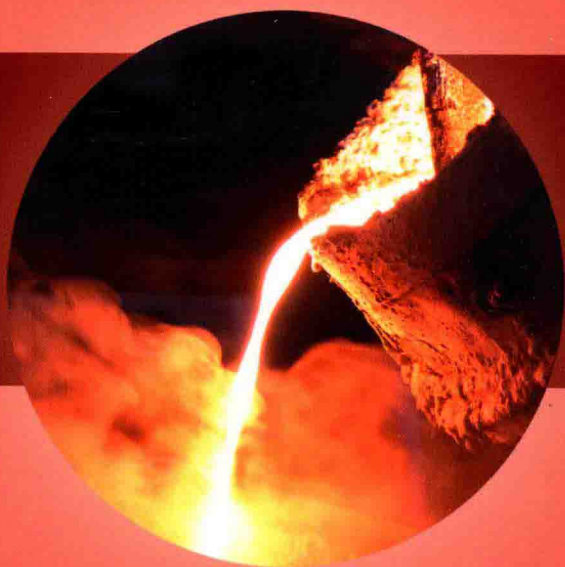


连铸漏钢计算机视觉 检测方法

刘宇 于淼 著



科学出版社

连铸漏钢计算机视觉 检测方法

刘宇 于森 著

国家自然科学基金资助项目(51704073)

吉林省科技发展规划资助项目(20180520065JH)

吉林省教育厅“十三五”科学技术研究资助项目(JJKH20180419KJ)

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书主要介绍作者提出的基于计算机视觉的漏钢检测方法。该方法解决了结晶器内铸坯黏结形成、传播过程不可见问题,利用计算机图像处理和特征提取算法,获取黏结漏钢的空间-时序特征,以此为基础,建立和优化神经网络智能化预报模型,确立准确、高效的漏钢预报方法;然后,设计和开发结晶器可视化漏钢预报专家系统,并在国内某钢厂弧形板坯铸机上投入使用,为保障连铸生产顺行发挥了重要作用,显示出良好应用潜力。

本书适用于长期从事连铸过程事故或铸坯缺陷检测研究的冶金工作者、研究生和本科生,也可为一线工作人员优化连铸生产工艺提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

连铸漏钢计算机视觉检测方法/刘宇,于森著. —北京:科学出版社,2018.6
ISBN 978-7-03-057675-0

I. ①连… II. ①刘… ②于… III. ①连续铸漏-可视化仿真
IV. ①TF777-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 122704 号

责任编辑:孙伯元 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 伟 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2018 年 6 月第一次印刷 印张:7 1/4

字数:137 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

连铸是现代钢铁冶金过程的核心环节。连铸装备和技术的进步促进了冶金行业的整体发展,是钢铁产品结构调整和质量提升的关键。近些年,随着我国高效连铸技术的发展,高拉速下过高的通钢量导致结晶器热负荷显著增加,产生频繁的铸坯黏结缺陷,严重降低铸坯质量。黏结产生的漏钢事故不仅给正常的生产秩序带来极大干扰,而且会使连铸机设备损毁严重,造成巨大的经济损失。迄今为止,国内外冶金工作者围绕漏钢形成机理和漏钢预防预报进行了大量的理论与实践研究,为推动连铸技术的持续、高效发展起到了重要作用。然而,实际生产中漏钢事故仍无法完全避免,漏报和频繁误报问题仍普遍存在,如何预防漏钢事故,及时、准确预报漏钢始终是连铸过程监控的重中之重。

计算机视觉利用计算机对人类视觉功能进行仿真和模拟,始于 20 世纪 50 年代模式识别的研究。它融合了多个研究领域的研究成果,如数学、认知科学、图像处理、模式识别、机器学习、人工智能、计算机图形学等;兼备非接触、高精度和可视化等优点,已在诸多领域中展现出替代乃至超越人工视觉的巨大潜力;广泛应用于军事、气象、环境、农业、医学等领域,为企业减少劳动力,提高了产品质量和生产效率。

鉴于计算机视觉技术的特有优势,本书采用该技术对结晶器过程可视化和异常预报方法进行研究。从铸坯凝固传热理论出发,阐述漏钢形成机理与发展过程,综合国内外漏钢预报方法研究现状,确定本书主要研究内容;基于国内某钢厂弧型宽厚板坯连铸机 4190 炉浇铸数据和 64 例黏结漏钢样本,对影响黏结漏钢的工艺因素进行实证研究,分别从铸坯尺寸、拉速、液位波动以及热流等方面,归纳影响黏结漏钢的主要因素;依据实测的热电偶温度对黏结漏钢的温度模式进行分析,重点考察黏结的移动速率、角度等

传播特征,为开发漏钢可视化预报方法提供参考和借鉴;借助计算机视觉技术,研究开发结晶器过程可视化方法和热成像技术,采用帧间差分、阈值分割、八连通区域标记及边界跟踪等图像处理算法,对漏钢发生时结晶器的温度异常区域进行标记和特征提取,归纳和提炼结晶器黏结的共性特征,并与伪黏结进行比照和区分,结果证实,伴随漏钢出现的温度、几何与传播等行为特征,能够作为区分真、伪黏结漏钢的重要判据;以黏结热点区域温度速率、几何以及移动特征为输入参量,建立了改进的BP神经网络的漏钢预报模型,利用现场追踪并收集的64例黏结漏钢和200例伪黏结样本,对BP神经网络、LM-BP神经网络和GA-LM-BP神经网络模型进行测试和分析,综合考察、比照各模型的预报精度和效率;基于连铸现场结晶器温度、液压振动、铸机设备、工艺参数等信号检测条件,依据上述开发的过程可视化、计算机视觉及人工智能等相关算法,设计和开发结晶器可视化漏钢预报专家系统,集成铜板温度检测、摩擦力检测、振动状态检测、过程可视化和漏钢预报等功能。该系统于国内某钢厂弧形板坯铸机上投入应用,在保障生产顺行方面发挥了重要作用,显示出良好应用潜力。本书是作者长期从事连铸漏钢预防预报研究工作的总结,结合近期国内多家钢厂的在线检测数据,进行系统阐述和完善。

在编写本书的过程中,作者得到多位连铸领域同行专家的热情鼓励,并得到同事的帮助,在此向他们以及一切支持本项研究工作的工作者们致以真诚的感谢。本书也获得吉林市科技发展计划项目(20166013)资助。

连铸结晶器漏钢计算机视觉检测涉及计算机图形学、人工智能等多门学科,由于作者水平有限,如有不当之处,恳请广大读者提出宝贵意见。

目 录

前言

第 1 章 连铸漏钢及其特征检测方法	1
1.1 铸坯凝固与传热理论	1
1.1.1 铸坯凝固理论	1
1.1.2 铸坯黏结漏钢形成过程	2
1.2 传统连铸漏钢检测方法	6
1.2.1 热电偶温度法	6
1.2.2 热流法	9
1.2.3 摩擦力法	9
1.3 计算机视觉检测技术	10
1.3.1 图像分割	11
1.3.2 特征提取	13
1.3.3 模式识别	14
1.4 本书的研究内容	16
参考文献	18
第 2 章 宽厚板坯黏结影响因素及预防	24
2.1 引言	24
2.2 连铸机设备参数与热电偶布置	25
2.2.1 连铸机设备参数	25
2.2.2 结晶器铜板热电偶布置	26
2.3 热流对铸坯黏结影响	28
2.3.1 宽面热流	28
2.3.2 窄面热流	30

2.3.3 热流波动	30
2.4 拉速与液位	31
2.4.1 拉速	31
2.4.2 液位波动	32
2.5 铸坯尺寸与黏结位置	33
2.5.1 铸坯尺寸	33
2.5.2 黏结位置	35
参考文献	36
第3章 铸坯黏结的二维空间传播行为	38
3.1 引言	38
3.2 黏结传播行为计算方法	39
3.3 黏结纵向传播实例分析	41
3.4 黏结横向传播实例分析	42
3.5 黏结传播角度实例分析	44
3.6 不同尺寸铸坯黏结传播行为对比	45
参考文献	46
第4章 黏结区域可视化特征检测	47
4.1 引言	47
4.2 结晶器铜板温度可视化	48
4.2.1 温度热成像	48
4.2.2 热像图帧间差分	49
4.2.3 温度变化速率可视化	49
4.3 黏结异常图像处理	51
4.3.1 区域分割	51
4.3.2 连通性标记	51
4.3.3 边界和轮廓提取	54
4.4 黏结异常特征提取	55
4.4.1 温度特征	55

4.4.2 几何特征	56
4.4.3 移动特征	56
4.5 真伪黏结实例特征统计与分析	57
4.5.1 黏结的可视化形成和传播过程	57
4.5.2 伪黏结的一般特征	59
4.5.3 黏结漏钢的典型可视化特征	62
4.5.4 黏结实例的特征统计与分析	64
参考文献	66
第5章 基于改进 BP 神经网络的智能化预报实例	67
5.1 引言	67
5.2 特征选择与归一化	68
5.2.1 黏结特征的选择	68
5.2.2 黏结特征数据归一化	69
5.3 LM-BP 神经网络预报模型	69
5.3.1 人工神经网络	69
5.3.2 BP 神经网络模型及训练	71
5.3.3 LM-BP 算法流程	75
5.3.4 LM-BP 神经网络的训练与测试	77
5.4 基于 GA-LM-BP 神经网络的预报模型	79
5.4.1 遗传算法	79
5.4.2 种群和个体操作	79
5.4.3 算法的优化流程	81
5.4.4 GA-LM-BP 神经网络模型	81
5.5 GA-LM-BP 模型训练与测试	82
5.5.1 模型参数设置	82
5.5.2 GA-LM-BP 神经网络模型训练	82
5.5.3 GA-LM-BP 神经网络模型测试	83
5.6 离线预测结果及指标对比分析	84

参考文献	86
第 6 章 结晶器可视化漏钢预报专家系统开发及应用	88
6.1 引言	88
6.2 系统总体构成	89
6.3 信号采集和通讯	89
6.3.1 热电偶及温度测量	90
6.3.2 液压振动系统数据采集	91
6.3.3 工艺参数检测	92
6.4 软件设计和开发	93
6.4.1 C/S 模式架构的选择	93
6.4.2 任务和功能分解	94
6.4.3 系统软件开发	95
6.5 专家系统在线运行	96
6.5.1 系统在线运行情况	96
6.5.2 铜板温度在线检测	97
6.5.3 结晶器铜板热流检测	97
6.5.4 瞬态摩擦力在线检测	99
6.5.5 结晶器振动状态监测	100
6.5.6 结晶器过程可视化	100
6.6 漏钢在线检测结果	101
6.6.1 现场检测实例	101
6.6.2 漏钢预报结果与指标对比	103
参考文献	104
第 7 章 结论	106

第 1 章 连铸漏钢及其特征检测方法

本章介绍与连铸漏钢有关的基础知识,包括铸坯凝固与传热理论;连铸漏钢检测方法;计算机视觉检测技术。以连铸过程基本传热理论为基础,介绍连铸漏钢形成机理和种类特点,阐述各漏钢检测方法原理和应用情况,并简要介绍计算机视觉检测技术的优势和主要内容。由于篇幅所限,仅列出主要参考文献,读者可根据需要查阅。

1.1 铸坯凝固与传热理论

1.1.1 铸坯凝固理论

在连铸钢坯生产中,结晶器传递着高温液态钢水的主要热量,是钢液结晶、坯壳形成的重要环节,对连铸机的生产能力和铸坯质量具有决定性作用,因此,结晶器也被称为连铸机的“心脏”。当中间包的钢水注入结晶器时,在结晶器铜板和冷却水的作用下,高温钢水会受到激冷作用并迅速凝固形成坯壳,即为初生坯壳。由于较高的冷却速度,在弯月面处会形成由细小等轴晶组成的致密激冷层(2~5mm);然后,晶粒会在原有的激冷层的基础上,以柱状晶的方式垂直于结晶器壁生长,内部钢水温度逐渐降低,直到钢水的过冷度消失;随后,由于过热度的消失,钢液中心的晶核将以等轴晶的方式生长,形成中心等轴晶。当铸坯出结晶器下口时,内部钢水并未完全凝固,带着液心的铸坯坯壳厚度一般为 12~15mm,具有一定厚度和强度的坯壳,可以抵抗芯部未凝固液态钢水的静压力,防止漏钢事故的发生^[1]。

钢液在结晶器内的凝固传热分为沿拉坯方向上的传热及垂直于拉坯方向上的传热。绝大部分热量是沿着垂直于拉坯方自内而外传递的,即由结

晶器进行热传导,包括钢液与坯壳、坯壳与保护渣、保护渣与铜板、保护渣与气隙、气隙与铜板以及铜板与冷却水等,其中,坯壳与铜板之间气隙产生的热阻约占总热阻的70%以上,对铸坯冷却、结晶器传热具有重要的影响^[2]。钢液冷却释放出的热量由铜板冷却水带走,这将产生持续、稳定的热量交换,促进铸坯的凝固成型。研究结晶器铜板的传热特性,有助于提高漏钢预报的准确性、预测铸坯裂纹的位置,对于考察结晶器内流场的稳定性、铸坯与结晶器之间的润滑状况有十分重要的意义。

目前,连铸板坯结晶器铜板温度场的计算模型有二维及三维模型,已有研究获得的关于结晶器铜板温度情况的结果大致如下:①沿着结晶器高度方向,铜板的温度从结晶器上口到弯月面处逐渐升高,在弯月面以下的附近区域内,铜板热面的温度达到最大值,是铜板工作状况最为恶劣的部分,随后,沿着拉坯方向向下,结晶器铜板温度总体呈下降的趋势;②沿着宽度方向看,铜板温度分布是不均匀的,温度曲线模式呈波浪线式分布,通常情况下,相邻两冷却水通道间温度的基值比冷却水通道处的温度要高,横向温度分布整体呈现无规律情况;③随着拉坯速度的增加,结晶器铜板的热面温度相比之前会有明显的升高,且升拉速过程中,温度变化较大;④较大的冷却水流量可获得较高的冷却强度,从而降低铜板的温度,但过大的冷却水流量对铜板温度场的影响却不是很大,反而对设备提出了更高的要求^[3,4]。

1.1.2 铸坯黏结漏钢形成过程

在连铸生产过程中,漏钢是最严重的破坏性事故,不仅会使连铸生产流程中断,降低连铸机的作业率,同时会造成结晶器和二冷区设备受到不同程度的损坏,经济损失巨大^[5~7]。根据连铸漏钢发生的成因和位置^[8,9],可分为以下几类。

(1)黏结漏钢。在弯月面附近,由于某种原因,较薄的初生坯壳直接与结晶器接触发生黏结,在结晶器振动和冷却作用下,黏结处坯壳将被反复拉断和愈合,直至离开结晶器,较薄坯壳将无法抵抗钢水静压力作用,发生黏结漏钢。导致黏结漏钢的因素十分复杂,其中,保护渣润滑不良、结晶器液

位波动、拉速波动过大以及不合理的一冷制度是影响黏结漏钢的重要因素。

(2)纵裂漏钢。由于结晶器冷却制度不合理等原因,凝固坯壳容易发生纵裂纹或角部裂纹,当铸坯在拉出结晶器时,裂纹处过薄的坯壳无法抵抗钢水静压力的作用,液态钢水将从裂纹处溢出而发生漏钢事故。为预防裂纹漏钢事故发生,应确保结晶器合理的锥度、钢水过热度以及窄面与宽面热流比等工艺因素,尽量保证坯壳与结晶器间传热稳定、均匀。

(3)开浇漏钢。在开浇过程中,由于操作不当等原因,在引锭头刚拉出结晶器时,高温液态钢水便从铸坯和引锭头的连接位置溢出,发生开浇漏钢。常见的开浇漏钢产生原因有:铁屑层铺撒厚度不均匀(过厚或过薄)、纸绳松动、中包塞棒控流不稳、结晶器与弯曲段之间对弧不良等原因。

(4)卷渣漏钢。结晶器内漂浮的固态或半熔融夹渣物被初生坯壳捕获,这使卷渣处的坯壳厚度小于安全坯壳厚度,在铸坯离开结晶器后,卷渣处坯壳无法抵抗钢水静压力作用,渣屑脱落导致漏钢。卷渣漏钢的主要原因包括结晶器液面波动较大、结晶器偏振、中间包耐材脱落等。

(5)悬挂漏钢。由于结晶器角缝过大或铜板划伤等其他原因,液态钢水溢出至结晶器角部缝隙,带有毛刺的铸坯增加了结晶器内部拉坯阻力,坯壳因阻力过大而被拉断,造成悬挂漏钢。

(6)尾坯封顶漏钢。在浇铸结束时,若尾坯封顶前保护渣未捞干净,在较大的二冷强度下,铸坯因收缩过大而产生鼓肚,受到辊子挤压的液态钢水将在尾坯处溢出。

在各种类型的漏钢中,黏结漏钢占漏钢总数的三分之二以上,其他类型的漏钢也同样具有黏结漏钢的特征^[10~13]。一般来说,开浇漏钢、卷渣漏钢、悬挂漏钢和尾坯封顶漏钢与现场操作有很大关系。随着连铸技术的不断发展和进步,通过规范操作并维持设备良好的运行状态,可以将该类漏钢的概率降到很低的水平。而黏结漏钢影响因素较多,与保护渣、拉速、液位波动以及热流密度等众多工艺因素密切相关。虽然国内外冶金研究人员对其形成原因进行研究,试图降低黏结漏钢的发生概率,但很难彻底避免铸坯在结晶器内的黏结^[14~17],因此,减少和预防漏钢事故、铸坯黏结一直是国内外冶

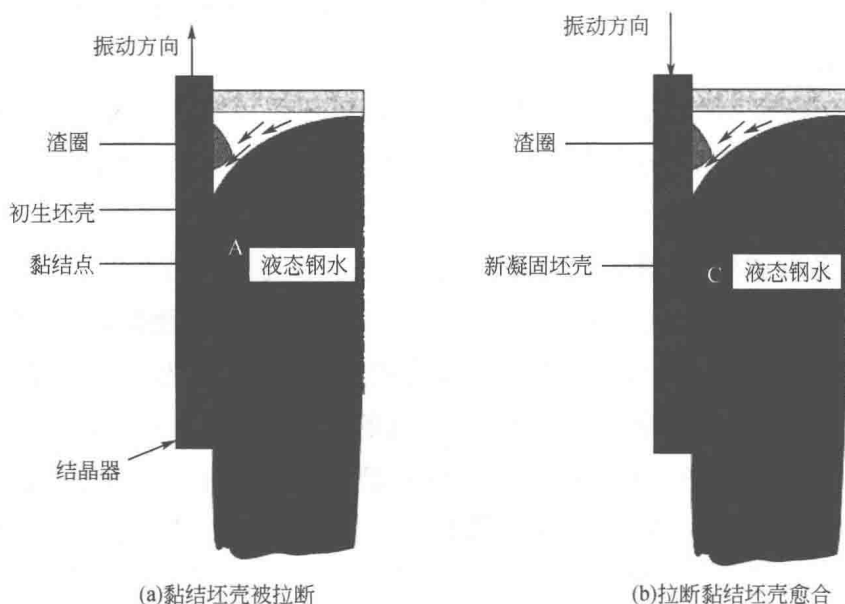
金工作者关注的重点和难点。

众所周知,坯壳首先形成于弯月面附近,初生坯壳厚度较薄,强度较低,受力后更易产生破损,因此,黏结以及大量裂纹缺陷形成于此。黏结形成过程大致可分为五个部分,即拉断-愈合-再拉断-再愈合-漏钢^[18],如图 1.1 所示。

图 1.1(a)是黏结坯壳初始拉断的时刻,当较薄的坯壳与结晶器直接接触发生黏结时,黏结坯壳 A 会随着拉坯进行与结晶器同步运动,而其周围的坯壳由于未发生黏结,会沿着拉坯方向继续向结晶器下口移动,当结晶器处于正滑脱时,结晶器向上运动使黏结处局部摩擦力过大,导致黏结点 A 附近较薄的坯壳被拉断,液态钢水将快速溢出。

图 1.1(b)中液态钢水从黏结拉断坯壳处溢出,快速填充结晶器与坯壳裂口缝隙,在结晶器激冷作用下,溢出钢水快速形成新的较薄坯壳,在负滑脱期间,结晶器向下运动对黏结坯壳有愈合作用,使坯壳厚度略有增加。

图 1.1(c)中,在下一次的正滑脱期间,新生较薄坯壳 C 由于强度不足而无法抵抗摩擦力,黏结坯壳再次被拉断。



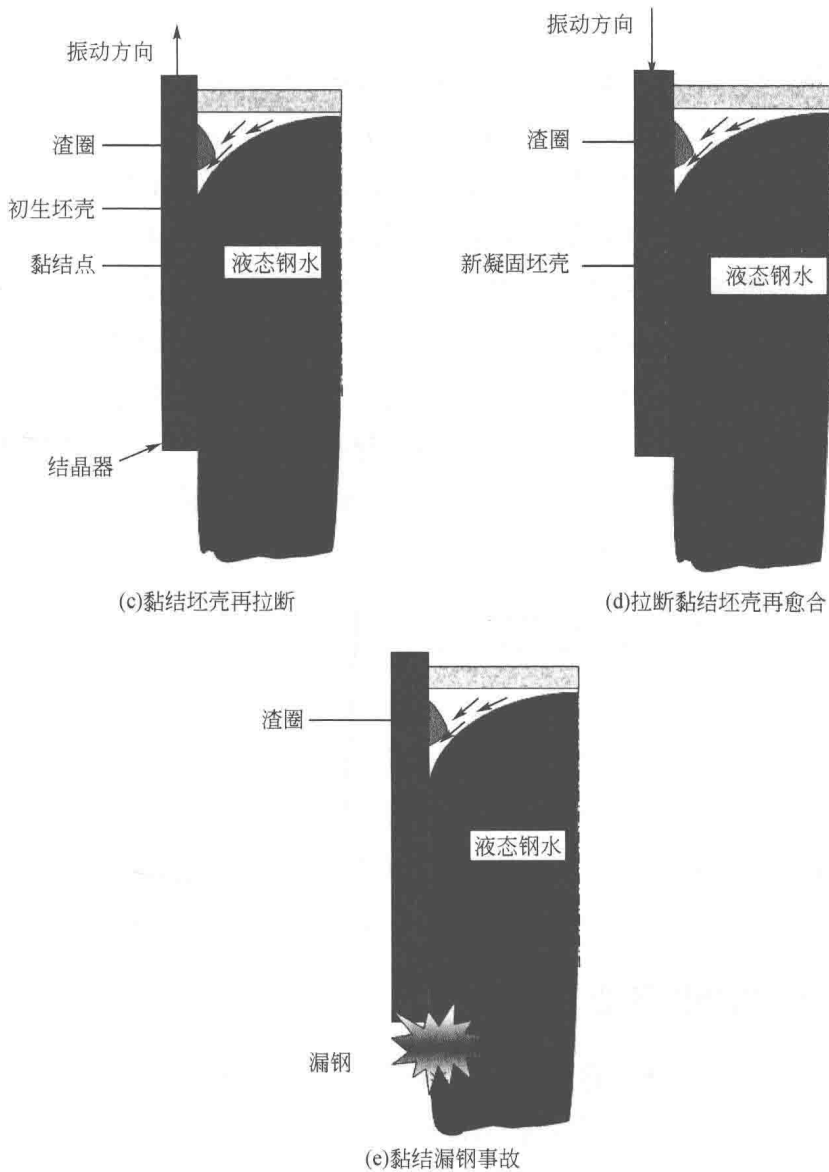


图 1.1 连铸板坯黏结过程示意图

图 1.1(d)中,在结晶器往复振动周期内,如图 1.1(b)、(c)所示过程将反复出现,而黏结点位置不断向结晶器出口处移动,同时,被拉断的裂纹还

将发生纵向、横向扩展,即黏结沿纵向、横向具有传播行为。

图 1.1(e)中,当黏结位置移动至结晶器出口时,由于突然失去了结晶器铜板的保护作用,黏结处未形成足够厚度和强度的坯壳,受到钢水静压力挤压作用,坯壳发生破裂,导致黏结漏钢事故。

在漏钢检测方法中,黏结漏钢的温度时滞和倒置现象是漏钢判断和报警的重要依据,这与以上黏结坯壳在结晶器内的传播和移动有关。描述黏结传播行为的参数有纵向传播速率、横向传播速率以及裂纹线与水平方向夹角,对黏结漏钢的传播行为分析有助于进一步掌握黏结形成过程特征,提高漏钢预报系统准确率。刘永贞对板坯、薄板坯黏结漏钢传播行为进行了研究分析^[2],结果表明,黏结的纵向移动速率一般要小于拉速,横向传播速率则高于拉速,并且具有明显的不确定性,对黏结漏钢传播行为的研究可以为漏钢预报系统的开发提供参考。

1.2 传统连铸漏钢检测方法

为减少和避免连铸漏钢,国内外学者对漏钢形成机理进行了深入研究,试图找到能够准确、及时反应漏钢的特征信息,提出了一系列漏钢检测方法,下面分别对连铸漏钢预报方法中的热电偶温度法、热流法、摩擦力法进行介绍。

1.2.1 热电偶温度法

热电偶温度法是目前广泛采用的漏钢预报方法,通过在结晶器铜板上布置一定数量的热电偶,监测铜板不同位置的局部温度变化,实时检测铸坯与结晶器间传热状态,当黏结或纵裂等缺陷发生时,临近处热电偶将会出现温度的大幅上升或下降^[19,20]。图 1.2 是热电偶温度法监测黏结漏钢的示意图,铜板上热电偶布置为两排或三排,当有黏结经过相应热电偶位置时,热电偶温度将出现先上升后下降的现象,这也是利用热电偶温度判断黏结的主要依据。在实际应用过程中,该方法除了考虑热电偶温度之外,还可以结合

拉速、液位波动以及热流等工艺因素进行综合考虑,特别是开浇、更换中间包等工艺操作过程。

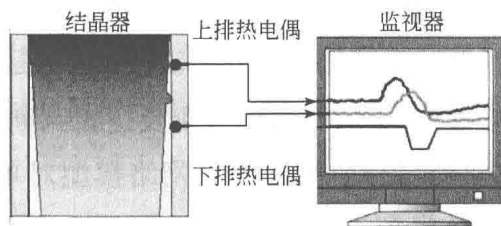


图 1.2 热电偶温度法示意图

热电偶温度法预报漏钢的优势在于:一是黏结漏钢形成过程中具有典型温度时滞和倒置现象;二是由于热电偶温度精度较高,可以对铜板局部的温度变化进行实时监测,对漏钢等异常的反映更加灵敏。

西门子奥钢联(Siemens-VAI)集团开发出的结晶器专家系统(mold-expert)^[21,22],是目前国内应用最多的结晶器监控系统,该系统以结晶器热电偶、液压振动、结晶器冷却水、液位波动等信号为基础,开发不同的功能模块,主要包括漏钢预报、结晶器温度场、结晶器热流、结晶器摩擦力监测等几个主要部分,其中漏钢预报模块采用结晶器热电偶温度逻辑判断法,通过计算的温度上升速率、下降速率以及上下排热电偶温度差值与设定阈值进行比较,综合判断是否存在黏结性漏钢。该系统结晶器漏钢预报功能为预防漏钢事故起到十分重要的作用。然而,在国内钢厂实际应用过程中仍存在问题,在现场实际调研过程中发现,由于漏报而产生的漏钢事故仍然时有发生,误报较多是漏钢预报系统的另一个主要问题^[23]。

英国钢铁公司经过多年研发,开发出结晶器热监视(mould thermal monitoring, MTM)系统^[24],该系统也采用热电偶测温,利用热电偶温度特征进行黏结性漏钢预报,同时具有铸坯表面纵裂纹及其长度检测功能,当纵裂纹经过热电偶位置处时,上下排热电偶将依次出现大幅度温度降低,低温持续时间将与纵裂纹长度相对应。除此之外,该系统还提供了保护渣状态评价功能,为保护渣开发及实验提供参考。据报道,MTM系统已

应用于英国、比利时、斯洛伐克及美国等多个钢厂,为生产顺利进行提供了重要保障。

在国内,宝钢集团有限公司为了解决漏报和频繁误报问题,自主开发了连铸漏钢预报系统(Baosteel breakout prediction system, BBPS)^[25],预报模型综合了神经网络模型、空间网络模型以及逻辑判断模型,先由逻辑判断模型对原始数据进行预处理,再由神经网络模型对单支热电偶温度特征进行识别,空间网络模型主要对黏结性漏钢空间传播性进行判断。BBPS于1999年投入生产,并在2005年进行改进、升级,在原有的基础之上,增加了热成像、纵裂纹预报等功能,对于促进过程顺行起到了积极作用^[26,27]。

中冶赛迪集团有限公司为燕山钢铁公司开发了基于热电偶测温的漏钢预报系统,该系统采用逻辑判断和神经网络模型对漏钢进行判断,运行结果表明,该系统能够正确地识别黏结漏钢。该公司同时提出了规范生产操作、优化保护渣润滑效果等建议^[28]。

镗目公司总结了影响漏钢预报系统准确率的主要因素,分析指出热电偶装配不合理、热电偶接触不良、防水性差等原因是产生误报的主要原因,而热电偶故障、数据丢失和参数不合理是漏报的主要影响因素。并在此基础上,开发了基于神经网络算法和逻辑判断的漏钢预报系统,系统应用于国内某大型钢厂,自运行以来,在预防漏钢方面发挥了重要作用,误报次数显著降低^[29]。

目前,无论对国外还是国内的结晶器监控系统来说,报警准确率偏低是漏钢预报系统的共同问题,频繁的误报已成为干扰连铸生产的主要问题,相比于国外连铸结晶器漏钢预报和监控系统,国内各企业开发的漏钢预报系统系统功能略显单一。结晶器热流、温度、摩擦力、振动、液位波动等信息对于了解现场生产顺利进行与否非常重要,因此,连铸生产过程结晶器漏钢预报和监控系统集成已成为钢铁企业的必要需求,也是冶金工作者们亟待解决的问题。