

RAL · NEU 研究报告 No.0011

冷轧润滑系统设计理论及 混合润滑机理研究

LENGZHA RUNHUA XITONG SHEJI LILUN JI HUNHE RUNHUA JILI 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. 0011

冷轧润滑系统设计理论及 混合润滑机理研究

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

2015

内 容 简 介

本书归纳了东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室近年来在冷轧润滑研究领域的工作,内容涉及冷轧变形区热量的传输、轧制过程油膜厚度以及混合润滑机理研究等方面。本书所研究内容具有重要的理论意义和应用价值。

本书可供冶金、机械、材料成型、石油化工等行业从事研究、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

冷轧润滑系统设计理论及混合润滑机理研究/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. 4

(RAL·NEU 研究报告)

ISBN 978-7-5024-6887-3

I. ①冷… II. ①轧… III. ①冷轧—润滑系统—系统设计—研究 ②冷轧—混合润滑—研究 IV. ①TG335.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 062419 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 yjcb@cnmp.com.cn

策 划 任静波 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 978-7-5024-6887-3

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 4 月第 1 版, 2015 年 4 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 9 印张; 140 千字; 129 页

44.00 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

冷轧技术发展当今时代，带钢的表面质量越来越受到高度关注，用户对产品质量的要求也在不断提高。随着冷连轧技术的发展，带钢轧制的高速化已成为现代化冷连轧机发展的一大趋势。伴随着轧制速度的提高，轧制变形区的温度、摩擦条件、前滑等情况变得十分复杂，在冷轧带钢表面很容易产生与工艺润滑密切相关的划痕、热滑伤等质量缺陷，大大降低了产品的质量及市场竞争力。为了获得良好的板形质量，需要严格控制轧辊的温度和热凸度。而轧制过程中轧件的变形热、轧件与轧辊接触产生的摩擦热以及工艺冷却和润滑制度都会使轧辊的温度发生改变，进而影响到轧辊的凸度和带钢的板形，因此，准确地计算轧制过程中产生的热量是关键。与此同时，带钢表面温度、润滑油膜厚度以及摩擦系数等参数之间是相互联系、互相影响的。随着带钢表面温度的变化，润滑油的黏度也会随之改变，从而影响油膜厚度和摩擦系数，而摩擦系数的改变又会影响到轧制功率，进而影响带钢的温度。影响板形的因素，除了辊系弹性变形和轧辊的磨损外，轧辊的热变形是另一个十分重要的影响因素，它会直接引起轧辊的凸度变化，从而影响带钢的平直度。工作辊热变形的有效控制是降低轧辊损耗、控制板形和提高成材率的有效措施。但是在板带钢轧制过程中，轧辊热变形的预测精度不高一直是困扰现场生产的难题。轧件在辊缝内的塑性变形功、轧件和轧辊之间的摩擦热与轧制的工艺参数有重要关系，不同条件下的轧制将带来不同的轧辊冷却问题，应针对不同的轧机特性实行相应的冷却方法。因此，有关带钢温度及轧辊温度场的研究具有重要的现实意义。

工艺冷却和润滑是冷轧工艺的重要组成部分，它是带钢冷轧过程的关键技术，在轧制过程中起着重要的作用。冷轧过程中通过对轧辊和带钢的冷却



来控制带钢的板形，提高轧辊的寿命。同时轧辊温度过高还会使冷轧润滑剂失效，油膜破裂，影响冷轧过程的正常进行。冷轧过程中的润滑可以起到提高带钢表面质量、降低轧制功率消耗、延长轧辊寿命等作用。循环的乳化液不仅能带走摩擦热及变形热，而且还能冲走轧辊及带钢表面上的金属粉尘，使带钢表面具有较低的表面粗糙度，良好的润滑性和冷却性，是能否实现轧机高速轧制的关键。尽管国内冷轧生产已经具有非常大的产能，并可以稳定生产大部分的冷轧产品，但对轧制过程中的润滑问题一直都没有特别清晰的认识，对轧制润滑机理的研究更是处于一个较低的水平之上。随着国内冷轧产品的高端化，尤其是在轧制高端产品（如不锈钢板）时，冷轧润滑的作用日益显著，润滑已成为厂家提高产品质量、提高轧制速度的一个关键问题。工艺润滑涉及材料、机械、控制等多个领域，现场条件纷繁复杂，在实际生产中还有许多与润滑有关的问题没有得到很好的解决，为了从根本上解决这些问题就必须对润滑机理进行深入系统的研究。在实际冷轧生产过程中，润滑状态主要是处于混合润滑机制之下，因此，本研究拟在总结国内外冷轧润滑相关理论的基础上，考虑表面粗糙度和表面微凸体压平对润滑状态的影响，通过理论与实践相结合的方法，建立新的混合润滑数学模型，从理论和实践上比较完整地描述冷轧过程中的润滑行为，找到利用轧制实验来评价润滑油性能的指标，为冷轧工艺制度的制定和轧制油的选择与使用奠定理论基础。

目前我国企业在乳化液使用方面具有丰富的现场经验，而对于乳化液系统的设计和轧制油的使用基本上是按照国外现有的经验数据进行的，缺乏理论依据，要想真正掌握该技术，实现自主集成和自主创新，必须对现有乳化液系统设计和乳化液使用的每个环节进行深入的理论和实验研究工作，找出每个设计和使用环节的理论根据，只有这样才能赶超国外的先进水平。鉴于此，开展了乳化液系统设计和冷轧润滑机理方面的研究工作，给出乳化液系统设计的理论依据和解决方案，为新一代冷轧机润滑系统的设计奠定理论基础。

2. 研究进展与成果

本研究以东北大学与国内企业签订的合作研究项目为背景，主要围绕轧件和轧辊温度场计算、轧制过程油膜厚度和传热系数模型及轧制润滑机理三

个方面开展研究工作，通过大量的理论和实验室及现场的轧制试验研究，在每个方面都取得了良好的进展，具体情况如下：

(1) 轧件和轧辊温度场研究方面，对冷连轧过程中带钢和轧辊的温度变化行为等问题进行了深入系统的研究，研究取得了如下进展：

1) 对冷轧过程中变形区内变形热、摩擦热和热量分配模型进行了分析，采用传统的轧件变形功模型计算轧件的变形热，考虑到实际轧制时轧辊与轧件接触表面为混合摩擦状态的实际情况，采用预位移-滑动摩擦模型计算变形区摩擦热，并在考虑带钢和轧辊初始温度对热量分配影响的基础上，将摩擦热作为等效独立热源温度来考虑，建立了变形区内轧件与轧辊之间热量的分配模型，同时采用考虑弹性变形的轧制力计算模型，在综合考虑上述模型的基础上，建立了轧制变形区内带钢温度的计算模型，包括变形功模型、摩擦热模型、热量分配模型，给出计算变形区内轧件与轧辊的摩擦热和轧件塑性变形功的方法，进而计算出变形区内总的能量。

2) 建立了冷连轧过程的油膜厚度模型，并利用轧制力模型对摩擦系数进行反算，通过回归分析建立了变形区内油膜厚度与摩擦系数之间的定量关系模型，分析了乳化液浓度、黏度、流量、初始温度、轧制速度、轧辊的粗糙度等因素对冷轧过程中摩擦系数的影响规律，为轧制变形区内带钢温度的精确计算奠定了基础。

3) 结合冷连轧的工艺特点，考虑到传热系数的变化及机架间带钢冷却对带钢温度的影响，建立了一套新的适合冷连轧过程的带钢温度计算模型，为机架间带钢温度的精确计算奠定了基础。

4) 在 Visual Studio 6.0 环境下开发了冷轧带钢温度场模拟计算软件，利用所开发的带钢温度场计算软件，对冷轧过程中带钢温度的主要影响因素进行了分析，温度场计算结果为轧辊温度场的精确计算奠定了基础，也为冷轧过程中乳化液的合理使用提供了理论依据。

5) 利用所开发的带钢温度计算软件，对冷轧过程中带钢温度的主要影响因素进行了分析，温度计算结果为轧辊温度的精确计算奠定了基础，也为冷轧过程中乳化液的合理使用提供了理论依据。

6) 利用 ANSYS 商业软件这个平台，开发了轧辊温度场计算软件，在带钢温度计算的基础上，对各机架工作辊的温度场进行了计算，通过计算给出

合适的用于轧辊冷却的乳化液流量，在此基础上，给出了连轧机组中每个机架轧辊冷却流量及轧辊冷却分配模式，为喷射梁设计及喷嘴的选择提供了理论依据。

(2) 油膜厚度、传热系数模型研究方面，对冷连轧过程中变形区油膜厚度、传热行为等进行深入系统的研究，研究获得如下进展：

1) 在实验室进行了冷轧润滑实验，建立了入口区最小油膜厚度模型，利用实验研究结果建立了油膜厚度与摩擦系数关系模型，该模型将对摩擦系数的影响因素归结为油膜厚度的影响上来，可提高轧制力模型的预测精度。结合冷轧润滑实验研究结果对影响最小油膜厚度的主要因素进行了分析，给出了各主要因素（轧制油黏度、轧制速度、压下量等）对油膜厚度的影响规律，通过计算 Stribeck 曲线对轧制润滑状态进行了定性分析，为冷轧润滑机理研究和新型油品的开发提供了理论依据。

2) 研究了冷轧变形区内热阻的成因及其变化规律，在国内外研究的基础上，对轧制变形区内热阻的主要影响因素（如接触面粗糙度、接触压力、润滑油膜等）进行了分析和研究，建立了变形区内轧件与轧辊接触的热阻模型，给出了较精确的传热系数，提高了轧辊温度场的计算精度。

3) 对乳化液的喷射距离、喷射角度、喷射压力、水流密度、乳化液温度等对传热系数的影响规律进行了研究，给出了乳化液的热交换能力计算模型，为冷轧带钢和轧辊温度的计算提供了条件，为每个机架喷射梁的设计与流量的精确控制奠定了基础。

(3) 轧制润滑机理模型研究方面，紧密结合生产实际，在理论上深入系统地研究了冷轧润滑机制，建立了混合润滑数学模型，并根据模型实现了数值模拟计算，利用实验室轧制实验研究了不同轧制条件下润滑状态的变化，经过实验室轧制实验的验证，理论模型具有较好的精度。本研究得到的主要结论如下：

1) 在考虑带钢和轧辊表面形貌的基础上，建立了整个轧制变形区域的混合润滑数学模型，采用 C++ 语言开发了模拟计算软件，分析了轧制变形区内单位轧制压力、油膜压力、接触比及油膜厚度等变量的变化情况。并利用实验室冷轧实验研究了轧制工艺对润滑状态的影响，实验结果验证了理论计算结果的有效性，理论结果从取值区间和趋势上都和实验结果十分吻合。

2) 给出了乳化液本身的性质及轧制工艺条件等对轧制过程中油膜形成及润滑机制的影响规律，为轧制油的合理使用提供了技术支持。

3) 建立了在实验室小轧机上进行冷轧润滑油的评价方法和指标体系，为轧制油的评价和进一步开发奠定了基础。

综上所述，项目取得的主要成果如下：

(1) 开发了冷轧带钢温度和轧辊温度场计算软件，据此给出了轧辊初始温度、乳化液温度、冷却强度、轧制速度以及道次变形量等对轧辊温度场的影响规律，通过对所开发的软件进行实验验证表明，带钢和轧辊温度计算结果与现场实测值吻合较好。

(2) 开发了考虑多因素影响的轧件与轧辊、乳化液与轧辊、辊间接触等的传热系数模型，模型用于带钢和轧辊温度场的计算，提高了温度的计算精度，同时开发了冷连轧过程油膜厚度与摩擦系数关系的数学模型，通过对变形区内油膜厚度与摩擦系数之间关系的定量研究，建立了新的考虑轧制速度、润滑油性能、乳化液流量等因素在内的摩擦系数模型，为轧制变形区内带钢温度的精确计算奠定了基础。

(3) 利用所开发的轧辊温度场有限元分析软件，通过大量的模拟计算，建立了轧辊热变形计算模型，根据能量守恒的原则，计算用于轧辊热平衡所需要的乳化液量，在此基础上，给出了连轧机组中每个机架轧辊冷却流量及轧辊冷却分配模式，为喷射梁设计及喷嘴的选择提供了理论依据。

(4) 对乳化液的喷射距离、喷射角度、喷射压力、水流密度、乳化液温度等对传热系数的影响规律进行了研究，给出了乳化液的热交换能力计算模型，为冷轧带钢和轧辊温度的计算提供了条件，为每个机架喷射梁的设计与流量的精确控制奠定了基础。

(5) 在考虑带钢和轧辊表面形貌的基础上，建立了整个轧制变形区域的混合润滑数学模型，开发了模拟计算软件，实现了冷轧过程中油膜厚度、油膜压力、轧制压力等的模拟分析，给出了乳化液本身的性质及轧制工艺条件等对轧制过程中油膜形成及润滑机制的影响规律，为轧制油的合理使用提供了技术支持。

(6) 建立了在实验室小轧机上进行冷轧润滑油评价的方法和指标体系，为轧制油的评价和进一步开发奠定了基础。



3. 论文与专利

论文:

(1) Jiang Zhenglian, Wang Kangjian, Zhang Xiaoming. Simulation of the strip temperature field for the tandem cold mill[C]. Proceedings of the 10th International Conference on Steel Rolling, Beijing China, 2010: 863 ~ 869.

(2) 王康健, 姜正连, 张晓明. 冷连轧机带钢温度场的模拟[C]. 2010 年全国冷轧板带生产技术交流会, 威海 中国, 2010: 38 ~ 43.

(3) Jiang Zhengyi, Wang Shujun, Wei Dongbin, Li Hejie, Xie Haibo, Wang Xiaodong, Zhang Xiaoming. Study on surface roughness muring metal manufacturing process[C]. 14th International Symposium on Advances in Abrasive Technology, Stuttgart Germany, 2011: 731 ~ 736.

(4) Liang Bo, Wang Guodong, Zhang Baoyan, Zhang Xiaoming. Corrosion resistance of Al-Cu-Fe alloy powder coated with silica using an ultrasound-assisted sol-gel method[J]. Corrosion Science. 2013, 73: 292 ~ 299.

(5) Liang Bo, Zhang Baoyan, Wang Guodong, Li Di, Zhang Xiaoming. Application of ultrasound irradiation on sol-gel technique for corrosion protection of Al65Cu20Fe15 alloy powder[J]. Applied Surface Science, 2013, 285: 249 ~ 257.

(6) Li Hejie, Jiang Zhengyi, Wei Dongbin, Zhang Xiaoming. Micro texture based analysis of surface asperity flattening behavior of annealed aluminum alloy in uniaxial planar compression[J]. Tribology International, 2013, 66: 282 ~ 288.

专利:

(1) 王国栋, 梁博, 张晓明, 张宝砚, 李迪. 含改性纳米铜的冷轧薄板轧制乳化油及其制备方法, 2012, 中国, ZL201210306149.3.

(2) 王国栋, 张宝砚, 梁博, 张晓明. 一种含有机硼酸酯的纯水基冷轧薄板轧制液及其制备方法, 2012, 中国, ZL201210299683.6.

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 RAL 国家重点实验室
张晓明	教授	东北大学 RAL 国家重点实验室
樊中免	博士生	东北大学 RAL 国家重点实验室
梁 博	博士生	东北大学 RAL 国家重点实验室
涂艳峰	硕士生	东北大学 RAL 国家重点实验室
周桂岭	硕士生	东北大学 RAL 国家重点实验室
李秀玲	硕士生	东北大学 RAL 国家重点实验室
吕永鸣	硕士生	东北大学 RAL 国家重点实验室

5. 报告执笔人

张晓明、樊中免。

6. 致谢

本研究报告是在东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室王国栋院士的悉心指导下完成的，在项目的提出和项目实施的整个过程中王院士都给予了无私的帮助，在这里表示衷心的感谢！

本研究得到了国家自然科学基金委和宝山钢铁股份有限公司的联合资助，在此表示诚挚的谢意！

最后感谢东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室全体员工为本研究的顺利实施提供的大量帮助！

目 录

摘要	1
1 绪论	3
1.1 冷轧过程中带钢和轧辊温度场的研究概况	3
1.2 冷轧润滑机理的研究现状	10
1.3 本研究的背景、目的和意义	23
1.4 本研究的主要内容	24
2 冷轧带钢温度模拟计算	26
2.1 冷轧变形区内带钢温度计算模型	26
2.1.1 轧件的变形功模型	26
2.1.2 接触表面的摩擦热模型	27
2.1.3 轧件与轧辊之间的热量分配	37
2.1.4 冷轧过程变形区内带钢温度计算	38
2.1.5 冷轧过程机架间带钢温度计算	39
2.2 摩擦系数模型的建立	42
2.2.1 冷轧过程中摩擦系数的计算	42
2.2.2 冷轧过程中油膜厚度模型	43
2.2.3 摩擦系数与油膜厚度关系模型的建立	55
3 冷轧轧辊温度场模拟	56
3.1 温度场、热应力有限元模拟理论	57
3.1.1 微元体内的能量守恒	57
3.1.2 导热微分方程	57

3.1.3	初始条件和边界条件	59
3.1.4	有限元计算公式	60
3.2	传热系数模型	62
3.2.1	轧件与轧辊接触热传导	63
3.2.2	乳化液与轧辊的热传导	66
3.2.3	空气与轧辊的热传导	69
3.2.4	辊间接触热传导	70
3.3	轧辊温度场模拟模型的建立及边界条件处理	71
3.3.1	模型的建立及网格的划分	71
3.3.2	初始条件和边界条件处理	72
3.3.3	模拟条件	77
3.4	模拟结果分析	79
3.4.1	轧辊初始温度对轧辊温度场的影响	79
3.4.2	轧制变形程度对轧辊温度场的影响	80
4	冷轧润滑实验研究及模拟结果验证	81
4.1	冷轧润滑实验研究平台的建立	81
4.2	冷轧带钢与轧辊温度的对比实验	84
4.3	油膜厚度与摩擦系数关系的对比实验	87
4.3.1	冷轧实验原料及轧制工艺规程	87
4.3.2	油膜厚度的影响因素分析	87
4.3.3	摩擦系数与油膜厚度的关系	90
4.3.4	润滑状态的判定	92
4.4	现场轧制实验结果分析	93
4.4.1	带钢温度场计算值与实测值的对比分析	93
4.4.2	轧辊温度场计算值与实测值的对比分析	94
4.5	乳化液流量计算和轧辊冷却分配模式确定	96
4.5.1	乳化液流量计算	96
4.5.2	轧辊冷却分配模式的确定	99

5 混合润滑机理研究	100
5.1 冷轧润滑基本方程	100
5.1.1 表面特征的表征	100
5.1.2 油膜厚度计算	103
5.1.3 油膜压力计算	106
5.1.4 轧制力计算	107
5.2 混合润滑数学模型	111
5.2.1 入口区分析	111
5.2.2 变形区分析	114
5.2.3 不同轧制速度计算处理方法	115
5.3 模拟软件开发及结果分析	117
5.3.1 模拟软件开发	117
5.3.2 模拟结果分析	117
6 结论	122
参考文献	124

摘 要

工艺冷却和润滑是冷轧工艺的重要组成部分，它是带钢冷轧过程的关键技术，在轧制过程中起着重要的作用。目前我国企业在冷轧润滑方面积累了丰富的现场经验，而对于冷轧润滑系统设计和轧制油的使用基本上是按照国外公司提出的要求来进行的，没有掌握其核心内容，缺乏理论依据。要想真正掌握该技术，实现自主集成和自主创新，必须对现有冷轧润滑系统设计和乳化液使用的每个环节进行深入的理论和实验研究工作，找出每个设计和使用环节的理论根据，只有这样才能赶超国外的先进水平。鉴于此，轧制技术及连轧自动化国家重点实验室（东北大学）开展了冷轧润滑系统设计和润滑机理方面的研究工作，给出冷轧润滑系统设计的理论依据和解决方案，为新一代冷轧机设计奠定理论基础。

本研究取得的主要结果可概括为如下几个方面：

（1）开发了冷轧带钢温度和轧辊温度场计算软件，据此给出了轧辊初始温度、乳化液温度、冷却强度、轧制速度以及道次变形量等对轧辊温度场的影响规律，通过对所开发的软件进行实验验证表明，带钢和轧辊温度计算结果与现场实测值吻合较好。

（2）开发了考虑多因素影响的轧件与轧辊、乳化液与轧辊、辊间接触等的传热系数模型，模型用于带钢和轧辊温度场的计算，提高了温度的计算精度，通过对变形区内油膜厚度与摩擦系数之间关系的定量研究，建立了新的考虑轧制速度、润滑油性能、乳化液流量等因素在内的摩擦系数模型，为轧制变形区内带钢温度的精确计算奠定了基础。

（3）利用所开发的轧辊温度场有限元分析软件，建立了准确的轧辊热变形计算模型，根据能量守恒的原则，计算用于轧辊热平衡所需要的乳化液量，在此基础上，给出了连轧机组中每个机架轧辊冷却流量及轧辊冷却分配模式，为喷射梁设计及喷嘴的选择提供了理论依据。

(4) 对乳化液的喷射距离、喷射角度、喷射压力、水流密度、乳化液温度等对传热系数的影响规律进行了研究,给出了乳化液的热交换能力计算模型,为冷轧带钢和轧辊温度的计算提供了条件,为每个机架喷射梁的设计与流量的精确控制奠定了基础。

(5) 在考虑带钢和轧辊表面形貌的基础上,建立了整个轧制变形区域的混合润滑数学模型,开发了模拟计算软件,实现了冷轧过程中油膜厚度、油膜压力、轧制压力等的模拟分析,给出了乳化液本身的性质及轧制工艺条件等对轧制过程中油膜形成及润滑机制的影响规律,为轧制油的合理使用提供了技术支持。

(6) 建立了在实验室小轧机上进行冷轧润滑油评价的方法和指标体系,为轧制油的评价和进一步开发奠定了基础。

关键词: 冷轧; 工艺润滑; 温度场; 油膜厚度; 混合润滑

1 绪 论

1.1 冷轧过程中带钢和轧辊温度场的研究概况

工艺冷却和润滑是冷轧带钢生产工艺的主要特点之一,它是带钢冷轧过程的关键技术,在轧制过程中起着十分重要的作用。工艺冷却和润滑技术决定了冷轧带钢和轧辊温度场的状况,因此,对带钢和轧辊温度场的研究和有效控制是冷轧润滑系统设计的理论基础,深受国内外学者的高度重视,而带钢温度的模拟和计算是轧辊热变形研究的基础和前提,它是轧辊热凸度控制的主要依据,也就是说在轧辊热变形的研究中势必包含带钢温度计算的内容,因此,这里将对轧辊与带钢温度的研究概况一并进行介绍。

现代高速冷轧机设备的装机容量普遍达到 $3 \times 10^4 \text{ kW}$ 以上,在轧制过程中,折合带钢的功率输入大约在 200 kW 以上,这部分输入功率主要转变成变形热,这些热量会使带钢和轧辊温度显著提高。带钢及轧辊温度的升高会显著影响轧制过程、轧制条件以及带钢的力学性能^[1]。国内外很多学者都非常关注由于这些热能给轧制过程的冷却带来的问题。

在冷轧过程中,带钢温度是影响热能流向的重要因素,不但直接影响轧辊热变形计算精度,而且也是轧辊热凸度控制的主要依据。由于没有适合的数学模型,早期对带钢和轧辊的热行为分析主要是靠经验和实测的方法。对冷轧过程中带钢热行为的理论分析始于 1960 年,Johnson 和 Kudo 采用上界法对带钢的温度进行了预测^[2]。1961 年 Grauer 预测了铝箔轧制过程中带钢的温度^[3]。1978 年 Lahoti^[4]对带钢温度做了最初的分析,但是其分析仅限于咬入区。1984 年 Tseng^[5]开发了有限差分模型,对轧辊与带钢的温度分布进行了分析。该模型可以很好地用于高速轧制,但其分析只局限于咬入区部分,其模型没有考虑辊面由于对流换热造成的热损失,而且假定带钢与轧辊接触区表面温度是相同的,同时还假设带钢与轧辊之间的摩擦热是恒定的,这与实

际不符。1990 年 Tseng^[6] 提出了将轧辊与带钢进行耦合的分析模型, 在该模型中带钢的温度按分离变量法求解, 而且轧辊与带钢接触界面上的两个热传输模型具有兼容性, 这样有利于研究界面几何形状、工艺条件的变化对热行为的影响, 但是它的不足在于计算精度不高。1998 年 Chang^[7] 开发了一个塑性变形与热效应关联的简单模型。该模型通过有限差分法与解析解的组合来减少计算时间, 但是对于计算整个轧辊或板带区域时会很复杂。2006 年 Tieu^[8] 提出一个处理接触热传导方式的热模型, 分析了混合摩擦润滑条件下各工艺参数对温度场的影响情况, 但是在计算摩擦热时, 带钢速度采用的是整个变形区内的平均速度, 这就影响了摩擦热的计算精度。

影响辊缝形状的主要因素有轧辊的弹性变形、轧辊的热变形和轧辊的磨损辊型等。板形的好坏主要取决于轧制时的辊缝形状, 板形的精确预报既依赖于轧辊弹性变形的计算精度, 也依赖于轧辊热变形的计算精度, 因此, 在板形理论中, 轧辊的热变形理论和弹性变形理论居于同等重要的地位。要想很好地解决板形问题, 精确求解轧辊的温度场对分析轧机辊系变形具有重要的指导意义。但是, 目前关于冷轧轧辊温度场的研究较少, 而对冷轧轧辊热凸度控制的研究则较多^[9,10]。

在一段时期内, 对冷轧板形控制与预报的精度主要取决于轧辊与机架弹性变形的计算精度。理论和实践研究表明, 常规的液压弯辊技术对复合波、局部波等复杂的板形缺陷控制能力十分有限, 而通过采取分段精细冷却方法控制轧辊的热辊型却是解决这类板形缺陷的有效手段, 因此, 工作辊的热变形在板形控制中具有十分重要的作用。由于辊型在线检测技术的限制, 很难在线准确测量轧辊热凸度, 往往通过轧辊温度场的计算来预报和控制轧辊热变形。在实际轧制生产过程中, 由于轧辊所受热载荷分布的不均匀性, 轧辊的温度场分布与热变形是不均匀的。影响轧辊热变形的因素很多, 边界条件复杂, 因此, 求解工作辊的热变形一直是板形研究和控制领域的薄弱环节。

热辊型是轧制过程中不可避免的问题。轧辊在轧制过程中由于磨损、热胀等原因, 辊廓形状会发生一定程度的不规则变化, 给带钢板形带来不良影响, 因此, 板形的计算精度也依赖于轧辊热变形和磨损辊型的计算精度^[11~13]。

有关轧辊热行为的研究始于 20 世纪 60 年代初。早期研究主要集中于热