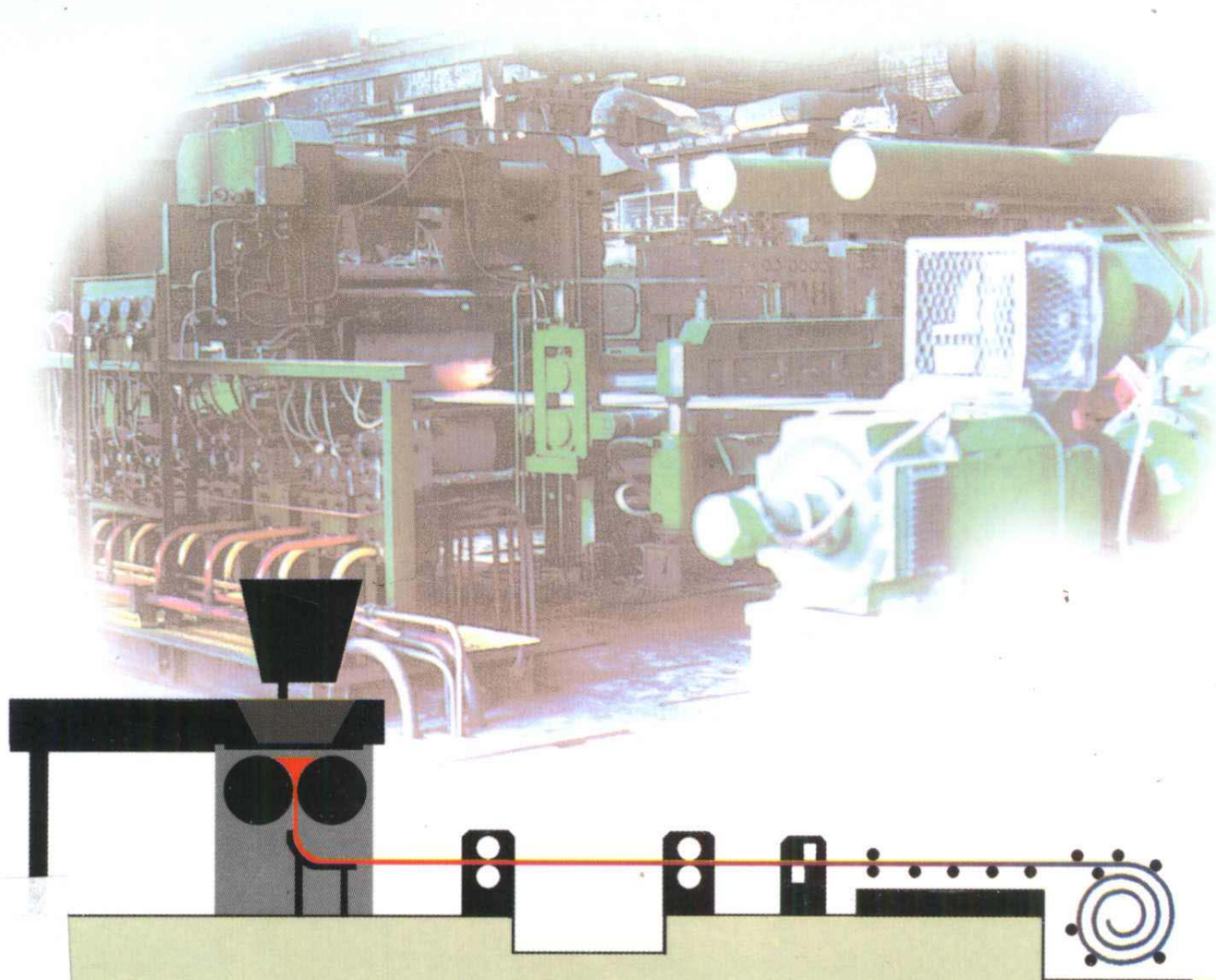


# 板带铸轧理论与技术

孙斌煜 等著



冶金工业出版社

# 板带铸轧理论与技术

孙斌煜 等著

北 京  
冶金工业出版社  
2002

## 内 容 简 介

本书分上下两篇,共 10 章。上篇铝带铸轧部分包括 4 章,系统地用黏性流体力学的观点和流函数方法描述了双辊式铸轧机力能参数计算,从热力学和几何力学的角度介绍了工艺参数计算等内容,全面地介绍了双辊式铸轧机设备的结构原理和铸轧生产工艺过程。下篇带钢铸轧部分包括 6 章,主要运用有限差分法对双辊式薄带铸轧过程的流场和温度场及二者的耦合结果进行了分析,并讨论了工艺参数对结果的影响。

本书可供从事铸轧理论研究和铸轧生产技术工作的工程技术人员、科研人员阅读,也可作为大专院校有关专业本科生、研究生的教学参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

板带铸轧理论与技术/孙斌煜等著. —北京:冶金工业出版社,2002.10

ISBN 7-5024-3096-2

I. 板… II. 孙… III. ①板材轧制 ②带材轧制  
IV. TG335.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 068736 号

出版人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑 李培禄 美术编辑 王耀忠 责任校对 栾雅谦 责任印制 牛晓波

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2002 年 10 月第 1 版,2002 年 10 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32;10.375 印张;275 千字;315 页; 1-3000 册

28.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

# 前 言

板带铸轧技术的发展至今已有 150 多年的历史。早在 1846 年,英国的贝塞麦(Bessemer)就提出,从两个旋转辊上方浇铸金属液,通过一对内部具有循环冷却作用的铸轧辊辊缝下边引出铸轧带坯,但限于技术水平和工艺技术条件而未获成功。在这以后近 100 年里,该项技术一直不为人们所重视,直到 19 世纪 30 年代,人们重新对该项技术进行了研究,并首先在有色金属领域取得了成功,此后在黑色金属领域里也取得了阶段性进展。该项技术具有独特的优越性,得到了世界各国的广泛关注和研究,并逐步取得了替代传统生产法的稳定地位。

板带铸轧法与传统生产模式相比具有很多优点:由于铸轧工艺在一台设备上同时完成铸造与轧制的两道工序,比传统生产法省去了铸锭加热、开坯及热轧等多道工序,同时减少了废料重熔,节省了大量电能;省去了铸锭铣面,减少了热轧后切头切尾,成材率得到有效提高;设备简单集中,投资少,占地面积小,建造速度快,生产成本低;可连续稳定地进行生产,简化了生产工艺,缩短了生产周期,减少了生产用人,使生产效率大大提高,且便于实现自动化。

板带铸轧技术的飞速发展,推动了板带铸轧理论研究的发展,但是,其目前的理论研究远滞后于生产技术。作者在铸轧理论研究方面做了长期的、大量的工作。为了满足广大工程技术人员和科技工作者提高铸轧理论研究水平的需要,作者将近些年来的理论研究成果和试验研究成果编撰成书,供同行参考。

板带铸轧过程是在铸轧区窄小的空间里,仅数秒钟时间就完成浇铸、凝固、轧制变形、出坯这一系列复杂的流变和物理化学过

程,使得对铸轧过程基本理论研究变得十分困难。铸轧理论基础应当包括铸轧区铸轧过程的结晶凝固规律、变形规律,铸轧区的流变特性,铸轧区温度场、速度场和应力场的分布,铸轧带坯和铸轧辊之间黏着力和摩擦力的分布,铸轧坯在半凝固到凝固状态下的单位压力分布,平均单位压力的确定,铸轧力和铸轧力矩的确定,铸轧区长度的确定等。它涉及到传热学、黏性流体力学、摩擦学和轧制塑性变形理论等多种学科。本书上篇主要对有色金属铸轧特别是铝带铸轧近期最新发展、从黏性流体出发的力能参数的计算方法、主要工艺参数的确定、目前铸轧设备的基本结构和主要部件进行了介绍,对于有色金属铸轧带坯的理论研究和生产实际具有一定的参考价值。下篇主要介绍了双辊式薄带铸轧的工艺过程及其设备,并介绍了其电气控制过程,同时运用有限差分法对其流场及温度场以及二者的耦合情况进行了分析和讨论,并考察了工艺参数对结果的影响。

在本书出版之时,感谢本书引用的参考文献的作者们,感谢山西省自然科学基金委员会的支持,感谢太原重型机械学院领导和有关部门的帮助。同时,对支持本书出版的所有专家和编辑表示由衷的谢意。

本书上篇由孙斌煜教授执笔,下篇第5章至第9章由杨建伟执笔,第10章由杜艳平执笔,全书由孙斌煜教授审定。张洪教授通读了全书并提出了许多宝贵意见。在本书的试验和理论研究中得到了李国桢教授、梁爱生教授、郭希学教授、史荣教授、张小平教授、米耀明博士、李志强博士、同育全高工、申宝成工程师、李蔚林师傅、包仁义师傅和太原铝材厂的刘石安高工、逯锁柱厂长的大力支持和帮助,在此对他们表示衷心的感谢。

限于作者水平,新观点和新理论难免有一些缺陷,书中疏漏和不当之处恳请广大读者和同行批评指正。

作者

2002年7月

# 目 录

## 上篇 铝带铸轧

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 1 绪论 .....                 | 3  |
| 1.1 板带铸轧理论的研究概况 .....      | 3  |
| 1.1.1 铸轧区长度计算研究状况 .....    | 4  |
| 1.1.2 铸轧变形区力能参数的研究状况 ..... | 7  |
| 1.2 板带铸轧技术的发展概况 .....      | 11 |
| 1.2.1 国外简况 .....           | 11 |
| 1.2.2 国内简况 .....           | 16 |
| 1.3 板带铸轧的技术特点 .....        | 17 |
| 1.4 板带铸轧设备的分类 .....        | 18 |
| 2 板带铸轧理论 .....             | 19 |
| 2.1 铸轧区长度 .....            | 19 |
| 2.1.1 冷凝区长度的计算 .....       | 20 |
| 2.1.2 结晶区长度的计算 .....       | 22 |
| 2.1.3 铸轧变形区长度的计算 .....     | 23 |
| 2.1.4 铸轧区总长度的计算 .....      | 24 |
| 2.1.5 理论值与实测值的比较 .....     | 25 |
| 2.2 铸轧带坯的结晶及凝固时间 .....     | 26 |
| 2.2.1 铸轧带坯的结晶 .....        | 26 |
| 2.2.2 铸轧带坯的凝固时间 .....      | 28 |
| 2.3 铸轧辊表面温度 .....          | 29 |
| 2.3.1 铸轧辊表面温度计算 .....      | 29 |

|       |               |     |
|-------|---------------|-----|
| 2.3.2 | 铸轧辊表面温度分布     | 29  |
| 2.4   | 铸轧过程力能参数的理论解析 | 31  |
| 2.4.1 | 理论研究方法的选择     | 31  |
| 2.4.2 | 传统算法          | 38  |
| 2.4.3 | 现代算法          | 40  |
| 2.4.4 | 铸轧力矩计算公式      | 80  |
| 3     | 双辊式板带铸轧设备     | 92  |
| 3.1   | 概述            | 92  |
| 3.1.1 | 双辊式板带铸轧设备的类型  | 92  |
| 3.1.2 | 板带铸轧生产的工艺流程   | 94  |
| 3.1.3 | 板带铸轧机组基本组成    | 96  |
| 3.2   | 熔炼系统          | 96  |
| 3.2.1 | 熔炼炉           | 96  |
| 3.2.2 | 静置炉           | 99  |
| 3.2.3 | 熔炼炉和静置炉的布置方式  | 100 |
| 3.3   | 浇铸系统          | 101 |
| 3.3.1 | 流槽            | 101 |
| 3.3.2 | 细化丝添加装置       | 101 |
| 3.3.3 | 前箱和金属液面高度稳定器  | 102 |
| 3.3.4 | 供料嘴装置         | 104 |
| 3.3.5 | 浇铸系统的组成       | 105 |
| 3.4   | 板带铸轧机列        | 107 |
| 3.4.1 | 联合传动方式        | 107 |
| 3.4.2 | 单独传动方式        | 108 |
| 3.4.3 | 板带铸轧机座        | 110 |
| 3.4.4 | 连接轴           | 118 |
| 3.5   | 牵引卷取系统        | 119 |
| 3.5.1 | 牵引机           | 119 |
| 3.5.2 | 剪切机           | 121 |

|       |                                                                      |     |
|-------|----------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.5.3 | 多辊矫直机 .....                                                          | 122 |
| 3.5.4 | 卷取机 .....                                                            | 124 |
| 3.6   | $\phi 1050\text{mm} \times 1600\text{mm}$ 水平双驱动超薄铝带<br>快速铸轧机简介 ..... | 125 |
| 4     | 板带铸轧工艺 .....                                                         | 127 |
| 4.1   | 立板 .....                                                             | 127 |
| 4.2   | 板带连续铸轧过程的工艺参数 .....                                                  | 129 |
| 4.2.1 | 温度对铸轧速度的影响 .....                                                     | 129 |
| 4.2.2 | 铸轧区长度 .....                                                          | 130 |
| 4.2.3 | 前箱液面高度 .....                                                         | 131 |
| 4.2.4 | 冷却强度 .....                                                           | 131 |
| 4.2.5 | 铸轧辊冷却水消耗量的计算 .....                                                   | 132 |
| 4.3   | 连续铸轧过程的缺陷及解决办法 .....                                                 | 133 |
| 4.3.1 | 热带 .....                                                             | 134 |
| 4.3.2 | 裂纹 .....                                                             | 134 |
| 4.3.3 | 孔洞 .....                                                             | 136 |
| 4.4   | 板带连续铸轧生产新技术 .....                                                    | 137 |
| 4.4.1 | 煤气燃烧润滑 .....                                                         | 137 |
| 4.4.2 | 成形钛酸铝溜槽 .....                                                        | 137 |
| 4.4.3 | 整体浇注耐火材料在熔铝炉上的应用 .....                                               | 137 |
| 4.4.4 | 铜包钢双金属复合材终形铸轧方法 .....                                                | 140 |
| 4.4.5 | 铝合金板带超常铸轧技术与设备 .....                                                 | 140 |
| 4.4.6 | 板带电磁铸轧技术 .....                                                       | 141 |
| 4.4.7 | 电磁铸轧生产毛化板箔材 .....                                                    | 142 |
| 4.4.8 | 铝铜合金超薄带坯的高速铸轧技术 .....                                                | 142 |

## 下篇 带钢铸轧

|     |                 |     |
|-----|-----------------|-----|
| 5   | 带钢铸轧的发展概况 ..... | 145 |
| 5.1 | 带钢铸轧的发展简史 ..... | 145 |

|                                            |     |
|--------------------------------------------|-----|
| 5.2 带钢铸轧机的类型 .....                         | 147 |
| 5.2.1 双辊式 .....                            | 147 |
| 5.2.2 单辊式 .....                            | 151 |
| 5.2.3 轮带式 .....                            | 154 |
| 5.2.4 内环式 .....                            | 154 |
| 5.2.5 双辊铸轧式 .....                          | 155 |
| 5.2.6 双流双辊式 .....                          | 156 |
| 5.2.7 逆铸式 .....                            | 158 |
| 5.2.8 带式铸轧机 .....                          | 160 |
| 5.3 主要带钢铸轧机简介 .....                        | 160 |
| 5.3.1 新日铁和三菱公司开发的双辊式带钢铸轧机 .....            | 160 |
| 5.3.2 蒂森公司和于齐诺尔-萨西洛尔公司共同<br>开发的带钢铸轧机 ..... | 162 |
| 5.3.3 欧洲不锈钢带钢铸轧技术的最新发展 .....               | 163 |
| 5.3.4 BHP 公司的带钢铸轧机 .....                   | 166 |
| 5.3.5 意大利 AST 公司的带钢铸轧机 .....               | 166 |
| 5.3.6 韩国浦项公司和英国戴维公司共同开发的<br>带钢铸轧机 .....    | 168 |
| 5.3.7 英国钢铁公司的带钢铸轧机 .....                   | 169 |
| 5.3.8 美奥联合开发的带钢铸轧机 .....                   | 170 |
| 5.3.9 法国的带钢铸轧机 .....                       | 170 |
| 5.3.10 上海钢铁研究所研制的带钢铸轧机 .....               | 171 |
| 6 带钢铸轧工艺和设备 .....                          | 174 |
| 6.1 带钢铸轧的工艺流程 .....                        | 174 |
| 6.2 双辊式带钢铸轧工艺参数 .....                      | 175 |
| 6.2.1 铸轧辊辊径 .....                          | 175 |
| 6.2.2 凝固系数 .....                           | 175 |
| 6.2.3 铸轧力 .....                            | 177 |
| 6.2.4 主电机功率的确定 .....                       | 177 |

|       |                                        |     |
|-------|----------------------------------------|-----|
| 6.2.5 | 铸速的计算 .....                            | 178 |
| 6.2.6 | 影响铸速的因素 .....                          | 181 |
| 6.3   | 双辊式带钢铸轧机的设备组成 .....                    | 183 |
| 7     | 带钢铸轧的关键技术 .....                        | 184 |
| 7.1   | 钢水的浇入 .....                            | 184 |
| 7.1.1 | 带水平孔的水口流动方式 .....                      | 184 |
| 7.1.2 | 由不同材质构成的层状结构水口 .....                   | 184 |
| 7.1.3 | 美国内陆钢公司开发的单孔进料系统 .....                 | 186 |
| 7.2   | 铸轧辊的侧封板 .....                          | 187 |
| 7.2.1 | 侧封装置的组成和受力分析 .....                     | 187 |
| 7.2.2 | 侧封对铸带质量的影响 .....                       | 188 |
| 7.2.3 | 新型侧封板耐火材料的研制 .....                     | 189 |
| 7.2.4 | 上海钢铁研究所 3 号带钢铸轧机侧封的<br>试验情况 .....      | 190 |
| 7.2.5 | 意大利 Terni 厂的侧封板 .....                  | 193 |
| 7.2.6 | 氮化硼复合材料 .....                          | 194 |
| 7.2.7 | 电磁侧封 .....                             | 195 |
| 7.3   | 铸轧辊 .....                              | 195 |
| 7.3.1 | 铸轧辊是带钢铸轧机的关键部件 .....                   | 195 |
| 7.3.2 | 铸轧辊的设计 .....                           | 196 |
| 7.4   | 带钢质量 .....                             | 205 |
| 7.4.1 | 上海钢铁研究所的铸带质量 .....                     | 205 |
| 7.4.2 | 日本三菱重工和日本钢公司联合开发的<br>奥氏体不锈钢铸带的质量 ..... | 207 |
| 7.4.3 | 新日铁提高铸带表面质量的专利 .....                   | 209 |
| 7.4.4 | 带钢连铸缺陷和凝固组织形成机理 .....                  | 210 |
| 8     | 铸轧过程熔池内三维流场数值模拟 .....                  | 222 |
| 8.1   | 数学模拟方法的作用及其发展 .....                    | 222 |

|          |                                    |            |
|----------|------------------------------------|------------|
| 8.1.1    | 数学模拟方法的作用 .....                    | 222        |
| 8.1.2    | 数学模拟方法的发展 .....                    | 223        |
| 8.2      | 铸轧过程熔池内三维流动数学模型的建立 .....           | 224        |
| 8.2.1    | 熔池内湍流流动的数学描述 .....                 | 224        |
| 8.2.2    | 湍流模型 .....                         | 228        |
| 8.2.3    | 壁函数 .....                          | 231        |
| 8.2.4    | 控制方程 .....                         | 233        |
| 8.2.5    | 计算区域及网格划分 .....                    | 234        |
| 8.2.6    | 基本方程离散化 .....                      | 235        |
| 8.2.7    | 初始条件和边界条件 .....                    | 240        |
| 8.2.8    | 基本算法 .....                         | 241        |
| 8.3      | 计算程序开发 .....                       | 243        |
| 8.3.1    | 计算程序框图 .....                       | 243        |
| 8.3.2    | 计算程序中的变量说明 .....                   | 243        |
| 8.3.3    | 子程序 .....                          | 245        |
| 8.4      | 计算结果分析 .....                       | 265        |
| 8.4.1    | 熔池内流场基本情况分析 .....                  | 266        |
| 8.4.2    | 水口倾角对流场的影响 .....                   | 267        |
| 8.4.3    | 拉速对流场的影响 .....                     | 268        |
| <b>9</b> | <b>铸轧过程熔池内三维流场与温度场耦合数值模拟 .....</b> | <b>270</b> |
| 9.1      | 熔池内凝固传热数学模型的建立 .....               | 270        |
| 9.1.1    | 前人工作总结 .....                       | 270        |
| 9.1.2    | 基本假设 .....                         | 273        |
| 9.1.3    | 控制方程 .....                         | 274        |
| 9.1.4    | 计算区域与网格划分 .....                    | 274        |
| 9.1.5    | 初始条件与边界条件 .....                    | 274        |
| 9.1.6    | 源项处理 .....                         | 276        |
| 9.1.7    | 确定有效导热系数 $\lambda_{yx}$ .....      | 277        |
| 9.1.8    | 方程的离散求解 .....                      | 277        |

|        |                                                |     |
|--------|------------------------------------------------|-----|
| 9.2    | 建立耦合模型的必要性 .....                               | 278 |
| 9.3    | 带钢铸轧流动与传热耦合数学模型 .....                          | 279 |
| 9.3.1  | 前人工作总结 .....                                   | 279 |
| 9.3.2  | 基本假设 .....                                     | 279 |
| 9.3.3  | 控制方程 .....                                     | 280 |
| 9.3.4  | 源项处理 .....                                     | 280 |
| 9.3.5  | 流动边界条件 .....                                   | 281 |
| 9.3.6  | 欠松弛的应用 .....                                   | 282 |
| 9.3.7  | 方程求解 .....                                     | 282 |
| 9.4    | 耦合结果分析 .....                                   | 284 |
| 9.4.1  | 过热度的影响 .....                                   | 284 |
| 9.4.2  | 铸轧速度对温度场的影响 .....                              | 285 |
| 10     | 带钢铸轧过程自动化与控制 .....                             | 287 |
| 10.1   | 带钢铸轧过程自动化的意义和特点 .....                          | 287 |
| 10.2   | 双辊带钢连续铸轧设备的电气控制技术 .....                        | 288 |
| 10.2.1 | 工艺对电气控制系统的要求 .....                             | 288 |
| 10.2.2 | 电气系统设计要求 .....                                 | 288 |
| 10.2.3 | 电器控制系统的设计 .....                                | 290 |
| 10.2.4 | 组成电气系统的主要设备 .....                              | 290 |
| 10.2.5 | 电气控制系统及各主要环节工作原理 .....                         | 291 |
| 10.2.6 | 电气设备操作、维修 .....                                | 297 |
| 10.3   | 计算机在带钢铸轧中的应用 .....                             | 299 |
| 10.3.1 | 系统的组成和功能 .....                                 | 299 |
| 10.3.2 | 软件及其设计 .....                                   | 302 |
| 10.4   | 上海钢铁研究所 3 号等径双辊带钢连续铸轧机<br>的电气、仪表及计算机控制系统 ..... | 303 |
| 10.5   | 日本三菱重工和日本钢公司联合开发的带钢<br>铸轧机的控制系统 .....          | 304 |
| 10.5.1 | 控制系统结构 .....                                   | 305 |

|           |                           |     |
|-----------|---------------------------|-----|
| 10.5.2    | 液面控制·····                 | 306 |
| 10.5.3    | 自动厚度控制系统·····             | 306 |
| 10.6      | 带钢连续铸轧工艺过程控制的依据——传感器····· | 308 |
| 10.6.1    | 质量控制传感器·····              | 309 |
| 10.6.2    | 钢水夹杂物传感器·····             | 309 |
| 10.6.3    | 钢水化学成分传感器·····            | 309 |
| 10.6.4    | 金属带钢缺陷传感器·····            | 310 |
| 10.6.5    | 带钢厚度传感器·····              | 311 |
| 10.6.6    | 工艺过程控制传感器·····            | 311 |
| 参考文献····· |                           | 312 |

上 篇

铝 带 铸 轧



# 1 绪 论

随着科学技术的不断进步,板带成形新技术及新工艺得到了飞速的发展。就板带铸轧新技术而言,由于其所具有的独特的优越性,得到了世界各国的广泛关注和研究,并逐步取得了替代铸锭热轧法的稳定地位。经过多年的技术攻关,产品质量已经达到或超过原有方法的水平。美国、英国、德国、法国、意大利、奥地利、俄罗斯、日本和我国已将该项技术推向一个崭新的阶段。

## 1.1 板带铸轧理论的研究概况

板带铸轧技术的飞速发展,带动了板带铸轧理论研究的发展,但是,就目前的理论研究水平还远滞后于应用技术。另外,因黑色金属板带铸轧和有色金属板带铸轧工艺上的差异,黑色金属板带铸轧理论和有色金属板带铸轧理论还有所区别。但两种板带铸轧成形的理论研究现在已经有所突破,有所推进。

板带铸轧过程是在铸轧区窄小的空间里,仅数秒钟时间就完成浇铸、凝固、轧制变形、出坯这一系列复杂的流变和物理化学过程,使得对铸轧过程基本理论研究变得十分困难,尽管如此,各国的学者都做了多方面的努力和探讨,并取得了一定的进展。

板带铸轧理论基础应当包括铸轧区铸轧过程的金属结晶凝固规律、变形规律,铸轧区的流变特性,铸轧区温度场、速度场和应力场的分布,铸轧带坯和铸轧辊之间黏着力和摩擦力的分布,铸轧坯在半凝固到凝固状态下的单位压力分布,平均单位压力的确定,铸轧力和铸轧力矩的确定,铸轧区长度的确定等。它涉及到传热学、黏性流体力学、摩擦学和轧制塑性变形理论等多个学科。

### 1.1.1 铸轧区长度计算研究状况

铸轧区通常被分成三个区域,即液穴区(液体金属冷却到结晶温度的冷却区域)、结晶区(液态金属附着在铸轧辊表面结晶成一定厚度的凝固壳)和变形区(铸轧坯被双辊轧制变形的区域)。

#### 1.1.1.1 欧美等国采用的计算方法<sup>[2]</sup>

这里主要考虑了金属氧化膜的表面张力、金属溶液密度、前箱液面与供料嘴的高度差、出坯速度、铸轧坯的凝固速度和铸轧辊半径等有关因素,推出了铸轧区长度的计算公式,即:

$$L = l_1 + l_2 + l_3$$
$$= \frac{\sigma_{bz}}{\rho_y g s_1} + \frac{v_1 (h_1 + \Delta h)}{2 \bar{v}_{ng}} + \sqrt{R \Delta h} \quad (1-1)$$

式中  $l_1$ ——冷凝区长度;

$l_2$ ——结晶区长度;

$l_3$ ——变形区长度;

$\sigma_{bz}$ ——表面张力系数;

$\rho_y$ ——金属溶液密度;

$g$ ——重力加速度;

$s_1$ ——前箱液面与供料嘴的高度差;

$v_1$ ——出坯速度;

$h_1$ ——铸轧坯出口厚度;

$\Delta h$ ——绝对压下量;

$\bar{v}_{ng}$ ——铸轧坯平均凝固速度,  $\bar{v}_{ng} = \frac{1}{2t_{ng}}(h_1 + \Delta h)$ ;

$t_{ng}$ ——铸轧坯凝固时间;

$R$ ——铸轧辊半径。

#### 1.1.1.2 俄罗斯和我国采用的计算方法

俄罗斯学者包利索夫(В. Г. Борисов)等<sup>[1]</sup>认为冷凝区的形成是由于金属过热引起的,而没有考虑金属表面液膜不与铸轧辊面