

RAL · NEU 研究报告 No.0022

# 液压张力温轧机的 研制与应用

YEYA ZHANGLI WENZHAJI DE YANZHI YU YINGYONG

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  
[www.cnmp.com.cn](http://www.cnmp.com.cn)

NEU 研究报告 No. 0022

# 液压张力温轧机的研制与应用

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  
2016

## 内 容 提 要

本研究报告基于中央高校基本科研业务费资助项目“难变形金属带材张力异步温轧工艺过程及控制模型的研究”课题(N120407005),以及钢铁共性技术协同创新中心“先进冷轧、热处理和涂镀工艺与装备技术”和“先进短流程热轧工艺与装备技术”方向的温轧研究子课题,依托武钢钢铁研究院中试工厂二期项目“四辊冷(温)轧机”、沙钢钢铁研究院冷轧硅钢中试项目“直拉式四辊冷-温实验轧机开发”、宝山钢铁股份有限公司“新增单张直拉式冷(温)轧模拟试验机”项目和重庆科学技术研究院“镁合金专用试验轧机”项目,介绍了液压张力温轧机的关键工艺设备、温轧规程设定模型、自动控制技术的最新研究进展及应用。本研究报告涵盖了液压张力温轧机的轧件加热装置及温度控制模型、轧辊加热装置、液压张力装置及微张力控制、温轧规程设定模型、变形区温度预测模型、厚度软测量及宽展模型、异步轧制技术、镁合金温轧实验等内容。

本书可供从事材料加工工程、轧制工艺与自动化等领域的科研人员、工程技术人员及高等院校相关专业师生学习与参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

液压张力温轧机的研制与应用/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, 2016. 12

(RAL·NEU 研究报告)

ISBN 978-7-5024-7414-0

I. ①液… II. ①轧… III. ①温轧—板材轧制—研究报告  
IV. ①TG335. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 306645 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 美术编辑 彭子赫

版式设计 彭子赫 责任校对 李 娜 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7414-0

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安华明印业有限公司印刷

2016 年 12 月第 1 版, 2016 年 12 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 7.75 印张; 148 千字; 103 页

48.00 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

随着材料科学的日益发展，金属板带轧制设备制造水平的不断进步以及自动化控制技术的快速提高，金属材料的产品质量和生产效率得到大幅度提升，尤其是钢铁工业得到迅猛发展。然而，对于那些具有重要用途或拥有良好应用前景的常温下难变形金属材料，因其自身的脆性、加工温度较高、设备工艺要求或防护性等因素，生产效率和应用量仍很难与钢材和铝合金等传统结构材料相比拟。

国内外相关领域的专家学者以及工程技术人员，对常温下难变形金属材料的加工问题进行了大量的研究，其中温轧是难变形金属材料加工的有效方法之一。温轧是针对常温下难变形的金属材料，在冷轧设备基础上，采用特殊手段对轧件进行加热，加热温度在金属的常温组织回复温度与再结晶温度之间，由于温轧时材料的塑性变形能力得到一定的提高，因此能够实现较大变形量的轧制。与冷轧相比，温轧时材料容易变形，而且没有热轧的缺点，例如易生成表面氧化层导致表面粗糙，以及尺寸精度较差等。

通常可以采用温轧工艺进行加工的难变形金属有：高硅电工钢（含 Si 约 6.5% 的 Fe-Si 合金）、镁及其合金、钨、钼及其合金，铝含量达到 12%（质量分数）以上的高铝青铜等。其中，高硅电工钢是黑色金属中具有极高应用价值的典型的难变形金属，其室温塑性几乎为零，常温下难以加工。目前只有日本 JFE 公司的化学气相沉积渗硅法（CVD）实现了高硅电工钢薄带的工业化生产，但是该技术存在工艺流程长、环境负担重、生产效率低、成本高等问题。谢建新等人发明了一种采用普通钢材对高硅电工钢进行包套后温轧，剥离包套后对其酸洗并冷轧的方法，制备出了表面光亮、组织均匀的高硅电工钢薄带。C. Bolfarini 等人采用喷射成型以及合金中添加

铝的方法，制备出了高硅电工钢薄板，但是该工艺难以实现大规模的工业化生产。刘海涛等人采用了铸轧、热轧、温轧加中间退火的方法制备出高硅钢电工钢薄板，是一种相对高效的高硅电工钢制备技术。镁及其合金是另一种具有广泛应用价值的常温下难变形金属。由于镁合金是密排六方晶体结构，塑性变形能力差，因此通常需在较高温度下成型，温轧是最适合的镁合金薄板生产工艺。

常温下难变形金属材料温轧加工过程的理论研究和工艺开发工作，需要有合适的研究平台。加之我国正处于经济结构转型阶段，钢铁行业面临结构调整、产能过剩、需求降低、价格下跌、节能环保等严峻挑战，各大企业对新材料的开发和工艺优化等研究工作的需求变得迫在眉睫。温轧实验轧机采用物理模拟的方法来模拟和再现现代化轧制过程，将复杂、巨大的车间轧制工艺浓缩到实验设备上，全面而又准确地反映现场生产过程，与工业实验相比，可以大量节省研究开发的时间、物力和财力，对新产品的工艺开发以及优化完善具有重要意义。

传统的温轧实验，对轧件采用离线加热的方法，在温轧实验轧机旁边放置加热炉，将金属片加热至所需温度后，人工夹持轧件送入轧辊进行轧制。这种方法效率低，降温太快而不能获得精确温度参数，不能对轧件施加张力而造成板型及尺寸精度较差。针对常温下难变形金属，实现带张力温轧实验，要求具备两个功能：一是能够对轧件施加张力；二是在轧制过程中轧件能够实现在线加热。为了模拟工业生产的温轧工艺过程，东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室（RAL）在液压张力冷轧实验轧机的基础上，增加一套轧件在加热装置，将左、右两个夹钳作为两个电极，采用一个变压器对这两个电极通电，对夹持在左、右夹钳之间的轧件进行在线加热，实现了轧件带张力温轧功能，改造后的实验轧机称为液压张力温轧机。

## 2. 研究进展与成果

### 2.1 液压张力温轧机关键技术研究进展及创新点

液压张力温轧机关键技术主要包括：温轧轧制规程设定模型、变形区出口温度数学模型、轧件温度控制技术、轧辊加热及表面温度控制、温轧宽展

模型及厚度软测量技术、液压微张力控制技术。

### 2.1.1 温轧规程设定模型的研究进展

温轧规程设定模型主要包括：轧制数学模型和温度数学模型。通过轧制数学模型设定辊缝、速度和张力，依据温度数学模型设定轧件温度和轧辊温度。

(1) 轧制数学模型主要包括：变形抗力模型、摩擦系数模型、轧辊压扁半径模型、轧制力模型、轧制力矩及功率模型、前滑模型、轧机刚度模型和出口厚度计算模型，用于计算薄板温轧规程中的辊缝、速度和张力设定值。

(2) 温轧工艺窗口中最关键的工艺参数是变形区温度。温轧依赖于合适的加工工艺和成型参数，以镁合金为例，温轧时需要严格控制变形区温度，当温度偏低时，轧件在轧制过程中易产生边部裂纹，可是能获得最佳镁制品力学性能的变形区温度范围很窄，且与产生轧制裂纹的温度区间接近。由于温轧时变形区温度不易测量，综合研究了轧件温度、轧辊温度、轧制速度、压下率和轧件厚度 5 个工艺参数对变形区温度的影响规律，建立了变形区出口温度数学模型，为轧件温度和轧辊温度参数设定提供了依据。

### 2.1.2 轧件温度及轧辊温度控制技术的研究进展

(1) 液压张力温轧机的轧件温度控制技术主要包括：轧件在线加热、温度控制器、接触式测温仪。

轧件在线加热采用在线电阻直接加热方式，方法有两种：单变压器加热和双变压器加热。单变压器加热方法优点是加热时温轧机辊缝可以打开，缺点是只能在温轧机停车后对轧件加热，无法在轧制过程中对其加热，不利于保证金属薄板的温度均匀性。双变压器加热方法要求温轧机辊缝始终闭合，分别对轧件在左夹钳和轧辊之间的部分、右夹钳和轧辊之间的部分单独加热，能够满足轧件在轧制过程中时刻保持在线加热状态。

温度控制采用前馈和反馈相结合的温度控制技术，可以保证轧件的加热速度和精度。当采用双变压器加热时，能够在轧制过程中进行补温，提高了

轧件的温度均匀性。

为保证温度测量精度，开发了接触式测温仪对轧件表面直接测温，解决了因轧件黑度系数随温度变化剧烈波动导致的红外测温仪失真的难题。

(2) 轧辊在线加热技术。温轧机采用轧辊加热技术改善薄板温轧过程中轧辊对变形区温度造成的剧烈温降，轧辊加热通常有三种方式：表面感应加热、芯部热油加热和表面火焰加热。通过试验比较发现，轧辊芯部热油加热方式由于蓄热能力强、轧辊温度稳定、造价低、维护简单，是最适合于液压张力温轧机的轧辊加热方式。

### 2.1.3 温轧宽展模型及厚度软测量技术的研究进展

液压张力温轧机上无法安装测厚仪，这是由设备结构特点决定的，厚度软测量技术解决了厚度监控的难题。已知原料厚度，根据体积不变原则，通过张力液压缸的位移传感器测量轧件在轧机入口和出口的长度，考虑每道次宽展的情况下，可以精确计算各道次轧件的出口厚度。薄板温轧的宽展与传统的热轧和冷轧不同，是个不可忽略的因素，综合研究压下率、温度、张力对宽展的影响规律，开发了薄板温轧宽展模型，提高了厚度软测量精度。

### 2.1.4 液压微张力控制技术的研究进展

液压张力温轧机的张力采用张力液压缸进行控制，液压缸内置位移传感器，通过张力液压缸调整轧件位置 and 实现张力闭环控制，张力控制系统经历了三次升级。

(1) 第一阶段：采用油压传感器测量张力，通过安装在液压站内的比例溢流阀控制张力液压缸的油压，间接控制张力；位置点动控制采用电磁阀。这种方式位置闭环无法实现，因此定位精度低。张力测量采用油压无法真实的测量出轧制过程中瞬时的张力波动，因此容易发生失张和断带现象。

(2) 第二阶段：采用伺服阀控制液压张力缸的位置和张力，实现了位置闭环和张力闭环控制，控制精度得到大幅提高，尤其是采用了张力计直接测量张力，张力控制效果得到了极大改善。这种方式依赖于前滑和后滑的计算精度，受伺服阀零漂的影响较大。

(3) 第三阶段：采用伺服阀进行位置闭环控制，通过比例减压阀和比例溢流阀实现张力闭环控制，实现了液压张力广域控制（1~50kN），具备了小于2kN的微张力控制功能，能够满足高硅钢和镁合金等脆性金属的温轧要求。

## 2.2 技术研发历程及推广应用

冷轧实验通常采用小型单机架卷取式冷轧机，做一次试验要用一个钢卷，取样时剪几片就够用，而且有些试验用料来自小炉冶炼，热轧后是单张板而不是成品卷，单片金属怎么做带张力的冷轧试验呢？课题组的科研人员决定换一种思路：拆除左、右卷取机，在冷轧机左、右两侧分别安装一个张力液压缸，采用液压钳口夹持轧件，控制张力液压缸的速度和压力对轧件施加张力，实现单片试样带张力轧制，如图1所示。

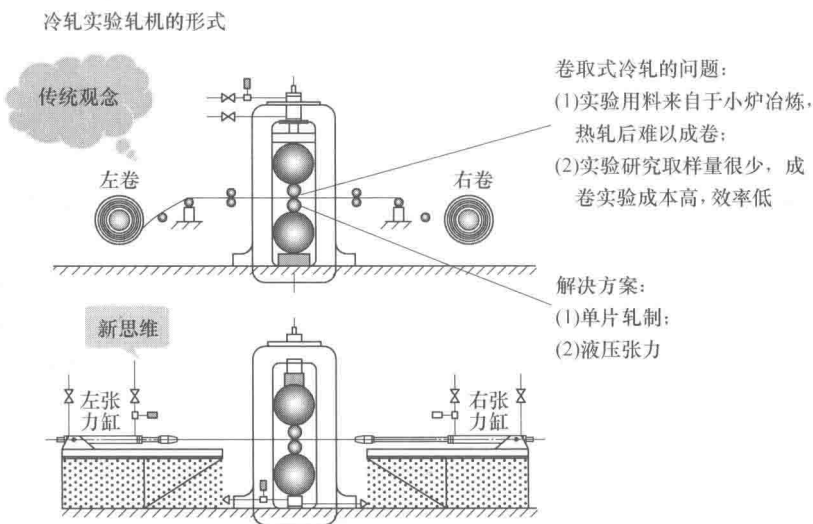


图1 新思维：液压张力冷轧机的初创

2005年，RAL完成了250mm液压张力冷轧机的改造，如图2所示。采用油压传感器测量张力，通过安装在液压站内的比例溢流阀控制张力液压缸的油压间接控制张力，位置点动控制采用电磁阀，实现了单片金属带张力轧制。这种新型的实验轧机很快就受到了各企业技术研发部门的青睐。



2006年，以RAL液压张力冷轧机为原型，为上钢一厂成功建设了一套450mm液压张力冷轧机，实现了首台液压张力冷轧机的推广，至今设备运行良好。

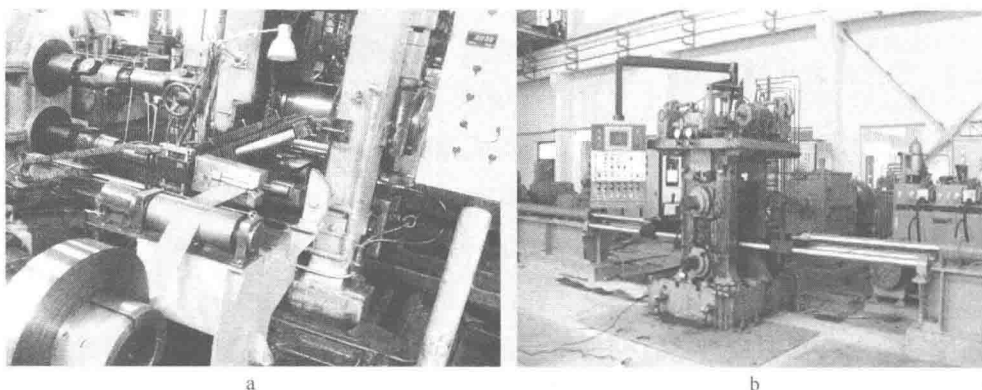


图2 RAL 液压张力冷轧机改造

a—改造前；b—改造后

2009年，RAL为鞍钢技术中心建成一套450mm液压张力冷轧机（见图3）。2010年，RAL为太钢技术中心建成一套450mm液压张力冷轧机（见图4）。2011年，RAL为包钢技术中心建成一套450mm液压张力冷轧机（见图5）。2012年，RAL为河北钢铁研究院中试工厂建成一套450mm液压张力冷轧机（见图6）。这种实验轧机为企业节约了研发成本、缩短了研发周期、避免了科研开发和生产过程中的盲目性，切实解决了科研和生产中遇到的难题，为提升企业的核心竞争力做出了重要贡献。

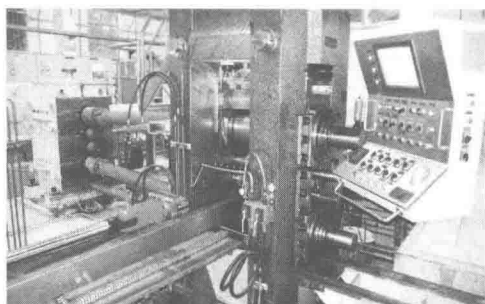


图3 鞍钢技术中心液压张力冷轧机

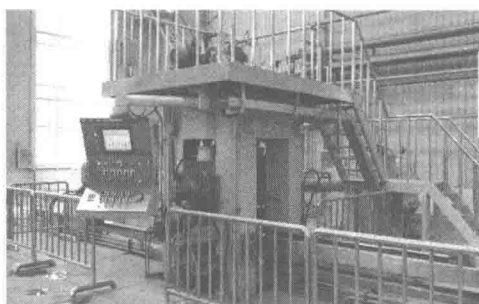


图4 太钢技术中心液压张力冷轧机

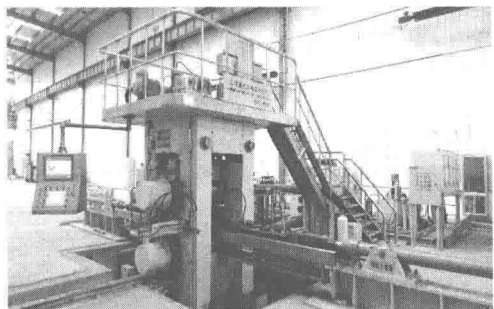


图5 包钢技术中心液压张力冷轧机

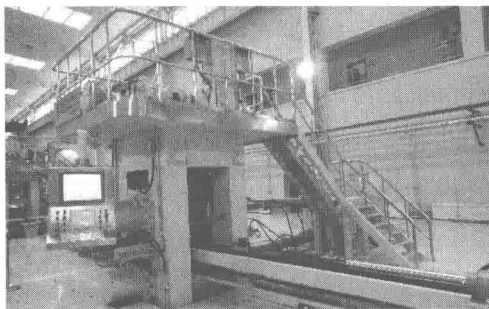


图6 河北钢铁研究院液压张力冷轧机

问题是创新的原点。高硅电工钢具有极高的应用价值，目前只有日本JFE公司的化学气相沉积渗硅法（CVD）实现了高硅电工钢薄带的工业化生产，但是该技术存在工艺流程长、环境负担重、生产效率低、成本高等问题，因此科研人员一直在尝试采用轧制的方法制备高硅电工钢薄板。众所周知，提高轧件温度可以改善塑性，利于轧制，因此2011年，课题组人员对液压张力冷轧机进行了第二阶段的温轧功能改造，如图7所示：在两个钳口之间通低电压大电流，对金属轧件进行在线电加热，可以实现单片试样带张力温轧实验，这种实验轧机被称为液压张力温轧机。

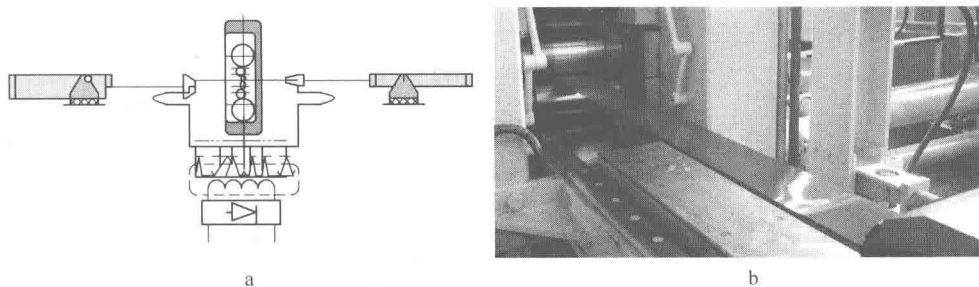


图7 液压张力冷温轧机

a—工作原理；b—温轧过程

目前，RAL研制的液压张力温轧机也获得了很好的推广应用：

(1) 2012年，RAL为武钢研究院成功建设了一套250mm液压张力温轧机（见图8），采用双变压器进行轧件加热，主要用于冷轧碳钢、硅钢和低合

金钢等产品开发和工艺研究，实现了首台液压张力温轧机的推广。

(2) 2013 年，RAL 为沙钢研究院成功建设了一套 250mm 液压张力温轧机（见图 9），采用单变压器进行轧件加热，主要用于冷轧碳钢、硅钢（ $\text{Si} \leq 4\%$ ）和不锈钢等产品的开发和工艺研究。

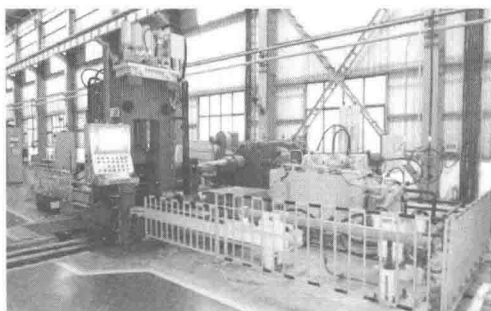


图 8 武钢研究院液压张力温轧机

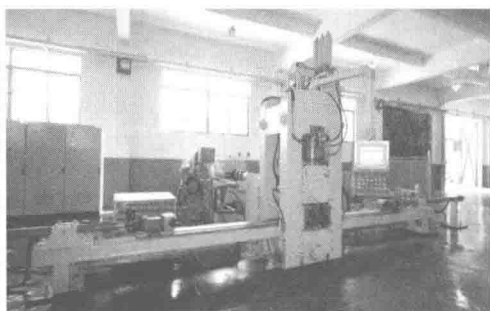


图 9 沙钢研究院液压张力温轧机

(3) 2014 年，RAL 为宝钢研究院成功建设了一套 350mm 液压张力温轧机（见图 10），主要用于冷轧碳钢、高硅钢、高强钢、精冲钢和镁合金等产品开发和工艺研究。采用单、双变压器可切换的方式进行轧件加热；轧辊采用电磁感应方式进行表面加热；首次采用接触式测温仪进行轧件测温；双电机传动可实现异步轧制；具备微张力控制功能。

(4) 2015 年，RAL 为重庆科学技术研究院成功建设了一套 250mm 液压张力温轧机（见图 11），主要用于镁合金板的温轧工艺及材料性能研究。采用单变压器方式进行轧件加热；轧辊采用芯部通热油的方式进行加热；接触

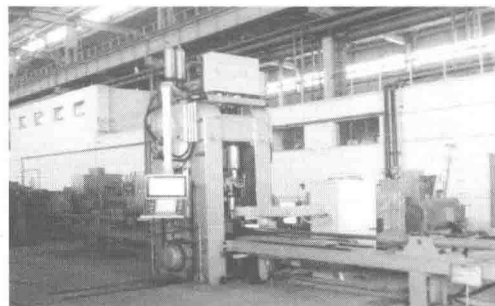


图 10 宝钢研究院液压张力温轧机



图 11 重庆科学技术研究院液压张力温轧机

式测温仪进行轧件测温；可更换传动齿轮实现异步轧制；具备微张力控制功能。

相对于生产设备，液压张力温轧机省去了诸多复杂的辅助设备，既大大地减少了投资又方便地取得科研样品及数据，可解决实际生产中所存在的一些不便于直接在生产轧机上进行实验研究的问题，为相关技术的开发、材料性能的提高创造了优良条件。

### 3. 论文、专利及获奖

#### 论文：

(1) 花福安, 李建平, 赵志国, 王国栋. 冷轧薄板轧件电阻加热过程分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2007, 28(9):1278 ~ 1281.

(2) Zhang Dianhua, Zhang Hao, Sun Tao, Li Xu. Monitor automatic gauge control strategy with a Smith predictor for steel strip rolling [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2008, 5(6): 827 ~ 832.

(3) Sun Tao, Wang Jun, Liu Xianghua. A method to improve the precision of hydraulic roll gap [C]. The 5th International Symposium on Advanced Structural Steels and New Rolling Technologies, 2008: 707 ~ 711.

(4) 孙涛, 牛文勇, 张殿华, 程立英. 快速高精度电动辊缝控制技术的研究与应用[J]. 材料与冶金学报, 2009, 8(3): 205 ~ 208.

(5) Wang Wenle, Li Jianping, Hua Fuan, Liu Xianghua. Application of self-learning to heating process control of simulated continuous annealing [J]. Journal of Iron and Steel Research (International), 2010, 17(6): 27 ~ 31.

(6) 孙涛, 王贵桥, 吴岩, 张宏. 直拉式可逆冷轧实验轧机张力控制技术[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2012, 33(4): 529 ~ 530.

(7) Li Jianping, Sun Tao, Niu Wenyong, Zhang Chunyu. Flow control of servo valves for tension cylinders based on speed feedforward [C]. Proceedings of the 31st Chinese Control Conference, 2012, 7615 ~ 7618.

(8) 张浩宇, 孙杰, 张殿华, 曹建钊. 基于流量预估的直拉式冷轧机液压张力控制策略[J]. 材料与冶金学报, 2013, 12(4): 283 ~ 288.



(9) 孙涛, 李建平, 王贵桥, 吴志强. 液压张力温轧实验轧机薄带在线加热温度控制[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, 37(10):1398~1402.

(10) 矫志杰, 孙涛, 李建平. 难变形材料轧制实验机开发及实验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016.

### 专利:

(1) 孙涛, 李建平, 张强. 一种用于测量液压张力温轧机轧件温度的测温装置及方法(发明专利-授权), 2016, 中国, 201410312998.9.

(2) 孙涛, 花福安, 李建平, 牛文勇. 一种液压张力温轧机的轧件加热方法(发明专利-授权), 2016, 中国, 201410353048.0.

(3) 孙涛, 王贵桥, 李建平, 牛文勇. 一种液压张力温轧机微张力控制系统及方法(发明专利-授权), 2016, 中国, 201510179687.4.

(4) 李建平, 孙涛, 牛文勇, 王贵桥, 花福安, 邹杰. 基于速度前馈的直拉式冷轧机张力控制方法(发明专利-授权), 2013, 中国, 201210048625.6.

(5) 矫志杰, 李建平, 张福波, 王黎筠, 刘相华, 王国栋. 直拉式冷轧实验机组带钢厚度间接测量方法(发明专利-授权), 2012, 中国, 200810011099.X.

(6) 王贵桥, 李建平, 高扬, 张福波, 孙涛, 孙杰, 牛文勇, 邹杰, 吴岩, 花福安, 吴迪, 王国栋. 一种直拉式冷轧实验机液压张力控制系统及方法(实用新型专利-授权), 2016, 中国, 201510105358.5.

(7) 李建平, 孙涛, 花福安, 牛文勇, 王贵桥. 一种液压张力温轧机(发明专利-实审), 2014, 中国, 201410310270.2.

(8) 孙涛, 杨红, 李建平, 花福安, 张春宇, 张俊潇. 一种液压张力温轧机金属轧件温度控制方法(发明专利-实审), 2015, 中国, 201510835132.0.

(9) 李建平, 刘振宇, 孙涛, 矫志杰, 牛文勇, 曹光明. 一种高硅钢的轧制装置及其方法(发明专利-实审), 2016, 中国, 201610013430.6.

(10) 牛文勇, 孙涛, 矫志杰, 李建平, 甄立东, 唐庸. 一种高硅钢的卷取式温轧装置及其方法(发明专利-实审), 2016, 中国, 201610013104.5.

## 科研获奖：

(1) 现代轧制技术、装备和产品研发创新平台 .2012，国家科技进步奖二等奖。

(2) 高品质硅钢生产工艺研究装备开发及应用 .2012，辽宁省科学技术奖二等奖。

## 4. 项目完成人员

主要完成人员	技术职称	单 位
李建平	教授	东北大学 RAL 国家重点实验室
孙 涛	讲师	东北大学 RAL 国家重点实验室
牛文勇	高工	东北大学 RAL 国家重点实验室
王贵桥	讲师	东北大学 RAL 国家重点实验室
矫志杰	副教授	东北大学 RAL 国家重点实验室
花福安	副教授	东北大学 RAL 国家重点实验室
杨 红	高工	东北大学 RAL 国家重点实验室
甄立东	高工	东北大学 RAL 国家重点实验室
高 扬	讲师	东北大学 RAL 国家重点实验室
王向红	高工	东北大学 RAL 国家重点实验室
王黎筠	高工	东北大学 RAL 国家重点实验室
吴 岩	工程师	东北大学 RAL 国家重点实验室
张春宇	工程师	东北大学 RAL 国家重点实验室
朱庆贺	工程师	东北大学 RAL 国家重点实验室
张泽瑞	工程师	东北大学 RAL 国家重点实验室
张 强	工程师	东北大学 RAL 国家重点实验室
唐 庸	硕士研究生	东北大学 RAL 国家重点实验室
张俊潇	硕士研究生	东北大学 RAL 国家重点实验室
许 征	硕士研究生	东北大学 RAL 国家重点实验室
郝志强	硕士研究生	东北大学 RAL 国家重点实验室

## 5. 报告执笔人

孙涛、李建平、矫志杰、王贵桥、牛文勇、唐庸。

## 6. 致谢

具有自主知识产权的液压张力冷轧机和温轧机成套装备与工艺技术，在开发与工程实践过程中得到了相关企业和研究院所的鼎力支持与帮助。特别感谢上钢一厂为第一套液压张力冷轧机的推广应用提供了良好的中试平台，感谢鞍钢技术中心、太钢技术中心、包钢技术中心和河北钢铁研究院对液压张力冷轧机的技术发展与应用给予的大力支持。感谢武钢研究院为第一套液压张力温轧机的推广应用提供了良好的中试平台，感谢沙钢研究院、宝钢研究院、重庆科学技术研究院对液压张力温轧机的技术发展与应用给予的大力支持和帮助。感谢各级领导、行业专家和广大技术人员对项目的成功实施给予的大力支持和帮助。同时，对国家科技部、辽宁省科技部等政府部门给予的支持，特此表示谢意！

# 目 录

摘要 .....	1
1 温轧工艺、关键设备及功能 .....	3
1.1 温轧工艺 .....	3
1.1.1 国内外现状 .....	4
1.1.2 典型材料 .....	5
1.2 关键设备及功能 .....	6
1.2.1 在线电阻加热装置及轧件温度控制 .....	7
1.2.2 接触式测温仪 .....	9
1.2.3 轧件温度控制 .....	10
1.2.4 轧辊加热技术 .....	16
1.2.5 液压张力装置 .....	19
1.2.6 自动控制系统 .....	24
1.3 微张力功能改造 .....	27
1.4 本章小结 .....	34
2 温轧规程设定模型 .....	35
2.1 轧制规程设定模型 .....	35
2.1.1 变形抗力模型 .....	35
2.1.2 摩擦系数模型 .....	37
2.1.3 轧辊压扁半径模型 .....	38
2.1.4 轧制力模型 .....	38
2.1.5 轧制力与轧辊压扁的迭代求解 .....	39
2.1.6 轧制力矩及功率模型 .....	39





2.1.7	前滑模型 .....	41
2.1.8	轧机刚度模型 .....	41
2.1.9	出口厚度计算模型 .....	42
2.2	轧制规程和轧机设定计算 .....	42
2.2.1	轧制规程计算 .....	43
2.2.2	轧制规程极限值检查及修正 .....	45
2.2.3	轧机的设定计算 .....	47
2.3	变形区温度模型 .....	48
2.3.1	模型建立 .....	48
2.3.2	正交设计及实验 .....	49
2.3.3	结果分析 .....	50
2.3.4	实验验证 .....	55
2.4	本章小结 .....	57
3	薄板温轧过程中的宽展及厚度软测量 .....	58
3.1	厚度软测量原理 .....	58
3.1.1	软测量的基本思想 .....	58
3.1.2	厚度软测量的基本原理 .....	59
3.1.3	道次间厚度软测量技术 .....	61
3.1.4	影响薄板温轧宽展的主要因素 .....	62
3.2	薄板温轧宽展数学模型 .....	65
3.2.1	摩擦系数 .....	66
3.2.2	传统宽展与温轧薄板宽展的区别 .....	68
3.2.3	温轧宽展模型 .....	72
3.3	厚度软测量技术实施 .....	73
3.4	本章小结 .....	75
4	液压张力温轧机应用案例 .....	76
4.1	镁合金温轧 .....	76
4.1.1	变形区温度与边裂 .....	76