取向硅钢新生产工艺的发展*

霍慧贤,李艳霞,孙振东,刘鹏程,黄 斌

(包头市威丰稀土电磁材料股份有限公司,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 文章总结归纳了近年来工业上取向硅钢新的生产工艺,着重介绍了薄板坯连铸连轧工艺、细化磁畴、异步轧制生产取向硅钢、提高Si含量、隧道式连续罩式高温退火取代单体罩式退火、减薄厚度、双取向硅钢7种取向硅钢生产新工艺。这些新的生产工艺对于提高取向硅钢的磁感应强度、降低铁损、降低矫顽力等磁特性,而且在高效、节能、降低成本方面取得了良好的效果。

关键词: 取向硅钢; 薄板坯连铸连轧; 异步轧制; 隧道式连续罩式高温退火

中图分类号: TG142.1 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2020)06-0030-03

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2020.06.009

Development of New Production Technology for Oriented Silicon Steel

Huo Hui-xian, Li Yan-xia, Sun Zhen-dong, Liu Peng-cheng, Huang Bin

(*Baotou Wei Feng Rare Earth Electromagnetic Material Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: In this paper, the new production technologies for oriented silicon steel in industry in recent years are summarized, seven of them including thin slab casting and rolling technology, refining magnetic domain, asynchronous rolling, increasing content of Si, replacing monomer cover annealing with tunnel continuous high temperature cover annealing, thinning thickness and double oriented silicon steel are introduced. With these new production processes, the magnetic induction intensity can be improved, iron loss and such magnetic characteristic as coercivity can be reduced as well as the effects of high efficiency, energy conservation and cost reduction are good.

Key words: oriented silicon steel; thin slab casting and rolling; asynchronous rolling; tunnel continuous high temperature cover annealing

硅钢被誉为钢铁产品中的“工艺品”,主要用于制造各种电机、变压器和镇流器铁芯以及各种电器元件。硅钢,尤其是取向硅钢的制造工艺和设备复杂,成分控制严格,制造工序长,而且影响性能的因素多,因此通常把取向硅钢的产品质量作为一个企业质量管理水平的重要标志。电工硅钢一直是我国严重紧缺的钢材品种,但传统生产工艺复杂,生产技术难度大、生产工序长、成本高,生产高性能的硅钢片已受到很多制约。近年来,科研人员研发出一些新的生产工艺来提高取向硅钢的磁感应强度、降低铁损、降低矫顽力等磁特性,而且在高效、节能、降低成本方面取得了良好的效果。

* 收稿日期: 2020-09-01

作者简介: 霍慧贤(1973-),女,辽宁省营口市人,硕士,工程师,现从事取向硅钢生产设备维护、新产品研发工作。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1　目前取向硅钢的生产工艺

硅钢是硅含量在 0.5% ~5.0% 的超低碳钢板。通过控制轧制方向和采用再结晶工艺生产的具有高斯织构的硅钢片称为取向硅钢片。取向硅钢片按制造工艺特点和磁性分为普通取向硅钢片(CGO)和高磁感取向硅钢片(Hi-B)。

目前取向硅钢的生产工艺流程为:炼钢→热连轧→常化、酸洗→冷轧过程→脱碳退火(渗氮)→取向硅钢高温退火→拉伸平整退火→激光刻痕→产品检验、分条、包装入库。

2　取向硅钢的新生产工艺

2.1　薄板坯连铸连轧工艺

薄板坯连铸连轧工艺流程由炼钢炉(电炉或转炉)、炉外精炼、薄板坯连铸机、物流的时间节奏与温度衔接装置、热连轧机组等五个单元工序组成,将原来意义上的炼钢厂和热轧厂紧凑地压缩,有效地结合在一起。

薄板坯连铸连轧工艺省去了传统板坯生产的初轧工艺,铸坯的厚度薄,经过均热炉加热以后不再粗轧,直接轧制成 2.0 ~3.0 mm 厚度的热轧带卷,有利于实现一次冷轧工艺生产取向硅钢。薄板坯连铸连轧短流程具有快速凝固、道次压下大、铸坯温度均匀等工艺特点,因此发挥这种工艺特点生产特殊钢、硅钢、以热代冷薄规格和高强钢板带材。

2.2　细化磁畴

细化磁畴技术是以刻痕效应为基础而发展的。生产上已采用的沿成品钢板横向激光照射(也称激光刻痕)的不接触法可使铁损降低。激光束的热量在钢板的表面之下产生弹性—塑性形变区域。磁畴是通过在弹塑性形变区产生的压应力和刻痕间的张应力来细化的。取向度(磁感应强度)愈高和钢带愈薄,激光照射也愈明显。目前工业上除了激光刻痕外,还有机械刻痕(机)两种刻痕方法。

2.3　异步轧制生产取向硅钢

异步轧制是 2 个工作辊圆周速度不等使轧制变形区产生一种搓轧变形的轧制技术,由于异步轧制完全消除了外摩擦的阻碍作用引起的轧制压力的增加部分,因此与常规轧制相比异步轧制可以显著降低轧制压力,获得大延伸,提高了轧机的轧薄能力和生产效率,轧制精度亦可明显提高[1]。采用异步轧制的退火试样,ODF 截面图中出现更强的高斯织构,而且随着异步速比的增加,高斯织构强度增加,得到的磁性能更好[2]。这种方法可用于小于 0.1 mm超薄取向硅钢的生产。

2.4　提高 Si 含量

根据公式[3]:

$$P_T = P_h + P_e = KfB_m^a + \frac{1}{6} \times \frac{\pi^2 t^2 f^2 B_m^2 k^2}{\gamma\rho} \times 10^{-3} \quad (1)$$

式中,P_T 为铁损,W/kg;P_h 为磁滞损耗,W/kg;P_e 为涡流损耗,W/kg;K 和 a 为常数,由实验确定,a 值一般为 1 ~ 2,对 3% 的 Si-Fe 来说,$a \approx 1.6$;$K \approx 1.2 \times 10^{-11}$ J/(cm·G);f 为频率,Hz;B_m 为最大磁感应强度,T;t 为板厚,mm,ρ 为材料的电阻率,(Ω·mm²)/m;γ 为材料的密度,g/cm³;k 为波形系数,对正弦波形来说 $k = 1.11$。

Si 含量提高到 3.4% ~3.5% 会使电阻率 ρ 升高,P_e 与 ρ 电阻率成反比,进而铁损会明显降低,然而 Si 含量增高会使冷加工性变坏,因此通过提高 Si 含量来降低铁损程度有限。

2.5　隧道式连续罩式高温退火

用连续退火炉取代罩式退火主要目的:升温通过二次再结晶形成单一的(110)[001]织构,然后升温并保温使二次晶粒吞并分散的残余初次晶粒,二次晶粒组织更完整,晶界更平直,磁性能更好。

包头威丰公司研制的隧道式连续罩式高温退火炉已通过成果鉴定并申请发明专利,其优点是钢卷和炉罩是放在台车上的,根据工艺要求,用液压推杆推进炉内,退火炉就像隧道,台车从一端推进,另一端推出,连续不间断的生产,生产周期短,机械化程度高,产量大,工人劳动强度低。隧道炉内的温度是从炉头到炉尾按产品工艺要求制定的,温度的布局由低到高,是恒定不变的,并且排出的废气温度也是恒定的,温度稳定性好,能耗低,整个工艺流程顺畅、合理。相对于环型炉、单体罩式炉具有较大的优越性。环型炉的特点是炉底呈环形,在炉底驱动装置的作用下承载硅钢卷由入料端旋转至出料端,再由出料机从出料炉门将加热好的硅钢卷取出。单体罩式炉是由坚固的退火炉台及其下方的供给介质输入、输出管道、保护罩、电加热罩及带有喷淋装置的冷却罩构成。退火炉台下方的地沟里设有氨分解气、氮气阀站。关于环型炉、单体罩式炉、隧道式高温退火炉 3 个类型的特点对比见表 1。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表1 取向硅钢高温退火炉类型特点对比

类型	总投资比重	满足工艺条件	节能效果	性能一致性	产量	气氛及温控	劳动生产率	安全性
环型炉	高	优	好	稳定	大	先进	用工少	安全
单体罩式炉	适当	一般	一般	有波动	小	炉之间有差异	用工多	安全
隧道式高温退火炉	划算	较好	好	稳定	大	首创	用工少	安全

2.6 减薄厚度

取向硅钢钢板越薄，其叠片系数越低，涡流损耗越小；表面板越薄，所制成薄板内晶粒的[001]轴与轧向之间的偏离角越小，因而磁感越高。涡流损耗P_e与t^2成正比，所以降低板厚，P_e明显降低，但厚度减薄，表面自由磁极能量(静磁能)和180°畴壁能量增大，也就是畴壁移动阻力增大，P_h增高。因此对铁损P_T来说有一合适的厚度[4]。取向硅钢钢板现已减薄到0.03 mm、0.05 mm和0.08 mm。目前，取向硅钢薄带是应用在中高频磁场下的一种软磁材料，它具有磁感应强度高、铁损低等特性，广泛用于电子变压器领域。

2.7 双取向硅钢

单取向硅钢片在与轧制方向垂直方向的导磁性能较低，为克服这一缺点，德国真空熔炼公司在20世纪40年代发明了双取向硅钢片。1957年，美国GE公司和西屋公司几乎同时制成双取向硅钢片，20世纪60年代日本川崎和八幡工厂也研制成功双取向硅钢片。与一般取向硅钢沿轧向的单一易磁化方向不同，双取向硅钢存在2个相互垂直的易磁化方向，它在轧制方向和垂直方向的磁性能都与单取向硅钢片轧制方向的磁性能相近，磁感最高。这种硅钢片的晶粒呈立方体组织，因此可以显著提高硅钢片的磁性能。

3 结束语

随着电力工业的发展和家电产业的兴旺，未来相当一段时间内，我国对作为变压器铁芯材料的取向硅钢片的需求将持续不断地增长。生产电机及变压器的材料向着具有低铁损高磁感的取向硅钢和高牌号的无取向硅钢发展。一般情况下，产品磁感升高铁损也相应升高，降低最终退火前的冷轧压下率和提高最终退火温度等虽可以大幅降低铁损，但对磁感影响不大，因此生产难度很大。目前降低铁损的主要手段是文中所述的增大硅含量，减小板厚和磁畴细化技术，同时采用涂绝缘涂层降低单位损耗，有效控制电机及变压器的噪声。提高磁感应强度的方法就是采用异步轧制生产取向硅钢、双取向硅钢等方法增强织构。如今取向硅钢生产厂家应更加重视提高产品质量及高端牌号产品比例，满足国家电网及变压器行业发展需求。

参 考 文 献

[1] 齐克敏. 异步恒延伸轧制的试验及理论研究[D]. 沈阳: 东北大学，1986.

[2] 范立学. 异步轧制对硅钢薄带织构和磁性能影响机理的研究[D]. 沈阳: 东北大学，2008.

[3] 何忠治. 电工钢[M]. 北京: 冶金工业出版社，2012.

[4] 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)：85－88.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net