无取向硅钢织构演变规律研究

包文清[1],郝娟娟[2],陆 斌[2,3],刘朋成[2],卢晓禹[2],邬宇轩[2],冯海涛[2]

(1. 包头钢铁(集团)有限责任公司办公室,内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心,内蒙古 包头 014010;
3. 北京包钢钢铁技术有限公司,北京 100083)

摘 要:无取向硅钢作为制造电机铁芯的核心材料,其性能直接决定电机的效率和使用寿命。织构作为影响无取向硅钢性能的关键因素之一,研究其演变规律对于提高产品性能十分必要。文章利用 X 射线衍射仪对不同化学成分无取向硅钢热轧板、冷轧板及退火板织构进行检测,研究无取向硅钢不同生产工艺过程织构的演变规律。研究结果表明,化学成分对主要织构类型无显著影响,提高 Si 含量各织构强度略有提高。热轧板主要织构类型为 Goss 织构,经过总压下率为 80% 以上的酸轧工艺处理后,织构类型主要为 α 织构和 γ 织构。退火工序中晶粒经过回复、再结晶和晶粒长大过程,主要织构为 γ 织构和少量 Goss 织构。不同生产工艺织构类型的转变,与不同取向晶粒与基体取向有关。可通过热轧、冷轧及退火工艺的协同配合,优化成品的织构类型及强度。

关键词:无取向硅钢;织构;热轧;退火
中图分类号:TG337.3 **文献标识码**:B **文章编号**:1009 - 5438(2025)06 - 0057 - 03

Research on Evolution Laws of Texture for Non - oriented Silicon Steel

Bao Wenqing[1], *Hao Juanjuan*[2], *Lu Bin*[2,3], *Liu Pengcheng*[2], *Lu Xiaoyu*[2], *Wu Yuxuan*[2], *Feng Haitao*[2]

(1. *Office of Baotou Iron & Steel (Group) Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
2. *Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
3. *Beijing Baotou Steel Technology Co., Ltd., Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Non - oriented silicon steel is the core material for manufacturing iron core of motor as well as its performances directly determine the efficiency and service life of motor. Texture is one of the key factors affecting performances of non - oriented silicon steel, so it is necessary to research its evolution laws for improving product performances. In this paper, the textures of hot rolled plates, cold rolled plates and annealed plates with non - oriented silicon steels of different chemical compositions are detected as well as evolution laws of textures for non - oriented silicon steels with different production processes are studied with X - ray diffractometer. The results showed that there were no significant effects of chemical compositions on main texture types and strength of each texture was slightly improved by increasing Si content. The main texture type of hot rolled plates is Goss texture as well as the main texture types are α texture and γ texture after the treatment of pickling and tandem cold rolling process with total reduction ratio of over 80%. In the annealing process, the main textures of grain are γ texture and a small amount of Goss texture with the process of recovery, recrystallization and grain

收稿日期:2025 - 08 - 20
作者简介:包文清(1989 -),男,内蒙古通辽市人,工程师,现从事金属材料领域相关管理工作。

growth. The transformation of texture types with different production processes is related to different grain and matrix orientations. The texture types and strength of finished products could be optimized through the coordinating cooperation of such processes as hot rolling, cold rolling and annealing.

Key words: non-oriented silicon steel; texture; hot rolling; annealing

无取向硅钢作为制造各类电机铁芯的核心材料,其性能直接决定电机的能耗和使用寿命。基于其庞大的数量,电机能源消耗量在全球能源消耗中占比极大。随着节能降耗逐步成为社会发展的必要途径,电机不断朝着高效化、节能化、小型化方向发展,推动无取向硅钢朝着低铁损、高磁感方向发展[1]。影响无取向硅钢磁性能的主要因素包括化学成分、组织和织构[2],其中织构是决定磁性能的关键因素,通过调控织构组分与分布,可有效降低磁滞损耗、提高磁感应强度。然而,无取向硅钢生产工艺十分复杂,包括冶炼、热轧、冷轧、退火等多道工序,为织构控制带来巨大挑战。目前,无取向硅钢织构演变规律研究多基于实验室,关于工业生产过程织构的演变规律研究较少。本文利用X射线衍射仪研究不同化学成分、不同生产工艺条件下无取向硅钢织构类型及强度,揭示了无取向硅钢织构的演变规律。

1 试验材料及方法

本试验使用两个化学成分试验钢作为研究对象,具体化学成分如表1所示。试验钢生产工艺为炼钢→热轧酸轧→退火。1#和2#试验钢热轧板厚度均为2.8 mm,冷轧板和退火板样品厚度均为0.5 mm。分别沿轧制方向取热轧板、冷轧板和退火板试样,试样尺寸为20 mm×15 mm。利用X射线衍射仪对热轧板、冷轧板和退火板宏观织构进行检测。

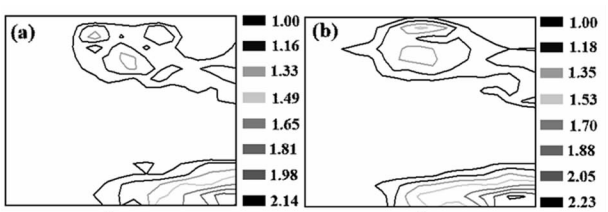
表1 试验钢化学成分(质量分数) %

名称	C	Si	Mn	P	S	Als	Ti	N
1#试验钢	0.002 1	0.32	0.32	0.070	0.002	0.278	0.001 4	0.001 6
2#试验钢	0.001 4	0.79	0.33	0.065	0.001	0.272	0.001 1	0.001 5

2 试验结果与分析

2.1 热轧板织构

1#和2#试验钢热轧板织构如图1所示,1#试验钢主要织构类型为Goss织构{110}<001>,还有少量铜型织构{112}<111>、黄铜型织构{110}<112>和{114}<041>。2#试验钢的织构类型与1#试验钢相似,主要有Goss织构{110}<001>,少量铜型织构{112}<111>、黄铜型织构、{001}<010>和{114}<041>,化学成分不影响对热轧板织构类型。1#试验钢和2#试验钢各织构强度如表2所示,随着硅含量增加,各织构类型强度均略有提高。



(a) 1#试验钢 (b) 2#试验钢

图1 热轧板织构分布图

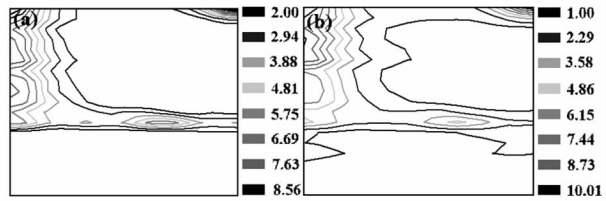
表2 热轧板织构类型及强度

织构类型	织构强度	
	1#试验钢	2#试验钢
{110}<001>	2.14	2.23
{112}<111>	1.16	1.18
{110}<112>	1.16	1.53
{114}<041>	1.33	1.35
{001}<010>		1.35

2.2 冷轧板织构

热轧板经过酸洗冷轧后,厚度由2.8 mm减薄至0.5 mm。冷轧生产过程中,1#和2#试验钢的总压下率均为82.14%,大于75%,使得晶粒发生转动,立方织构组分会逐步提高,织构类型发生显著变化,形成形变织构[3,4]。如图2所示,1#和2#试验钢冷轧板主要织构类型相同,包括立方织构{001}<110>、α织构({114}<110>和{112}<110>)及γ织构({111}<110>和{111}<112>)。如表3所示,2#试验钢的有利织构立方织构{001}<110>和α织构{114}<110>强度高于1#试验钢,不利织构γ织构{111}<110>和{111}<112>强度低于1#试验

钢。分析表明,冷轧后 2#试验钢的有利织构占比优于 1#试验钢。



(a) 1#试验钢　　(b) 2#试验钢

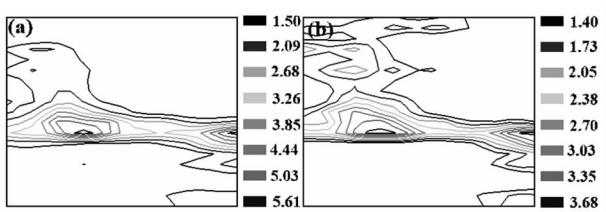
图 2　冷轧板织构分布图

表 3　冷轧板织构类型及强度

织构类型	织构强度	
	1#试验钢	2#试验钢
{001}<110>	8.56	10.01
{114}<110>	7.63	10.01
{111}<110>	7.63	4.86
{111}<112>	3.88	2.29

2.3　退火板织构

退火作为无取向硅钢生产的关键工艺之一,能够有效消除冷轧过程产生的内应力,改善组织均匀性,提高产品的加工性能。退火过程中晶粒经过回复、再结晶和晶粒长大,织构类型及强度发生显著变化。相同退火工艺下,退火板织构如图 3 所示,1#试验钢主要织构类型为 γ 织构{111}<112>,同时有少量 Goss 织构{110}<001>和 α 织构({112}<110>{114}<110>)。2#试验钢织构类型除 γ 织构{111}<112>外,还有少量 Goss 织构{110}<001>、α 织构({112}<110>和{114}<110>)及 α* 织构{113}<361>。2#试验钢 γ 织构强度明显低于 1#试验钢。



(a) 1#试验钢　　(b) 2#试验钢

图 3　退火板织构分布图

由以上结果可知,退火后退火板 α 织构和 γ 织构强度显著降低。这是由于再结晶织构的形成与变形基体间存在较高的取向角(25°~55°),γ 取向晶粒和 α 取向晶粒分别会在再结晶初始阶段和后期消失。后期新形成的 γ 取向晶粒{111}<112>主要形核于{111}<110>取向的变形基体中,因此退火后 γ 织构{111}<110>消失。Goss 织构主要在 γ 取向晶粒内部的剪切带位置形核,退火后形成少量的 Goss 织构[5]。结果表明,提高 Si 含量,γ 织构强度降低。

3　结论

(1)Si 含量对热轧、冷轧及退火板中织构强度有一定影响,Si 含量提高,冷轧及退火板 γ 织构强度降低。

(2)热轧板主要织构类型为剪切织构 Goss 织构,还有少量的铜型织构和黄铜型织构,随着 Si 含量增加,各织构强度提高。

(3)冷轧压下率较大,促使晶粒发生转动,主要织构类型转变为立方织构{001}<110>、α 织构({114}<110>和{112}<110>)及 γ 织构({111}<110>和{111}<112>)。

(4)无取向硅钢退火过程晶粒经过回复、再结晶和长大过程,织构类型和强度发生变化。退火后,γ 织构{111}<110>消失,产生少量的 Goss 织构。

参　考　文　献

[1] 乔向东,严蒋,赵强,等. 无取向硅钢研究的进展[J]. 热处理,2023,38(3):40-45.

[2] 何忠治. 电工钢[M]. 北京:冶金工业出版社,1996.

[3] Lyudkovsky G, Shapiro J M. Effect of aluminum content and processing on texture and permeability of lamination steels [J]. Journal of Applied Physics. 1985. 57(8):4235-4237.

[4] 刘穆光,刘继申,谌晓文,等. 电工钢的生产开发现状和发展趋势[J]. 特殊钢. 2005,26(1):38-41.

[5] Park J T, Szpunar J A. Evolution of recrystallization texture in nonoriented electrical steels [J]. Acta Material. 2003, 51 (11): 3037-3051.