

RAL · NEU 研究报告 No.0005

高品质电工钢的 研究与开发

GAOPINZHI DIANGONGGANG DE YANJIU YU KAIFA

轧制技术及连轧自动化国家重点实验室
(东北大学)



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

RAL · NEU 研究报告 No. 0005

高品质电工钢的研究与开发

轧制技术及连轧自动化国家重点实验室
(东北大学)

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2014

内 容 简 介

本书以双辊薄带连铸流程为基础,以高品质无取向和取向硅钢为对象,系统介绍了在亚快速凝固、二次冷却以及后续冷轧、退火条件下,Fe-Si合金全流程组织、织构、析出和磁性能演化的基础理论、影响因素和控制方法,以及制备具有优异磁性能的高效电机用无取向硅钢的工艺和技术;同时,在薄带连铸硅钢和低温路线制备取向硅钢的基础上,提出了高磁感超低碳取向硅钢的制造理论与技术。本书所研究内容突破了采用薄带连铸生产高性能电工钢中的关键科学和技术问题,具有重要的理论意义和应用价值。

本书可供冶金、机械、电力行业从事电工钢钢种开发和生产工作的科研人员、工程技术人员阅读,也可供高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

高品质电工钢的研究与开发/轧制技术及连轧自动化国家重点
实验室(东北大学)著. —北京:冶金工业出版社, 2014. 10
(RAL·NEU 研究报告)
ISBN 978-7-5024-6708-1

I. ①高… II. ①轧… III. ①电工钢—研究 IV. ①TM275

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 220867 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 [www. cn mip. com. cn](http://www.cn mip. com. cn) 电子信箱 [yjcs@cnmip. com. cn](mailto:yjcs@cnmip.com.cn)

责任编辑 李培禄 卢 敏 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6708-1

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;北京百善印刷厂印刷

2014 年 10 月第 1 版, 2014 年 10 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 10.25 印张; 159 千字; 143 页

39.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 [tougao@cnmip. com. cn](mailto:tougao@cnmip.com.cn)

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 [yjgy. tmall. com](http://yjgy.tmall.com)

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

研究项目概述

1. 研究项目背景与立题依据

硅钢是电力、电子和军工等领域广泛应用的重要软磁材料，主要用于制造电动机、发电机、变压器的铁芯和各种电讯器材，按重量计占磁性材料用量的 90% 以上，是具有高附加值和战略意义的钢铁产品。

传统硅钢流程生产工艺复杂，制造难度大，技术要求严格苛刻，具有高度的保密性和垄断性。以传统的厚板坯连铸—常规热轧过程为例，由于厚板坯连铸参数可控性差，导致凝固组织粗大、分布不均匀，对析出物或抑制剂缺乏有效的调控手段。为破坏有害的铸造组织，需要经过 9 ~ 10 个机架组成的热连轧机，总压缩比高达 100 左右，这不仅导致生产线流程冗长、能耗高、稳定性差等问题影响生产效率，而且使硅钢组织、织构和磁性能的控制面临一系列非常棘手，甚至难以克服的工艺“瓶颈”限制。对于无取向硅钢（NGO）而言，大压缩比、多道次热轧过程中会出现大量不利于降低铁损的有害析出物和不利于提高磁感的 γ 织构组分；而在取向硅钢（GO）中，由于抑制剂在连铸过程中被提前消耗，必须采用铸坯高温加热或低温加热-后渗氮工艺。铸坯高温加热温度接近 1400℃，大幅度降低成材率；而低温加热技术在后续热处理过程中进行渗氮处理以补偿抑制剂，技术难度大，工艺复杂。另外，热轧过程会导致 AlN、MnS 等抑制剂提前析出并粗化，影响对初次再结晶晶粒的钉扎效果，从而造成二次再结晶不充分，严重损害材料的磁性能。

正是传统流程（包括薄板坯连铸连轧技术）固有的成分、工艺设计缺陷，使其在低成本、高品质的新一代电工钢开发方面显得尤为困难。例如，高效电机用钢代表了新一代低铁损高磁感无取向硅钢的发展趋势，在节能高效等方面具有显著优势。然而，采用传统工艺生产该钢种，不仅工艺复杂、成本昂贵、技术难度大，而且降低铁损、提高磁感的幅度有限，同时不利于

钢带的力学性能、饱和极化强度和导热性能的改善。再如，薄规格化是提高电工钢磁性能的重要途径之一，但是常规流程的热带规格和冷轧压下量限制超低铁损薄规格电工钢开发。冷轧压下量太大，NGO 硅钢会产生大量不利织构（如 α 和 γ 织构），而 GO 硅钢则导致抑制剂和有利高斯晶核分布密度及均匀性大大下降，从而达不到所要求的磁性能水平。

我国自 20 世纪 70 年代从日本引进硅钢生产技术至今，已经突破了国外严格的技术封锁，基本掌握了厚板坯流程制备硅钢的核心技术。目前我国硅钢总体产能过剩，但生产成本低、成材率低，高性能产品的产量、质量和品种构成仍落后于发达国家，相同牌号实物质量与国际先进水平差距较大，无法满足快速发展的各工业领域的需求。例如，高牌号 GO 硅钢和 NGO 硅钢仍主要依赖于进口（军工需要的高性能产品无法进口）， B_{50} 高于 1.80T 的高效电机用钢产品仍是空白。

双辊薄带连铸技术（twin roll strip casting, TRSC）是连铸领域最具潜力的一项新技术，是当今世界上薄带钢生产的前沿技术，是世界各大钢铁企业纷纷投入巨资竞相开发的一种短流程、低能耗、投资省、成本低和绿色环保的新工艺。双辊薄带连铸工艺不同于传统薄带的生产方法，可以省去加热、热轧等生产工序，以转动的两个铸辊作为结晶器，将钢水直接注入铸轧辊和侧封板形成的熔池内，液态钢水在短时间（亚）快速凝固并承受塑性变形而直接生产出 1~6mm 薄带钢。

东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室（RAL）在国内较早开始薄带连铸技术研究，经过多年工作积累深刻认识到，与传统厚板坯热轧流程相比，薄带连铸技术不仅具有流程紧凑、工序缩短、节省能源、降低投资等短流程优势，而且在微观组织和织构控制上也具有独特的优越性。例如，双辊薄带连铸凝固组织和织构的可控性，为硅钢获得有利的织构提供了柔性的工艺窗口；薄带连铸的快速凝固过程，可以保证抑制剂在铸带中以过饱和固溶形式存在，使得 GO 硅钢无需高温加热和后渗氮工艺；取消传统热连轧过程，可抑制 NGO 硅钢有害的析出物和不利 γ 织构的产生，避免了 GO 硅钢中 AlN 的过早析出粗化现象；通过提高 NGO 硅钢中有利织构比例，保证成品 GO 硅钢中抑制剂及高斯晶核数量、密度和均匀性，有望开发超薄规格电工钢，极大地降低铁损，进一步提高磁性能。

正是基于上述分析, RAL 抓住国际上刚刚起步、尚未系统研究的历史机遇, 在国家自然科学基金(钢铁联合研究基金重点支持项目)“基于双辊薄带连铸的高品质硅钢织构控制理论与工业化技术研究”、“凝固、冷却及热处理一体化柔性调控无取向硅钢夹杂物与析出物的基础研究”, 国家“十二五”支撑计划项目“高品质硅钢铸轧生产流程关键技术集成及示范”等课题的支持下, 对基于双辊薄带连铸的高品质硅钢基础理论与工业化技术进行了大量的研究和开发工作。本研究报告重点聚焦高效电机用钢、超低碳取向硅钢以及中温加热取向硅钢等内容, 主要研究薄带连铸等短流程过程电工钢微观组织、织构和析出物演变的冶金学原理、影响因素和控制方法, 实现超短流程制备高品质硅钢成分和工艺的精确设计, 开发具有自主知识产权的新一代硅钢原型钢, 储备薄带连铸创新技术、工艺和装备的研发能力, 引领世界薄带连铸技术和硅钢生产技术的发展。

2. 研究进展与成果

(1) 双辊薄带连铸高效电机用钢。高效电机用钢是在低碳、低硅电工钢基础上发展而来的一种较好地兼顾铁损和磁感的钢种, 解决或缓解了中低牌号无取向电工钢存在的铁损和磁感相互矛盾的问题。高效电机用钢的使用可以有效地提高电机效率, 降低能源损耗, 并可缩小铁芯截面面积, 满足电器产品高效率、小型化的要求。

20 世纪 80 年代以来, 日本的新日铁、川崎、NKK、住友和德国的 EBG 等公司都先后推出了高效电机用无取向电工钢系列。新日铁主要在纯净钢质的基础上降低硅含量提高锰含量; JFE 主要是调整硅、铝成分, 降低夹杂物含量和控制冷轧前织构; 住友主要是加入特殊元素, 控制成品织构和减薄产品厚度; 川崎则是添加铝和稀土元素, 控制夹杂物大小及分布。

RAL 通过减薄铸带厚度、优化浇铸温度和调整铸辊转速等方法成功制备了具有优异磁性能的高效率高性能电机用 NGO 钢, 中牌号 ($w(\text{Al} + \text{Si}) = 1.5\%$) 无取向硅钢的磁性能分别达到如下指标: $P_{15/50} = 4.3 \text{ W/kg}$, $B_{50} = 1.84 \text{ T}$ 。日本 JFE 和新日铁同类产品的典型值分别为: $P_{15/50} = 4.5 \text{ W/kg}$, $B_{50} = 1.70 \text{ T}$ 。宝钢高磁感 NGO 钢的典型值分别为: $P_{15/50} = 3.7 \text{ W/kg}$, $B_{50} = 1.74 \text{ T}$ 。也就是说, 磁性能较常规厚板坯连铸流程和薄板坯连铸流程产品有显



著提升。在此基础上该课题组还系统研究了铸轧无取向硅钢组织和织构控制理论与技术，发现了双辊铸轧高性能无取向硅钢在微观结构和取向控制上的特点和优势。

1) 双辊薄带连铸由于冷却速度很快，凝固时首先生成的是均匀的 $\{100\}\langle 0_{vw} \rangle$ 位向柱状晶，从而使得 γ 织构很弱或几乎没有。利用织构的遗传性可以使无取向硅钢成品中的 $\{100\}$ 或 Goss 组分增加，从而提高磁感。

2) 薄带连铸的铸带组织比传统热轧组织的晶粒更加粗大、均匀（平均晶粒尺寸可达到 $300\mu\text{m}$ 以上），其晶粒尺寸甚至远大于传统热轧后经过常化（或预退火）处理的冷轧坯料，这种粗大晶粒在冷轧时生成更多剪切带从而促进 Cube 和 Goss 取向晶粒生成，有利于减少热轧过程中形成的 γ 织构的遗传作用，提高磁性能。

3) 减薄铸带厚度可以减小冷轧压下量，从而降低晶粒的偏转角度，减少有害织构的积累，增大再结晶晶粒尺寸，更大程度地保留铸带中的 $\{100\}$ 织构，提高成品的磁感，降低铁损和磁各向异性。

由此看来，双辊薄带连铸不仅可以大大降低建设投资和生产成本，而且在生产高性能无取向硅钢方面具有独特的优势。该流程可以取消热轧和常化（预退火），并通过合理控制过热度、铸轧、二次冷却工艺，获得晶粒尺寸合适和有利织构较强的薄带坯，再结合后续冷轧及热处理工艺，能够获得具有优异磁性能的高效率电机用钢。

(2) 高性能中温取向硅钢。与无取向硅钢不同，取向硅钢是通过 Goss 晶粒发生二次再结晶形成的，在轧制方向具有高磁感、低铁损的优良磁性能，主要用于各种变压器的铁芯，是电力、电子和军事工业中不可缺少的重要软磁合金。其制造工艺和设备复杂，成分控制严格，杂质含量要求极低，制造工序长和影响性能因素多，是技术难度大、水平高的特钢艺术产品。

取向硅钢抑制剂的控制是保证高斯晶粒发生二次再结晶的关键因素，直接影响产品的磁性能。采用以 AlN 及 MnS 为主要抑制剂生产取向硅钢时，铸坯需经过高温加热，使铸坯中的 MnS 和 AlN 重新固溶，并在后续热轧及常化过程中细小弥散析出，以抑制初次再结晶晶粒长大，促进二次再结晶的发生。普通取向硅钢（CGO）铸坯加热温度规定为 $1350 \sim 1370^\circ\text{C}$ ，高磁感取向硅钢（Hi-B）加热温度高达 1400°C 。如此高的加热温度带来了能耗高、成材率低

等一系列的缺点。因此,本研究选择固溶温度较低的 Cu_2S 为主要抑制剂,成功地把铸坯加热温度降低到 1300°C 以下,并研究了与之相适应的冷轧及退火工艺和中温加热取向硅钢全流程组织、织构、抑制剂演变规律,在实验室条件下成功制备了 $B_8 = 1.91\text{T}$ 的高磁感取向硅钢。其冶金学研究结果表明:

1) 中温取向硅钢的初次再结晶晶粒尺寸约 $18\mu\text{m}$,一阶段冷轧法生产取向硅钢的初次再结晶晶粒尺寸约 $19\mu\text{m}$ 。两阶段冷轧中间退火发生初次再结晶而使晶粒得到细化。

2) 中等压下率冷轧可以获得更多高斯取向的再结晶晶粒。例如两阶段冷轧法生产的中温取向硅钢在初次再结晶基体中高斯晶粒的体积分数为 0.6% 左右,一阶段冷轧法中高斯晶粒的体积分数仅为约 0.3% 。

3) 两阶段冷轧过程取向硅钢初次再结晶基体上,重位点阵晶界 ($\Sigma 5$ 、 $\Sigma 9$) 以及 $20^\circ \sim 45^\circ$ 取向偏差角所占的比例均强于一阶段冷轧法,更有利于高斯晶粒发生二次再结晶。

(3) 双辊薄带连铸超低碳取向硅钢。在双辊薄带连铸条件下,取向硅钢组织、织构及抑制剂的控制与常规取向硅钢完全不同,如何在铸轧条件下获得细小均匀的初次再结晶组织,足够的高斯种子和细小弥散的抑制剂,以保证高斯晶粒发生完善的二次再结晶,这是制备铸轧取向硅钢的关键所在。

由于薄带连铸的快速凝固/冷却特点可以使抑制剂充分固溶在铸坯内,本课题开创性地提出了超低碳铸轧取向硅钢新成分和工艺体系。将碳含量控制在 $40 \times 10^{-4}\%$ 以下和在工艺上取消热轧及常化过程,在国际上首次成功制备出二次再结晶比率超过 95% 、晶粒尺寸 $10 \sim 30\mu\text{m}$ 的 0.27mm 厚取向硅钢原型钢,磁感值 B_8 在 1.94T 以上,达到 Hi-B 钢磁性能水平。

1) 通过改变过热度调控铸轧初始组织,获得尺寸较小的等轴晶,并采用两阶段冷轧工艺消除铸带组织的不均匀性,从而获得具有细小晶粒尺寸的初次再结晶组织。

2) 铸带冷轧后退火过程中高斯晶粒在高密度剪切带上形核长大,可以保证二次再结晶所需高斯种子的数量,并实现高斯晶核在厚度方向上的均匀分布。

3) 薄带连铸的快速凝固及灵活的二次冷却工艺为抑制剂提供了柔性化的控制手段。一方面,可以通过合理选择抑制剂及控制二次冷却路径,在

铸带中获得细小弥散的析出物；另一方面，也可以利用快速凝固及冷却过程，抑制薄带连铸中第二相粒子的析出，以保证在后续冷轧退火过程中的大量析出。

在2012年3月8日国家自然科学基金委员会工程与材料学部组织的关于“基于双辊薄带连铸的高品质硅钢织构控制理论与工业化技术研究”（批准号：50734001）重点项目验收评审会上，该项目相关研究成果受到与会专家的高度评价，一致认为“在高品质硅钢制备技术上取得重要突破，研究成果达到国际领先水平”。

在本课题研究成果的基础上，RAL建议并承担了国家“十二五”支撑计划项目“高品质硅钢铸轧生产流程关键技术集成及示范”和“863”高技术项目“节能型电机用高硅电工钢”，分别在沙钢建立宽度1050~1250mm硅钢薄带连铸生产示范线和在武钢建立宽度400~550mm节能高效电机用高硅钢中试研究—生产示范线，科研成果正在转化为生产力，将为高性能、节约型、低成本硅钢工业化生产发挥重要的示范作用。

3. 论文与专利

论文：

(1) Yunbo Xu, Yuanxiang Zhang, Yang Wang, Chenggang Li, Guangming Cao, Zhenyu Liu, Guodong Wang. Evolution of cube texture in strip-cast non-oriented silicon steels [J]. Scripta Materialia, 2014, 87: 17~20.

(2) Yuanxiang Zhang, Yunbo Xu, Haitao Liu, Chenggang Li, Guangming Cao, Zhenyu Liu, Guodong Wang. Microstructure, texture and magnetic properties of strip-cast 1.3% Si non-oriented electrical steels [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2012, 324(20): 3328~3333. (SCI 期刊论文)

(3) 张元祥, 许云波, 刘振宇, 王国栋. 双辊薄带连铸对无取向硅钢织构和磁性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2012(8): 64~68. (EI 期刊论文)

(4) 张元祥, 许云波, 刘振宇, 王国栋. 双辊薄带连铸 1.2% Si 无取向电工钢组织和析出物[J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2012(5): 653~

656, 672. (EI 期刊论文)

(5) 许云波, 侯晓英, 王业勤, 吴迪. 快速加热连续退火对超高强 TRIP 钢显微组织与力学性能的影响 [J]. Jinshu Xuebao/acta Metallurgical Sinica, 2012(2): 176 ~ 182. (SCI、EI 期刊论文)

(6) 侯自勇, 许云波, 吴迪. 超快速退火下超低碳钢的再结晶行为研究 [J]. Jinshu Xuebao/acta Metallurgical Sinica, 2012(9): 1057 ~ 1066. (SCI、EI 期刊论文)

(7) Ziyong Hou, Yunbo Xu, Di Wu, Guodong Wang. Study of microstructure and Texture of Nb-IF high strength steel after cold rolling and annealing [J]. Advanced Materials Research, 2012, 538 ~ 541: 1208 ~ 1212. (SCI、EI 期刊论文)

(8) Yang Wang, Yunbo Xu, Yuanxiang Zhang, Feng Fang, Xiang Lu, Guodong Wang. Formation of $\{411\} \langle 148 \rangle$ recrystallization texture in grain-oriented electrical steel [C]. International Conference on Material Processing Technology 2013, Bangkok Thailand, 2013: 157 ~ 160.

(9) Yang Wang, Yunbo Xu, Yuanxiang Zhang, Feng Fang, Xiang Lu, Yongmei Yu, Guodong Wang. Cu_2S and AlN precipitates in Fe-3% Si-0.5% Cu steel produced by low slab reheating technique [J]. Advanced Materials Research, 2013, 790: 69 ~ 72.

(10) Yuanxiang Zhang, Yunbo Xu, Yang Wang, Guodong Wang. Evolution of microstructures and texture of 1.3% Si non-oriented electrical steel in the twin-roll strip casting process [C]. The 8th Pacific Rim International Congress on Advanced Materials and Processing (PRICM-8), Hawaii USA, 2013: 609 ~ 614.

(11) Yongmei Yu, Desheng Du, Yunbo Xu. The flow stress and microstructures of Fe-1.6% Si silicon steel [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 401 ~ 403: 840 ~ 843.

(12) 王洋, 许云波, 张元祥, 王国栋. 冷轧工艺对取向硅钢初次再结晶组织的影响 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2014, 35(2): 217 ~ 222.

(13) Yongmei Yu, Yunbo Xu, Yuanxiang Zhang, Ting Zhang, Xiaoming Zhang, Guodong Wang. Structure and precipitation of strip as-cast and hot-rolled by



TSCR on orientation silicon steel[J]. Materials Science Form, 2011, 686: 506 ~ 510.

(14) Yongmei Yu, Yunbo Xu, Changsheng Li, Guodong Wang. Effect of cold rolling on crystallographic texture of oriented silicon steel produced by TSCR[J]. Materials Research Innovations, Supplement, 2011, 15: S274 ~ S277.

(15) 于永梅, 李长生, 王国栋. 薄板坯连铸连轧生产取向硅钢技术的研究[J]. 钢铁, 2007, 42(11): 45 ~ 47.

(16) 于永梅, 李长生, 王国栋. TSCR 热轧工艺参数对 Fe-3% Si 钢带织构的影响[J]. 功能材料, 2008, 39(2): 268 ~ 270.

(17) 于永梅, 李长生, 王国栋. 薄板坯连铸连轧 Fe-3% Si 钢带析出物的实验研究[J]. 材料热处理学报, 2008, 29(3): 76 ~ 79.

(18) Yunbo Xu, Yongmei Yu, Guangming Cao, Changsheng Li, Guodong Wang. Microstructure and crystallographic texture of strip-cast Fe-3.2% Si steel sheet [J]. Int. J. Mod. Phys. B, 2008, 22(31&32): 5762 ~ 5767.

(19) Yunbo Xu, Yongmei Yu, Baoliang Xiao, Guodong Wang. Microstructural modeling and processing optimization during hot strip rolling of high-Nb steels [J]. Steel Res. Int, 2010, 81: 74 ~ 77.

(20) Yunbo Xu, Yongmei Yu, Baoliang Xiao, Zhenyu Liu, Guodong Wang. Analysis of change in microstructure and properties during high temperature processing of ultralow C and high Nb microalloyed steel[J]. Materials Science and Technology, 2011, 27: 1558 ~ 1564.

(21) Yunbo Xu, Yongmei Yu, Xianghua Liu, Guodong Wang. Modelling of microstructure evolution during hot rolling of a high-Nb HSLA steel[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material, 2010, 15: 396 ~ 401. (Springer, EI/SCI, IF2.015)

(22) Yunbo Xu, Yongmei Yu, Baoliang Xiao, Zhenyu Liu, Guodong Wang. Microstructural evolution in an ultralow-C and high-Nb bearing steel during continuous cooling[J]. Journal of Materials Science, 2009, 44: 3928 ~ 3935. (Springer, EI/SCI, IF2.015)

(23) Xiaodong Tan, Yunbo Xu, Xiaolong Yang, Di Wu. Effect of partitioning procedure on microstructure and mechanical properties of a hot-rolled directly quenched and partitioned steel[J]. Materials Science and Engineering A, 2014, 607: 149 ~ 160.

(24) Xiaodong Tan, Yunbo Xu, Xiaolong Yang, Di Wu. Microstructure-properties relationship in a one-step quenched and partitioned steel[J] Materials Science and Engineering A, 2014, 589: 101 ~ 111. (Elsevier Science, SCI, IF2.108)

(25) Xiaolong Yang, Yunbo Xu, Xiaodong Tan, Di Wu. Influences of crystallography and delamination on anisotropy of Charpy impact toughness in API X100 pipeline steel[J]. Materials Science and Engineering A, 2014, 607: 53 ~ 62.

专利:

(1) 许云波, 吴迪, 刘相华, 王国栋, 于永梅. 轧制过程在线检测钢板力学性能的方法, 2005-03-29, 中国, ZL200510046131.4。

(2) 许云波, 吴迪, 刘相华, 王国栋, 于永梅. 轧制过程钢板内部组织晶粒尺寸的软测量方法, 2005-03-29, 中国, ZL200510046130.X。

(3) 许云波, 邓天勇, 赵颜峰, 吴迪, 刘相华, 王国栋. 一种钢板控轧控冷过程温度制度的逆向优化方法, 2008-11-07, 中国, ZL200810228623.9。

(4) 许云波, 董毅, 于永梅, 侯晓英, 吴迪, 刘相华, 王国栋. 抗拉强度 750MPa 以上的超细晶热轧双相钢及其板材制造方法, 2010-07-08, 中国, ZL201010220990.1。

(5) 许云波, 张元祥, 王洋, 曹光明, 李成刚, 刘振宇, 方烽, 卢翔, 王国栋. 一种基于双辊薄带连铸技术的 1.5mm Fe-Si 合金铸带组织控制方法, 2013-12-06, 申请号 2013106520749。

(6) 许云波, 张元祥, 王洋, 曹光明, 李成刚, 刘振宇, 方烽, 卢翔, 王国栋. 一种基于双辊薄带连铸技术的高效电机用无取向电工钢的制造方法, 2013-12-06, 申请号 2013106505240。

4. 项目完成人员

主要完成人员	职 称	单 位
王国栋	教授（院士）	东北大学
刘振宇	教 授	东北大学
许云波	教 授	东北大学
张晓明	教 授	东北大学
曹光明	副教授	东北大学
刘海涛	副教授	东北大学
李成刚	工程师	东北大学
张元祥	博士生	东北大学
王 洋	博士生	东北大学
吴立国	硕士生	东北大学

5. 报告执笔人

许云波、张元祥、王洋。

6. 致谢

首先感谢国家自然科学基金重点和面上项目“基于双辊薄带连铸的高品质硅钢织构控制理论与工业化技术研究（50734001）”、“凝固、冷却及热处理一体化柔性调控无取向硅钢夹杂物与析出物的基础研究（U1260204）”、“非等温热激励下大变形薄带连铸 Fe-Si 合金的超快速再结晶与择优取向研究（51174059）”，以及国家“十二五”“863”高技术项目“节能型电机用高硅电工钢”和国家“十二五”支撑计划项目“高品质硅钢铸轧生产流程关键技术集成及示范”等项目对本工作给予的资助。

本研究工作是在王国栋院士、刘振宇教授的直接领导下，在许云波教授、张晓明教授、李成刚老师、曹光明副教授、刘海涛副教授等课题组成员的积极参与下完成的。

同时感谢薄带连铸硅钢课题组的袁国副教授、李海军副教授、赵文柱高工、崔海涛博士、邱以清副教授、李家栋博士、王贵桥博士等老师的大力支持。

持与帮助；感谢吴立国、卢翔、方烽、牟俊生、谢顺卿、焦海涛、韩琼琼等研究生同学的积极参与和无私奉献；感谢沙钢研究院李化龙博士、马建超博士提供的耐心指导！

最后，再次衷心感谢东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室各位老师以及所有给予支持、关心和帮助的老师、同学和朋友们！

目 录

摘要	1
1 绪论	3
1.1 电工钢概述	3
1.1.1 电工钢的分类及用途	3
1.1.2 电工钢的发展历史	4
1.2 无取向硅钢	5
1.2.1 无取向硅钢的分类	5
1.2.2 无取向硅钢的性能要求	6
1.2.3 影响无取向硅钢性能的因素	7
1.2.4 无取向电工钢的最新研究进展	8
1.2.5 高效电机用无取向硅钢	10
1.3 取向硅钢	12
1.3.1 取向硅钢的分类	12
1.3.2 取向硅钢的影响因素	12
1.3.3 取向硅钢的发展方向	13
1.4 双辊薄带连铸技术	15
1.4.1 双辊薄带连铸生产硅钢的研究现状	16
1.4.2 双辊薄带连铸生产高效电机用钢的优势	17
1.4.3 双辊薄带连铸生产取向硅钢的优势	18
1.5 本书的研究背景与内容	19
2 薄带连铸无取向硅钢典型组织、织构和磁性能	21
2.1 引言	21

2.2	实验材料和方法	21
2.2.1	实验钢成分和铸轧工艺	21
2.2.2	样品检测	23
2.3	不同二次冷却条件铸带组织和织构特征	23
2.3.1	铸带宏观分析	24
2.3.2	微观组织分析	25
2.3.3	微观取向分析	25
2.3.4	宏观织构分析	27
2.4	过热度对组织、织构和磁性能的影响	29
2.4.1	过热度对铸带组织和织构的影响	29
2.4.2	过热度对成品织构和磁性能的影响	32
2.5	铸带的再结晶退火过程组织、织构演化	34
2.5.1	铸带和热轧板组织和织构	34
2.5.2	铸带组织对再结晶过程的影响	35
2.5.3	铸带组织对再结晶织构和磁性能的影响	37
2.6	退火对组织、织构和磁性能的影响	41
2.6.1	退火工艺及磁性能比较	41
2.6.2	退火过程中显微组织演化	43
2.6.3	退火过程中微观取向演化	46
2.6.4	退火过程中织构演化	53
2.7	本章小结	58
3	薄带连铸高效电机用钢的开发	60
3.1	薄带铸轧参数	61
3.2	铸轧条件对薄带的影响	61
3.2.1	微观组织	61
3.2.2	铸带微观取向分析	64
3.2.3	宏观织构	68
3.2.4	力学性能分析	73
3.3	铸轧条件对薄带成品的影响	75

3.3.1 显微组织分析	75
3.3.2 微观取向分析	76
3.3.3 成品宏观织构分析	79
3.3.4 成品磁性能	83
3.4 析出物的形貌特征	85
3.4.1 铸带析出物的分析	85
3.4.2 薄带析出物分析	87
3.4.3 成品析出物分析	89
3.5 本章小结	92
4 低温取向硅钢的组织与织构	94
4.1 引言	94
4.2 实验材料和实验方法	94
4.3 结果与讨论	95
4.3.1 初次再结晶的组织分析	95
4.3.2 初次再结晶的织构分析	97
4.3.3 取向硅钢的磁性能	101
4.4 本章小结	103
5 取向硅钢中的析出物	104
5.1 引言	104
5.2 析出物理论计算	104
5.2.1 热力学计算	105
5.2.2 动力学计算	106
5.3 热轧板中的析出物	109
5.4 常化板中的析出物	110
5.5 冷轧与退火中的析出物	111
5.5.1 一阶段冷轧后脱碳中的析出物	112
5.5.2 两阶段冷轧与脱碳中的析出物	112
5.6 高温退火中的析出物	114