

RAL · NEU 研究报告 No.0017

高品质电工钢薄带 连铸制造理论与工艺技术研究

GAOPINZHI DIANGONGGANG BAODAI LIANZHU ZHIZAO LILUN YU GONGYI JISHU YANJIU

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. 0017

高品质电工钢薄带 连铸制造理论与工艺技术研究

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
2015

内 容 简 介

本书首先分析了当前我国电工钢行业遇到的问题,探讨了近终形薄带连铸技术在开发特殊钢种上的优势和潜力,指出基于薄带连铸技术生产电工钢是一个极具潜力的发展方向;然后从薄带坯的初始组织、织构控制原理及遗传影响、无取向硅钢的组织性能调控原理、6.5% Si 高硅钢的增塑方法及组织性能调控等基础研究内容进行了详细阐述和理论分析;最后详细论述了普通取向硅钢、高磁感取向硅钢,特别是超低碳取向硅钢的抑制剂、组织、织构调控原理及原型钢的制备工艺流程。

本书对冶金企业、科研院所等从事钢铁材料研究和开发的科技人员、工艺开发人员具有重要的参考价值,也可供高等院校钢铁冶金、材料科学、材料加工、热处理等专业的教师及研究生阅读、参考。

图书在版编目(CIP)数据

高品质电工钢薄带连铸制造理论与工艺技术研究/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, 2015. 10

(RAL·NEU 研究报告)

ISBN 978-7-5024-7042-5

I. ①高… II. ①轧… III. ①电工钢—薄带坯连铸—研究
IV. ①TF 777. 7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 222110 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.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

策 划 任静波 责任编辑 卢 敏 李培禄 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 978-7-5024-7042-5

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2015 年 10 月第 1 版, 2015 年 10 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 9 印张; 141 千字; 127 页

52.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.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 yjgycbs.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

电工钢（又称硅钢）是电力、电子和军事工业领域不可缺少的重要软磁材料，主要分为取向硅钢和无取向硅钢两大类，广泛用于制造电动机、发电机、变压器铁芯以及各种电讯器材，是具有高附加值和战略意义的钢铁产品。硅钢生产技术具有高度的保密性和垄断性，是衡量一个国家特殊钢生产和科技发展水平的重要标志。

电工钢传统生产流程冗长、工艺复杂、窗口狭窄、制造困难、成本高、成材率低，因此被称为钢铁工业的“艺术品”。长期以来，我国硅钢生产核心技术与装备，受制于国外发达国家，长期处于引进、仿制、跟跑的地位。更严峻的形势是，国外发达国家现在对我国实施了严密的技术封锁，已经达到无条件拒绝转让硅钢制造新技术的程度。我国硅钢制造工业存在的主要问题是：缺乏自主知识产权的硅钢制造核心技术、工艺装备及研发能力。为此，亟须系统开展硅钢新一代制造理论及技术研究，打破发达国家的垄断局面，使我国彻底摆脱“落后—引进—落后—再引进”的局面，促进我国钢铁工业的可持续发展。薄带连铸技术是一种以钢水为原料直接生产薄带材的绿色化新技术，具有短流程、低成本、低能耗、低排放等巨大优势。发达国家投入巨资，竞相研发。我国政府文件也多次将此技术列入重点支持方向。

东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室（RAL）王国栋课题组认真分析了目前国际上电工钢最先进生产技术的成分设计、组织与织构控制原理以及存在的工艺技术难题，并结合薄带连铸亚快速凝固、短流程的特征优势，于2008年提出并成功申报NSFC钢铁研究联合基金重点项目——“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），旨在突破目前国际上硅钢传统制造流程的局限，彻底解决硅钢

生产存在的工艺复杂、生产难度大、生产成本低、成材率低等严峻问题，开发易控制、高效率、低成本、高性能的新一代先进生产工艺流程，为电工钢生产开辟一条具有中国特色的创新发展道路。

2. 研究进展与成果

课题组在国际上率先建立了完备的电工钢近终形薄带连铸流程组织性能调控理论，取得了一系列研究进展与创新性成果，主要包括：

(1) 发现亚快速凝固条件下铸带坯的初始组织、织构可控并提出了调控方法。传统观点认为在薄带连铸每秒高达 1000°C 的冷却强度条件下只能形成细小的等轴晶组织和随机织构。课题组却发现：通过改变熔池内钢水的过热度可以制备出具有不同组织和织构特征的铸带坯。取向硅钢和 6.5% Si 高硅钢也呈现出相同的变化规律。不仅打破了人们对薄带连铸亚快速凝固的传统认识，而且满足了无取向硅钢、取向硅钢、6.5% Si 高硅钢对初始凝固组织和织构类型的个性化需求，为制备较之传统产品更高性能的硅钢产品提供了有利条件，也为其他各向异性织构材料的研发提供了新思路。

(2) 阐明了无取向硅钢铸带坯初始组织、织构的遗传影响。前人由于未能成功获得具有不同初始组织和织构特征的铸带坯，所以，对其遗传影响的研究一直处于空白。课题组发现：等轴晶铸带坯的成品板的 $\{001\}$ 再结晶织构非常弱，而柱状晶铸带坯的成品板的 $\{001\}$ 织构显著增强。前者的磁感 B_{50} 与传统产品相当，而后者则提高 0.03T 以上，达到高效无取向硅钢的水平。从而确立了无取向硅钢铸带坯初始组织和织构的控制目标。

(3) 弄清了无取向硅钢再结晶织构的优化调控原理并提出了控制方法。长期以来，在传统流程条件下，如何强化 $\{001\}$ 再结晶织构并弱化 $\{111\}$ 织构以提高磁感一直困扰着无取向硅钢研究工作者。大压缩比成为薄规格产品开发的瓶颈。人们不得不采取一些繁琐的附加措施（如热轧板常化处理、两阶段冷轧等），但是，效果非常有限。课题组研究发现：在薄带连铸条件下，通过对晶内剪切带和形变带这些亚结构的合理设计与调控，在不采取附加工序的条件下，即可获得近乎完美的织构组态： $\{001\}$ 织构全面占优， $\{111\}$ 织构基本消失。这种优越的织构在传统制造流程下是无法获得的。磁感 B_{50} 较之传统产品提高 0.04T 以上。

(4) 解决了取向硅钢 Goss “种子” 控制的难题。在传统的厚板坯连铸流程条件下, 大于 100 倍的热轧压缩比对于 Goss 织构的形成至关重要。但是, 在薄带连铸条件下, 压缩比过小成为制备取向硅钢的一个障碍。课题组发现: 通过对亚快速凝固过程进行调控可以获得非常细小的初始组织, 在这种组织中即存在大量的 Goss 晶粒, 经小变形量的热轧后可以保证存在一定数量的 Goss “种子”, 可以满足后期二次再结晶的需要。另外, 当初始凝固组织过于粗大时, 在冷轧后进行中间退火也可以确保一定数量的 Goss “种子”。从而全面解决了薄带连铸条件下压缩比太小、剪切变形不够所引起的 Goss “种子” 不足的难题, 扫清了制备取向硅钢的第一个障碍。

(5) 阐明了取向硅钢抑制剂控制原理并提出调控方法, 使抑制剂控制难度显著降低。在传统的厚板坯生产流程条件下, 为获得抑制剂需对铸坯进行长时间高温加热, 导致炉内氧化、断坯、熔化、烧损十分严重, 成材率非常低。抑制剂对热轧过程参数异常敏感, 工艺控制窗口异常狭窄。因此, 取向硅钢的生产难度非常大, 废品率非常高。课题组创造性地提出: 在二次冷却阶段采用快速冷却以减少抑制剂的形成, 通过改变常化处理制度即可实现对抑制剂的数量、大小及分布状态的精确调控: 抑制剂较传统流程更加细小 (25 ~ 50nm) 且尺寸分布更加集中。不但取消了高温加热和渗氮工序, 而且使抑制剂调控难度显著降低、调控精度显著提高。

(6) 开展了基于全流程全铁素体的成分设计制备取向硅钢的探索研究。发现在超低碳、不存在 γ/α 相变的条件下, 也可以获得取向硅钢发生二次再结晶所需的抑制剂。需要特别指出的是, 研究表明, 初次再结晶组织的均匀性是保证形成完善二次再结晶组织的一个关键因素。由于一阶段冷轧法难以获得均匀、细小的初次再结晶组织, 所以, 最终难以获得完善的二次再结晶组织。相比之下, 采用合适的两阶段冷轧法可以显著改善初次再结晶组织的均匀性并弱化 $\{001\}$ 织构, 故最终可以得到完善的二次再结晶组织。

(7) 弄清了 6.5% Si 高硅钢的有序-无序转变行为, 找到了改善塑性的途径。B2(FeSi)、DO₃(Fe₃Si) 等有序结构被认为是导致 6.5% Si 高硅钢脆性的主要原因。各发达国家相继采用快速凝固法、化学气相沉积扩散法 (CVD)、粉末冶金法等制备 6.5% Si 电工钢薄板以避免其室温脆性。目前在世界范围内只有日本 JFE 钢铁公司一家企业实现了 6.5% Si 高硅钢的工业化批量生产

(CVD 法)。但是, CVD 法存在诸多缺点如设备腐蚀严重、生产效率低、生产成本低、污染环境等。因此, 用低成本、高效率、环境友好的轧制法制备 6.5% Si 高硅钢仍然是一个重要研发方向。课题组创造性地提出了应用“薄带连铸 + 热轧 + 温轧 + 冷轧”制备薄规格 6.5% Si 高硅钢的工艺路线, 通过综合匹配连铸过程的凝固速率、热轧后的冷却及常化处理制度可以有效调控 B₂、DO₃ 有序相, 使材料的室温塑性得到显著改善。

通过以上研究工作, 课题组在国际上率先掌握了电工钢近终形薄带连铸流程的系统原型工艺技术并制备出一系列高性能原型钢, 主要包括以下三方面内容:

(1) 形成了薄带连铸无取向硅钢的全流程原型工艺技术, 可省去再加热和常化退火处理工序, 在实验室条件下成功制备出高性能无取向硅钢原型钢, 磁性能尤其是磁感指标显著优于国内外现有产品, 为高效无取向硅钢薄带连铸产业化生产提供了技术原型;

(2) 形成了薄带连铸取向硅钢的全流程原型工艺技术, 彻底摆脱了高温加热、渗氮处理等繁复、苛刻工序, 大幅降低生产难度, 简化生产流程, 降低生产成本, 成功制备出 CGO 和 Hi-B 硅钢原型钢, 磁性能明显提高;

(3) 初步形成了基于全流程全铁素体的成分设计制备取向硅钢的原型工艺技术, 省去了高温加热、脱碳退火、渗氮处理等繁复、苛刻工序, 大幅降低生产难度, 简化生产流程, 降低生产成本, 成功制备出 CGO 原型钢;

(4) 形成了薄带连铸 6.5% Si 高硅钢的全流程原型工艺技术, 成功制备出宽度达 160mm、厚度规格为 0.15 ~ 0.50mm、铁损指标与国外 CVD 产品相当、磁感指标显著提高的 6.5% Si 高硅钢原型钢薄带, 使工业化生产 6.5% Si 高硅钢薄带成为可能。

3. 应用前景

东北大学 RAL 电工钢近终形薄带连铸课题组在多个国家自然科学基金项目的资助下, 提出了基于双辊薄带连铸技术生产电工钢这种高投入、高技术、高难度、高消耗、高成本的钢铁产品的新一代先进制造流程。率先系统开展了电工钢薄带连铸基础研究和产业化技术研究, 填补了国际上在此领域的空白, 形成了具有自主知识产权的电工钢新一代先进制造理论和技术, 为我国

在这一新领域跻身国际前沿做出了努力。目前,科研成果正在转化为生产力,以上研究作为武汉钢铁(集团)公司薄带连铸 6.5% Si 高硅钢中试研究示范线项目以及沙钢 40 万吨硅钢薄带连铸工业化示范线项目提供了大量的基础数据和原型工艺技术,将为高性能、节约型、低成本电工钢工业化生产发挥重要的示范作用,将为早日建成世界上首条电工钢薄带连铸生产线做出贡献。沙钢电工钢薄带连铸生产线一旦建成,无疑将会成为世界钢铁工业里程碑式的重大事件。

4. 论文与专利

论文:

(1) Haitao Liu, Guodong Wang, Zhenyu Liu, et al. Solidification structure and crystallographic texture of strip casting 3wt% Si non-oriented silicon steel[J]. Materials Characterization, 2011, 62(5): 463 ~ 468.

(2) Haitao Liu, Zhenyu Liu, Guodong Wang, et al. Microstructure and texture evolution of strip casting 3wt% Si non-oriented silicon steel with columnar structure[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2011, 323(21): 2648 ~ 2651.

(3) Hongyu Song, Huihu Lu, Haitao Liu, Guodong Wang. Investigation on microstructure, texture and tensile properties of hot rolled strip casting grain-oriented silicon steel[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 395 ~ 396: 297 ~ 301.

(4) Haitao Liu, Zhenyu Liu, Guodong Wang, et al. Formation of {001} <510> recrystallization texture and magnetic property in strip casting non-oriented electrical steel[J]. Materials letters, 2012, 81(8): 65 ~ 68.

(5) Wu Shengjie, Chen Aihua, Liu Haitao, Li Hualong. Microstructure and texture evolution in twin-roll cast 3.2% Si steel sheet[C]. BAOSTEEL BAC 2013, Shanghai, N43 ~ 46.

(6) Haitao Liu, Zhenyu Liu, Guodong Wang, et al. Development of λ -fiber recrystallization texture and magnetic property in Fe-6.5 wt% Si thin sheet produced by strip casting and warm rolling method[J]. Materials letters, 2013, 91: 150 ~ 153.

(7) Haitao Liu, Zhenyu Liu, Guodong Wang, et al. Microstructure, texture and magnetic properties of strip casting Fe-6.2wt% Si steel sheet [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(9): 1941 ~ 1945.

(8) Hongyu Song, Haitao Liu, Huihu Lu, Haoze Li, Wenqiang Liu, Xiaoming Zhang, Guodong Wang. Effect of hot rolling reduction on microstructure, texture and ductility of strip-cast grain-oriented silicon steel with different solidification structures [J]. Materials Science & Engineering A, 2014, 605: 260 ~ 269.

(9) Hongyu Song, Haitao Liu, Huihu Lu, Lingzi An, Baoguang Zhang, Wenqiang Liu, Guangming Cao, Chenggang Li, Zhenyu Liu, Guodong Wang. Fabrication of grain-oriented silicon steel by a novel way: strip casting process [J]. Materials letters, 2014, 137: 475 ~ 478.

(10) Haitao Liu, Zhenyu Liu, Yu Sun, Yiqing Qiu, Guodong Wang. microstructure and texture evolution of strip casting Fe-6.2wt% Si steel [J]. Advanced Materials Research, 2012, 415 ~ 417: 947 ~ 950.

(11) Liu Haitao, Ma Dongxu, Cao Guangming, et al. Recent Developments of twin-roll strip casting silicon steels in RAL [C]. BAOSTEEL BAC 2010, Shanghai, J35 ~ 38.

(12) Haoze Li, Haitao Liu, Zhenyu Liu, et al. Characterization of microstructure, texture and magnetic properties in twin-roll casting high silicon non-oriented electrical steel [J]. Materials Characterization, 2014, 88: 1 ~ 6.

(13) Hongyu Song, Huihu Lu, Haitao Liu, Haoze Li, Dianqiao Geng, R. D. K. Misra, Zhenyu Liu, Guodong Wang. Microstructure and texture of strip cast grain-oriented silicon steel after symmetrical and asymmetrical hot rolling [J]. Steel Research International, 2014, 85: 1 ~ 6.

(14) Haitao Liu, J. Schneider, Guodong Wang, et al. Fabrication of high permeability non-oriented electrical steels by Increasing $\langle 001 \rangle$ recrystallization texture using compacted strip casting processes [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2015, 374: 577 ~ 586.

(15) Haoze Li, Haitao Liu, Zhenyu Liu, Guodong Wang. Effects of warm temper rolling on microstructure, texture and magnetic properties of strip-casting 6.5

wt% Si electrical steel[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2014, 370: 6 ~ 12.

(16) Haitao Liu, Zhenyu Liu, Guodong Wang, et al. Evolution of microstructure, texture and inhibitor along the processing route for grain-oriented electrical steels using strip casting[J]. Materials Characterization, 2015, 106: 273 ~ 282.

(17) Haitao Liu, Haoze Li, Hualong Li, Guodong Wang, et al. Effects of rolling temperature on microstructure, texture, formability and magnetic properties in strip casting Fe-6.5 wt% Si non-oriented electrical steel[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2015, 391: 65 ~ 74.

(18) Haitao Liu, J. Schneider, A. Stöcker, A. Franke, Fei Gao, Hongyu Song, Zhenyu Liu, R. Kawalla and Guodong Wang. Microstructure and texture evolution in non-oriented electrical steels along novel strip casting route and conventional route[J]. Steel Research International, 2015, accepted.

(19) Haitao Liu, Dongjie Chen, Baoguang Zhang, Hualong Li, Aihua Chen, Lei Li, Guodong Wang, R. D. K. Misra. The impact of hot rolling temperature after reheating in the new generation strip casting process on structure-property relationship in extra-low carbon steel[J]. Steel Research International, 2015, accepted.

(20) Hongyu Song, Haitao Liu, Huihu Lu, Wenqiang Liu, Yinping Wang, Zhenyu Liu, Guodong Wang. Microstructure and texture evolution of strip casting grain-oriented silicon steel[J]. IEEE Transactions on Magnetics. 2015, accepted.

(21) Haoze Li, Xianglong Wang, Haitao Liu, Zhenyu Liu, Guodong Wang. Microstructure, Texture evolution, and magnetic properties of strip-casting nonoriented 6.5 wt% Si electrical steel sheets with different thickness[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(11): 1 ~ 4.

(22) Xianglong Wang, Haitao Liu, Zhenyu Liu. Effect of cooling rate on order degree of 6.5 wt. % Si electrical steel[J]. IEEE Transactions on Magnetics. 2015, accepted.

(23) Haitao Liu, J. Schneider, Guodong Wang, et al. Evolution of microstructure and texture along the processing route for electrical steels using strip casting [C]. 6th International Conference on Magnetism and Metallurgy, Cardiff-UK,

WMM' 14, 2014, June 17 ~ 19, 370 ~ 379.

(24) 刘海涛, 刘振宇, 王国栋, 等. 薄带连铸钢铁材料组织调控与性能优化[C]. 第三届海峡两岸绿色材料及绿色制程论坛. 台南, 2014, 9月3~4日.

(25) 刘海涛, 刘振宇, 王国栋, 等. 电工钢薄带连铸短流程制造理论与工业化技术研究进展[C]. 中国工程院化工、冶金与材料工程第十届学术会议, 2014, 10月21~25日, 福州, 575~582.

专利:

(1) 王国栋, 刘振宇, 张晓明, 李成刚, 曹光明, 张婷. 一种高硅钢薄带及其制备方法. CN 201010297551.0。

(2) 王国栋, 刘海涛, 刘振宇, 李成刚, 曹光明, 马东旭, 张晓明, 吴迪. 一种双辊薄带连铸制备取向硅钢等轴晶薄带坯的方法. CN 201010539148.4。

(3) 刘振宇, 刘海涛, 王国栋, 曹光明, 李成刚, 马东旭, 张晓明, 吴迪. 一种双辊薄带连铸制备无取向硅钢等轴晶薄带坯的方法. CN 201010539378.0。

(4) 刘海涛, 王国栋, 刘振宇, 曹光明, 李成刚, 张晓明, 吴迪. 一种基于双辊薄带连铸技术的无取向硅钢板的制造方法. CN 201110220789.8。

(5) 刘海涛, 刘振宇, 孙宇, 鲁辉虎, 宋红宇, 李昊泽, 王国栋. 一种提高双辊薄带连铸无取向电工钢磁性能的方法. CN 201210491627.2。

(6) 刘海涛, 王国栋, 刘振宇, 曹光明, 李成刚, 张晓明, 吴迪. 一种双辊薄带连铸制备无取向硅钢柱状晶薄带坯的方法. CN 201010539203.X。

(7) 刘海涛, 王国栋, 刘振宇, 李成刚, 曹光明, 马东旭, 吴迪. 一种以氮化铝为抑制剂的取向硅钢薄带坯的制备方法. CN 201010565817.5。

(8) 刘海涛, 李昊泽, 陈圣林, 王项龙, 张凤泉, 宋红宇, 李成刚, 曹光明, 骆忠汉, 刘振宇, 王国栋. 一种冷轧无取向高硅钢薄板的短流程制造方法. 201410489028.6。(已受理)

(9) 刘海涛, 宋红宇, 鲁辉虎, 刘文强, 王银平, 李成刚, 曹光明, 刘振宇, 王国栋. 一种超低碳取向硅钢板及其制造方法. 201410504579.5。(已受理)

(10) 刘海涛, 李昊泽, 陈圣林, 王项龙, 张凤泉, 骆忠汉, 刘振宇, 王国栋. 一种高磁感高硅无取向硅钢板及其制备方法. 201410709225.4。(已受理)

(11) 刘海涛, 宋红宇, 鲁辉虎, 刘振宇, 李成刚, 曹光明, 衣海龙, 王国栋. 一种增强双辊薄带连铸取向硅钢热轧高斯织构的方法. CN 201310170486.9。

(12) 刘海涛, 王项龙, 李昊泽, 安灵子, 张宝光, 刘文强, 赵士淇, 曹光明, 李成刚, 刘振宇, 王国栋. 一种超细晶粒高硅电工钢薄板及其制造方法. 201510196003.1。(已受理)

(13) 刘振宇, 李成刚, 曹光明, 刘海涛, 王国栋. 一种薄带连铸过程多种冷却方式集成的冷却系统. CN 201010233459.8。

5. 项目完成人员

主要完成人员	职 称	单 位
王国栋	教授, 中国工程院院士	东北大学 RAL 国家重点实验室
刘海涛	副教授	东北大学 RAL 国家重点实验室
刘振宇	教授	东北大学 RAL 国家重点实验室
许云波	教授	东北大学 RAL 国家重点实验室
邱以清	副教授	东北大学 RAL 国家重点实验室
曹光明	副教授	东北大学 RAL 国家重点实验室
李成刚	工程师	东北大学 RAL 国家重点实验室
宋红宇	博士生	东北大学 RAL 国家重点实验室
李昊泽	博士生	东北大学 RAL 国家重点实验室
孙 宇	硕士生	东北大学 RAL 国家重点实验室
马东旭	硕士生	东北大学 RAL 国家重点实验室
鲁辉虎	硕士生	东北大学 RAL 国家重点实验室
刘文强	硕士生	东北大学 RAL 国家重点实验室

6. 报告执笔人

刘海涛

7. 致谢

本研究工作得到了国家自然科学基金钢铁联合基金重点项目“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)”、青年项目“Fe-Cr、Fe-Si系BCC钢薄带连铸成形组织性能控制机理(51004035)”、青年面上连续资助项目“基于双辊薄带连铸制备低铁损、高磁感、薄规格硅钢板的组织性能控制机理(51374002)”、面上项目“近终形薄带钢连铸条件下基于氧化物冶金的组织超细化及强韧化控制机理(51574078)”的资助。国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目“节能型电机用高硅电工钢开发(2012AA03A506)”和“十二五”国家科技支撑计划项目“高品质特殊钢新型短流程生产线技术开发与应用示范(2012BAE03B02)”为本研究成果的产业化应用和推广提供了支持。

本研究工作得到了中国钢研科技集团公司连铸技术国家工程研究中心仇圣桃教授级高工、武汉钢铁集团公司国家硅钢工程技术研究中心骆忠汉部长、张凤泉部长、陈圣林主任以及江苏沙钢集团有限公司刘俭总经理、李化龙主任、马建超主任的大力支持，在此一并致谢。

目 录

摘要	1
1 绪论	3
1.1 背景及意义	3
1.2 国内外研究现状	8
1.2.1 薄带连铸 NGO 硅钢	8
1.2.2 薄带连铸 GO 硅钢	10
1.3 亟需解决的关键问题	12
1.4 研究报告的主要内容	12
2 NGO 钢薄带坯初始组织、织构演变原理及调控方法	14
2.1 实验方法与过程	14
2.2 结果与分析	15
2.2.1 铸带的组织演变规律	15
2.2.2 铸带的宏、微织构演变规律	19
2.3 本章小结	24
3 NGO 钢薄带坯初始组织、织构的遗传演变与影响	25
3.1 实验方法与过程	25
3.2 结果与分析	25
3.2.1 组织演变比较	25
3.2.2 织构演变比较	27
3.2.3 磁性能比较	29
3.2.4 再结晶织构形成演变机制	31

3.3 本章小结	32
4 NGO 钢组织性能的优化调控原理及方法	33
4.1 实验方法与过程	33
4.2 结果与分析	34
4.2.1 组织演变比较	34
4.2.2 织构演变比较	40
4.2.3 磁性能比较	43
4.2.4 再结晶织构优化调控原理	46
4.3 本章小结	47
5 6.5%Si NGO 高硅钢薄带的制备及磁性能控制	49
5.1 实验方法与过程	49
5.1.1 0.50mm 成品薄板的制备	49
5.1.2 0.35mm 成品薄板的制备	50
5.1.3 0.15mm、0.20mm 成品薄板的制备	50
5.2 结果与分析	51
5.2.1 0.50mm 厚度薄板的制备及组织性能调控	51
5.2.2 0.35mm 厚度薄板的制备及组织性能调控	57
5.2.3 0.15mm、0.20mm 厚度薄板的制备及组织性能调控	61
5.3 本章小结	65
6 薄带连铸普取向硅钢的研发	66
6.1 实验方法与过程	67
6.2 结果与分析	67
6.2.1 薄带坯初始组织、织构的调控	67
6.2.2 全流程的组织演变及调控	70
6.2.3 全流程的织构演变及调控	71
6.2.4 抑制剂的演变与调控	77
6.2.5 磁性能指标	78

6.3 本章小结	79
7 薄带连铸 Hi-B 取向硅钢的研发	80
7.1 实验方法与过程	80
7.2 结果与分析	82
7.2.1 组织演变行为研究	82
7.2.2 织构演变行为研究	86
7.2.3 抑制剂演变行为研究	90
7.3 本章小结	92
8 基于全过程全铁素体的成分设计及一阶段冷轧法制备取向硅钢的 探索研究	93
8.1 实验方法与过程	93
8.2 结果分析与讨论	94
8.2.1 组织演变规律研究	94
8.2.2 织构演变规律研究	97
8.2.3 抑制剂演变规律研究	103
8.3 本章小结	106
9 基于全过程全铁素体的成分设计及两阶段冷轧法制备取向硅钢的 探索研究	107
9.1 实验方法与过程	107
9.2 结果分析与讨论	108
9.2.1 组织演变规律研究	108
9.2.2 织构演变规律研究	111
9.2.3 抑制剂演变规律研究	119
9.3 本章小结	121
10 结论	122
参考文献	124

摘 要

电工钢是重要的软磁材料，生产工艺复杂，窗口狭窄，流程冗长，制造困难，成本高昂，被称为钢铁工业的“艺术品”。长期以来，我国硅钢生产核心技术与装备，受制于国外发达国家，长期处于引进、仿制、跟跑的地位。薄带连铸技术是一种以钢水为原料直接生产薄带材的绿色化新技术，具有短流程、低成本、低能耗、低排放等巨大优势。发达国家投入巨资，竞相研发。我国政府文件也多次列入重点支持方向。

东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室王国栋课题组与钢铁研究总院仇圣桃课题组合作，认真分析了目前国际上最先进硅钢生产技术的成分设计、组织与织构控制原理以及存在的工艺技术难题，并结合薄带连铸亚快速凝固、短流程的特征优势，于2008年提出并成功申报NSFC钢铁研究联合基金重点项目——“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”，旨在突破目前国际上硅钢传统制造流程的局限，彻底解决现有技术存在的工艺技术难题，为硅钢生产开辟一条有中国领跑的特色化、绿色化创新发展道路。经过几年的不懈努力，课题组形成了具有自主知识产权的电工钢新一代先进制造理论和系统工艺原型技术，填补了国际上在此领域的空白。

课题组首次发现在独特的亚快速凝固条件下硅钢带坯的初始凝固组织、织构可控，并提出了系统调控理论和方法，为实现凝固-热轧-冷轧-热处理一体化精确组织控制奠定基础；基于薄带连铸无取向硅钢独特的组织、织构遗传行为研究，提出其再结晶组织与织构的优化调控原理，原型钢产品磁性能指标显著优于目前国内外现有产品；基于传统流程取向硅钢的成分设计，建立了薄带连铸条件下组织、织构、抑制剂的调控理论，掌握了全流程系统的工艺技术，省去了高温加热、渗氮处理等繁复、苛刻工序，制备出普通取向硅钢和高磁感取向硅钢原型钢；提出了创新的取向硅钢成分设计和全铁素体