vapor Produced in-situ by Aluminothermic Reduction of Magnesium Oxide. CAMP-ISIJ, 2002, 15, 812
- 史震兴, 余志祥, 叶枫. 实用连铸冶金技术. 北京:冶金工业出版社, 1998, 123
- Tani M, Toh T, Harada H, Fujisaki K, Anzai E and Matsumiya T. Electromagnetic Casting for High Quality of Continuously Cast Steel. CAMP-ISIJ, 2002, 15, 831
- Nakada M, Kubota J, Kubo N and Suzuki M. The Steel Flow Control System in Caster Mold by Traveling Magnetic Field. CAMP-ISIJ, 2002, 15, 829
- Zhang J M, Yu H X and Wang X H. Flow Control in Continuous Slab-Casting Mold by F Index Obtained Through Mathematical Simulation. CAMP-ISIJ, 2002, 15, 835
- 西本昭彦, 细谷佳弘, 占部俊明. 无方向性电磁钢板的制造方法. 日本公开特许公报, 平 3 - 260017
- 屋铺裕义, 冈本笃树. 无方向性电磁钢板的制造方法. 日本公开特许公报, 昭 63 - 60227
- Brascugli G, Mascanzoni A, Quix F and Schwellenbach J. First CSP Plant for Stainless Steel at AST, Italy, Proceedings of the Steel Conference "Stahl 2000-Talk About Steel". The German Iron and Steel Institute (VDEh), Dusseldorf, Germany, November 2000, 16
- 阿姆科的 Conroll 连铸-连轧厂的运行效果. 国际钢时代(中文版), 1998, 8
- 久保田猛, 立野一郎. 磁性优异的无方向性电磁钢板的制造方法. 日本公开特许公报, 平 2 - 194123
- 黎世德. 用于电子工业的电工钢研究发展动态. 电工钢, 2002(3):2

刘光穆, 男, 39 岁, 高级工程师。1988 年毕业于东北工学院钢铁冶金专业, 从事钢铁冶金工艺研究、产品开发及技术工作。

收稿日期: 2004-07-20