



2006

中国金属学会功能材料分会
电工钢专业学术委员会

第九届全国电工钢专业学术年会

论文集

电工钢专业学术委员会
2006年11月10日

前 言

2006 年是国家实施“十一五”规划的开篇之年，也是我国冷轧电工钢生产(产能)持续、高速增长、科技创新繁荣之年。第九届全国电工钢专业学术年会的隆重召开，再次为全国电工钢工作者提供了一个重要的学术交流的平台，我们要更好地贯彻科学发展观，坚持科技创新，为健康均衡可持续发展我国电工钢事业而共同努力。

本次年会共征集论文 31 篇，为了便于代表们学习交流，学委会组织专人整理和汇编。由于某些原因，还有许多科研成果的论文没能收集其中，特表欠意，同时对论文作者的辛勤劳动表示衷心的感谢。

由于时间仓促，难免有些差错，请各位作者和代表给予更正。

电工钢学委会

2006 年 11 月 1 日

06'第九届全国电工钢专业学术年会论文

目 次

宝钢电工钢质量现状及展望-----	(宝钢) 陈 晓 (1)
卷取温度对无取向电工钢电磁性能和板形的影响-----	(宝钢) 黄望芽 张 明等 (8)
铈、锡、硼等合金对高牌号无取向电工钢电磁性能的影响-----	(宝钢) 黄望芽 (13)
冷轧无取向硅钢表面激光处理的织构改善作用-----	(太钢) 李慧峰 王立新等 (22)
热轧板常化温度对冷轧无取向硅钢电磁性能的影响-----	(太钢) 菅瑞雄 张文康等 (26)
退火温度对无取向硅钢组织结构的影响-----	(太钢) 苗 晓 张文康等 (30)
冷轧硅钢碱洗黑斑缺陷的机理研究-----	(鞍钢) 张本尊 罗 理等 (33)
简述高牌号无取向钢的发展-----	(武钢) 王良芳 (37)
武钢冷轧电工钢新产品简介-----	(武钢) 李炳南 (43)
武钢大生产试制出冷轧高磁感系列无取向电工钢带(片)产品-----	(武钢) 张新仁 谢晓心等 (49)
晶体缺陷在无取向硅钢中的作用-----	(武钢) 黄 璞 刘振清等 (51)
高牌号无取向电工钢生产技术研究-----	(武钢) 卢凤喜 何 敏 (69)
冷轧无取向电工钢的点阵畸变储能及其对再结晶织构的影响-----	(武钢) 李长一 黄 璞等 (72)
武钢近期在改善中低牌号无取向硅钢横向厚差方面做的一些工作-----	(武钢) 邵云锋 骆忠汉等 (76)
无取向硅钢片铁损分离方法的实验研究-----	(武钢) 冯大军 郭小龙等 (79)
硅钢片不同方向(0~360°)磁性的测试-----	(武钢) 姚腊红 黄 璞等 (81)
磁性试样的重量、长度、密度及碳含量对测量结果的影响-----	(武钢) 亓福荣 邱 忆等 (85)
国内外冷轧电工钢尺寸公差分析及探讨-----	(武钢) 杨春甫 刘其中 (90)
进口“油片”对我国取向硅钢市场的影响-----	(武钢) 牛琳霞 陈 卓 (94)
常化对 1%Si 无取向电工钢磁性能的影响-----	(武科大) 刘 静 石文敏等 (97)
改造和发展中的太钢六轧-----	(中冶) 许彦波 (103)
取向硅钢用 MgO 的研制和使用-----	(上海振泰) 王贵仁 杨连龙 (105)
非晶配电变压器的市场应用-----	(钢研总院) 刘国栋 (108)
中国大电机对高牌号电工钢的应用-----	(东方电机) 肖海航 (112)
浅谈华北地区电工钢市场需求及展望-----	(天津机械) 宋和平 战庭栋 (118)
国内冰箱压缩机生产现状及展望-----	(上海中昱) 汪淳淳 (124)
薄板坯连铸连轧技术在电工钢生产上的应用-----	(马钢) 王小燕 刘兴华 (130)
重庆四钢热轧硅钢三十多年生产回顾及未来-----	(重庆四钢) 袁思胜 张发进等 (136)
加快淘汰热轧硅钢片的研究-----	(武钢) 陈 卓 姚昌国 (138)
鞍钢电工钢的发展与质量现状-----	(鞍钢) 高振宇 罗 理等 (144)
取向硅钢铸坯低温加热技术的开发进展-----	(钢研总院) 李 军 孙 颖等 (151)



宝钢电工钢质量现状及展望

陈晓

(宝钢股份公司冷轧厂 上海 201900)

摘要 本文介绍了宝钢电工钢的产品质量和新产品开发情况。回顾了宝钢电工钢生产技术和质量改进工作。展望了宝钢电工钢的发展前景。

1 前言

电工钢是使用在各种电器铁芯中不可缺少的材料。随着电力工业的发展和人们生活水平的不断改善,其需求量不断增加。近年来,随着对电器设备高效化、小型化、高精度化和高可靠性的需求日益提高,对电工钢的性能提出了更高的要求。

宝钢股份在 2000 年 4 月和 2005 年 6 月相继投产了 1#、2#电工钢退火涂层机组和 3# 电工钢退火涂层机组,主要生产中低牌号无取向电工钢。宝钢凭借其先进的技术、一流的装备和严格的管理等优势,使宝钢电工钢产品质量和产量迅速提高,其产品已广泛地用于空调压缩机、冰箱压缩机、EI 变压器和电机四大行业,见图 1,并已稳定地进入了国内外著名厂家。宝钢电工钢产量逐年提高,见图 2,2005 年生产电工钢 68.8 万吨,6 年来共计生产电工钢 267.1 万吨,并已出口电工钢 38 余万吨。

为了更好地满足国内外用户的需求,宝钢在消化引进 6 种化学成分 14 个牌号电工钢的基础上,已开发了 11 个新牌号,并形成了 EI 变压器、空调压缩机、冰箱压缩机和家用电机等四大系列产品。

本文旨在介绍宝钢电工钢质量现状并展望宝钢电工钢的发展前景。

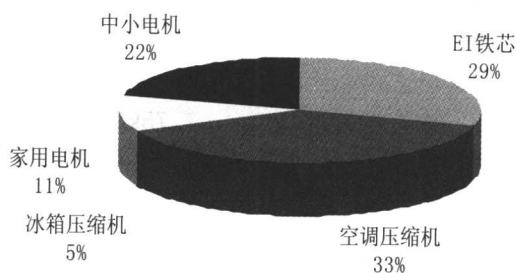


图 1 宝钢电工钢产品用途分布图

2 宝钢电工钢的产品质量

2.1 宝钢电工钢的种类和材质特性

宝钢从川崎制铁引进了 0.35mm、0.50mm 和 0.65mm 3 种厚度规格 14 种牌号电工钢产品。六年来,宝钢在对电工钢引进技术进行消化的同时,对产品磁性、绝缘涂层以及带钢尺寸公差等方面的质量进行了不断改进。宝钢电工钢产品已具有稳定的磁性、出色的加工性能、优良的涂层性能和极佳的尺寸精度等特性。表 1 为 0.50mm 厚规格的 6 种牌号电工钢典型值。

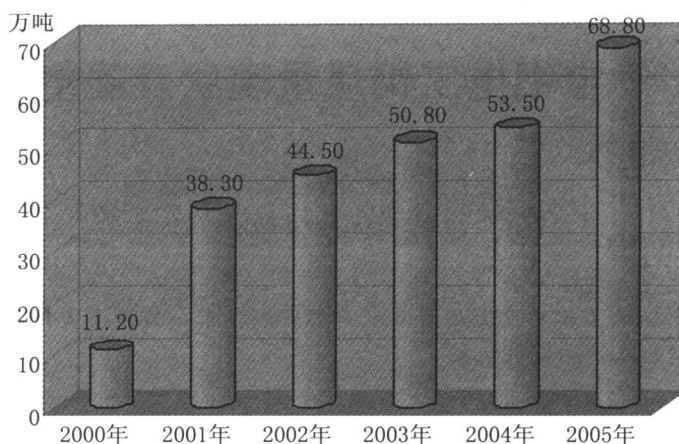


图2 宝钢电工钢产量年推移图

表1 0.50mm 厚规格6种牌号电工钢的典型值

牌号	厚度 (mm)	理论密度 (kg/dm ³)	铁损 P15/50 (w/kg)	磁感 B50 (T)	屈服强度 (L) (MPa)	抗拉强度 (L) (MPa)	硬度 HV1
B50A470	0.50	7.70	3.90	1.68	260	428	137
B50A600		7.75	4.10	1.70	240	410	129
B50A700		7.80	5.10	1.73	270	412	128
B50A800		7.80	5.60	1.73	280	419	127
B50A1000		7.85	6.10	1.75	262	384	117
B50A1300		7.85	6.60	1.75	253	357	110

2.1.1 B50A470~B50A600

该2个牌号是含有1.2~1.65%Si, 密度为7.70kg/dm³~7.75kg/dm³的中牌号产品。此产品在保持高磁感的同时, 以低铁损为目标, 添加0.25%Al为特征。已广泛使用在冰箱压缩机、EI变压器和中小型电机之中。

2.1.2 B50A700~B50A800

该2个牌号是含有0.65~1.20%Si, 密度为7.80kg/dm³的低牌号产品。此产品铁损比中牌号大, 但磁感比中牌号高。添加0.25%Al为特征, 为了改善B50A800的力学性能, B50A800添加了适量的P, 已广泛地使用在空调压缩机、小型电机之中。

2.1.3 B50A1000~B50A1300

该2个牌号是含有0.15~0.35%Si, 密度为7.85kg/dm³的低牌号产品, 以低价格、高磁感为目标。含有极微量的Al (≤0.001%), 为了提高冲片性能, 通过添加适量的P, 改善力学性能。已大量使用在空调压缩机、EI变压器、小型电机之中。

2.2 电工钢绝缘涂层的种类和品质特性

无取向电工钢板作为铁芯叠片使用, 其叠片的形状多种多样, 为了消除剪切应力和进一步改善磁性能, 消除应力退火已应用得越来越广泛。因此, 绝缘涂层应具有绝缘性、冲片性、耐热性、防锈性和焊接性等要求。

宝钢电工钢绝缘涂层根据其成分不同可分为半有机涂层和无机涂层, 半有机涂层根据膜厚不同又可分为厚涂层和薄涂层。半有机涂层的膜厚增加, 层间电阻增大, 冲片性也提高, 但是焊接性和附着性有恶化的倾向, 因此, 根据使用条件和用途选择合适涂层厚度是很重要的。无机涂层由于不含有有机物成分, 焊接性和耐热性优良, 但冲片性一般。在非氧化气氛中, 绝缘涂层可以承受不高于800℃下的消除应力退火。

宝钢电工钢产品涂层的环保性能通过了瑞士环保机构—通标标准技术服务有限公司 (SGS-CSTC) 的认证: Pb、Cr⁶⁺等有害元素含量低于欧洲标准中玩具安全要求。宝钢电工钢系列产品中绝缘涂层的种类和特性见表 2。

表 2 宝钢电工钢绝缘涂层的种类和特性

特性项目	A 涂层	H 涂层	D 涂层
涂层种类	半有机	半有机	无机
涂层厚度	0.4~1.2 g/m ²	1.5~3.0 g/m ²	0.3~1.0 μ
层间电阻 (Ω·cm ² /片)	1~10	10~80	1~30
附着性	好	一般	好
耐蚀性	一般	好	好
焊接性	好	一般	很好
冲片性	好	好	一般

除了以上介绍的绝缘涂层以外, 宝钢还成功地开发了环保型半有机涂层、有机涂层和自粘接涂层, 且可批量稳定供货。

自粘接涂层的电工钢加工叠装后, 对铁芯加热就可将叠片固定。自粘接涂层固定叠片牢固, 电机效率高, 振动小, 噪音低, 已应用在高品质音响中的微型电机和磁悬浮长定子等领域。

3 宝钢电工钢新产品及其特征

为了更好地满足市场的需求, 宝钢在不断改进引进牌号品质的同时, 一直致力于新产品的研发, 形成了针对不同行业特点的新产品系列, 并且开展了高牌号无取向电工钢大生产的研制。表 3 为宝钢电工钢新产品典型值。

3.1 电机类新产品

3.1.1 B50A400

B50A400 属涂层全工艺型产品。此产品利用宝钢现有的设备开发的高牌号无取向硅钢。具有铁损低, 磁感高的特征。主要使用制造中型电机、压缩机铁芯和电表铁芯。

3.1.2 B50A470M

B50A470M 属涂层全工艺型产品。为了提高引进牌号 B50A470 的力学性能, 宝钢对 B50A470 的化学成分进行了重新设计, 提高了 Si 含量, 调整了炼钢、热轧和冷轧的工艺参数, 磁性与 B50A470 相当, 但力学性能提高, 主要使用制造中型电机。

3.1.3 B50AD-2

B50AD-2 属涂层全工艺型产品, 是专门为硅钢以冷代热而开发的系列化新产品之一。B50AD-2 钢带磁性、表面质量和尺寸公差都大大优于热轧硅钢。宝钢以冷代热 B50AD-1、2、3 系列产品已作为中小型电机新标准—Y3 系列三相异步电动机的铁芯材料。

3.1.4 B50A1300M

B50A1300M 属涂层全工艺型产品。通过适当提高 Si、Mn 和 P 等化学元素的含量, 使低硅硅钢产品的力学性能改善, 冲片性好, 磁性优良, 特别适合制造小型 (微型) 电机。

3.2 空调压缩机类新产品

3.2.1 B50AY-1

B50AY-1 属涂层全工艺型产品。含有极微量的 Al ($\leq 0.001\%$), 由于对制造工艺进行了优化, 因此磁性优良, 性能稳定, 同板差小, 已大量使用在空调压缩机领域。

3.2.2 B50AY-2

B50AY-2 属涂层半工艺型产品。含有 0.25%Al, 由于严格控制了电工钢夹杂物的形态和数量, 使产品消除应力退火后的晶粒易于长大, 具有极佳磁性能, 同板差小, 已大量使用在空调压缩机领域。

表 3 宝钢电工钢新产品典型值

类别	牌号	性能典型值			备注
		P15/50 (w/kg)	B50 (T)	HV1	
中小电机类	B50A400	3.2	1.70	170	
	B50A470M	3.8	1.69	150	
	B50AD-2	4.4	1.70	130	
	B50A1300M	5.4	1.75	122	
空调压缩机类	B50AY-1	6.00	1.75	115	
	B50AY-2	4.60	1.74	117	
	B50A1300T	4.90	1.74	125	SRA: 750℃×2h
冰箱压缩机类	B50A700T	4.20	1.73	140	
	BSP-1	3.60	1.68	78 (屈强比)	SRA: 790℃×1h
	BSP-2	3.30	1.66	78 (屈强比)	
EI 铁芯类	B50A1300H	5.50	1.75	112	

3.2.3 B50A1300T

B50A1300T 属涂层半工艺型产品。含有极微量的 Al ($\leq 0.001\%$)。由于控制夹杂物形态和数量以及退火工艺参数, 不仅具有高磁感、低铁损, 而且特别适合制造要求硅钢材质较硬的压缩机铁芯。

3.3 冰箱压缩机类新产品

3.3.1 B50A700T

B50A700T 属涂层半工艺型产品。冰箱压缩机的铁芯材料主要使用 B50A470 和 B50A600 中牌号无取向硅钢, B50A700T 的铁损和力学性能与中牌号相当, 但磁感高, 因此, 该产品具有更好的综合性能, 可取代 B50A470 和 B50A600 中牌号无取向硅钢在冰箱压缩机中使用。

3.3.2 BSP-1、BSP-2

BSP-1 和 BSP-2 属无涂层半工艺型产品。通过选择合适的化学成分和退火后的调质压下技术, 使该产品具有优良的板形和高屈强比, 在消除应力退火后能得到优良的磁性。

3.4 EI 变压器铁芯类

3.4.1 B50A1300H

B50A1300H 属涂层全工艺型产品, 是专门针对 EI 铁芯而开发。该产品具有低铁损、高磁感的特征。

宝钢可根据用户使用要求, 有针对性地为用户设计个性化产品。标准 + a 的协议品订货量占订货总量的 66%, 见图 3 为宝钢电工钢产品分布图。

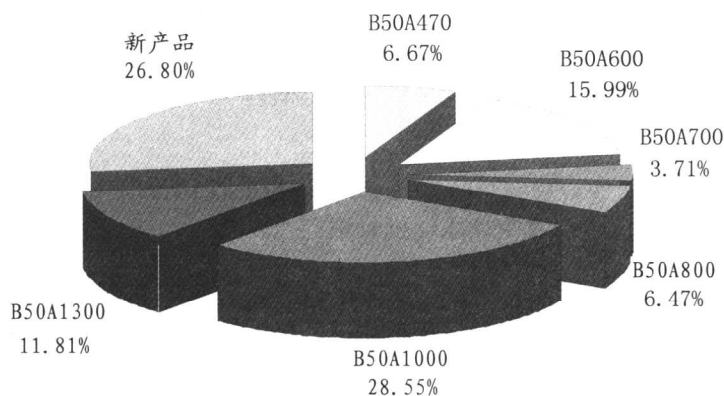


图 3 宝钢电工钢产品分布图

4 电工钢的质量改进

无取向电工钢的关键技术就是提高钢质的纯净度、提高产品的晶粒尺寸、改善钢板表面质量和控制带钢尺寸精度。为此,宝钢自2000年5月投产以来,在吸收消化引进专利技术的同时,对电工钢炼钢、热轧和冷轧等工序制造工艺进行了大量地优化,有效地保证了宝钢电工钢产品质量不断改进和提高。

4.1 炼钢方面

宝钢电工钢冶炼采用了一系列国内外先进的技术和设备,使用了铁水脱硫预处理,转炉顶底复吹技术,真空RH-KTB技术和连续铸造等当今先进的炼钢技术,为后工序提供了高品质的C、S、N和O等杂质元素含量极低的高纯净钢。

4.1.1 极低碳的冶炼技术的研究

碳对无取向电工钢是有害元素,造成电工钢性能恶化和磁时效,图4示出了钢中碳含量对碳时效的影响。宝钢通过对炼钢转炉、真空处理和连续铸造技术的改进,可使中牌号含碳量全部降到25ppm以下,实际上可使冷轧后工序的脱碳退火不进行脱碳处理,这就减少了电工钢产品的表面氧化,有效地改善了产品性能。

4.1.2 钢中夹杂物控制技术的研究

无取向电工钢除了Si、Al、Mn等成分的控制外,控制氧化物夹杂、促进成品晶粒长大对电工钢的磁性能也是至关重要的。为此,开展了钢中夹杂物形态和尺寸的控制研究,通过对转炉和RH工艺的优化,使电工钢的磁性能得到了改善。

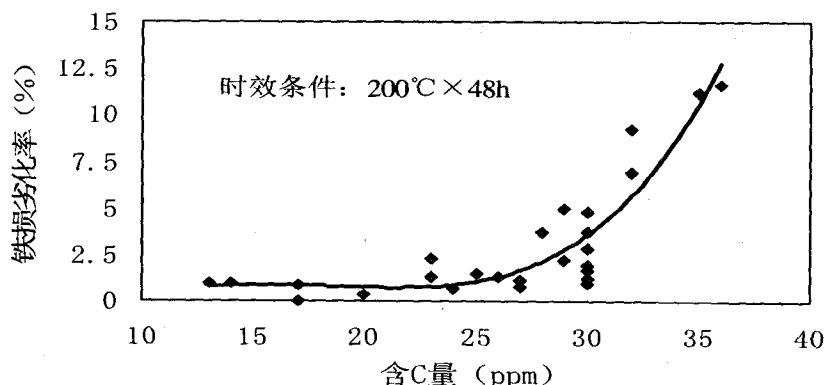


图4 B50A470 成品碳量与铁损劣化率的关系

4.1.3 有害元素钛和铌对电工钢磁性能影响的研究

由于宝钢炼钢厂在生产电工钢的同时,还要大量冶炼IF钢,因此,对电工钢作为不纯物Ti和Nb的混入对电工钢产品磁性能的影响进行了研究。研究表明:Ti和Nb的混入对电工钢磁性能造成极为不利的影响,尤其对半工艺型产品影响更大。为此,采取了切实有效地措施避免Ti和Nb的混入。

4.2 热轧方面

宝钢热轧采用了PC轧制技术、板坯宽大侧压技术以及边部感应加热器技术,这对改善带钢的轧制精度,防止边裂,控制板型等方面起到了重要作用。为了生产出性能好的电工钢,在热轧方面进行了如下研究。

4.2.1 低温板坯加热工艺的研究

无取向电工钢的AlN、MnS和MnO等夹杂物若在热轧加热时固溶,在热轧过程中,由于固溶度随带钢温度降低而下降,夹杂物又以细小弥散状析出而阻碍成品退火时晶粒长大,使{111}组分增多,造成磁性能变坏,因此,宝钢对电工钢采取了低温板坯加热工艺。

4.2.2 精轧终轧温度对磁性的影响研究

在精轧温度控制方面,研究表明,磁性能与精轧终轧温度存在极强的相关性,见图5。终轧温度在 $A_{R1} \sim A_{R1} - 100$ 时,随着终轧温度增加,铁损下降,磁感上升。这是由于终轧温度在 $A_{R1} \sim A_{R1} - 100$ 时,热轧带钢具

有大的晶粒度, 温度越接近 A_{r1} , 晶粒越大, 且 $\{001\}<110>$ 组分密度显著提高^[1]。由于各牌号的化学成分不同造成相变点的差异, 因此, 宝钢对各牌号分别确定了不同的精轧终轧温度, 保证热轧带钢晶粒尺寸最大化, 以利于磁性的改善。

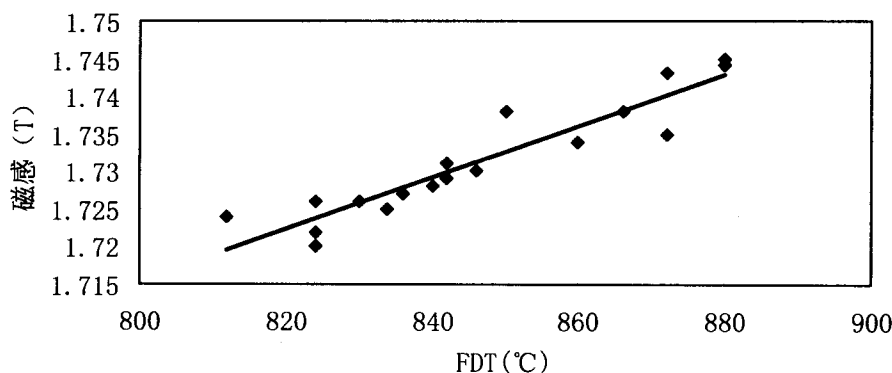


图5 终轧温度与磁感的关系

4.3 冷轧方面

宝钢 1550 酸轧机组是国内首次在酸洗轧机联合机组上生产电工钢机组。该机组采用了紊流酸洗、横断面凸度检测仪、边缘降检测仪和板形仪的前馈后馈技术。使用了 UCMW 轧机 ASC、AGC 控制技术以及特有的带锥度工作辊自动窜动技术, 从而确保了电工钢产品具有良好的板形及同板差。

宝钢 1550 电工钢退火涂层机组主要由脱脂清洗、退火、涂层和检查等工序组成。1SACL 机组采用干气氛退火, 无脱碳能力, 用于生产 B50A700~B50A1300 低牌号电工钢, 2SACL 机组采用湿气氛退火, 有脱碳功能, 主要生产有时效要求的 B50A470~B50A600 中牌号电工钢。在 2SACL 机组退火段, 采用了两段加热两段均热的工艺, 即将脱碳退火与再结晶退火分开进行, 有利于产品质量的提高。3SACL 机组采用干气氛退火, 无脱碳能力, 用于生产 B50A400~B50A1300 电工钢。

4.3.1 降低电工钢边缘降的研究

电工钢作为叠片使用, 不仅要求带钢纵向厚度精度高, 而且要求带钢横向边缘降要小。宝钢 1550 轧机具备有边缘降控制手段, 几年来, 宝钢对轧机边缘降控制策略和工艺进行了反复优化, 从而有效地保证了宝钢电工钢产品边缘降达到了国外先进水平。

4.3.2 电工钢边浪的影响和改善的研究

为了降低电工钢机组成品边浪, 通过优化退火炉加热工艺、冷却工艺、调整漂浮器压力和修改部分炉辊辊型等方面的工作, 使带钢急峻度全部控制在 1% 以下。

4.3.3 电工钢涂层附着性的研究

电工钢附着性是涂层的一项重要指标。几年来, 为了改善电工钢涂层的附着性, 宝钢调整了涂层的组分, 优化了烧结炉工艺, 改造了烧结炉排废气系统。因此, 大大地改善了涂层附着性。

5 宝钢电工钢的展望

在宝钢新一轮钢铁发展规划中已将电工钢作为继汽车板后的另一个主导产品来发展, 重点发展取向硅钢 (含 HiB)、高牌号无取向硅钢和高效电工钢。宝钢电工钢规划的实现将会大大提升宝钢电工钢市场的地位和

竞争力，生产的电工钢系列产品不仅在数量上，而且在质量和品种上能满足国内外市场的需求，宝钢将成为中国乃至世界最大的电工钢生产基地。

6 结束语

宝钢中低牌号无取向电工钢经过六年的发展在产量、质量和新产品研发等方面取得了可喜的成绩。产品的质量达到了新日铁和川铁同牌号电工钢的实物水平，电工钢产品已具有较强的市场竞争力，随着电工钢被宝钢确立为主导产品和电工钢规划的实施，宝钢电工钢将会跨上一个新的高度。

参考文献

[1]Zhang Liu Wen China Steel Technicai Report, No. 12(1998)

卷取温度对无取向电工钢电磁性能和板形的影响

黄望芽 张明 陈浩 莫志英

(宝钢股份宝钢分公司制造管理部 上海 201900)

摘要 电磁性能和板形是无取向电工钢的重要产品特性,卷取温度作为生产控制中的一个重要的工艺参数,对它们有重要影响。本研究通过大生产实验,发现高温卷取、U 形卷取的层流冷却方式可以有效促进晶粒长大和均匀热轧带钢组织,并进一步提高无取向电工钢的电磁性能,但是会增大带钢纵向厚度的波动,对带钢横向厚度的控制无显著影响。

1 前言

无取向电工钢主要用来制作压缩机、电机、小型变压器的铁芯,要求具有良好的电磁性能和工艺性能。电磁性能作为无取向电工钢最重要的性能指标,主要通过对两个冶金特性(晶粒尺寸和织构)及夹杂物的控制来实现,而精确控制成分和/或制造过程则是一个有效手段。板形作为工艺性能中的一个重要指标,直接影响到后续的加工性能,是下游用户关心的重要指标之一。为此,本研究结合大生产中的实际控制情况,重点研究热轧过程卷取温度对电工钢的电磁性能和板形的影响,以探索电磁性能和板形的工艺平衡点。

2 实验材料及方案

实验用钢采用了 S-30 系列钢种,通过转炉冶炼,后经 RH 真空脱气处理,具有低碳、低氧、低硫和氧化物夹杂的特性。连铸坯的再加热温度为 $\leq 1200^{\circ}\text{C}$,保温 30 分钟以上,以使板坯温度均匀化,后经除鳞、粗轧、精轧,轧制成 2.6mm 厚的热轧板,终轧温度范围为 $820\sim 880^{\circ}\text{C}$ 。热轧后,通过控制层流冷却模式,获得不同的卷取温度,以研究卷取温度对电磁性能和最终冷轧板形控制的影响。最终材料经冷轧、退火涂层生产出成品,冷轧板厚度为 0.5mm。热轧过程卷取控制方案如表 1 所示。

表 1 卷取实验方案

卷取温度 冷却方式	570℃	620℃	650℃	680℃	710℃	710℃
后段 急冷	★	/	/	★	★	/
U 形 冷却	/	★	★	/	/	★

- 备注: 1. ★ 表示采用的实验方案, / 表示未进行实验。
2. 后段急冷: 层流冷却前段不实施, 后段层流水冷却打开。
3. U 形卷取: 带钢头/尾部分采取提高卷取温度的模式。

3 验结果

3.1 热轧温度控制情况

U 形卷取温度控制情况如图 1 所示,带钢头、尾 50 米左右卷取温度比中部高 50°C 左右。后段急冷卷取温度控制情况如图 2 所示,卷取温度带钢全长方向控制平稳。

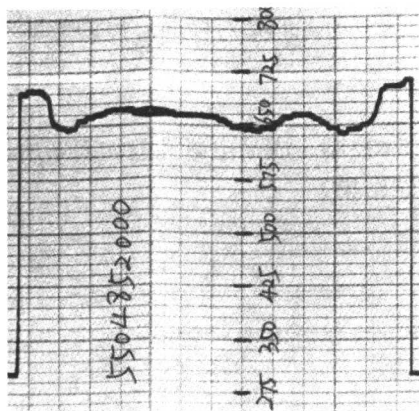


图1 U形卷取 温度实绩

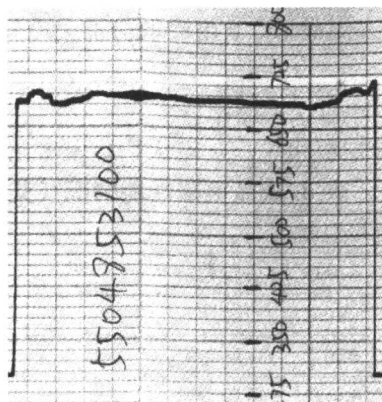


图2 后段急冷 温度实绩

3.2 冷轧板形控制

热轧带钢经酸洗后进行冷轧，冷轧过程对带钢纵向厚度进行在线测量。本实验一个重要目的就是研究卷取温度对带钢纵向厚度波动和同板差的影响，实验结果如表2所示：

表2 热轧卷取温度和冷却方式对冷轧板形的影响

卷取温度	570℃	620℃	650℃	680℃	710℃	710℃
层流冷却方式	后段急冷	U形卷取	U形卷取	后段急冷	后段急冷	U形卷取
纵向厚度波动 (μm)	3.0	4.5	4.8	4.5	4.8	5.5
同板差 (μm)	9.1	9.3	8.0	8.5	7.1	8.2

各种不同热轧卷取控制条件下，冷轧带钢纵向厚度控制情况如图3所示：

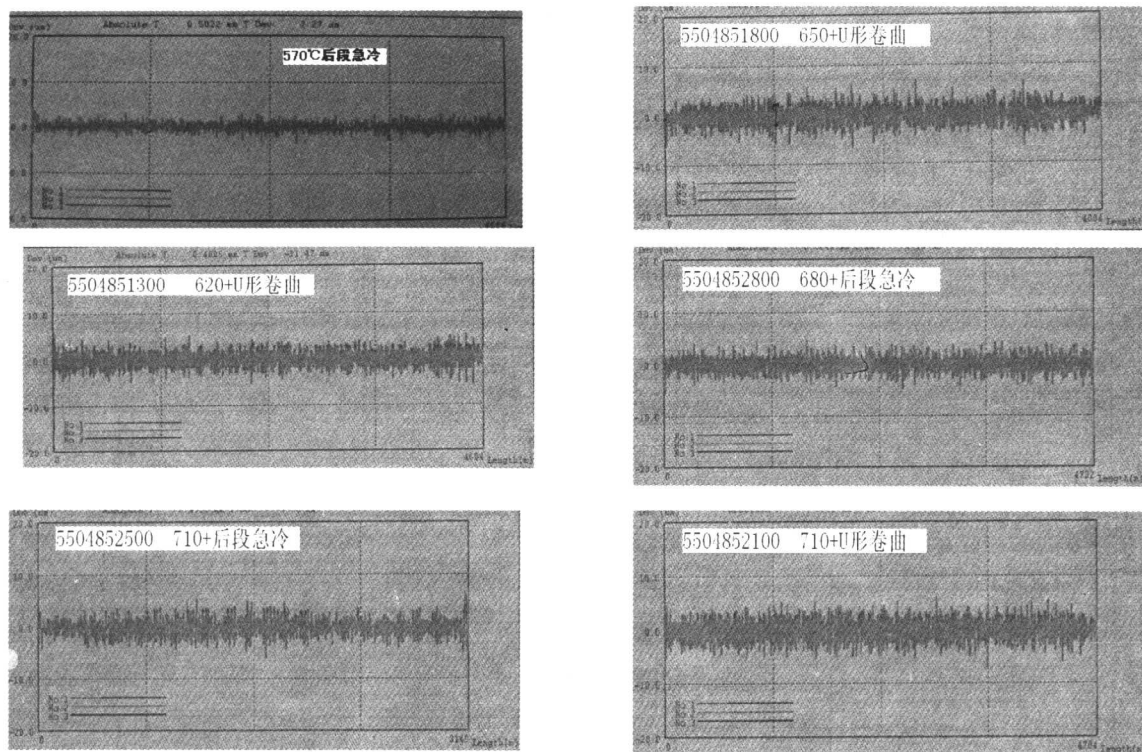


图3 不同卷取方式对冷轧带钢纵向板形的影响

表 2 和图 3 反映出，高温卷取、U 形卷取会加大冷轧带钢纵向厚度的波动，但是对横向厚度的影响不明显。

3.3 成品性能

实验料冷轧后经退火涂层机组生产，退火均热段工艺参照 $810^{\circ}\text{C} \times 15\text{s}$ 控制。成品电磁性能如表 3 所示：

表 3 成品电磁性能情况（艾波斯坦方圈测试结果）

卷取温度/层流冷却方式	铁损 (W/Kg)	磁感 (T)
570℃ /后段急冷	5.112	1.728
620℃ /U 形卷取	5.093	1.730
650℃ /U 形卷取	5.169	1.729
680℃ /后段急冷	5.045	1.732
710℃ /后段急冷	5.119	1.733
710℃ /U 形卷取	5.101	1.735

4 分析讨论

4.1 卷取温度对电磁性能的影响

首先，针对实验数据进行相关性分析，所用分析工具为 SAS，找出影响电磁性能的主要因素除了卷取温度外，还有退火温度（如表 4 所示）。

表 4 影响电磁性能因素 SAS 分析结果

因素	自由度	平方和	Pr > F
退火温度	1	8.467E-05	0.0299
卷取温度	1	0.0001	0.0190

本次实验关键考证的是卷取温度对成品性能的影响，为排除退火温度的交叉影响，将退火温度限制在 $800 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 范围内，再进行分析。对数据进行筛选后，再利用 SAS 工具分析分析卷取温度对电磁性能（铁损 P15/50 和磁感 B50）的影响，如图 4、图 5 所示：

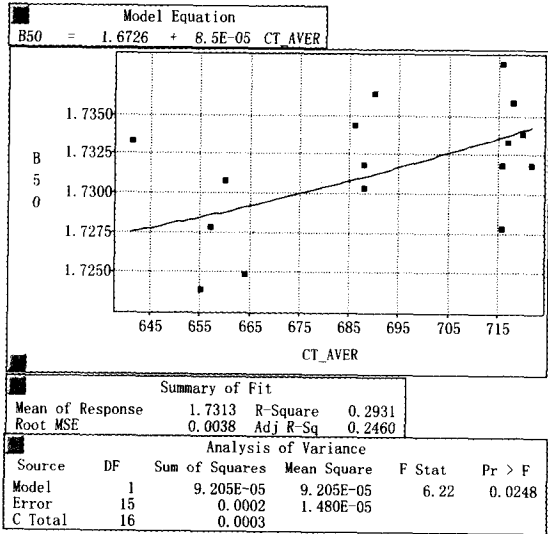


图 4 卷取温度对磁感 B50 的影响

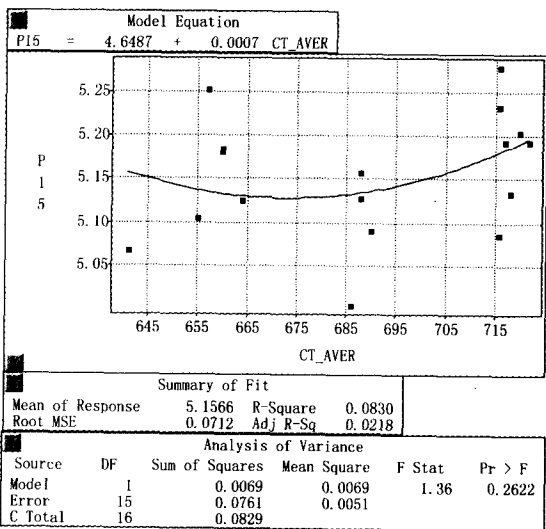


图 5 卷取温度对铁损 P15/50 的影响

图 4 显示, 卷取温度 (CT_AVER) 和磁感 (B50) 的相关系数 $R = \sqrt{R-SQUARE} = \sqrt{0.2931} = 0.541$, 从检验相关系数的临界值表可以查出, 在显著水平 $\alpha = 0.05$ 时, $R_{1-\alpha/2}(16) = 0.468$, 可以得出 $R = 0.541 > 0.468$, 因此说明这两个变量间具有显著的线性相关性。从另一个方面 $Pr > F$ 的概率为 $0.0248 < 0.05$ 也可以得出, 在显著水平 $\alpha = 0.05$ 时卷取温度和磁感这两者具有相关性。

同理, 图 5 显示卷取温度 (CT_AVER) 和铁损 (P15) 的相关系数 $R = \sqrt{R-SQUARE} = \sqrt{0.083} = 0.288 < 0.468$, 因此说明这两个变量间在显著水平 $\alpha = 0.05$ 时无线性相关性。从另一个方面 $Pr > F$ 的概率为 $0.2622 > 0.05$ 也可以得出, 在显著水平 $\alpha = 0.05$ 时卷取温度和铁损这两者无相关性。

由以上分析可得出, 卷取温度对磁感的影响显著, 随着卷取温度的升高, 磁感增大。由于无取向电工钢精轧过程属两相区轧制, 热轧变形后的组织比较复杂, 由变形奥氏体转变成铁素体为细小、等轴、不具有亚结构的组织。先析出的铁素体经变形后, 部分铁素体仅被拉长, 晶内没有亚晶, 另有部分除了晶粒延长外, 晶内位错密度增加, 产生回复, 形成亚结构, 而还有极少数先析出的铁素体晶粒经变形后发生铁素体再结晶, 形成等轴铁素体晶粒^[1]。当采取高温卷取 (710℃) 时, 微观组织存在静态再结晶以后的长大, 而且发生第二相析出物 Ostwald 长大, 同时也包括小析出物的溶解、溶质原子的扩散。从微观组织来看, 高温卷取以后, 中部的再结晶组织增多, 晶粒长大趋势明显, 纤维层状组织减少; 卷取温度为 650℃ 时, 中部再结晶组织较少, 仍存有轧制后流变纤维层状组织; 当卷取温度为 570℃ 时, 上下表层为再结晶组织, 中部存在变形纤维组织, 且晶粒组织不均匀, 主要是缺少再结晶驱动力, 同时溶质原子在短时间内难以发生有效的长距离扩散, 容易弥散的形成 AlN 等第二相析出物, 在冷轧退火后钉扎晶界, 从而恶化电磁性能^[2]。相关热轧组织形貌如图 6 所示。由此可见, 高温卷取可以起到一定程度的“常化”效果, 提高热轧板晶粒尺寸, 粗化析出物从而提高成品退火后有利织构比例, 最终提高成品的磁感。

4.2 U 形卷取对电磁性能的影响

为进一步探讨 U 形卷取对电磁性能的影响, 首先对数据进行筛选, 对照卷取温度实际控制曲线, 分析 U 形卷取和后段急冷对性能的影响, 如表 5 所示:

表 5 U 形卷取对电磁性能的影响

卷取温度 (℃)	层流冷却方式	P15/50 (W/Kg)	B50 (T)
620	后段急冷	5.184	1.731
	U 形卷取	5.069	1.734
650	后段急冷	5.146	1.723
	U 形卷取	5.185	1.727
710	后段急冷	5.219	1.731
	U 形卷取	5.097	1.733

从表 5 可知, U 形卷取可以提高磁感 (B50) 0.002~0.004T (20~40 高斯), 并且也能够降低铁损。这主要由于 U 形卷取 (头、尾温度比中部温度高) 可以弥补热轧带钢头、尾温降大而引起的带钢组织不均匀, 有利于均匀带钢组织和促进带钢晶粒长大, 提高成品电磁性能。

4.3 卷取温度和层流冷却方式对板形控制的影响

卷取温度和层流冷却方式对板形的影响如表 2 和图 3 所示。可以看出, 高温卷取 (710℃) 使带钢纵向厚度波动加大, 尤其是采取高温卷取、“U 形卷取”的层流冷却方式时, 带钢纵向厚度波动更大; 但是, 高温卷取对最终成品同板差 (横向厚度差) 控制影响无不良影响。当卷取温度为 620~680℃ 时, 卷取温度对带钢纵向厚度波动和同板差均无显著影响。当卷取温度为低温卷取 (570℃) 时, 带钢纵向厚度波动显著减小。

当采取高温卷取时, 从带钢组织 (图 6) 可以看出热轧带钢组织长大充分, 带钢强度相对低温卷取要低,

在冷轧过程中轧制条件相同的情况下，带钢纵向厚度控制更容易受到组织不均匀的影响，从而导致带钢纵向厚度波动增大。当采取 U 形卷取时，热轧带钢组织要更粗大，带钢强度还要相应降低，纵向厚度的控制也将更容易受到组织不均匀的影响。而横向厚度的控制主要取决于冷轧轧制过程控制及热轧来料板形状况，所以，高温卷取、U 形卷取对带钢同板差的控制无显著影响。

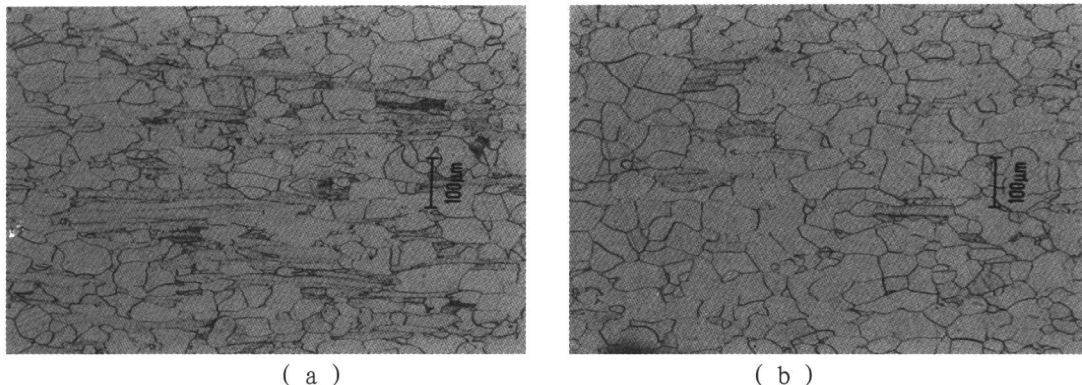


图6 卷取温度对热轧带钢组织的影响 a) 卷取温度 570℃ b) 卷取温度 710℃

5 结论

卷取温度作为无取向电工钢生产控制中的一个重要工艺参数，对无取向电工钢产品质量有着重要影响。

1) 高温卷取在一定程度上可以达到“常化”的效果，能够促使析出物和热轧板晶粒的粗大，从而达到提高电磁性能的目的。

2) U 形卷取可以弥补热轧带钢头、尾温降大而引起的带钢组织不均匀，达到均匀带钢组织和促进带钢晶粒长大的目的，从而提高成品电磁性能。

3) 高温卷取、U 形卷取会使带钢纵向厚度波动增大，但对横向厚度差的控制无显著影响。

参考文献

- [1] 《电工钢》(第 1 版)，冶金工业出版社，何忠治 (特殊钢丛书)
- [2] 热轧工序温度对中低牌号无取向电工钢电磁性能的影响，黄望芽等，《宝钢技术》2004 年第 2 期。

锑、锡、硼等合金 对高牌号无取向电工钢电磁性能的影响

黄望芽

(上海宝钢股份有限公司制造管理部 上海 201900)

摘要 本文通过对高牌号无取向电工钢的金相组织、组织、析出物以及夹杂物的剖析,分析了合金元素(锑、锡、硼)对高牌号无取向电工钢电磁性能的影响。锑(Sb)和锡(Sn)可以使易磁化的立方组织和高斯组织得到强化,而抑制难磁化的(111) γ 组织的发展,改善无取向电工钢的组织特性。然而,当硼氮比(B/N)大于4.1时,硼(B)能够使 γ 组织得到强化,同时抑制立方组织和高斯组织的发展。本研究还发现,当晶粒尺寸小于 $150\mu\text{m}$ 时,铁损随着晶粒尺寸的增大而降低,而晶粒尺寸对磁感应强度的影响却相对较弱;然而,成品组织却与磁感应强度的影响相对铁损则更为显著, γ 组织的强化可使磁感应强度降低。所以,锑和锡对改善高牌号无取向电工钢电磁性能有着较为积极的作用;过高硼(B/N>4.1)的加入,会产生细小且分散的析出物而使得电磁性能劣化。

1 前言

随着全球对能源节约和环境保护的逐渐重视,电工钢作为电工业中最重要的软磁材料之一,已经开始对全球工业的发展产生着愈为深远的影响。电工钢主要有取向电工钢和无取向电工钢,其中无取向电工钢主要用来制作旋转机械如各类电机、压缩机等,同时由于它良好的冲片性及其它相对于取向电工钢加工性能方面的优势,也被广泛用来制作一些小型变压器和其它固定设备的定子。所以,无取向电工钢是一种推动电工业快速发展的一个重要材料,尤其是它可以提高电器设备的效率以达到节约电力的目的。所以,为了满足电工业逐步发展的需求,一些具有高效性能的无取向电工钢在近些年已经得到了快速发展[1]。

通常来说,电磁性能是电工钢产品最重要的性能指标,并且无取向电工钢的电磁性能的控制主要通过两个冶金特性(晶粒尺寸和组织)及夹杂物的控制来实现。组织或晶粒择优取向是在晶粒回复、再结晶和晶粒长大的过程中,晶界由于能量、活动性及内能的各向异性而发生迁移所形成。获得低铁损、高磁感应强度一直是电工钢产品发展的方向[2, 3],而精确控制成分和/或制造过程则是一个有效手段。对无取向电工钢来说,化学成分一直是影响其电磁性能的首要因素,但是,获得合适的组织和晶粒尺寸也同样重要。有研究表明,在钢中加入锑可以改善产品组织,从而改善产品电磁性能,锡也有相似的作用[4]。在1979年,新日铁发现硼(0.002~0.004%)的加入可以使板坯在加热过程中优先与N结合形成BN,从而使得AlN粗化[5]。而且,随着(100)[001]组织的强化,(111)组织强度会减弱[6]。本文通过一系列实验研究,对比分析了合金元素(Sb、Sn、B)对高牌号无取向电工钢电磁性能的影响,以寻求一种制造具有高磁感的无取向电工钢的方法。

2 实验材料方法

表 1 实验材料基本化学成分情况 (%)

钢种	Si	C	Mn	S	N	添加元素		
						Sn	B	Sb
A	2.0	0.003	0.27	0.002	0.001	0	0	0
B						0.10	0	0
C						0	0.0041	0
D						0	0	0.076

表 2 试验钢种的电磁性能

钢种	铁损 $W_{15/50}$ (瓦特/公斤)			磁感应强度 B_{50} (特斯拉)		
	纵向	横向	平均	纵向	横向	平均
A	2.197	2.462	2.330	1.696	1.667	1.682
B	2.240	2.542	2.391	1.709	1.672	1.691
C	2.557	2.810	2.684	1.696	1.659	1.678
D	2.255	2.484	2.370	1.726	1.677	1.702

所有实验钢种通过真空冶炼炉冶炼, 钢锭化学成分如表 1 所示, 钢种 A 是对比钢种, 在钢种 B, C, D 中分别加入了锡、硼、铈, 以对比分析这些添加元素对产品电磁性能的影响。钢锭经热轧加工成厚度为 2.6mm 的带钢, 并经常化处理。热轧带钢常化处理, 在盐酸溶液中清除氧化铁皮, 再冷轧至 0.35mm 厚的带钢, 最后经过再结晶退火处理, 均热温度和时间分别为 $1000^{\circ}\text{C} \times 90''$, 炉内气氛为氢气和氮气的混合气体。

最终电磁性能在单片检测仪上检测, 金相组织检测在带钢垂直轧制方向的横截面上进行。通过 X 射线衍射仪 (XRD) 分析, 得到带钢表面 (110)、(200) 和 (211) 极图, 并通过专用工具进行织构分析, 得到带钢表面的取向分布函数 (ODF)。再结晶过程中绝大多数新晶粒从带钢表面开始长大, 而且本实验最终产品都已经完成了完全再结晶过程 (如图 1 所示)。所以, 要了解铁素体晶粒的织构发展过程, 分析表面织构显得尤为重要。

在最终产品和热轧带钢上, 通过配有能谱分析 (EDS) 的透射电镜 (TEM) 和扫描电镜 (SEM), 进一步分析铈、锡和硼对析出物和夹杂物的影响。

3 实验结果

3.1 电磁性能

最终产品的电磁性能如表 2 所示, 含铈钢 D 具有最高的磁感, 其次是含锡钢 B, 它们相对于对比钢种 A 磁感 B_{50} 分别提高 0.02 特斯拉和 0.009 特斯拉, 且钢种 A、B、D 的铁损 $W_{15/50}$ 非常接近, 其值为 2.3~2.4 瓦特/公斤。含硼钢 C 的铁损 (2.684 瓦特/公斤) 明显比其它钢种高, 而且 B_{50} (1.678 特斯拉) 也明显低, 与对比钢种 A 相比, $W_{15/50}$ 提高了 0.348 瓦特/公斤, B_{50} 降低了 0.004 特斯拉。

3.2 金相组织