

钛含量对无取向电工钢组织和磁性能的影响

李景才, 辛 燕

(商丘职业技术学院机电工程系, 河南 商丘 476000)

摘 要:以实验室冶炼的不同钛含量的无取向电工钢为原材料,采用退火炉、透射电镜、金相组织观察和磁性能测试等手段就钛含量对无取向电工钢组织和性能的影响进行了研究。结果表明:试样的晶粒尺寸随其钛含量增加而减小,当钛含量小于 0.015% 时,试样的晶粒组织呈等轴状,均匀性较高,其中的钛以碳氮化物形式析出,且钉扎于组织的晶界处;随着钛含量提高至 0.015% 以上,其组织中的晶粒形变明显,钛以铁-钛磷化物形式析出于晶内和晶界上。添加微量的钛($\leq 0.015\%$)可改善电工钢的磁感应强度和铁损,铁损 $W_{15/50}$ 约 4.6 ~ 5.2 W/kg,磁感应强度 B_{50} 约 1.74 ~ 1.76 T,但需严格避免钛含量的过量添加。

关键词:无取向电工钢;钛元素;磁感应强度;铁损

中图分类号:TF823, TG142.1

文献标志码:A

文章编号:1004-7638(2021)04-0156-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2021.04.026

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
聊科研
与作者互动

Effect of Ti on microstructure and magnetic properties of non-oriented electrical steel

Li Jingcai, Xin Yan

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Shangqiu Vocational and Technical College, Shangqiu 476000, Henan, China)

Abstract: In this paper, the effect of titanium content on the microstructure and properties of non oriented electrical steel with different titanium content was studied by means of annealing furnace, transmission electron microscope, metallographic observation and magnetic property test. The results showed that the grain size of electrical steel decreased with the increase of titanium content. When the content of titanium was less than 0.015%, the grain was equiaxed with a higher uniformity. The titanium precipitated in the form of carbonitride and was pinned at the grain boundary of the structure. With the increase of Ti content to more than 0.015%, the grains in the microstructure were obviously deformed, and Ti precipitated out of the grain boundary and in the grain boundary by Fe-Ti phosphide. The magnetic induction and iron loss of electrical steel could be slightly improved by adding a small amount of titanium ($\leq 0.015\%$). The iron loss $W_{15/50}$ was about 4.6 ~ 5.2 W/kg, and the magnetic induction B_{50} was about 1.74 ~ 1.76 T. However, excessive addition of titanium should be strictly avoided.

Key words: non-oriented electrical steel, titanium element, magnetic induction, iron loss

0 引言

电工钢是小型电机和变压器铁芯的主要材料,

为了改善环境,减少二氧化碳排放,人们开始重点关注改善电工钢的磁性能从而减少能源消耗。目前,各国学者通过精准控制化学成分、晶粒尺寸和组织

收稿日期:2021-01-10

作者简介:李景才(1982-),男,汉族,讲师,主要研究方向:材料研发及机械制造, E-mail: 411785183@qq.com。

等手段,大幅度提高了电工钢的磁性能,已成功开发出许多具有低铁损和高磁感的新产品^[1],这些进步是伴随着钢铁制造工艺的进步实现的。钢铁制造工艺是基于组织与磁性能之间的关系制定的,钢铁制造工艺的革新使生产极低碳低合金钢成为现实,现已在无取向电工钢板上实现了高磁感和相对磁导率以及低铁损^[2-3]。

无取向硅钢的铁损和磁感主要受到其化学成分、晶粒尺寸和夹杂物等多方面的影响,且这些影响因素又与其生产工艺存在相互影响^[4]。铌钛钒等作为氮的形成元素,可形成稳定的第二相颗粒,其氮化物曾被提出用于辅助抑制剂,以提升材料的磁性能,但其加入量过高会增加材料混晶的风险,因此确定合适的添加量对有效利用合金和提升材料性能均具有重要意义^[5]。截至目前,有关C、S、O、N对钢磁性能的影响研究已很充分,而有关铌钛钒对钢的电磁性能的影响研究则鲜有报道^[6-7]。Pei Ruilin等人指出3.2%Si硅钢磁性能会产生恶化^[8],并认为含碳0.038%的钢出现了时效现象,而含碳0.002%的钢则未出现时效现象。为了解决时效问题,金自力等

提出加钛以使间隙固溶碳以碳氧化物的形成析出^[9],但是这些析出物恶化了磁性能,且无有效控制手段。Yangsuo Lim等人发现钒微合金化对无取向电工钢磁性有提升作用^[10],并认为当钒含量为0.018%时,钒对碳氮化物尺寸的影响妨碍了再结晶晶粒的长大并恶化了磁性能。

笔者主要采用二次冷轧加退火工艺制备不同钛含量的无取向硅钢板,研究了钛微合金化对电工钢组织和磁性能的影响,以期对含钛电工钢的现实批量生产提供指导。

1 试验材料及方法

利用50 kg真空感应炉冶炼了钛含量具有一定差别的钢坯,钢坯的主要化学成分如表1所示。其中1[#]试样的化学成分为现有成熟商用电工钢的主要成分体系,为研究钛含量对其组织和性能的影响,以1[#]试样为基础添加不同的钛含量,分别为0.002%、0.004%、0.005%、0.009%、0.015%、0.042%、0.072%和0.118%,其他主要化学成分类似,分别标记这些钢坯为2[#]~9[#]样。

表1 试验钢的主要化学成分
Table 1 Main chemical compositions of tested steels

	C	Si	Mn	P	S	Als	Ti	N	O
1 [#]	<0.001 0	0.30	0.29	0.100	0.004 2	0.27	≤0.001	0.001 3	0.003 2
2 [#]	<0.001 0	0.32	0.30	0.098	0.004 1	0.28	0.002	0.001 5	0.001 8
3 [#]	<0.001 0	0.33	0.28	0.098	0.004 5	0.26	0.004	0.001 3	0.001 0
4 [#]	<0.001 0	0.32	0.30	0.097	0.004 2	0.26	0.005	0.001 3	0.002 4
5 [#]	<0.001 0	0.32	0.29	0.098	0.004 2	0.27	0.009	0.001 4	0.002 2
6 [#]	<0.001 0	0.28	0.29	0.098	0.004 4	0.27	0.015	0.001 3	0.001 1
7 [#]	<0.001 0	0.29	0.28	0.100	0.004 2	0.26	0.042	0.001 2	0.002 6
8 [#]	<0.001 0	0.32	0.30	0.098	0.004 5	0.28	0.072	0.001 3	0.003 2
9 [#]	<0.001 0	0.29	0.29	0.097	0.004 2	0.27	0.118	0.001 1	0.001 2

钢坯首先被轧制为45 mm厚的钢板,加热至730 ℃保温30 min后空冷至380 ℃时,热轧至4.5 mm厚,然后冷却至220 ℃后保温5 h,再炉冷至室温。将钢板均匀平整至2.5 mm厚再去掉氧化皮,然后在四辊冷轧机上冷轧至0.3 mm厚,之后按图1所示的热处理方式连续退火。将退火板剪成30 mm×100 mm的规格,然后在氮气中于300 ℃进行去应力退火2 h,最后炉冷至室温。

对退火后的试样进行显微组织观察,对去应力

退火后的试样进行磁性能测量,并结合组织观察讨论组织与性能的关系。金相组织采用180~1 500目砂纸进行逐级机械研磨和抛光,然后用4%硝酸酒精腐蚀、酒精洗净后,采用Axio Observer Z1M光学显微镜进行观察;透射电镜选用FEI Tecnai20 Titan60型;铁损和磁感应强度采用FE-2100M硅钢测量仪,参考GB/T3655—2000、GB/T13789—1992进行检测。

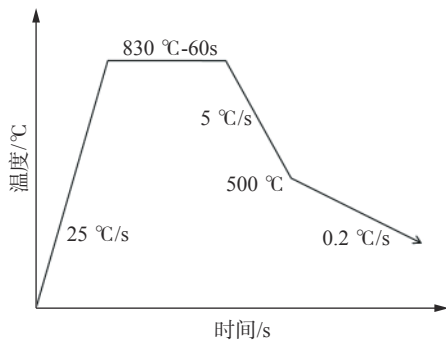


图1 热处理连续退火工艺

Fig. 1 Continuous annealing parameters of heat treatment

2 试验结果与讨论

2.1 显微组织

经退火后各试样的显微组织如图2所示,随着试样中钛含量的升高,其晶粒尺寸逐渐下降。钛含量不大于0.015%时(1#~6#试样),试样的晶粒组织呈现等轴状;随着钛含量继续增加(7#~9#试样),晶粒组织细化明显,但晶粒呈现形变特征,尺寸均匀性显著降低。

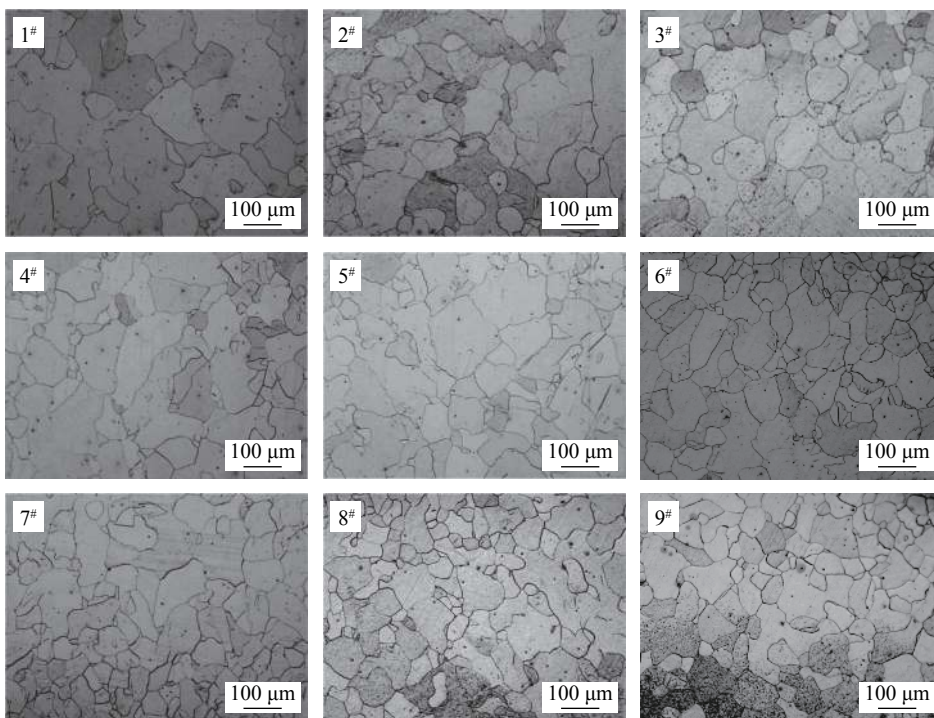


图2 试验钢经退火后的金相组织

Fig. 2 Microstructure of tested steels after annealing

有人研究了无取向电工钢的再结晶机制,并指出形变铁素体很难发生再结晶,而且钛基无取向电工钢中的磷光体可以有效延迟冷轧板的再结晶现象^[8]。此外,朱涛等人^[11]研究了磷光体导致的再结晶延迟行为,并得出结论:只有轧钢的热轧卷取温度低于550 °C,才能有效避免类似(Fe, Ti)P之类的磷化物析出。因此,电工钢的显微组织形态受到了其中析出相的强烈影响,在7#~9#试样中,其组织晶粒形变明显,预测与其钛含量过高导致其组织中的析出相增多有关。

图3为经连续退火后不同钛含量试样的透射电镜形貌,试样中的夹杂物以钛和铝的夹杂物为主,在

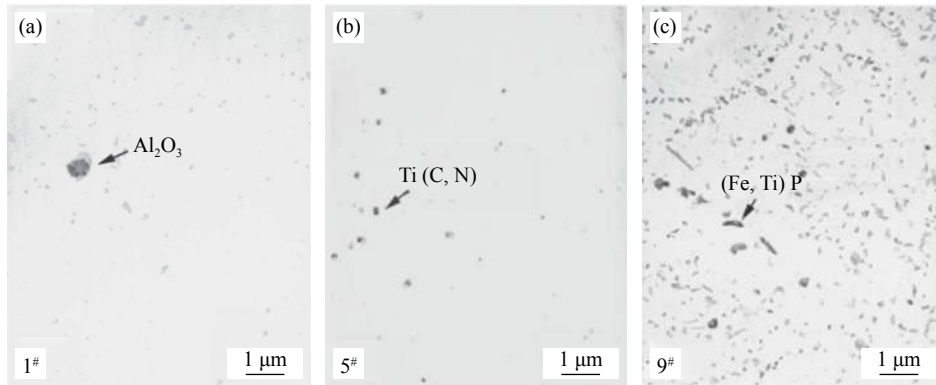
钛含量较高的材料中基本以钛的夹杂物为主,而且材料组织中晶界处可观察到钛的碳氮化物存在,可以起到一定的钉扎作用,因此该类钛的碳氮化物对晶粒长大的延迟作用比其他化合物更为明显。在钛含量较高的9#试样中,其组织的晶内和晶界处均观察到大量的铁-钛磷化物析出,说明随着试样中钛含量的进一步上升,其主要析出物会由钛的碳氮化物转变为铁-钛磷化物,这也证实了组织中的析出相与其组织形变存在关联。

2.2 磁性能

图4为试样经去应力退火后其铁损与钛含量之间的对应关系,试样的晶粒尺寸可以很大程度上影

响材料的磁性能, 当试样中的钛含量不超过 0.015% 时(1# ~ 6#), 随着试样中钛含量的上升, 其组织晶粒尺寸下降, 铁损处于较低水平, 约 4.6 ~ 5.2 W/kg。

但随着试样中的钛含量超过 0.015% 后(7# ~ 9#), 其等轴状晶粒变化为形变状, 而且材料中的夹杂物数量显著增加, 导致其铁损明显上升。



(a) 试样 1#; (b) 试样 5#; (c) 试样 9#

图 3 试样退火后的透射电镜形貌

Fig. 3 TEM images of Ti bearing steels after annealing

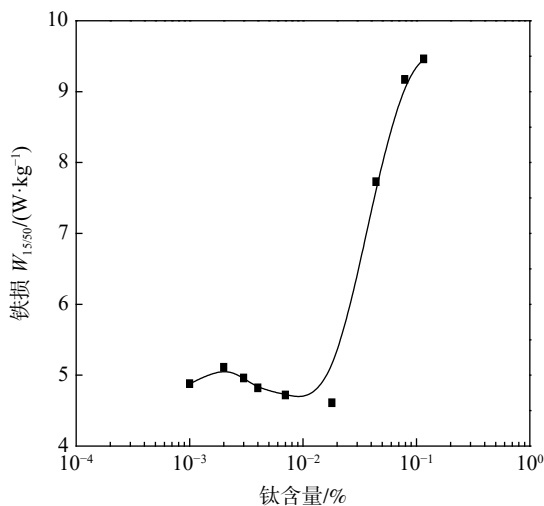


图 4 铁损 $W_{15/50}$ 与钛含量的关系曲线

Fig. 4 Relationship between iron loss $W_{15/50}$ and titanium content

材料的磁感应强度 B_{50} 随着钛含量的增加首先出现波动, 然后大幅度下降, 如图 5 所示。当试样钛含量不超过 0.015% 时(1# ~ 6#), 试样的磁感应强度 B_{50} 整体维系在较高水平, 约 1.74 ~ 1.76 T; 而试样钛含量大于 0.015% 时, 磁感应强度 B_{50} 下降趋势大幅度增加, 当其中的钛含量超过 0.072% 后, 试样的磁感应强度 B_{50} 最低为 1.70 T, 且其铁损超过 9.3 W/kg。材料的磁感应强度与材料的晶粒尺寸和结构有关, 图 6 给出了各试样退火前的微观形貌, 可以看出, 当钛含量小于 0.015% 时(1# ~ 6#试样), 材

料组织以等轴晶为主, 晶粒尺寸无明显差别; 而钛含量大于 0.015% 的试样(7# ~ 9#) 出现了部分再结晶。相对而言, 退火前试样的显微组织差距较退火后更大, 退火工艺对材料的组织均匀性有一定的改善作用, 造成退火样组织差异的主要因素是材料的化学成分差异(即钛含量)。

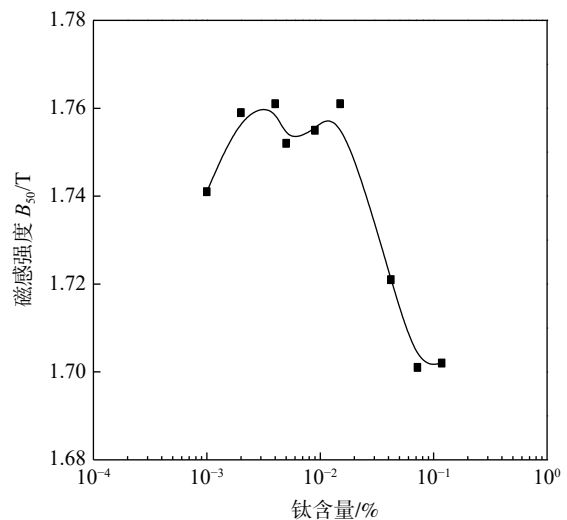


图 5 磁感应强度 B_{50} 与钛含量的关系曲线

Fig. 5 Relationship between the intensity of magnetic induction B_{50} and the content of titanium

试样的磁感应强度和铁损随钛含量的增加均出现轻微改善后大幅度恶化, 微量的钛含量添加可以均匀电工钢的晶粒尺寸, 并抑制退火过程中的组织恶化趋势, 综合钛含量对电工钢铁损 $W_{15/50}$ 和磁感

应强度 B_{50} 的影响,无取向电工钢中应该避免钛含量的过量添加。过量钛含量会显著恶化材料的性能,因此在冶炼过程中需要对铁水、废钢、其他合金元素中的钛进行严格控制。

图7和图8为退火前后试样的反极图强度与其钛含量之间的关系,其中{222}晶面是较难被磁化的,它在退火前后强度均相对较高,但是其强度变化与

钛含量变化关系不一致,退火前试样的{222}强度随钛含量的上升而提高,但退火后试样中的{222}强度却呈现一定的波动变化,这可能受到钛在不同材料中析出状态的影响。{200}晶面较易磁化,其在退火后试样中的强度随着钛含量的上升整体出现下降,这是材料的磁感应强度在钛含量超过0.015%后显著下降的另一个组织原因。

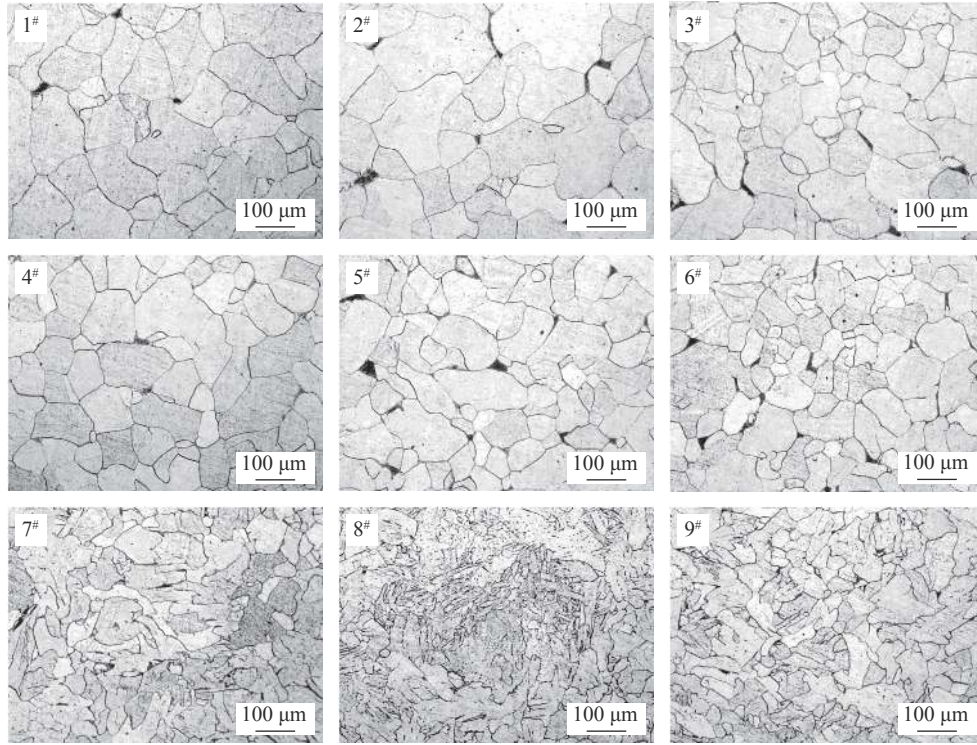


图6 各试样退火前的微观组织
Fig. 6 Microstructure of individual steels before annealing

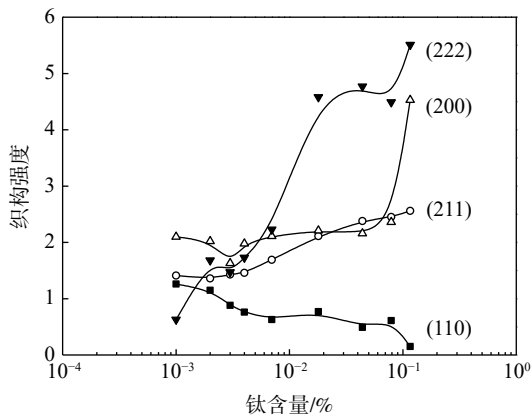


图7 退火前试样反极图强度与钛含量的关系
Fig. 7 Relationship between strength of reverse pole diagram and titanium content in steels before annealing

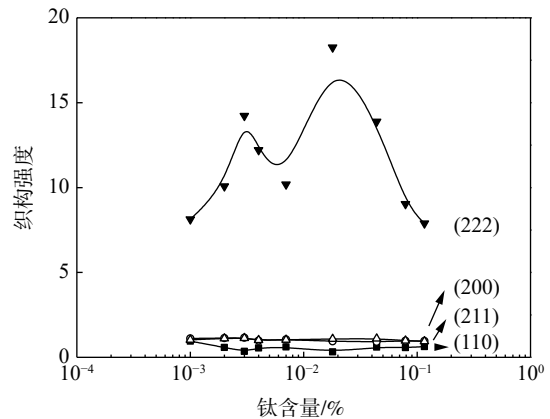


图8 退火后试样反极图织构强度与钛含量的关系
Fig. 8 Relationship between strength of reverse pole diagram and titanium content in steels after annealing

3 结论

1) 退火态试样的晶粒尺寸随钛含量的增加而减小,当钛含量较低时($\leq 0.015\%$),试样组织的晶粒呈现等轴状,均匀性较高;随着钛含量超过 0.015% ,材料晶粒组织形变明显,并伴有小晶粒萌生。

2) 当钛含量 $\leq 0.015\%$ 时,材料中的钛以碳氮化物形式析出,且钉扎于组织的晶界处;当钛含量

$> 0.015\%$ 时,其以铁-钛磷化物形式析出于晶内和晶界上,并阻碍晶粒长大。

3) 微量的钛含量添加($\leq 0.015\%$)有利于均匀电工钢的晶粒尺寸,并抑制退火过程中的组织恶化趋势,其磁感应强度和铁损均出现轻微改善。钛含量的添加过量钛含量会显著恶化材料的性能,因此在冶炼过程中需要对铁水、废钢、其他合金元素中的钛进行严格控制。

参考文献

- [1] Dong Mei, Zhu Tao, Pei Chenxin, *et al.* Development and research on cold rolled semi-processed no-oriented electrical steel[J]. *Electrical Engineering Materials*, 2012, (1): 29-33.
(董梅,朱涛,裴陈新,等.半工艺冷轧无取向电工钢的开发研究[J].*电工材料*,2012,(1):29-33.)
- [2] Kocks U F. Texture and anisotropy: Preferred orientations in polycrystals and their effect on materials properties[M]. New York: Cambridge University Press, 1998.
- [3] Chen Yuanyang, Han Zeyin, Chen Yangsheng. Mechanical strength analysis of high speed interior permanent magnet motor[J]. *Small and Special Electrical Machines*, 2012, 40(5): 5-9.
(陈远扬,韩则胤,陈阳生.高速内嵌式永磁电动机转子机械强度分析[J].*微特电机*,2012,40(5):5-9.)
- [4] Gao Pengyue. Study on precipitation and recrystallization behavior of RE and Nb microalloyed oriented silicon steel during hot rolling[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2015.
(高鹏越.稀土及铌微合金化取向硅钢热轧过程中的析出及再结晶行为的研究[D].包头:内蒙古科技大学,2015.)
- [5] Zhu Wenying. Effect of some elements on magnetic properties of oriented silicon steel[J]. *Electrical Steel*, 2002, 48(2): 18-20.
(朱文英.某些元素对取向硅钢磁性能的影响[J].*电工钢*,2002,48(2):18-20.)
- [6] Yan Bin, Zhu Chengxin, Zhang Yunxiang. Effect of Nb on precipitation behavior of inhibitor in hot rolled plate of oriented silicon steel[J]. *Hot Working Process*, 2019, 48(1): 14-16, 21.
(严彬,朱诚意,张云祥.Nb对取向硅钢热轧板中抑制剂析出行为的影响[J].*热加工工艺*,2019,48(1):14-16,21.)
- [7] Xie Li, Lin Yuan, Zhang Wenkang. Effect of niobium on mechanical and magnetic properties of 0.5% Si steel[J]. *Hot Working Process*, 2016, 45(24): 62-64, 67.
(谢力,林媛,张文康.铌对0.5%Si钢力学性能和磁性能的影响[J].*热加工工艺*,2016,45(24):62-64,67.)
- [8] Pei Ruilin, Zeng Lubin, Chen Xiao, *et al.* Studies of high-efficiency electrical steels used in electric vehicle motors[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2012, 17(3): 319-322.
- [9] Jin Zili, Qi Jianbo, Han Qiang, *et al.* Comparison and analysis of the low grade cold rolled non-oriented silicon steel on texture and magnetic property[J]. *Metallic Functional Materials*, 2006, (1): 1-3.
(金自力,齐建波,韩强,等.低牌号冷轧无取向硅钢的组织及电磁性能的对比如分析[J].*金属功能材料*,2006,(1):1-3.)
- [10] Yangsu Lim, Jiyum Kim. A study of the characteristics of traction motor performance for EV by electrical steel[C]//2012 2nd International Electric Drives Production Conference (EDPC). Nuremberg, 2012: 15-18.
- [11] Zhu Tao, Shi Lifa, Dong Mei, *et al.* Comparative analysis of effect of microstructure and texture on magnetic properties of non-oriented electrical steel produced by CSP and traditional processes[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2009, 21(11): 35-37.
(朱涛,施立发,董梅,等.CSP与传统工艺生产无取向电工钢的组织 and 织构对磁性能影响与对比分析[J].*钢铁研究学报*,2009,21(11):35-37.)