

DOI:10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20200039

超薄取向硅钢的研究进展

张 波¹, 孟 利¹, 张 宁¹, 何承绪², 杨富尧², 马 光²

(1. 钢铁研究总院冶金工艺研究所, 北京 100081;
2. 全球能源互联网研究院有限公司先进输电技术国家重点实验室, 北京 102211)

摘 要: 随着特高压直流输电和灵活交流输电的迅猛发展,超薄取向硅钢作为阳极饱和电抗器核心材料发挥着不可替代的作用;同时,随着节能环保的要求不断提高,超薄化成为取向硅钢的重要发展方向。近年来,超薄取向硅钢的制备成为材料冶金领域的研究热点。总结了超薄取向硅钢的制备方法,综述了超薄取向硅钢的研究进展,讨论了超薄取向硅钢磁性能的影响因素,提出了超薄取向硅钢的发展方向,为超薄取向硅钢的未来研发提供了参考依据。
关键词: 超薄取向硅钢; 磁感; 铁损; 轧制; 退火; 再结晶; 织构
文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2020)10-0096-07

Research progress of ultra-thin grain-oriented silicon steel

ZHANG Bo¹, MENG Li¹, ZHANG Ning¹, HE Cheng-xu²,
YANG Fu-yao², MA Guang²

(1. Metallurgical Technology Institue, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China;
2. State Key Laboratory of Advanced Power Transmission Technology,
Global Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd., Beijing 102211, China)

Abstract: With the rapid development of ultrahigh-voltage direct current transmission system and flexible alternating current transmission system, ultra-thin grian-oriented silicon steel plays an irreplaceable role as the core material of anode saturated reactor. At the same time, with the requirement of energy saving and environmental protection, ultra-thin steel has become an important development direction of oriented silicon steel. In recent years, the preparation of ultra-thin grian-oriented silicon steel has become a research hotspot in the field of material metallurgy. In this paper, the preparation methods, research progress, influence factors of magnetic property and development direction of ultra-thin grian-oriented silicon steel were summarized, providing the reference basis for the development of ultra-thin grian-oriented silicon steel in future.
Key words: ultra-thin grain-oriented silicon steel; magnetic induction; core loss; rolling; annealing; recrystallization; texture

降低取向硅钢铁损是取向电工钢制备技术发展的不竭动力,常见降低铁损的方法有增加硅质量分数、减少带材的厚度和细化磁畴等,但比较有效的方法是减少带材厚度^[1]。取向硅钢片的厚度与铁损有重要联系,在一定范围内,厚度减薄,涡流损耗降低使得总铁损降低^[2-3];随着科技的发展,要求设备的性能越来越高,体积越来越小,设备选择的频率也越来越高,而中高频率下取向硅钢的铁损主要为涡流损耗。因此,厚度减薄是近年来取向硅钢的重要发展方向。
通常把厚度不超过 0.10 mm 的取向电工钢板称为超薄取向硅钢,主要用于工作频率不低于 400

Hz 时的中高频变压器、脉冲变压器、脉冲发电机、大功率磁放大器、通信用的扼流线圈、电感线圈、储存和记忆元件、开关和控制元件、磁屏蔽以及在振动和辐射条件下工作的变压器^[4]。
1 超薄取向硅钢的主要制备方法及其特点
近年来,报道了多种超薄取向硅钢制备方法^[5-7],根据制备过程中退火工艺的差别,可将制备方法概括为初次再结晶法、二次再结晶法和三次再结晶法。
1.1 初次再结晶法
采用无碳无抑制剂的二次再结晶成品取向硅钢

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB0903901)
作者简介: 张 波(1988—),男,博士生; E-mail: zhangbo530925@163.com; 收稿日期: 2020-02-04
通讯作者: 孟 利(1978—),男,博士,高级工程师; E-mail: li_meng@126.com

板为原始材料,通过一次冷轧和初次再结晶退火制备超薄取向硅钢的方法称为“初次再结晶法”。20 世纪 40 年代,Dunn 等^[4]用单晶冷轧和退火试验证实 Goss 取向经 50%~70%冷轧转变为 $\{111\}\langle 112 \rangle$ 取向(F 取向)再经退火初次再结晶又转变为 Goss 取向的规律,本文简称为“G-F-G”“伪可逆”规律。1949 年,Littmann M F 等^[8]根据“G-F-G”转变规律,用多晶取向硅钢成品板冷轧和 850 °C 初次再结晶退火首次制备超薄取向硅钢。

初次再结晶法退火过程中只发生初次再结晶及晶粒正常长大,驱动力是形变储存能和界面能,轧制工艺为一次冷轧工艺,经一次冷轧达到 70%左右的压下率,无中间退火。退火工艺为初次再结晶退火,时间较短,一般控制在 30 min 范围内,退火保护气氛一般为纯氢气气氛。初次再结晶法工艺流程简短,易于控制,可连续化生产,是当前工业生产超薄取向硅钢的主要技术手段^[9],满足中频用途磁性器件。

1.2 二次再结晶法

采用热轧及常化取向硅钢板为原料,经过二次以上冷轧和中间退火及脱碳退火,在最终高温退火过程中 Goss 晶粒依靠表面能差发生二次再结晶,从而择优长大制备超薄取向硅钢的方法称为“二次再结晶法”,也可称为多次冷轧法。二次再结晶法类似于常规取向硅钢制备方法,钢带厚度进一步减薄,以期实现进一步降低损耗。但是,取向硅钢厚度低于 0.160 mm 时,轧制、退火的工艺控制难度极大,同时薄带的表面积与体积比急剧增大,使得抑制剂的空间分布和数量明显减少,退火过程中抑制剂的熟化与分解速度加剧,抑制力减弱,从而导致二次再结晶不易完善^[10]。因此,利用常规取向硅钢的制备方法制备超薄取向硅钢的工艺路线更长,难度极大,生产成本高。采用常规方法制备超薄取向硅钢的不利原因主要体现在以下 3 个方面:首先,在现行工业条件下,热轧板的厚度通常为 2.2~2.3 mm 左右,冷轧至 0.1 mm 超薄带,需要的压下率超过 95%,这对热轧板中 Goss 织构的保留十分不利;其次,高温退火过程中抑制剂快速熟化,晶粒容易发生正常长大,很快生长碰到板材表面并受晶界沟槽的钉扎,最终的成品板中形成的均是细小的晶粒组织,而非单一的 Goss 取向晶粒组织,性能较差;最后,冷轧压下率增大后,偏 Goss 和非 Goss 取向晶粒增多,也会形成大尺寸的二次再结晶组织。

1.3 三次再结晶法

采用薄规格取向硅钢成品板为原料,经过多次

冷轧、中间退火和高温退火工艺,最终热处理过程发生三次再结晶现象,依靠表面能差为驱动力,此方法称为“三次再结晶法”。20 世纪 80—90 年代,以荒井贤一、石山和志等为主要代表的日本学者开展了早期工作,成功制备出厚度为 0.10 mm 以下具有优异磁性能的超薄取向硅钢带;20 世纪 90 年代以后,仍有学者^[11]继续完善三次再结晶法制备超薄带技术。

三次再结晶法制备超薄取向硅钢工艺路线较长,同时三次再结晶对杂质元素、退火温度、退火时间和退火气氛极为敏感,技术难度较大,目前还没有成熟的工业化应用。此外,三次再结晶晶粒尺寸粗大,需要开发匹配的细化磁畴技术。

1.4 薄带连铸法

19 世纪中叶,贝塞麦提出双辊薄带连铸的设想,随着当代科技迅速发展,使得这一设想将逐步得以实现。迄今,发展比较成熟的薄带铸轧技术包括纽柯的 Castrip、浦项的 poStrip、宝钢的 Baostrip 以及东北大学的 E²Strip。双辊薄带铸轧技术可以一次性形成毫米级薄带,由于高速冷凝、晶粒细化、成分偏析少以及节能减排优势明显,常用于制备不易加工成形的材料。近年来,薄带铸轧技术也在超薄取向硅钢制备中表现出潜力^[12-14]。目前,薄带连铸法在最终工序仍为二次再结晶退火,但其在上游工艺过程显著区别于上述制备方法,因此薄带连铸法在本文作为一种方法单独列出。

2 影响超薄取向硅钢性能的主要因素

制备超薄取向硅钢的原材料状态、轧制工艺、退火工艺以及最终表面处理工艺都会在一定程度上影响超薄取向硅钢的性能。

2.1 原料状态对超薄取向硅钢性能的影响

超薄取向硅钢的制备原料一般为常化后的热轧取向硅钢板(二次再结晶法)和商业成品取向硅钢板(初次再结晶法和三次再结晶法),由于常化后的热轧板制备工艺较为成熟,不同原料差别不大,因此,一般讨论原料对超薄取向硅钢性能的影响只针对初次再结晶法和三次再结晶法。原料的洁净度、原始晶粒取向度、晶粒直径及均匀性都会对超薄取向硅钢的性能产生一定影响。

原料取向硅钢中 C、S、N、Ti、Nb、V 等杂质元素质量分数会影响钢中非金属夹杂物的数量和尺寸,而这些夹杂物在后续轧制和退火工艺中变化不大,会遗留到超薄取向硅钢中。原料中杂质元素质量分

数一般不会明显影响超薄取向硅钢冷轧和初次再结晶组织,但高纯度会降低普通晶界和特殊晶界移动能力的差异,推迟晶粒的异常长大行为。Arai K I 等^[15]研究了制备原料的洁净度对超薄取向硅钢三次再结晶过程的影响,认为洁净度高的样品发生二次再结晶开始温度较高,三次再结晶完成时间较短、晶粒度较小,铁损较低;原料中锰和锡元素质量分数对三次再结晶影响较小,而铜元素对三次再结晶过程具有明显抑制作用。Chai K H 等^[16]认为,超薄取向硅钢制备原料中的硫元素易在热处理过程中形成硫偏析,促进 $\{111\}$ 等高指数面晶粒生长,从而恶化磁感应强度;而真空和氢气气氛下热处理可将偏析的硫元素净化为 H_2S ,使得表面能诱发 Goss 晶粒择优长大,提高磁感应强度;同时,硫元素易发生晶界偏析,对三次再结晶晶粒的生长产生较强的抑制作用。Lobanov M L 等^[17]认为,初次再结晶法制备超薄取向硅钢,原料中铜元素质量分数和 Goss 取向度会共同影响初次再结晶的形核位置,铜元素质量分数和 Goss 取向度较高的样品,初次再结晶优先在形变孪晶处形核;铜元素质量分数和 Goss 取向度较低的样品,初次再结晶主要优先在剪切带和过渡带区域形核。超薄取向硅钢的洁净度还会影响二次再结晶组织类型,杂质元素较多的样品二次再结晶组织是强的 $\{410\} \sim \{430\} \langle 001 \rangle$ 和弱的 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 及 $\{211\} \langle 110 \rangle$ 组织,只有少数的二次再结晶晶粒具有 Goss 取向;杂质元素越少的样品,Goss 和 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 组织越强。欧洲专利^[18]中提到,制备原料中含有一定比例的锡和铈元素可以抑制再结晶退火过程中杂乱取向晶粒的晶界形核,提高 Goss 组织强度,从而提高超薄取向硅钢的磁性能。

超薄取向硅钢在制备过程中组织的演化具有一定的遗传性,特别是一次再结晶法是利用 Goss 取向晶粒在轧制和退火过程中 Goss- $\{111\} \langle 112 \rangle$ -Goss 的“伪可逆”规律,因此,原料的 Goss 取向度对超薄取向硅钢的性能具有重要影响。对于初次再结晶法,Lobanov M L 等^[19]研究发现,以初始组织与理想 Goss 取向偏差较大的薄规格取向硅钢为原料通过初次再结晶法制备的超薄取向硅钢磁性能较优;然而,Wang Y P 等^[14]研究认为,以高磁感取向硅钢为原料制备的超薄取向硅钢磁性能较好,他们发现普通取向硅钢为原料的冷轧组织中相比高磁感取向硅钢含有大量变形带和剪切带,随着压下率增加,以高磁感取向硅钢和普通取向硅钢为原料的冷轧组织演化规律分别为 $\{110\} \langle 001 \rangle$ - $\{230\} \langle 001 \rangle$ -

$\{111\} \langle 112 \rangle$ 和 $\{110\} \langle 001 \rangle$ - $\{210\} \langle 001 \rangle$ - $\{111\} \langle 112 \rangle$;退火组织的演化规律分别为 $\{110\} \langle 001 \rangle$ - $\{230\} \langle 001 \rangle$ - $\{210\} \langle 001 \rangle$ 和 $\{210\} \langle 001 \rangle$ - $\{610\} \langle 001 \rangle$,以高磁感取向硅钢为原料的超薄取向硅钢再结晶开始时, $\{110\} \langle 001 \rangle$ 和 $210 \rangle \langle 001 \rangle$ 取向晶粒分别由于与基体取向呈 $35^\circ / \langle 110 \rangle$ 关系和具有形核频率优势而优先形核成为主要组织组分,而以普通取向硅钢为原料的超薄取向硅钢再结晶开始时,由于冷轧组织中存在 $\{112\} \langle 131 \rangle$ 和 $\{114\} \langle 841 \rangle$ 杂乱取向组分,导致 $\{100\} \langle 001 \rangle$ 和 $\{114\} \langle 841 \rangle$ 杂取向与 $\{110\} \langle 001 \rangle$ 和 $\{210\} \langle 001 \rangle$ 取向共同形核。对于二次再结晶法,LIANG R Y 等^[20]研究了制备超薄取向硅钢的原料初始 Goss 组织取向度对超薄取向硅钢组织演化和性能的影响,认为原料初始 Goss 组织取向度高的样品发生二次再结晶的机理为“组织诱导”,而原料初始 Goss 组织取向度低的样品发生二次再结晶的机理为“表面能诱导”。初次再结晶后,初始 Goss 取向度高的样品低频性能较好;发生二次再结晶晶粒异常长大后,初始 Goss 取向度低的样品高频性能较好。

超薄取向硅钢制备原料的晶粒直径及均匀性对超薄取向硅钢的性能也有影响。Ushigami 等^[18]在专利中提到,为了满足最终超薄取向硅钢磁感不低于 1.85 T,制备原料沿轧向的晶粒直径应不低于 20 mm;制备原料沿轧辊方向的晶粒直径对磁性能也具有一定影响,并认为在本专利条件下制备原料沿轧辊方向的晶粒直径应高于 40 mm。

2.2 轧制工艺对超薄取向硅钢性能的影响

轧制方式、轧制压下率、轧制速度、轧制张力等因素都会对超薄取向硅钢的轧制组织和组织产生一定影响,从而影响超薄取向硅钢的磁性能。

高秀华等利用异步轧制的方法成功制备出超薄取向硅钢,并研究了轧制方式对超薄取向硅钢性能的影响,结果表明^[5,21],异步轧制能明显减少轧制道次,改善超薄取向硅钢的组织 and 磁性能。异步轧制^[22]的优点是轧薄能力强、轧制力低、轧制精度高,在生产超薄带钢方面具有明显优势。这种轧制是利用上下工作辊面的线速度差来改变轧辊表面的滑动方向,从而改变变形区的应力状态,使上、下辊接触面上摩擦力方向相反,变形区内存在搓轧区,样品处于剪切应力状态。取向硅钢本身材质脆硬,异步轧制在生产超薄取向硅钢方面有一定优势,可明显避免“碎边”和“断带”等问题,使得超薄取向硅钢平整度和表面质量改善。

初次再结晶法和三次再结晶法制备超薄取向硅钢以商用成品硅钢板为原料,制备一定厚度的超薄取向硅钢,原料的厚度决定了轧制压下率。而轧制压下率对轧制组织和织构都有一定影响,因此,研究轧制压下率的影响对原料的选型有一定借鉴意义。梁瑞洋等^[23]研究了冷轧压下率对超薄取向硅钢织构演变与磁性能的影响,发现随着冷轧压下率增大,退火后再结晶织构增强,当压下率为 70% 时, η 织构 ($\{0kl\}\langle 100 \rangle$ 或 $\langle 100 \rangle // RD$) 最锋锐,磁性能最佳。

超薄取向硅钢的制备原料为晶粒尺寸较大的多晶取向硅钢板,多晶体材料宏观尺度的均匀变形在介观尺度上往往表现为非均匀性,其宏观性能是微结构敏感的,依赖于晶粒结构、晶粒取向、晶界分布、滑移系和位错组态等^[24]。在轧制过程中需要考虑潜在硬化和晶格旋转对塑性变形的影响,因此,冷轧轧制速度、轧制张力等参数对塑性变形的均匀性及冷轧织构的变化均有一定影响。

2.3 热处理工艺对超薄取向硅钢性能的影响

热处理工艺参数如退火温度、保温时间、升温速度和退火气氛,对组织、织构组分的演化规律和晶粒大小有重要影响。

Arai K I 等^[15]认为,热处理温度越高,三次再结晶孕育时间越短,三次再结晶速率越快;低真空度和氢气气氛下,三次再结晶速率较慢。刘美霞等^[25]研究了影响三次再结晶晶粒长大的因素,也认为三次再结晶晶粒在经过一定孕育期后以一恒定的速度长大。退火温度越高,孕育期越短,三次再结晶晶粒的长大速度越快;在低真空度和氢气气氛中退火,三次再结晶晶粒的长大速度将会减慢。高秀华等^[26]研究了热处理参数对异步轧制硅钢超薄带三次再结晶的影响,认为相同的工艺参数下,真空退火的硅钢超薄带的磁性能优于氢气处理的;退火温度越高,保温时间越长,升温速度越快,磁性能越好,三次再结晶发展得越完善。本课题组前期工作研究了热处理参数对初次再结晶法制备超薄取向硅钢磁性能的影响,认为快速升温条件下更有利于 Goss 取向和 η 取向晶粒形核再结晶;初次再结晶法制备超薄取向硅钢的适宜退火气氛为纯氢气气氛。

2.4 表面涂层对超薄取向硅钢性能的影响

超薄取向硅钢常用于制备电力电子设备铁芯,为了有效地将涡流限制到各硅钢叠片内,通常需要在硅钢片表面涂覆具有绝缘性能的表面涂层,使硅钢片之间相互绝缘。超薄取向硅钢的涂层是在最终退火后进行的,主要作用是提高硅钢片的层间电阻

率,使硅钢片层间功率损失降为最小。同时使硅钢片在储存、运输和使用过程中免受各种腐蚀介质的侵蚀,防止锈蚀^[27]。绝缘涂层的附着力和电阻对超薄取向硅钢性能有很大影响,而且绝缘涂层可以在一定程度上改善取向硅钢超薄带的版型和平整度。

3 超薄取向硅钢的研究现状及发展方向

3.1 超薄取向硅钢制备过程中显微组织及织构演化机理的研究进展

自 1949 年 Littmann M F^[8] 根据 Duun C G 等^[28]提出的 $\{110\}\langle 001 \rangle$ 取向 3% Si-Fe 单晶经 50%~70% 冷轧转变为 $\{111\}\langle 112 \rangle$ 冷轧织构后经初次再结晶退火又转变为 $\{110\}\langle 001 \rangle$ 再结晶织构的规律,采用多晶体取向硅钢产品经冷轧和退火工艺制成超薄取向硅钢以来,国内外学者利用取向硅钢单晶体对超薄取向硅钢制备过程中组织和织构的演化机理进行了研究。

Gunn C G^[28]发现,原始取向为 $(110)[001]$ 的 3% Si-Fe 单晶体经 70% 压下率变形后的轧制织构主要有 $(111)[\bar{1}12]$ 和 $(111)[11\bar{2}]$, 还有少量的 $(100)[011]$ 织构。Walter J L 等^[29]也研究了原始取向为 $(110)[001]$ 的 3% Si-Fe 单晶体的轧制和退火织构,得到相似结论,并且他们认为轧制织构中微弱的 Goss 织构可能是再结晶退火 Goss 晶粒形核的“种子”。然而, Hu H^[30]研究了经 70% 压下率轧制后的 3% Si-Fe Goss 单晶体退火过程中 Goss 重新形成行为,他认为轧制织构中残存可测量的 Goss 晶粒在再结晶退火初期让位于 $(210)[001]$ 取向 (η 织构的一种组分),因此,认为轧制织构中残存的 Goss 晶粒不是再结晶形成 Goss 织构的必要条件;同时,得到低温回复可消除 Goss 织构周围的杂乱取向晶粒,从而在随后的再结晶退火中得到锋锐的 Goss 织构。何承绪等^[9]研究了取向硅钢超薄带的组织和织构与其最终性能的关系,认为晶粒尺寸及 η 线取向晶粒所占比例是带材性能差异的主要原因。此外, Hu H^[31]利用直接观察法研究了原始取向为 $(110)[001]$ 3% Si-Fe 单晶冷轧态样品的再结晶行为,发现初期先发生多边形化,接着亚晶以聚合方式长大并发生再结晶形核;不同取向区域的再结晶形核能力不同, $\{100\}$ 区域形核较难, $\{110\}$ 区域再结晶形核较为容易。Ushiod K 等^[32]研究了 3% Si-Fe 单晶 $\{111\}\langle 112 \rangle$ 形变织构中剪切带对退火织

构形成的影响,结果表明,在 $\{111\}\langle 112\rangle$ 形变织构中存在宽、窄 2 种剪切带,较宽的剪切带在 TD 面内与轧制方向呈 35° 而较窄的剪切带在 TD 面内与轧制方向呈 17° ;退火时剪切带附近优先形核生成 Goss 晶粒,宽剪切带区域的 Goss 晶粒偏差角在 10° 以内,而窄剪切带区域的 Goss 晶粒偏差角是宽剪切带区域的 2 倍;Goss 晶粒形核后由剪切带区域向基体生长。Rusakov G M 等^[33]研究了 ND 面内与轧制方向呈 20° 的剪切带的形成机理,认为这种剪切带实际为过渡带在观察面的截面,这种组织的形成与其周围的特殊晶界有关,它的存在对初次再结晶中 Goss 晶粒的形核有一定影响。Wang Y P 等^[14]研究了初始 Goss 织构锋锐度对冷轧过程及初次再结晶退火过程中织构演化规律的影响,分析了超薄取向硅钢初次再结晶形核机理,并认为大压下率及低温再结晶退火促进最终超薄取向硅钢磁性能提升。

3.2 超薄取向硅钢制备工艺的研究进展

超薄取向硅钢首次成功研制以来,为了提高其磁性能、降低生产成本,众多学者和冶金工作者尝试用不同方法制备超薄取向硅钢,先后开发出初次再结晶法、二次再结晶法和三次再结晶法等制备工艺,并将异步轧制法和薄带连铸法也应用到超薄取向硅钢的研制中,取得了令人瞩目的成果。

王慧敏等^[34]以热轧常化板为初始材料,分别利用二次冷轧法和三次冷轧法制备出超薄取向硅钢,并分析了 2 种工艺过程中织构与组织演变规律,结果表明,采用最终冷轧压下率适中的三次冷轧法对应的轧制织构中高斯晶核较多,最终磁性能明显优于二次冷轧法;脱碳退火后样品中的 $\{111\}\langle 112\rangle$ 织构组分及 Goss 晶粒数量对最终二次再结晶有重要影响。高秀华等^[5]以 Hi-B 取向硅钢成品板为原料,用初次再结晶法制备超薄取向硅钢,研究了异步轧制速度比对成品性能的影响,认为在一定范围内,提高异步轧制速度比可以显著改善超薄取向硅钢的性能。SONG H Y^[12]和 WANG Y P^[13]等采用双辊薄带连铸工艺制备薄规格取向硅钢,经热轧、常化、二次冷轧或三次冷轧、中间退火、初次再结晶退火和二次再结晶退火成功制备出超薄取向硅钢,双辊薄带连铸工艺制备的取向硅钢超薄带具有高效的抑制剂和完善的初次再结晶组织,在厚度限缩空间内可发展完善的二次再结晶,大大缩短了取向硅钢超薄带的制备流程。日本专利^[35]中提出了一种利用伴有“岛晶”存在的取向硅钢板为原料,通过一次或多次

冷轧(含中间退火)和初次再结晶工艺制备厚度小于 0.15 mm 超薄取向硅钢的方法。该方法克服了杂取向岛晶的影响,制备的超薄取向硅钢性能均匀、尺寸精度高。欧洲专利^[18]中提出了一种厚度小于 0.15 mm、晶粒尺寸小于 1 mm 的超薄取向硅钢制备方法,并论述了制备原料选取的原则及提高磁性能的相关退火工艺。

3.3 超薄取向硅钢的发展方向

商用薄规格取向硅钢的生产工艺较为成熟,以薄规格取向硅钢板为原料制备超薄取向硅钢可省去前段硅钢冶炼成型工艺,缩短工艺流程,提高生产效率,因此,以商用薄规格取向硅钢板生产超薄取向硅钢是工业化生产超薄取向硅钢的发展方向。尤其商用无底层取向硅钢技术日臻成熟,直接应用无底层取向硅钢板作为原料进入薄轧工艺,大大节省工序,同时避免了原料表面酸洗导致的环境污染。随着冷轧技术的革新,一次冷轧工艺可连续化生产平整度高、表面质量好的超薄取向硅钢。

锋锐的 Goss 织构和匹配的 Goss 晶粒形态是超薄取向硅钢实现高磁感、低铁损的关键,由于超薄取向硅钢制备过程中轧板厚度极限减薄使得 Goss 取向晶粒的演化对轧制变形参数和退火参数极为敏感,同时,变形微观组织结构的不均匀性和复杂性对 Goss 晶粒竞争长大环境带来复杂性,使得轧制和退火调控技术具有极大挑战性。因此,超薄取向硅钢带材中 Goss 取向演化与影响因素的基础理论研究、轧制工艺参数与制备原料性质匹配调控技术和退火温度及气氛匹配调控技术是超薄取向硅钢制备领域的重要研究方向。

在推进应用性能提升方面,需研发超薄取向硅钢专用无公害绝缘涂层,好水溶性高阻抗绝缘涂层、自黏结涂层、高张力环保型绝缘涂层。进一步研发针对超薄取向硅钢的磁畴控制技术,开发细化磁畴、张力涂层、表面平滑化(镜面化)等技术的相关研究。进一步降低铁损同样是超薄取向硅钢制备领域的重要研究方向。

4 结语

中高频磁性元件是实现大功率电力电子装备大容量、紧凑化的关键,其中铁芯用高磁感、低损耗超薄取向硅钢是电工钢材料的重要发展方向。满足中频应用的初次再结晶法工艺流程简短,易于控制,生产成本低,工艺技术成熟度较高,但是在降低损耗和提高成材率方面仍然有提升空间,尤其质量稳定性

和应用性能提高是国内超薄取向硅钢制备工艺优化的重要方面。有利磁性能的显微组织结构及织构演化规律、轧制工艺参数与制备原料性质匹配调控技术、退火温度及气氛匹配调控技术和表面质量优化等,这些是超薄取向硅钢制备领域的重要研究方向。

参考文献:

[1] 林希峰,刘静,汪汝武,等. 厚度对取向硅钢组织和磁性的影响[C]//2010 第 11 届中国电工钢专业学术年会论文集. 厦门:中国金属学会电工钢分会,2010:228. (LIN X F, LIU J, WANG R W, et al. Effect of product thickness on texture and magnetic properties of oriented silicon steel[C]//Proceedings of the 11th China Electrical Steel Professional Academic Conference in 2010. Xiamen:Electrical Steel Branch of the Chinese Society for Metals,2010:228.)

[2] 黎先浩,孟小涛,赵鹏飞,等. 高磁感取向硅钢研发现状与展望[J]. 中国冶金,2019,29(1):1. (LI X T, MENG X T, ZHAO P F, et al. Present status and future prospect of high permeability grain-oriented silicon steel[J]. China Metallurgy,2019,29(1):1.)

[3] Arai K I, Ishiyama K. Rolled texture and magnetic properties of 3% silicon steel[J]. Journal of Applied Physics,1988,64(10):5352.

[4] 何忠志. 电工钢[M]. 北京:冶金工业出版社,2012. (HE Z Z. Electrical Steel[M]. Beijing:Metallurgical Industry Press, 2012.)

[5] GAO X H, LIU E, QIU C L, et al. New process for production of ultra-thin grain oriented silicon steel[J]. Rare Metals, 2006,25(6):454.

[6] Nakano M, Ishiyama K, Arai K L. Production of ultra thin grain oriented silicon steel sheets[J]. IEEE Transactions on Magnetics,1995,31(6):3886.

[7] Nakano M, Ishiyama K, Arai K I, et al. New production method of 100 μm -thick grain-oriented 3% silicon steel sheets [J]. Journal of Applied Physics,1997,81(8):4098.

[8] Littmann M F. Process for Developing High Magnetic Permeability and Low Core Loss in Very Thin Silicon Steel; USA,US2473156[P]. 1950-6-27

[9] 何承绪,涂蕴超,孟利,等. 超薄取向硅钢组织及织构与磁性能的关系[J]. 材料导报,2019,33(3):1027. (HE C X, TU Y C, MENG L, et al. The relationship between microstructures and textures and magnetic properties in ultra-thin grain-oriented silicon steel[J]. Materials Reports,2019,33(3):1027.)

[10] Nakashima S, Takashima K, Harase J. Effect of final thickness on secondary recrystallization of grain-oriented electrical steel produced by single-stage cold rolling process[J]. Journal of the Japan Institute of Metals,1991,55(8):898.

[11] Arai K, Ishiyama K. Tertiary recrystallization and magnetic properties of thin gage silicon steels[J]. Bulletin of the Japan Institute of Metals,1992,31(5):429.

[12] SONG H Y, LIU H T, WANG Y P, et al. Microstructure and

texture evolution of ultra-thin grain-oriented silicon steel sheet fabricated using strip casting and three-stage cold rolling method[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials,2017,426:32.

[13] WANG Y P, LIU H T, SONG H Y, et al. Ultra-thin grain-oriented silicon steel sheet fabricated by a novel way: Twin-roll strip casting and two-stage cold rolling[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials,2018,452:288.

[14] WANG Y P, AN L Z, SONG H Y, et al. Dependence of recrystallization behavior on initial Goss orientation in ultra-thin grain-oriented silicon steels[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials,2020,499:166290.

[15] Arai K I, Ishiyama K. Factors affecting grain growth of very thin silicon steel sheets[J]. Materials Science Forum,1996, 204:133.

[16] Chai K H, Heo N H, Na J G, et al. Tertiary recrystallization and magnetic induction under various annealing atmospheres in thin-gauged 3%Si-Fe strip[J]. Journal of Applied Physics, 2000,87(9):5233.

[17] Lobanov M L, Rusakov G M, Redikul' Tsev A A. Effect of copper content, initial structure, and scheme of treatment on magnetic properties of ultra-thin grain oriented electrical steel [J]. The Physics of Metals and Metallography, 2013, 114(7):559.

[18] Ushigami, Abe, Kousaka. Very thin electrical steel strip having low core loss and high magnetic flux density and a process for producing the same. European, EP0374948A2[P], 1989-12-22.

[19] Lobanov M L, Rusakov G M, Redikul' Tsev A A, et al. Effect of the grain orientation in the material used for the preparation of an ultrathin electrical steel on its texture and magnetic properties[J]. The Physics of Metals and Metallography, 2011,111(5):479.

[20] LIANG R Y, YANG P, MAO W M. Effect of initial Goss texture sharpness on texture evolution and magnetic properties of ultra-thin grain-oriented electrical steel[J]. Acta Metallurgica Sinica,2017,30(9):895.

[21] 高秀华,齐克敏,邱春林,等. 轧制方式对超薄取向硅钢带性能的影响[J]. 钢铁研究学报,2001,13(5):48. (GAO X M, QI K M, QIU C L, et al. Effect of rolling method on magnetic property of super-thin grain oriented silicon steel sheet[J]. Journal of Iron and Steel Research,2001,13(5):48)

[22] 高秀华,齐克敏,邱春林,等. 同步、异步组合轧制取向硅钢极薄带的织构研究[J]. 材料导报,2002,16(1):64. (GAO X M, QI K M, QIU C L, et al. Texture of conventional and cross shear rolled thin grain oriented silicon steel sheet[J]. Materials Reports,2002,16(1):64.)

[23] 梁瑞洋,杨平,毛卫民. 冷轧压下率及初始高斯晶粒取向度对超薄取向硅钢织构演变与磁性能的影响[J]. 材料工程, 2017,45(6):87. (LIANG R Y, YANG P, MAO W M. Effects of cold rolling reduction and initial Goss grains orientation on texture evolution and magnetic performance of ultra-thin

grain-oriented silicon steel[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(6): 87.)

[24] 赵蒙, 李萍, 李成铭, 等. TA15 钛合金高温变形过程的介观模拟计算[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(4): 927. (ZHAO M, LI P, LI C M, et al. Mesoscale simulation on plastic deformation of TA15 titanium alloy at high temperature[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(4): 927.)

[25] 刘美霞. 影响薄硅钢板三次再结晶晶粒长大行为的各种因素[J]. 电工材料, 2001(3): 30. (LIU M X. Various factors influencing the grain growth behavior of the third recrystallization of silicon steel sheet[J]. Electrical Materials, 2001(3): 30.)

[26] 高秀华, 齐克敏, 邱春林, 等. 热处理参数对异步轧制硅钢板薄带三次再结晶的影响[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2005, 26(1): 55. (GAO X H, QI K M, QIU C L, et al. Effect of heat treatment parameters on tertiary recrystallization of cross-shear rolled ultra-thin silicon steel strips[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2005, 26(1): 55.)

[27] 吴雪, 田程涛, 魏剑啸, 等. 取向硅钢的表面绝缘涂层研究进展[J]. 智能电网, 2016, 4(11): 1061. (WU X, TIAN C T, WEI J X, et al. Research progress of the surface insulation coating of the oriented silicon steel[J]. Smart Grid, 2016, 4(11): 1061.)

[28] Dunn C G. Cold-rolled and primary recrystallization textures in cold-rolled single crystals of silicon iron[J]. Acta Metallurgica, 1954, 2(2): 173.

[29] Walter J L, Hibbard W R. Texture of cold-rolled and recrystallized crystals of silicon-iron[J]. Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, 1958, 212: 731.

[30] Hu H. The formation of (110)[001] recrystallization texture in a cold-rolled and annealed (110)[001] crystal of silicon-iron[J]. Acta Metallurgica, 1960, 8(2): 124.

[31] Hu H. Direct observations on the annealing of a Si-Fe crystal in the electron microscope[J]. Transactions of the Metallurgical Society of AIME, 1962, 224(1): 75.

[32] Ushioda K, Hutchinson W B. Role of shear bands in annealing texture formation in 3%Si-Fe (111)[112] single crystals[J]. ISIJ International, 1989, 29(10): 862.

[33] Rusakov G M, Lobanov M L, Redikul' Tsev A A, et al. Special misorientations in localized deformation regions in Fe-3% Si alloy single crystals[J]. Technical Physics, 2014, 59(8): 1180.

[34] 王慧敏, 杨平, 崔凤娥, 等. 最终冷轧压下率对取向硅钢薄带磁性能及织构的影响[C]//第十三届中国体视学与图像分析学术会议. 太原: 中国体视学学会, 2013: 234. (WANG H M, YANG P, CUI F E, et al. Effect of final cold rolling reduction rate on magnetic properties and texture of thin grain-oriented silicon steel[C]//Proceedings of the 13th Chinese Conference on Stereology and Image Analysis. Taiyuan: Chinese Society for Stereology, 2013: 234.)

[35] Ushikami, Jiang Xing, Abe, et al. Production of Extra Thin Silicon Steel Strip Having Uniform Magnetic Property: Japanese, JP04059927A[P]. 1992-2-26.