化学元素对冷轧无取向电工钢磁性能的影响*

乔继强，张文博，华国龙

（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）

摘 要： 文章介绍和分析了主要合金元素、杂质元素及特殊元素对低碳低硅冷轧无取向电工钢磁性能的影响及各元素对磁性能的作用机理。结果表明，Si、Al、Mn 等主要合金元素是磁性能的主要决定因素，随着其含量的增加，铁损值升高，磁感值降低；C、N、O、S、Ti 等杂质元素均不利于磁性能；Sn、RE 等特殊元素加入后可使有利织构的组分明显增加，优化磁性能。

关键词： 低碳低硅；冷轧无取向电工钢；化学元素；磁性能

中图分类号： TG142.4 **文献标识码：** B **文章编号：** 1009－5438(2017)05－0021－04

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2017.05.007

Effects of Chemical Elements on Magnetic Properties of Cold Rolled Non－oriented Electrical Steel

QIAO Ji－qiang, ZHANG Wen－bo, HUA Guo－long

(*CSP Plant of Steel Union Co. Ltd. of Baotou Steel (Group) Corp.*, *Baotou* 014010, *Nei Monggol*, *China*)

Abstract: In the paper, it is introduced and analyzed the effects of main alloying elements, impurity elements and special elements on magnetic properties for cold rolled non－oriented electrical steel of low carbon and low silicon, and the mechanism of action for these elements effects on magnetic properties. The results show: Si, Al, Mn and other major alloying elements are the main determinants of magnetic properties, with their contents increasing, iron loss increasing, the magnetic susceptibility values decreasing; C, N, O, S, Ti and other impurities are not conducive to magnetic properties; after the addition of Sn, RE and other special elements, the composition of favorable texture can be increased obviously, and the magnetic properties can be optimized.

Key words: cold rolled non－oriented electrical steel of low carbon and low silicon; chemical elements; magnetic property

电工钢又名硅钢，是电力、电子和军事工业中不可缺少的重要软磁合金。低碳低硅冷轧无取向电工钢 w[Si] 低（不大于 1%），磁感应强度高，铁损也较高，制造成本低。该类产品主要用作小于 1 kW 的家用电机和微电机、小电机、镇流器和小型变压器等的铁芯[1]。低碳低硅冷轧无取向电工钢成分组成基本包括三大类元素。第一类为主要合金元素，如 Si、Al、Mn 等；第二类为杂质元素，如 C、N、O、S、Ti 等；第三类为特殊元素，如 Sn、RE 等。电工钢磁性能指标主要为铁损值及磁感值，与成品的组织及织构密切相关，生产工艺恒定条件下，提高磁性能最直接的方法是改善成分配比。

* 收稿日期：2017－06－30

作者简介：乔继强（1980－），男，陕西省宝鸡市人，硕士，工程师，现从事冷轧无取向电工钢产品开发及质量管理工作。

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

1 主要合金元素的作用

1.1 硅元素

硅是无取向电工钢中最主要的元素，对其组织、织构及磁性能具有决定性的影响。随着硅含量增加，电阻率提高，γ相区缩小，涡流损耗降低，晶粒粗化，磁滞损耗降低[2]，使铁损值降低同时磁感值也降低。

硅能使钢中杂质元素危害降低，使碳石墨化，降低碳对磁性能的有害影响；硅与氧有亲和力，起脱氧作用，与氮形成氮化硅，降低钢中氮的溶解度。

硅与低碳低硅冷轧无取向电工钢磁性能关系如图1所示：

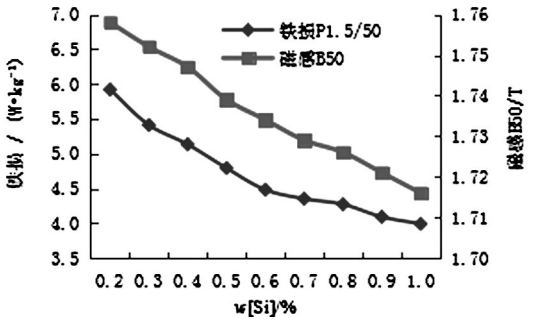


图1 w[Al]为0.3%低碳冷轧无取向电工钢中w[Si]与磁性能的关系

由图1可知，随着w[Si]的增加，铁损值(P1.5/50)逐渐降低，磁感值也同时降低。在实际的磁性能检测中，低碳低硅冷轧无取向电工钢磁感值与产品理论密度密切相关，密度每降低0.05 kg/dm^3，磁感值(B50)同时降低约0.01 T。

要得到晶粒组织均匀、粗大的冷轧无取向电工钢产品最直接的方法是提高w[Si]，但若w[Si]过高，铸坯明显变软，轧制力波动大，轧制控制难度大。硅元素对轧制过程中板形的的影响也很大，当w[Si]小于0.50%时冷轧无取向电工钢极易产生浪形。

1.2 铝元素

铝的作用与硅相似，提高电阻率，缩小γ相区，促进晶粒长大，粗化AlN夹杂，改善织构，减轻时效。铝与低碳低硅冷轧无取向电工钢磁性能关系如图2所示。

由图2可知，随着w[Al]的增加，铁损值(P1.5/50)逐渐降低，磁感值也降低，但降低趋势不如硅元素明显。

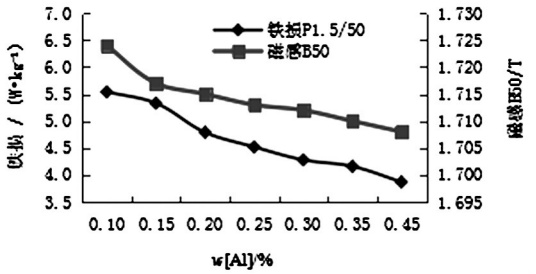


图2 w[Si]为0.9%低碳冷轧无取向电工钢中w[Al]与磁性能的关系

铝具有脱氧作用，可净化钢水，使钢实现连续浇注。当w[Al]在0.005%～0.150%之间时易形成细小的AlN夹杂，阻碍晶粒长大，铝过量又会造成大型夹杂物，使磁性能变差，一般工业化生产w[Al]控制在0.15%～0.50%之间。

1.3 锰元素

锰也可提高电阻率，降低铁损，改善磁性能。锰可与硫形成MnS夹杂，防止FeS引起的热脆，扩大γ相区，MnS粗化后利于晶粒长大。锰加入后有利于冲片性和切削性。

锰与低碳低硅冷轧无取向电工成品铁损值关系如图3所示。

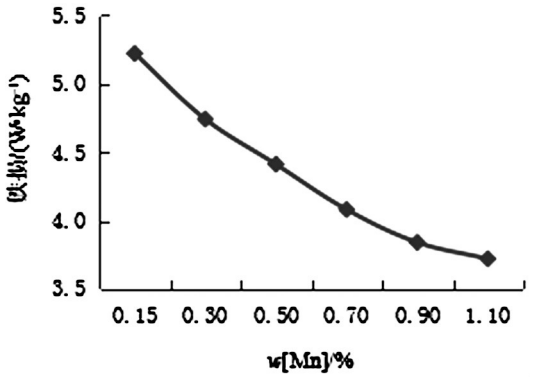
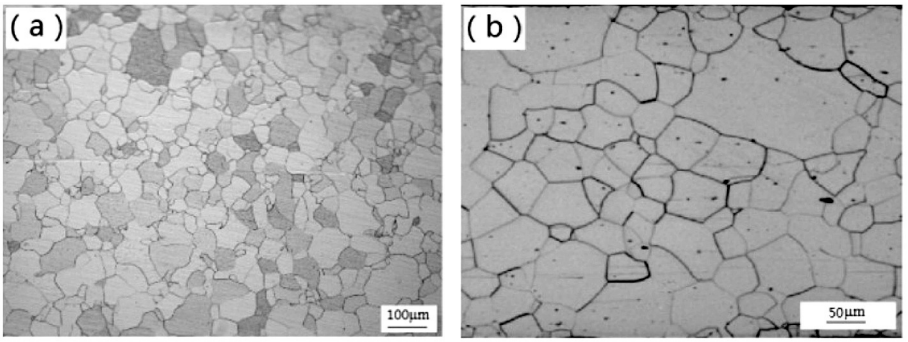


图3 w[Si]为0.9%低碳冷轧无取向电工钢中w[Mn]与铁损值的关系

由图3可知，随着w[Mn]的增加，铁损值(P1.5/50)逐渐降低。

工业生产中锰、硅、铝三种元素常依照生产条件及成品磁性能要求搭配设计，w[Mn]为0.8%，w[Al]为0.3%，w[Si]为0.8%，热轧及退火后试样组织如图4所示：

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



（a）热轧组织　　（b）退火组织

图 4　无取向电工钢金相组织图

由图 4 可知，加一定量的锰后，热轧组织为较均匀的多边形铁素体，晶粒尺寸 40 ~ 50 μm 之间；退火后晶粒长大，晶粒尺寸 50 ~ 80 μm 之间。这是因为低碳低硅无取向电工钢中加一定量的锰（一般 w [Mn] ≤1.0%）可在热轧时避开两相区，改善热轧组织和织构。

2　杂质元素的影响

2.1　碳元素

随着 w [C] 增加，碳化物增加，铁损值显著升高，磁感值降低。

碳与低硅冷轧无取向电工成品铁损值关系如图 5 所示。

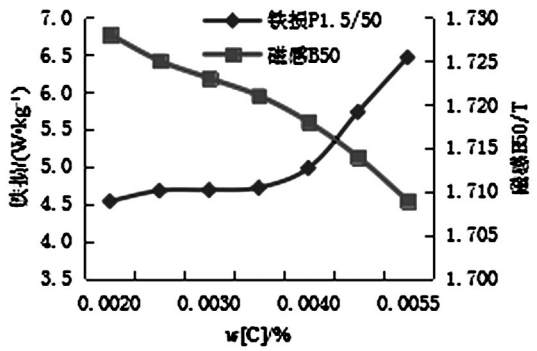


图 5　w [Si] 为 0.6% 冷轧无取向电工钢中 w [C] 与磁性能的关系

由图 5 可知，随着 w [C] 增加，铁损值升高，磁感值下降。当 w [C] $>40\times10^{-6}$ 后，上升趋势更为明显。

w [C] 高使无取向电工钢的相变温度降低，不利于晶粒长大，恶化磁性能，同时引起磁时效[3]，生产中一般要求 w [C] <0.003%。

2.2　氮元素

w [N] 增加，铁损值显著升高，同时产生磁时效。

氮与低碳低硅冷轧无取向电工成品铁损值关系如图 6 所示。

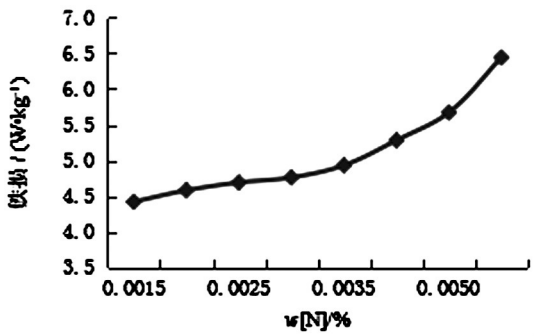


图 6　w [Si] 为 0.6% 低碳冷轧无取向电工钢中 w [N] 与铁损值的关系

由图 6 可知，随着 w [N] 增加，铁损值明显升高，当 w [N] 超过 35×10^{-6} 后，上升趋势更为明显。低碳低硅冷轧无取向电工钢中一般要求 w [N] < 0.003%。

2.3　其它杂质元素

氧、硫及钛等元素对磁性能也有不同程度的影响，但无碳元素及氮元素明显。

随着 w [O] 增加，铁损值升高，间接加速磁时效。生产中一般要求 w [O] <0.002%。

硫对无取向电工钢的影响主要在于晶界间的 MnS 夹杂及自由硫，随着 w [S] 增加，铁损值升高，一般要求 w [S] <0.005%。

钛元素易与碳元素及氮元素形成 TiC 及 TiN 夹杂，阻碍晶粒长大，增加铁损值同时降低磁感值，一般要求 w [Ti] <0.002%。

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

3 特殊元素的作用

3.1 锡元素

冶炼时添加少量 Sn 元素，可以改善无取向电工钢再结晶退火后的织构，使有利织构的组分增加，使不利织构组分减弱，中磁场下磁感值提高。添加少量 Sn 元素，可抑制氧化层和氮化层的形成，改善磁性[3]。

锡与低碳电工钢成品磁感值关系如图7所示。

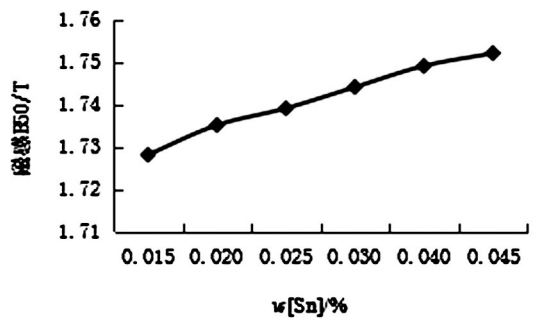


图7 w[Si]为0.6%低碳冷轧无取向电工钢中w[Sn]与磁感值的关系

由图7可知，w[Si] 0.6%电工钢，随着锡加入量的增加，磁感值逐渐升高。

3.2 稀土(RE)元素

在钢水加入一定量的稀土元素(常规w[RE]控制在0.005%以下)，可起到一定的净化作用，降低钢水中的杂质水平，降低钢中细小析出物的绝对量，减少阻碍晶粒长大与磁畴移动的阻力。加入稀土后形成细小稀土硫化物及氧化物作为钢的非自发晶核，其形核过冷度小，可使铸坯等轴晶率增加[4]，退火后晶粒尺寸增大，成品磁性能提高。

w[C] 1%的无取向电工钢中加入微量稀土La元素(w[La]约0.003%)后成品试样及常规对比试样$\phi2=45°$截面XRD织构检测结果如图8所示。

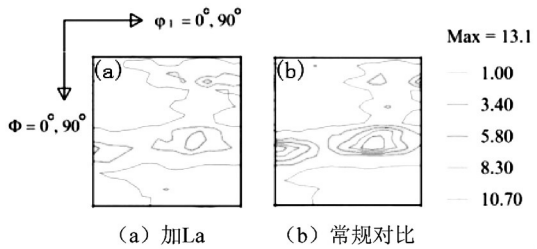


图8 w[Si]为1.0%无取向电工钢$\phi2=45°$截面XRD织构对比

两种试样织构组分占比及成品磁性能对比如表1所示。

表1 含稀土及常规试样织构与磁性能对比

试样编号	各织构组分占比/%			磁性能对比	
	(100)	(110)	(111)	铁损P1.5/50 /(W·kg^{-1})	磁感B50 /T
a	18.38	16.68	26.68	3.94	1.726
b	14.61	14.60	32.45	4.12	1.714

由图8及表1可知，加镧试样较常规试样(100)、(110)面织构强度增加，(111)面织构强度降低。从磁性能对比可知：加La试样较常规试样铁损值低0.18 W/kg，磁感值高0.012 T。

4 结论

(1)低碳低硅无取向电工钢中Si、Al、Mn等主要合金元素是磁性能的主要决定因素，硅元素和铝元素显著降低铁损值同时也降低磁感值，促进晶粒长大，改善织构，减轻时效；锰元素可提高铁损，利于热加工及成品冲片。

(2)C、N、O、S、Ti等杂质元素均不利于磁性能，生产中应严格控制。碳元素及氮元素对低碳低硅冷轧无取向电工钢影响最大，提高铁损，降低磁感的同时还会引起磁时效；硫元素及钛元素易形成各类夹杂物，阻碍晶粒长大。

(3)Sn元素加入后可以改善无取向电工钢再结晶退火后的织构，使有利织构的组分明显增加，不利织构组分减弱，磁感值提高。稀土La元素可净化钢水，改善组织及织构，优化磁性能。

参 考 文 献

[1] 何忠治. 电工钢[M]. 北京：冶金工业出版社，2012.

[2] 储双杰，瞿标. 某些元素对硅钢性能的影响[J]. 钢铁，1998，(11)：68－72.

[3] 李晶，岳铁军. 化学成分对低牌号冷轧无取向电工钢铁损的影响[J]. 特殊钢，2008，04(29－2)：4－6.

[4] 王龙妹，谭清元，李娜，等. 稀土在无取向电工钢中应用的研究进展[J]. 中国稀土学报，2014，32(5)：513－533.

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