Sn对无取向硅钢磁性能影响研究*

吴明明[1],詹卢刚[2],秦美美[3],樊立峰[3]

(1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司总工室,内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司薄板坯连铸连轧厂,内蒙古 包头 014010;
3. 内蒙古工业大学材料科学与工程学院,内蒙古 呼和浩特 010051)

摘 要: 文章研究了Sn对无取向硅钢热轧、冷轧、退火板组织及织构的影响。加入Sn元素后,热轧板组织变形晶粒更加扁长,冷轧板剪切带明显增加,成品晶粒尺寸减小,成品γ-fiber织构显著减弱,有利λ-fiber织构增加。随着Sn的加入,铁损值持续增加,磁感应强度值先增加后降低,在Sn含量为0.006%~0.007%获得最大值。

关键词: 无取向硅钢; Sn; 组织; 织构; 磁性能
中图分类号: TG142.1 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2021)06-0044-04
DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2021.06.019

Study on Effects of Sn on Magnetic Property of Non-oriented Silicon Steel

Wu Ming-ming[1], *Zhan Lu-gang*[2], *Qin Mei-mei*[3], *Fan Li-feng*[3]

(1. *Chief Engineering Office of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
2. *CSP Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
3. *School of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot* 010051, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: In the paper, the effects of Sn on microstructure and texture of hot rolled, cold rolled and annealed sheets with non-oriented silicon steel are studied. After add the element Sn, the deformed grains of microstructure of hot rolled sheet become more prolate, shear band of cold rolled sheet increases significantly, grain size of finished product decreases and texture of γ-fiber of finished product is significantly weakened, which is favorable for increase of texture of λ-fiber. With the addition of Sn, the value of iron loss continues to increase, value of magnetic induction intensity first increases and then decreases and the maximum value is obtained when content of Sn is 0.006%~0.007%.

Key words: non-oriented silicon steel; Sn; microstructure; texture; magnetic property

硅钢是一种铁硅系合金,用于制造电动机、发电机的定转子铁芯,是重要的金属功能材料[1]。随着

* **收稿日期:** 2021-09-20
基金项目: 内蒙古自治区科技计划项目(2020GG0265);内蒙古自然科学基金项目(2020MS05006);轧制技术及连轧自动化国家重点实验室课题(2019-KF-25-09)。
作者简介: 吴明明(1986-),男,内蒙古呼和浩特市人,工程师,现从事轧钢工艺研究工作。

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

我国电力工业迅猛发展，绿色经济理念不断深入，高效电机比例逐步增加，无取向硅钢需求量快速增长。而目前行业中致力于研究高磁感无取向硅钢，这种材料在相同功率条件下，能有效降低铁芯体积与重量，磁感每提高 0.01 T，可节约硅钢片、铜线和绝缘材料损耗 5%。一般情况下，高磁感无取向硅钢与相应牌号普通无取向硅钢的铁损相当，而磁感至少要比普通硅钢高 0.05 T。对硅钢来说，有目的选择一些偏聚元素，可以改善织构，从而改变磁感应强度[1]。

本文通过添加 Sn 元素，研究无取向硅钢热轧、冷轧和退火状态的微观组织、晶体织构等方面特征，分析 Sn 对磁性能影响规律。

1　试验材料及方法

试验原始材料为无取向硅钢 BR50W1000，对比材料为在此成分基础上增加 Sn，标记为 BR50WEI，主要化学成分见表 1，无取向硅钢的生产工艺路线为：铁水脱硫→顶底复吹转炉炼钢→真空精炼→连铸连轧→酸洗→冷轧→连退，热轧板厚度 2.3 mm，冷轧至 0.5 mm，连续退火温度为 830 ℃。

表 1　试验材料化学成分(质量分数)　%

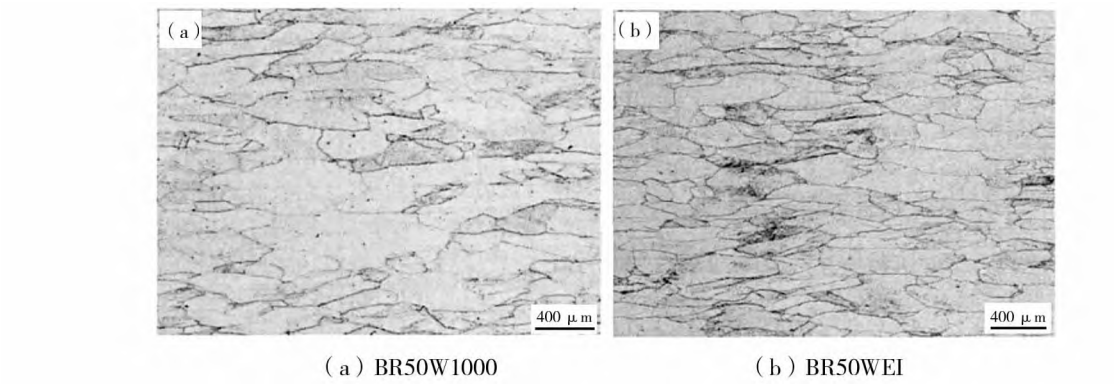
牌号	C	Si	Mn	P	S	Al_s	O	N	Sn
BR50W1000	≤0.0025	0.25～0.35	0.25～0.35	0.055～0.075	≤0.005	0.28～0.38	≤0.002 0	≤0.003 0	
BR50WEI	≤0.0025	0.25～0.35	0.25～0.35	0.055～0.075	≤0.005	0.28～0.38	≤0.002 0	≤0.003 0	0.006～0.007

将热轧、冷轧、退火样品制成尺寸为 10 mm × 15 mm(TD × RD)的试样，依次经过水磨、抛光，再用 10%的硝酸酒精溶液腐蚀 10 s 吹干后，采用光学金相显微镜观察组织，并用 XRD 观察织构。

2　试验结果及分析

2.1　Sn 对无取向硅钢显微组织的影响

图 1 为试验钢和对比材料的热轧显微组织，可以发现热轧后主要为变形组织，不加偏析元素的 BR50W1000 无取向硅钢的热轧显微组织中变形晶粒较宽，而加了偏析元素 Sn 的热轧组织晶粒更加扁长，带状组织特征更明显。

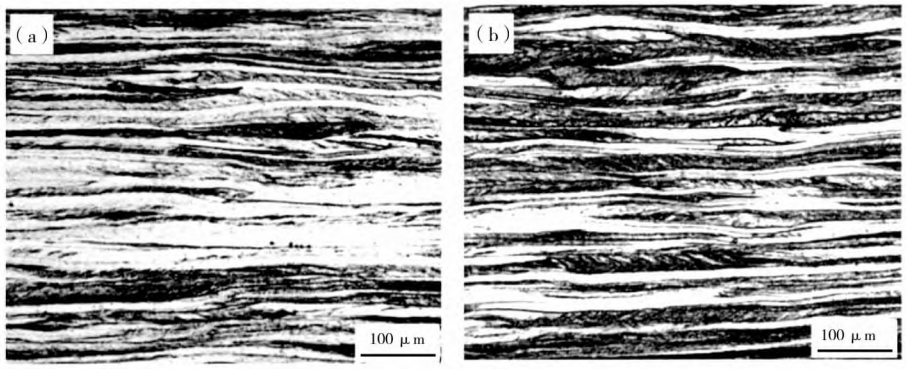


(a) BR50W1000　　(b) BR50WEI

图 1　热轧显微组织

图 2 为试验钢 BR50WEI 和对比组 BR50W1000 的冷轧显微组织，冷轧后均为典型的压扁拉长的变形组织，BR50W1000 的变形带稍宽一些，加 Sn 钢组织内部出现了大量的剪切带，这些剪切带两侧储存能差异较大，使组织的储存能分布不均匀，容易造成退火组织晶粒分布不均匀。剪切带为高斯、立方织构形核创造条件，有利于磁感值的提高。

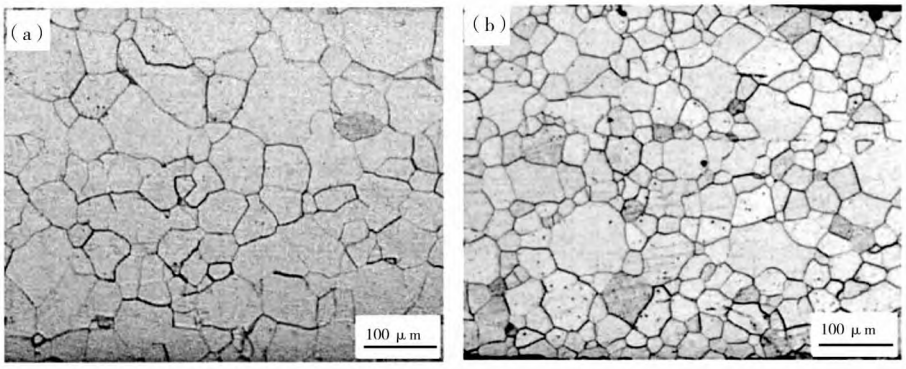
(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a) BR50W1000 (b) BR50WEI

图2 冷轧显微组织

图3为试验钢BR50WEI和对比组BR50W1000的再结晶退火组织，BR50W1000和BR50WEI的平均晶粒尺寸分别为47.1 μm、35.4 μm。从图3中可以明显看出，加Sn的晶粒尺寸较小，且均匀性较差，这是因为在再结晶退火的过程中，Sn为偏析元素，在晶界上偏析，会阻碍晶粒长大，从而使成品板的晶粒小而且不均匀。



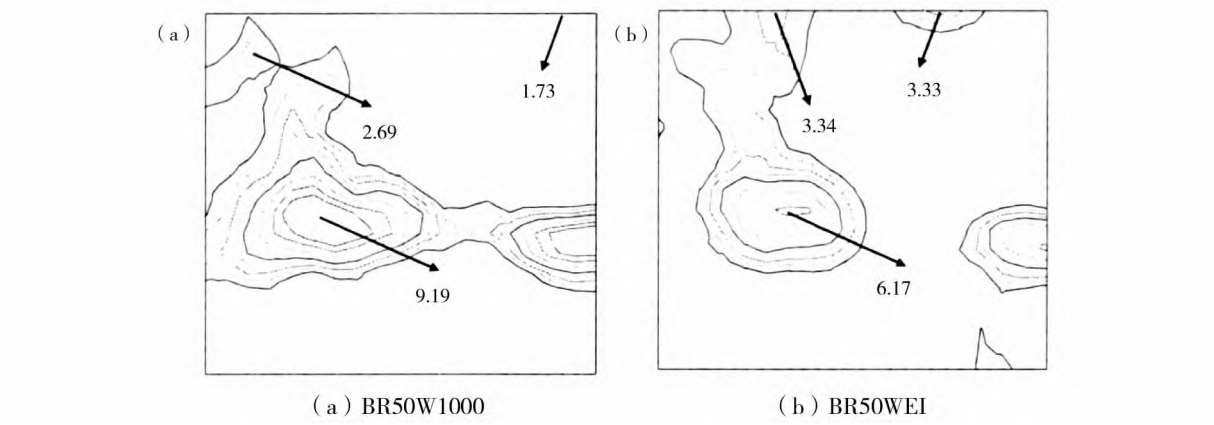
(a) BR50W1000 (b) BR50WEI

图3 退火显微组织

2.2 Sn对无取向硅钢织构的影响

图4为不同成分下成品板$\Phi_2=45°$的(Orientation Distribution Function)截面图，退火织构主要为γ-fiber织构、λ-fiber织构和少量的α-fiber织构。如图4(a)，对于普通BR50W1000，成品板织构类型为γ-fiber织构以及少量的α-fiber织构；γ-fiber织构较强，强点{111}<112>的取向密度为9.19，α-fiber织构较弱，没有λ-fiber织构；由图4(b)可知，加Sn的BR50WEI成品板的织构包括γ-fiber织构和λ-fiber织构，其中λ-fiber织构中{001}(<120>~<130>)的取向密度为3.34；同时，γ-fiber织构强点{111}<112>的取向密度降为6.17。与普通BR50W1000相比，加Sn的BR50WEI成品板中有利的织构组分包括{001}<uvw>织构和{001}<uvw>附近的织构都相对较多，并且γ-fiber织构显著减弱。这对磁感应强度的提高是非常有利的。

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



(a) BR50W1000　　(b) BR50WEI

图 4　成品板 $\Phi_2=45°$ 的 ODF 截面图

2.3　Sn 对无取向硅钢磁性能的影响

表 2 所示为试验钢 BR50WEI 和对比组 BR50W1000 的成品磁性能，可知加 Sn 后，成品板的磁感应强度由 1.742 T 提高到 1.753 T，铁损由 5.263 W/kg 提高到 5.416 W/kg。

进一步验证 Sn 含量对磁性能影响规律，如表 3 及图 5 所示，发现随着 Sn 含量的增加，磁感值先增加后降低，当 Sn 含量为 0.006% ~0.007% 时，磁感值最大达到 1.753 T，但是随着 Sn 含量增加，铁损值成持续增加趋势。

表 2　试验钢 BR50WEI 和对比组 BR50W100 的成品磁性能

项目	BR50W1000	BR50WEI	变化值
磁感/T	1.742	1.753	0.011
铁损/(W·kg^{-1})	5.263	5.416	0.153

表 3　不同 Sn 含量试验钢 BR50WEI 和对比组 BR50W100 磁性能

牌号	Sn 含量/%	磁感/T	铁损/(W·kg^{-1})
BR50W1000		1.742	5.263
试验组 1	0.004 ~0.005	1.745	5.383
试验组 2	0.005 ~0.006	1.750	5.409
试验组 3	0.006 ~0.007	1.753	5.416
试验组 4	0.007 ~0.008	1.752	5.420
试验组 5	0.008 ~0.009	1.747	5.427

3　讨论

根据表 3、图 5 可见，在其他成分和工艺不变情况下，Sn 的加入使磁感增加，但随着 Sn 含量的增加，在 0.006% ~0.007% 时达到峰值，之后随 Sn 含量增加磁感下降，铁损成持续降低。

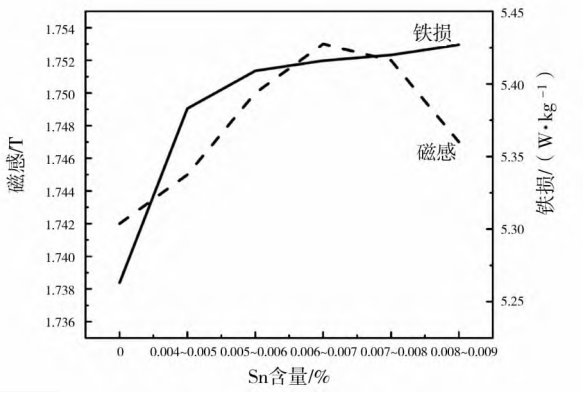


图 5　不同 Sn 含量试验钢及对比组磁性能趋势图

无取向硅钢磁性能受晶粒尺寸与磁感直接影响。平均晶粒尺寸越大，晶界越少，磁畴移动阻力越小，磁滞损耗降低，铁损降低[3-4]。从图 3 看出，加 Sn 后晶粒尺寸减小了 11.7 μm，导致铁损升高。晶粒尺寸减小，一方面是由于 Sn 的晶界偏聚降低了冷轧无取向硅钢中的晶界能，晶粒长大驱动力降低[5]；另一方面，Sn 沿晶界偏聚，本身就钉扎晶界，阻碍晶粒长大。磁感应强度与织构相关，从图 4 看出，随着 Sn 的加入，λ - fiber 织构含量增加，γ - fiber 织构强度降低，均有利于磁感的提高。有利织构增加，一方面由于 Sn 沿晶界偏聚，减小了 γ - fiber 织构形核位置，降低其强度，另一方面，如图 2 所示，加 Sn 后冷轧组织出现大量剪切带，有利于立方织构的形核，三是 Sn 的表面偏析可以通过降低表面能来促

(下转第 59 页)

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

3.82%。

(2) 盘螺宏观金相的不同衬度和魏氏组织得到明显缓解,从而保证了盘螺的屈服强度满足标准要求,且富余量较大。

参 考 文 献

[1] 梁云科,孙国庆,刘学森. 400 MPa 级抗震盘螺生产工艺研究[J]. 天津冶金,2014,(4):27-29.

[2] 李探,刘学森. HRB400E 盘螺工艺优化[J]. 天津冶金,2020,(3):36-39.

[3] 陈文勇,贾元海,王晓飞,等. HRB400 盘螺控温控冷技术试验[J]. 河北冶金,2016,(12):21-25.

[4] GB/T 1499.2—2018,钢筋混凝土用钢: 热轧带肋钢筋[S].

[5] 李德成. 控轧控冷工艺下普通 C-Mn 钢强化机理的研究[J]. 现代冶金,2013,41(1):29-31.

[6] 冯宝,杨其敏,邱卫锋,等. 盘螺 HRB400E 屈服强度偏高分析[J]. 山西冶金,2018,(3):5-6.

[7] 马正洪,张玺成,钱萍,等. 低锰 HRB400E 盘螺控冷机理分析[J]. 轧钢,2015,32(1):79-81.

[8] 黄亚鹤. 超细晶低锰盘螺产品开发与应用[J]. 现代冶金,2020,48(5):42-45.

(上接第 47 页)

进{100}取向晶粒的生长,Sn 的晶界偏析可以提高晶界迁移率,抑制不利织构发展,从而提高磁感应强度。

Sn 的加入在提高磁感的同时,也增加了铁损,主要是因为 Sn 含量偏低时,Sn 在各个晶界处的偏聚量不均匀,对{111}面织构的抑制力不强,Sn 含量过高时,在再结晶和晶粒长大过程中,除了抑制{111}面晶粒在原始晶界处的形核和晶粒长大外,还对其他有利织构组分的晶粒长大也有一定程度的抑制作用,从而导致了铁损的增大与磁感的降低[6]。

4 结论

(1) 加入 Sn 元素后,热轧板组织变形晶粒更加扁长,冷轧板剪切带明显增加,成品晶粒尺寸减小,成品 γ-fiber 织构显著减弱,有利 λ-fiber 织构增加。

(2) 随着 Sn 的加入,铁损值持续增加,磁感应强度值先增加后降低,在 Sn 含量为 0.006% ~ 0.007% 获得最大值。

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] 董浩. 高磁性能冷轧无取向硅钢薄带的研制[D]. 沈阳: 东北大学,2009.

[3] 高超,李运刚,齐艳飞,等. 微合金元素 Sn、Nb、RE 对无取向硅钢性能的影响[J]. 华北理工大学学报(自然科学版),2013,35(3):27-30.

[4] Fan Lifeng, Dong Ruifeng, Qiu Shengtao, et al. Effect of Sn on High Permeability Grain-Oriented Silicon Steel[J]. Journal of Superconductivity, 2014,27(9):1 959-1 965.

[5] McLean D. Grain Boundaries in Metals[M]. London: Oxford University Press, 1957.

[6] 董浩,赵宇,喻晓军,等. 锡含量对无取向硅钢薄带铁损和织构的影响[J]. 金属功能材料,2008,15(2):5-8.

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