

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311826

高炉铁水温度检测方法的研究进展*

潘冬, 蒋朝辉, 许川, 桂卫华
(中南大学自动化学院 长沙 410083)

摘要:高炉铁水温度是分析铁水质量、判断炉温状态及评估高炉能耗水平的重要指标,铁水温度检测是钢铁行业的强制性需求。本文根据测温仪表的工作原理,将现有铁水测温技术进行分类分析,结合高炉出铁场环境特点和铁水特点,从测温原理、测温位置、技术特点等方面论述了现有测温技术的优缺点。为实现高炉铁水温度的实时在线准确检测,重点介绍了红外视觉测温方法的研究进展和应用潜力。在总结现有铁水测温技术的基础上,分析了红外视觉测温方法存在的主要问题及未来研究方向,旨在为学术界和工业界研究人员提供铁水测温技术方面的一些参考和借鉴。

关键词:高炉铁水;温度检测;红外视觉;环境认知;温度补偿

中图分类号: TN 21 TH811 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.20

Research progress of measurement methods of molten iron temperature in blast furnace

Pan Dong, Jiang Zhaohui, Xu Chuan, Gui Weihua
(School of Automation, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Molten iron temperature is an important index to analyze the quality of molten iron, judge the furnace temperature state, and evaluate the energy consumption level of blast furnaces. The molten iron temperature measurement is a mandatory demand of the iron and steel industry. According to the working principle, the existing measurement technology of molten iron temperature is classified and analyzed. Combining with the environmental characteristics of blast furnace casting field and molten iron, the advantages and disadvantages of the existing temperature measurement technology are discussed from the aspects of temperature measuring principle, measuring position, and technical characteristics. To realize the real-time online and accurate measurement of molten iron temperature in blast furnaces, the research progress and application potential of the infrared visual temperature measurement method are introduced. Based on summarizing the existing measurement techniques of molten iron temperature, the main problems and future research directions of infrared visual temperature measurement are analyzed. The objective is to provide some references for researchers in academia and industry on temperature measurement of molten iron.

Keywords: molten iron of blast furnace; temperature measurement; infrared vision; environmental cognition; temperature compensation

0 引言

钢铁工业属于国家基础原材料工业,是制造业的“脊梁”、工业的“粮食”,为国民经济发展提供了重要的钢铁原材料^[1]。我国钢铁工业的 CO₂ 直接排放量约占我国 CO₂ 排放总量的 34% 左右,仅次于电力行业。经过几十年的持续改进和优化,我国钢铁行业的主要污染物和碳

排放强度逐年下降,但仍面临环境负荷重、冶炼过程稳定性不足、生产决策智能程度不高等问题^[2]。中国金属学会理事长张晓刚指出:让科技创新有能力引领世界钢铁发展潮流,数字化-智能化制造是流程制造业技术创新的主要抓手和转型升级的主要路径,钢铁工业实施智能制造更是具备得天独厚的优势^[3]。在“碳达峰碳中和”、“智能制造”等国家战略驱动下,钢铁制造过程的数字化转型智能化升级显得尤为迫切。

收稿日期:2023-08-23 Received Date: 2023-08-23

* 基金项目:国家自然科学基金(62303491、61927803)、湖南省青年自然科学基金(2022JJ40634)项目资助

智能源于感知,钢铁冶炼过程中关键信息的准确获取可为冶炼过程精细化调控和安全运行提供数据支撑,有利于实现绿色低碳高效冶炼,助力钢铁行业向数字化转型智能化升级。高炉炼铁是钢铁生产流程中的关键工序,其 CO_2 排放量约占钢铁全流程总排放的 70% 左右,也是所有生产工序中能耗最大的环节,约占钢铁行业总能耗的 60%^[4-5]。高炉是一个高温、高压、密闭的大型黑箱反应器,其内部连续发生复杂物理化学反应,最终在炉缸形成熔融铁水并周期性排出^[6-7]。高质量铁水是确保最终产品规格、提升最终产品质量和优质率的关键。

高炉铁水温度是分析铁水质量、判断炉温状态及评估高炉能耗水平的重要指标,也为高炉铁水质量闭环控制提供了关键反馈信息。因此,准确检测高炉铁水流温度的具有重大的科学意义和实用价值^[8-9],具体表现为:1) 为探明大型高炉内部未知的冶炼新现象和新规律、探索高炉炼铁过程绿色高效运行新机理提供了温度观测手段,具有重大科学价值;2) 高炉铁水温度是了解铁水质量、判断炉温发展趋势的最直接指标,也是高炉铁水质量闭环控制系统的重要反馈信息和调节高炉操作变量(如热风温度、热风压力、喷煤量等)的科学依据,更是高炉热平衡计算中的关键参量,有助于准确计算高炉的热收入和热支出及评估高炉能耗水平,具有重要应用价值;3) 高炉铁水是一种典型的高温熔融金属,研究高炉铁水温度检测方法将为冶金行业中其他高温熔融金属温度检测提供可行的参考思路。

温度检测是许多工业生产过程的强制性要求,对优化生产工艺、保证生产安全、改善产品质量、分析能源效率等具有重要意义。在温度检测方面,Childs 等^[10]根据检测设备与被测对象的接触状况,将测温技术分为侵入式、半侵入式、非侵入式 3 种,并分析了气体测温仪、阻抗测温设备、红外热成像仪等代表性测温设备。余跃等^[11]总结了热电偶、黑体腔等高温测量技术在熔池温度检测中的应用进展,并指出非接触式测温技术的应用前景广阔。解瑞东等^[12]分析了非接触式红外辐射测温在激光增材制造温度场检测中的应用,展望了增材成型表面温度场对于激光功率提前控制的重要性。周萌等^[13]总结了应用于微波场的温度场测量方法,重点介绍了有机金属框架材料温度计这一新型温度测量方式。在钢铁行业参数检测、建模仿真方面,Saxen 等^[14]从数据驱动角度综述了用于高炉冶炼过程铁水硅含量短时间离散预测的黑箱模型。蒋珂等从铁水温度和化学成分两个方面总结了铁水质量信息在线检测方法的研究现状^[8]。Ueda 等^[15]针对高炉稳定顺行的需求,介绍了高炉先进数学模型的发展现状和进展,并对期望模型的发展前景进行了展望。Kuang 等^[16]聚焦高炉炼铁过程的建模与仿真,重点介绍了从炉顶装料系统到炉体到炉缸等不同高炉区域

的数学模型建模及仿真方面的进展。上述综述对了解高炉炼铁机理及现有测温原理具有重要作用,但未对高炉炼铁过程铁水温度检测这一研究方向进行梳理总结。在铁水温度检测这一问题上,学术界和工业界开展了大量的理论方法研究和实践探索,从快速热电偶测温^[17]、光纤测温^[18]到黑体空腔测温^[19]、红外测温^[20],再到基于数据驱动的铁水温度预报模型^[21],尽管这些检测手段在部分高炉上取得了一定应用效果,由于高炉炼铁过程的复杂性、出铁场环境的恶劣性、铁水自身的特殊性,致使高炉铁水温度信息的在线准确获取并非易事。目前高炉现场仍依靠快速热电偶的测温方式,尚缺少公认的铁水温度在线精准检测手段,尤其缺乏高炉复杂出铁场环境下铁水温度检测技术的系统梳理和总结分析,尚未有铁水温度检测相关综述。为推动高炉炼铁检测技术的进步,助力高炉炼铁过程的数字化智能化转型升级,同时便于钢铁及其他领域专家学者对铁水温度检测方法及面临的挑战难题有系统全面了解,有必要对现有铁水温度检测方法总结梳理。为此,本文结合高炉炼铁工艺、出铁场环境特点和铁水自身特点,系统分析不同铁水温度检测技术之间的异同、优缺点及适用条件,重点分析红外视觉铁水测温技术的优势及存在的挑战,概括总结高炉铁水测温面临的主要问题,并展望高炉铁水在线测温技术的未来发展方向。

1 高炉出铁过程

1.1 高炉炼铁工艺

高炉炼铁过程是一个具有非线性、强耦合、大时滞等特点的复杂连续反应过程^[22],图 1 模拟了高炉炼铁生产过程。通过在高炉炉顶分批次投入一定配比的含铁原料、燃料以及熔剂等原料,同时从风口平台向炉内鼓入的高温热风及煤粉与焦炭发生燃烧反应生成一氧化碳和氢气等高温还原性气体,含铁原料、燃料和熔剂随着炉内复杂物理化学反应过程的进行而下降,下降的炉料和上升的高温煤气流相遇,含铁原料逐渐还原、软化、熔融、脱碳形成生铁,直至完全熔化从软熔带滴落在底部的炉缸中,最终铁水经铁口流到铁水沟中,再经过撇渣器撇渣后流入鸭嘴罐中。需要说明的是,本文主要聚焦高炉炼铁工艺,新的炼铁工艺不在本文研究范围内。

根据高炉体积大小,其炉缸具有 2~4 个出铁口(取决于高炉容积,容积越大,铁口越多),高炉运行过程时从不同铁口轮流出铁^[23]。当炉缸内的铁水到达一定容量后,使用开口机钻开铁口出铁,炉缸内铁水经铁口流至铁水主沟中,炉渣伴随铁水从铁口一起流出,铁水主沟上方的除尘系统将出铁过程中产生的粉尘吸走。当炉缸内铁水液位下降到一定程度时,铁口会喷出高炉炉渣和煤气

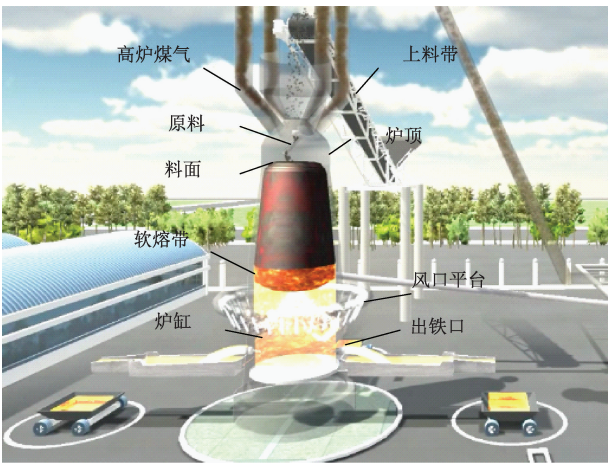


图 1 高炉炼铁生产过程模拟图

Fig. 1 Diagram of blast furnace ironmaking process

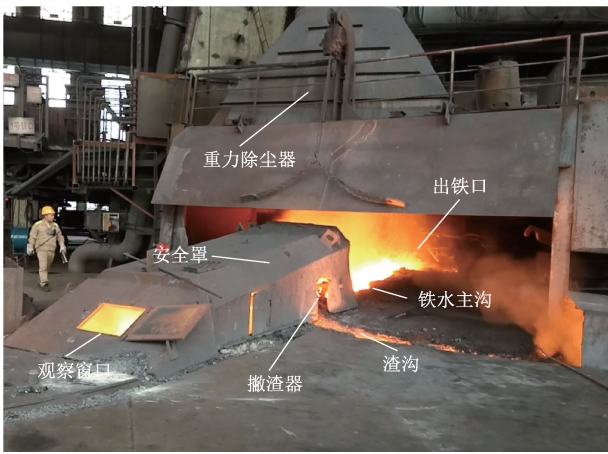


图 3 某炼铁厂的高炉出铁场

Fig. 3 Blast furnace casting field in an ironmaking plant

等杂质,需要使用泥炮机快速准确及时地堵塞出铁口,避免造成出铁现场安全事故^[24]。

由于高炉炉缸是密闭的,无法利用传感器深入炉缸内部进行铁水温度检测,只能在高炉出铁时检测出铁场内撇渣器处或出铁口处的铁水温度。图 2 是高炉出铁场的示意图,出铁口直接与炉缸相连,出铁口处铁水温度与炉缸内铁水温度更为接近。铁水从出铁口流入铁水主沟中,在撇渣器处进行渣铁分离,由于铁水在流动过程中存在热损,撇渣器后铁水温度与炉缸铁水温度存在差异。

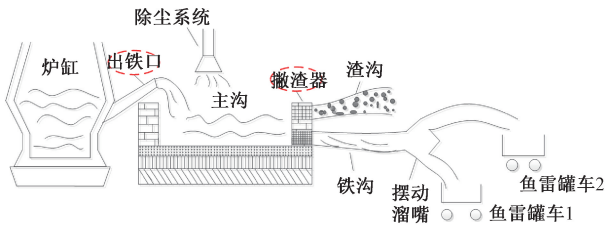


图 2 高炉出铁场示意图

Fig. 2 Diagram of blast furnace casting field

1.2 出铁场环境特点

由于从高炉炉缸中射流出的铁水流温度很高,出铁场温度较低,铁水在流动过程中会产生大量的热辐射,使得出铁场的环境温度较高,图 3 显示某炼铁厂的高炉出铁场。在环保要求下,越来越多的高炉出铁场被密闭起来,致使出铁场内的环境温度更高。

高炉铁口附近配有机机械臂、炮泥机等机械装置以方便开、堵铁口,使得铁口铁水测温设备的安装位置受限。在出铁过程中,出铁口铁水流也会向四周飞溅,容易污染检测设备的前端镜头或在前端积灰,铁水主沟两边也堆积有大量沉积的粉尘和渣堆。此外,由于铁口和铁水沟需要定期维护,在维护过程中会产生剧烈的振动干扰。

在高炉出铁过程中,由于热压的作用,在铁口附近的铁水主沟内,大量粉尘会从铁水中挥发出来,致使高炉出铁场内会存在动态非均匀分布的粉尘。由于铁口附近的间歇性出现非均匀分布粉尘、不规则机械振动等干扰,使得高炉铁口处铁水温度的精确检测并非易事。

撇渣器后方的环境较高炉出铁口处稍好,在除尘系统的作用下,粉尘干扰较小。考虑到铁水主沟需要定期施工维护,在撇渣器后方安装仪器设备检测铁水温度的手段也受到了限制。

概括来说,出铁场具有环境温度高、空间有限等特点,存在铁渣飞溅、动态非均匀分布粉尘、不规则机械振动等干扰,使得高炉铁水温度的在线精准获取充满挑战。

1.3 铁水特点

在高炉出铁时,由于炉缸内部压力较大、铁口直径较小,铁水和炉渣以混合状态射流形式从铁口快速地流入铁水主沟中,出铁过程如图 4(a)所示。出铁时高炉铁口处的铁水温度甚至超过 1 500℃(不同炼铁厂生产的铁水温度根据生产需求而定,不一定相同),铁水流的热辐射能力和腐蚀性都较强。在出铁过程中,由于高炉炉缸内部压力波动、铁口卡焦或磨损等情形,铁水流会发生飞溅,甚至由于卡焦等问题,出现喷溅而紧急堵铁口的情形。综上,高炉铁口铁水具有温度高、腐蚀性强、流速快、易飞溅、渣铁混合等特点。

铁水在主沟流动过程中,由于炉渣密度较小,炉渣会漂浮在铁水表面,且由于铁水沟上部是开放的,铁水流表面容易结渣。在撇渣器的作用下,浮在铁水流上方的炉渣流入渣沟,铁水经摆动流嘴流至鸭嘴罐中。由于出铁场上方除尘系统的作用,撇渣器后的铁水流上方仍存在动态分布的粉尘。理想情况下,经过撇渣后铁水流表面不会存在炉渣,但有时经过撇渣后的铁水流表面仍会存在少量浮渣,这是铁水流的快速流动和撇渣器的磨损造

成的。在部分出铁现场,为减少铁水流动过程中的热损,会在铁水沟上方覆盖保温材料,致使撇渣后的铁水流表面存在保温层遮挡。此外,由于在撇渣器后方测温使用的快速热电偶是一次消耗型的,测温完成后会直接丢弃在铁水沟中,致使快速热电偶在铁水流上方燃烧。另外需要说明的是,铁水从炉缸流出到铁水主沟中,需要经过一段距离才流到撇渣器后方,环境温度与铁水温度间的巨大温差会造成铁水沟均温效应^[25],铁水在流动过程中存在热量损失,撇渣器后方铁水温度略低于出铁口处铁水温度,同时,铁水流上方也会覆盖较薄的氧化层,如图 4(b)所示。综上,尽管撇渣器后的铁水流所处检测环境较出铁口处铁水流好,但依旧存在粉尘、浮渣、保温层遮挡、氧化层等影响因素。

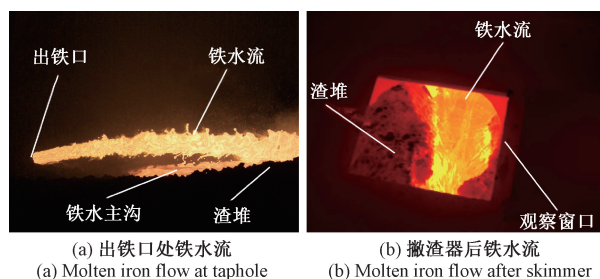


图 4 高炉铁水流图像

Fig. 4 Image of molten iron flow in blast furnace

总的来说,高炉铁口直接连接高炉炉缸,而撇渣器距离出铁口较远,铁水从出铁口流至撇渣器过程中存在热损。因此,相比撇渣器后的铁水温度,铁口铁水流温度更能直观表征炉缸内铁水温度,更能准确有效地反映高炉炉温状况。但是,出铁口处铁水温度检测面临的环境干扰较撇渣器后更为严重。

2 铁水测温方法

由于高炉是一个大型密闭黑箱反应器,无法利用检测设备直接检测高炉炉缸内部铁水温度,因此,高炉现场主要在打开高炉炉缸出铁口出铁时,对出铁口处铁水和撇渣器处铁水进行测温。理论上,为保证高炉稳定顺行、分析炉温状况、判断铁水质量,应该在出铁过程中实时连续在线地检测出铁口处或撇渣器处铁水温度,为炉温调控、铁水质量调控提供实时的反馈数据。尤其随着“碳达峰碳中和”战略的实施,钢铁行业也渴望将铁水温度调控在一个稳定的“窄窗口”区间,铁水温度既不能太高,以免造成能耗浪费成本增加或其他安全问题,铁水温度也不能太低,以免达不到铁水质量要求。因此,铁水温度实时在线准确检测也一直是钢铁行业所期望的。但是,目前缺少公认的实时在线准确测温方法,高炉出铁现场主

要采用工人手持快速热电偶测量铁水温度的方式。由于快速热电偶测温是接触消耗型测温,每次测温都会消耗一支热电偶。考虑到成本、劳动强度等因素,在高炉出铁过程中,一般在出铁稳定后测量 3 次铁水温度,以反映该出铁周期的铁水温度变化情况,即一般情况下,一次出铁周期测量 3 次。高炉炉况波动时,可能会要求现场工人在一次出铁过程多次测温。

总的来说,对于钢铁行业来说,高炉铁水温度的实时在线准确检测一直是渴望解决的痛点问题。若能解决该难题,将对高炉炼铁过程质量控制、操作优化、降本增效、设备保护、安全生产等诸多方面具有重要价值。

对于铁水测温精度,受限于测温仪器设备和现场环境的限制,目前快速热电偶测温是较准确的手段,因此,在检测 1 500℃左右的铁水时,以快速热电偶的标称精度 $\pm 5^\circ\text{C}$ 为测温精度要求。考虑到快速热电偶的响应时间为 4~6 s,因此铁水测温的响应时间应不低于热电偶的响应时间。由于现场环境恶劣,工人劳动强度大,测温操作是否便捷也是要考虑的测温需求。另外,铁水温度高达 1 500℃左右,测温操作是否安全也是需要考虑的。使用寿命是需要考虑的另一重要因素。概括来说,高炉炼铁过程理想的测温手段应该能够长期、稳定、连续、在线、准确地检测铁水温度。即:

- 1) 测温精度: $\pm 5^\circ\text{C}$;
- 2) 响应时间:5 s 左右
- 3) 使用寿命:长期使用数月以上
- 4) 安全性:操作安全且便捷。

目前,高炉铁水温度的测量方法可分为直接测量和预报两大类,其中直接测量方式中又可分为接触测量和非接触测量,接触测量包括快速热电偶测温法^[17]、光纤测温法^[18]和黑体空腔测温法^[19],非接触测温方式主要指红外测温技术^[20];预报方法可以分为基于高炉炼铁机理的预报方法^[26]和基于数据驱动的预报方法^[27]两种。为了便于直观对比不同铁水测温方法,表 1 总结了不同铁水温度检测方法的原理及优缺点。下文将对这些高炉铁水测温方法进行具体介绍分析。

2.1 快速热电偶测温技术

快速热电偶是一种接触式铁水测温技术,由于高炉铁口处铁水流速快,环境恶劣,且要在受限空间内进行开、堵铁口操作,难以采用快速热电偶来检测铁口铁水温度。因此,快速热电偶主要用在撇渣器后的铁水测温,其测温原理是基于金属的热电效应,即当两种不同金属材料串接成一个闭合回路,若两个接点温度不同时,闭合回路内会形成热电流^[28-29]。快速热电偶的原理图和实物图如图 5 所示。

快速热电偶的传感器是由两种不同金属导线焊接构成,即偶丝。常见的偶丝包括铂铑和钨铼两种,由于铂铑

表 1 高炉铁水测温方法对比

Table 1 Comparison of temperature measurement methods of molten iron in blast furnace

铁水测温方法	类型	测温原理	测温范围	测温精度	测温位置	测温滞后时间	使用寿命	优点	缺点
快速热电偶	接触式	热电效应	1 300℃ ~ 1 700℃	±5℃	撇渣器后	4~6 s	一次性	稳定可靠、较为准确	消耗型、一次只能测得一个温度点、间断测量
黑体空腔	接触式	辐射测温	1 400℃ ~ 1 600℃	±3℃	撇渣器后	300 s 以内	20~30 h	实时连续、较为准确	存在滞后时间,使用寿命有限
光纤测温	接触式	辐射测温	1 200℃ ~ 1 600℃	0.8%	撇渣器后	未见报道	未见报道	实时连续	消耗型、测温误差大
红外测温	非接触	辐射测温	1 400℃ ~ 1 600℃	±1.5%	出铁口处/撇渣器后	1 s 以内	数月以上	实时在线、安全无害、红外热成像技术可以获取二维面源温度	容易受环境因素干扰
机理驱动预报模型	非接触	炼铁机理	-	-	-	1 s 以内	未见报道	有一定可解释性	准确性不高,难以适应复杂炉况
数据驱动预报模型	非接触	数据间映射	-	-	-	1 s 以内	未见报道	直接建模,无需了解检测原理或冶炼机理	黑箱模型,不确定性大,受数据质量影响大

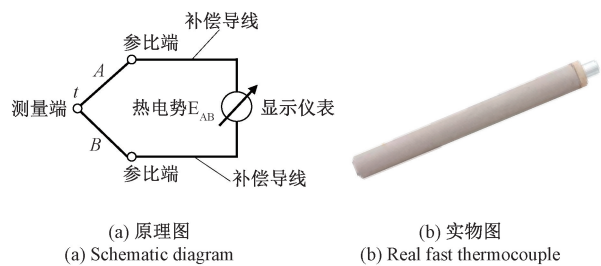


图 5 快速热电偶

Fig. 5 Fast thermocouple

价格昂贵,高炉现场使用的快速热电偶偶丝主要采用测温区间大、成本低的钨铼。

快速热电偶可以看作一种结构简单的测温仪器。高炉现场使用的快速热电偶测温范围一般为 1 300℃ ~ 1 700℃,测量精度或误差为±5℃,使用寿命为 1 次,即每次测温都会消耗一支热电偶,测温响应时间或滞后时间为 4~6 s。目前,大部分高炉现场直接显示快速热电偶测温结果,未对测温结果进行进一步数据处理。由于高炉出铁过程中利用快速热电偶测温次数有限,尚未有基于快速热电偶测温结果的智能工业系统。

20 世纪 60 年代,Kozlov 等^[17]基于该方法设计出带保护管的侵入式热电偶对高炉的铁水温度进行了测量。1978 年,石思顺等^[30]设计了具有金属陶瓷保护管的侵入式热电偶铁水连续测温装置,在武钢高炉试用取得了一定效果。1983 年,Mee 等^[31]对保护管的材料进行了改

进,侵入式热电偶的响应速度和使用寿命得到了提高,但是由于保护套管寿命较短,且昂贵的铂铑金属使得测温成本变高。目前,高炉现场主要使用价格便宜的一次性快速热电偶来检测撇渣器后的铁水温度,尽管如此,使用快速热电偶测温的人力成本和热电偶消耗成本也不容忽视。

快速热电偶直接通过与熔融铁水接触来检测温度,测温结果可靠稳定,不易受到出铁场粉尘、浮渣等干扰因素的影响,检测精度较高,是高炉现场普遍采用的测温方式。但快速热电偶的材质无法承受高温铁水,每次测温都会消耗一支热电偶。根据热电偶的测温原理可知,其每次测温只能获取某个位置处的单点温度。考虑到热电偶的消耗成本和工人操作的劳动强度,在一次出铁周期(出铁周期时间取决于高炉容积大小、炉况等)中,操作工

人往往只会检测有限次的铁水温度,属于间断式测温,无法获取整个出铁周期内铁水温度的实时变化情况,难以及时发现并调控异常炉温。需要说明的是,尽管快速热电偶的标称精度很高,但由于快速热电偶需要工人参与测温,工人的测温熟练程度、测温位置、浸入铁水时间、浸入铁水深度等主观因素都会影响最终的测温结果,不同的操作工人同一时间检测同一位置处的铁水温度数据间也可能存在偏差,甚至由于操作失误,可能存在热电偶已经烧损但未能测得温度的情况。此外,由于需要将快速热电偶插到测温杆的一端靠近高温铁水沟进行测温,测温过程存在飞溅火花,具有一定危险性,且劳动强

度大。因此,高炉现场一直期望能够在线连续安全获取铁水温度的检测技术。

2.2 黑体空腔测温技术

黑体空腔是一种接触式铁水测温技术,主要在撇渣器后方实时连续地检测铁水温度。黑体空腔传感器主要由测量管、测温探头及信号转换电路等相关硬件组成,其中将测量管的内壁由辐射特性稳定和具有镜-漫反射特性的材料制成,以使其成为近似的黑体空腔,其原理图^[32]和实物图如图 6 所示。

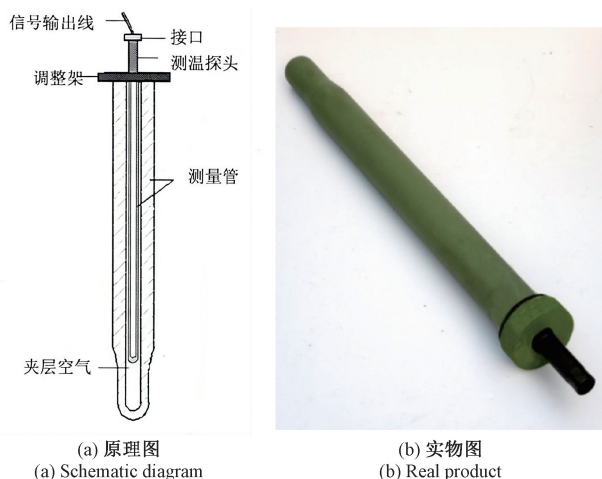


图 6 黑体空腔传感器
Fig. 6 Blackbody cavity sensor

黑体空腔测温仪器主要由黑体空腔传感器、信号处理器、计算机等构成。黑体空腔测温设备的测温范围一般为 $1\,400^{\circ}\text{C}$ 到 $1\,600^{\circ}\text{C}$, 测量精度或误差为 $\pm 3^{\circ}\text{C}$, 使用寿命 $20\sim 30\text{ h}$, 测温响应时间约为 4 min 左右^[33]。在测温时,将涂有防护材料的测量管直接插入熔融铁水中,使其与铁水充分接触以感知温度,测量管受热发出的辐射信号被光电转换器转换为与铁水温度具有一定映射关系的电信号,再经后续信号处理,最终得到铁水温度^[32,34]。需要指出的是,由于测量管需要接触高温铁水以充分感知铁水温度,因此,测量管的外壁材料需要具有耐高温、耐冲刷、耐腐蚀、耐氧化和导热性优良的性质。

谢植等^[35]基于在线黑体空腔理论,设计了黑体空腔式钢水连续测温传感器,在包钢炼钢厂方坯铸机中间包开展一系列钢水测温实验,能够实现一定时间内的连续钢水测温。王丰等^[36]利用外保护管和黑体空腔结构设计了浸入式测温传感器,根据黑体空腔的辐射信号和辐射测温理论,计算出钢水温度。

在黑体空腔测温仪器测温结果的处理方面,主要集中在测温滞后时间补偿上,刘勇震^[34]针对黑体空腔测温的滞后现象,研究了动态预估补偿方法,显著降低了黑体

空腔的响应时间。史新清^[37]指出由于黑体空腔传感器中的测量管需要与钢水充分接触以感知温度,测温过程存在一定滞后,构建了预估补偿系统以实现钢水温度的快速测量。针对黑体空腔传感器与金属陶瓷管存在轴不对中造成的响应滞后问题,方勇杰提出了一种同轴度检测方法,并对测温误差进行补偿^[38]。

在铁水测温智能工业系统方面,由于黑体空腔测温寿命有限且只能获取铁水温度的点源信息,尚未有在高炉出铁过程中利用黑体空腔构建智能工业系统的公开报告。虽然黑体空腔测温方法可连续精确地检测铁水温度。但是铁水温度高(约 $1\,500^{\circ}\text{C}$ 左右)、流速快,浸在铁水中的黑体空腔外壳会受到铁水的冲刷侵蚀,工作寿命有限,谢植等^[35]报道的黑体空腔传感器使用寿命范围为 $24\sim 40\text{ h}$,显然无法满足高炉铁水长期稳定连续测温的需求。同时,为使黑体空腔外壳能够承受高温,其外壳材料制造较为复杂,致使成本较高。此外,黑体空腔往往安装在撇渣器后方,而高炉铁水沟需要周期性清理维护,且其工作寿命较短,使其在现场安装使用较为繁琐。因此,高炉现场很少使用黑体空腔传感器进行铁水测温。

2.3 光纤测温技术

在冶金工业中,光纤测温技术主要指热辐射光纤温度传感器,根据光纤内产生的热辐射来感知温度,其理论基础是光纤纤芯中热点本身所产生的黑体辐射现象。因此从这个角度来看,光纤测温也可看作黑体空腔测温方式中特例。

光纤测温技术中的光耦合器探针是传感器。结合光电转换器、单片机等构成测温仪器。光纤测温的测温范围是 $1\,200^{\circ}\text{C}\sim 1\,600^{\circ}\text{C}$, 测温精度为 0.8% , 使用寿命和响应时间等指标未见报道^[18]。1985 年,北京钢铁学院胡纪五等^[19]提出光纤连续测温法,将光耦合器探针安装在靠近熔融铁水表面的地方,并接受来自熔融铁水的辐射能,利用光纤作为传输介质,通过光电转换器将温度转换为电压信号,最终将其计算为温度值。1997 年,日本 Miyahara 等^[39]直接将光纤一端埋入铁水中,另一端接入辐射高温计,构成了浸入式铁水光纤连续测温装置。高炉铁水温度很高,使得光纤损耗很大,且由于光纤传给辐射高温计的红外信号实际上是铁水温度直到环境温度的混合信号,造成测量误差较大。因此,高炉现场很少使用光纤测温技术,在高炉炼铁过程中也尚未有利用光纤测温技术的智能工业系统。

2.4 红外测温技术

红外测温技术是一种非接触在线检测铁水温度的手段,可以在撇渣器后方或出铁口处非接触地测温,避免高温铁水对红外设备的损坏,具有实时在线、操作便捷安全等优点,部分高炉现场采用这种测温方式。红外测温方

式的基本原理是辐射测温理论,即任何表面温度高于绝对零度(−273.15℃)的物体,都会向外发出红外辐射,物体表面发出红外辐射能量与其表面温度间存在函数关系,且物体表面温度越高,发射的红外能量的强度越大^[40-41]。

基尔霍夫定律^[42]指出在热平衡状态下,被测物体发射的辐射功率等于其吸收的辐射功率。进一步地,普朗克定律^[43]揭示了物体热辐射的基本规律,定量描述了黑体光谱辐射出射度与光谱波长间的关系。

$$M_{\lambda bb} = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \tag{1}$$

式中:λ 是波长, c₁ 为第一辐射常量, c₁ = 3.741 5 × 10⁸ W · μm⁴/m², c₂ 为第二辐射常量, c₂ = 1.438 8 × 10⁴ μm · K, T 是热力学温度。

在普朗克定律的基础上,维恩位移定律^[44]描述了黑体光谱辐射出射度的峰值 M_{λ_m} 与所对应的峰值波长 λ_m 和黑体的热力学温度 T 的关系表达式。

$$b = \lambda_m T \tag{2}$$

式中:b 为常数,且 b = 2 897.756 μm · K。

斯蒂芬-玻尔兹曼定律^[45]定量描述了黑体全辐射出射度与被测物体热力学温度间的关系。即:

$$M_{bb} = \sigma T^4 \tag{3}$$

式中:σ = 5.670 51 × 10^{−8} W/(m² · K⁴)。

上述定律是研究物体红外辐射特性的基本依据,红外测温设备在测温时接收到的红外辐射如图 7 所示,其基本测温原理可以表示为式(4)^[46]。

$$W_{rd} = \varepsilon_o \tau_a W_o + \rho_o \tau_a W_u + \varepsilon_a W_a \tag{4}$$

式中:W_{rd} 表示红外测温设备接收到的红外辐射, W_o

表示被测物体发出的红外辐射, W_u 表示周围环境发出的红外辐射, W_a 表示大气发出的红外辐射, ε_o 表示被测对象的发射率, τ_a 表示大气透射率, ρ_o 表示被测对象的反射率, ε_a 表示大气发射率。更详细的红外测温原理可以参考 Dewitt 等^[47]和 Zhang 等^[48]的辐射测温经典著作。

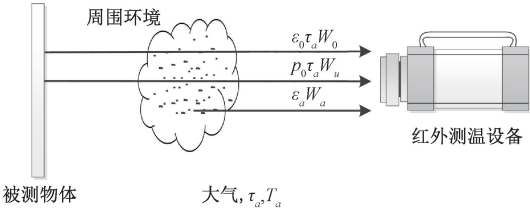


图 7 红外测温设备接收到的红外辐射
Fig. 7 Infrared radiation received by infrared temperature measuring equipment

在红外测温中,红外探测器是核心传感器,其可以分为两大类:热探测器和光子探测器。热探测器在吸收红外辐射后,其温度、电动势、电阻率等参数会发生变化,基于这些变化便可量化被测对象的红外辐射能量。光子探测器在吸收光子后产生内和外光电效应,从而可以测定吸收的光子数^[49]。基于红外测温原理和不同的红外探测器,可以设计不同的测温设备,包括红外测温仪、比色测温仪、红外热成像仪等,如图 8 所示。高炉铁水测温使用的红外测温设备测温范围一般为 1 400℃ ~ 1 600℃,测量精度为 ±1.5% (实验室良好环境下),可长期稳定在线使用,使用寿命较长,测温响应时间很短,基本上在 1 s 以内。下文主要介绍铁水测温中常用的上述 3 种红外测温设备。



图 8 常见的红外测温仪器设备
Fig. 8 Common infrared temperature measuring equipment

1) 红外测温仪

红外测温仪主要由光学系统、光电探测器、信号处理电路等部分构成,根据其工作波段下红外辐射与物体温度间的标定曲线,可以检测某一点区域的温度。红外测温仪具有实时在线、安全便捷等优点,因此,既可以在撇渣器后方检测铁水温度,也可在出铁口处测温。但需要指出的是,红外测温仪测温区域较小,必须对准被测对象

才能实现测温^[50]。另外,红外测温仪非接触检测的特性,使其容易受到蒸汽、粉尘、烟雾等环境因素的干扰,同时环境温度也会使温度标定曲线发生漂移,致使测温结果存在误差^[51-52]。

钟山等^[53]为克服环境因素的干扰,设计了兼具遮光和气冷功能的辅助装置,保障红外辐射测温计能够连续测量铁水温度。Sugiura 等^[54]利用高温辐射计来检测高

炉铁口铁水流的温度。孙国军等^[25]采用了便携式测温枪来实现铁口铁水温度的非接触式在线检测,但其本质上是利用红外测温仪来获取某一固定点的温度,难以自动对准铁口铁水流中的铁水区域,无法保证测温结果是铁水温度,且需要不断的人工调节来使测温点对准铁水流。由于铁水流表面具有炉渣、氧化层等物质,而红外测温仪只能固定检测某一点的温度,当该点受到高炉出铁场粉尘影响时,测温结果存在很大的误差,并且当铁水流形态发生改变或高炉现场不规律振动导致测温仪测温点偏移时,无法保证测温点是铁水区域,当测温点是非铁水区域时,测温结果将是错误的。

在红外测温仪检测结果的处理上,学者们主要研究了影响红外测温的因素及其对应的补偿方法。廖盼盼等^[55]研究了距离、发射率和外界环境温度等因素对红外测温仪测温的影响,并针对距离影响构建了温度补偿模型,提高了红外测温仪的测温精度。任晶秋等^[56]通过激光测距,构建了针对红外测温枪的温度补偿模型,实现了人体体温的精确检测。然而,现有文献中关于红外测温仪在高炉铁水测温上补偿建模的研究较少。在铁水测温智能工业系统方面,由于红外测温仪测温结果误差较大,无法指导高炉炼铁生产,目前也缺少利用红外测温仪开发工业智能系统的案例。

在高炉出铁场这种复杂工业测温场景中,存在飞溅炉渣、动态非均匀粉尘、保温层等干扰,使得红外测温仪的测温点容易受到粉尘或炉渣的遮挡,导致测温结果存在偏差。此外,铁水流的射流位置偏移或者现场施工剧烈振动带来的红外测温仪位置波动都会使得红外测温仪无法对准铁水流,致使测温结果是错误的。因此,尽管部分高炉现场在撇渣器处安装了红外测温仪,但测温结果的精度和可靠性难以满足现场需求,致使现场依旧采用快速热电偶的测温方式。

2) 比色测温仪

比色测温仪主要由色散元件、滤光片、红外探测器、信号处理器等构成,它基于双波段辐射测温原理,通过建立被测对象表面温度与被测物体发出的两个相邻窄波段内辐射强度的比值之间的定量关系来实现温度检测^[57],如式(5)和(6)所示。

$$r \approx \frac{\lambda_2^5}{\lambda_1^5} \exp\left(\frac{c_2}{\lambda_2 T} - \frac{c_2}{\lambda_1 T}\right) \quad (5)$$

$$T = \frac{c_2(\lambda_2^{-1} - \lambda_1^{-1})}{\ln(r\lambda_1^5/\lambda_2^5)} \quad (6)$$

式中: c_2 为第二辐射常量, λ_1 和 λ_2 是两个工作波长, r 为两个相邻狭窄波段内辐射强度的比值, T 为物体的表面热力学温度。比色测温仪测温时,默认物体在两个相邻窄波段内的发射率是近似相等的,则物体发射率的影响会降到很小,甚至忽略,如式(6)所示,即温度与物体发射率

几乎无关。这样无需获取被测对象的发射率即可利用比色测温仪进行测温,简化了测量步骤,提高了测量效率。

理论上,比色测温仪的测量结果由两个窄波段辐射强度的比值确定,受周围环境中干扰因素的影响较小,当被测物体周围环境中存在干扰时,例如粉尘、烟雾、水蒸气和其他杂质时,如果比色测温仪的波长选择合适,便可以依据标定模型获得准确的测量结果,避免了外部环境因素造成的测温误差。

在比色测温仪检测结果的处理上,吴凡^[58]构建了基于比色法的高温火焰温度场测量系统,利用中值滤波、相位相关性图像配准等算法对温度场进行解算。凌俊^[59]研究了基于彩色 CCD 比色测温原理的激光熔池温度场检测模型,提出了基于数学形态学和 Chan-Vese 主动轮廓模型的熔池分割方法,实现对激光熔池区域的分割。刘润^[60]、杨显涛^[61]基于比色测温技术,设计了 AOD 炉在线红外温度监控系统及对应的温度补偿模型,实现了 AOD 炉内钢水熔液的温度的在线检测。实际上,比色测温仪的性能与所选的两个波长有关,测量结果对两个辐射能的比值非常敏感,两个辐射能的比值波动会带来很大的测温误差。此外,比色测温中两个工作波段下的发射率并非严格相等,且发射率与波长的关系也难以准确地确定。因此,比色测温方式在高炉铁水温度检测中应用较少,尚未有利用比色测温技术研发高炉铁水测温相关的工业智能系统案例。

3) 红外热成像仪

通常,工业用非制冷型红外热成像仪由光学成像镜组、非制冷焦平面阵列探测器、电子信号处理系统和显示系统 4 个部分构成,如图 9 所示。光学成像镜组将物体发射的红外辐射聚到探测器上,探测器接收红外辐射,并将红外辐射转变为电信号输出,电子信号处理系统负责处理来自探测器的电信号,并将依据一定规则将其转化为温度信息,最终在显示系统中显示人眼可见的被测对象红外热图像,红外热像仪便是依据红外热成像测温原理研制的^[62-63]。

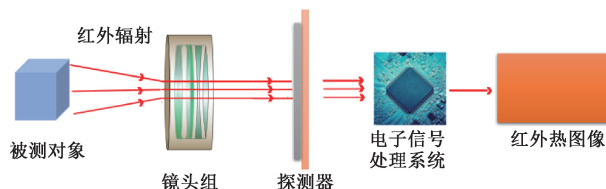


图 9 红外热成像原理图

Fig. 9 Schematic diagram of infrared thermal imaging

红外热成像是一种常用温度场检测技术,通过红外探测器检测物体表面的红外辐射,并将探测器检测信号转化为物体表面温度,并借助伪彩色色标将物体温度分

布渲染成人眼可见的图像,以不同颜色表征物体表面温度分布。红外热成像的优点如下^[64]:

(1) 红外热成像是非接触测温的,红外热像仪不需要接触被测对象,使得安全检测高温、强腐蚀的物体成为可能,如高温熔融金属铁水、强酸等;

(2) 红外热成像是一种非侵入式技术,因此,应用红外热成像不会破坏被测物体表面的原有形态,可以实现原位检测;

(3) 红外热成像可以实时检测,不仅能够静态的目标进行高速扫描,还可以对快速移动的目标进行检测;

(4) 红外热成像可以提供二维红外热图像,因此可以对红外热图像对应的温度分布进行深入分析;

(5) 红外热成像没有有害辐射,可以在很多场合安全应用。

在红外热成像仪检测结果的处理上,红外热成像仪获取的是被测对象的二维面源温度场,国内外学者在应用红外热成像技术检测铁水温度方面展开了相关研究。西班牙 Usamentiaga 等^[65]利用非制冷焦平面红外热成像仪对鱼雷罐车内的铁水进行测温,采用多元函数拟合算法,对红外图像进行处理,利用阈值从红外图像上识别铁水和炉渣,确定感兴趣区域,试图克服炉渣因素造成的测量误差,但鱼雷罐车所处环境与出铁场铁口或撇渣器后铁水流所处环境存在较大差异,难以直接应用该方法检测出铁场铁水流温度。潘冬等^[66]提出基于红外热像仪获取的面源温度信息,结合图像处理技术,实时在线地检测某高炉撇渣器处铁水温度,该高炉撇渣器后基本上不存在粉尘的干扰,环境良好,而在高炉出铁时,铁口附近存在间歇性随机分布粉尘,环境恶劣,致使该方法难以应用到出铁口处铁水温度检测。Pan 等^[67]针对撇渣器后铁水流上方存在多种粉尘干扰状态,引入多态检测的思想,利用智能算法自动识别粉尘干扰状态,并构建了铁水流表面氧化层温度的多态检测模型,并根据氧化层温度与铁水流温度间的关系实现了撇渣器后铁水温度的在线检测。Pan 等^[68]先利用红外热像仪检测撇渣器处铁水温度,进而结合铁水沟温度降低模型,根据撇渣器后铁水温度间接地推导出铁口处铁水温度,这种融合红外视觉检测与机理建模的方式对复杂环境下精确检测温度具有一定借鉴意义,但机理模型构建需要大量假设条件,且模型参数往往确定困难,限制了这种方法的进一步应用。为了在线获取高炉出铁口处铁水温度,Pan 等^[69]提出了基于红外视觉的高炉铁水测温方法,研发了工业级红外热成像测温系统,并通过构建的补偿模型来减小粉尘对红外测温的影响,在高炉现场进行了成功应用。进一步地,Pan 等^[70]针对动态非均匀粉尘对出铁口铁水红外视觉温度检测方法的影响,提出了基于多类异质图像特征的温度分

区补偿方法,一定程度上克服了粉尘对红外视觉测温的影响,在线获取了准确的出铁口铁水温度。

在铁水测温智能工业系统方面,红外热成像技术能够获取铁水流二维红外热图像,为高炉出铁过程许多智能化方法及系统研究提供了数据基础。利用红外热成像技术在线获取的准确铁水温度信息,可以对铁水温度和高炉炉温变化趋势进行深入分析。另外,高炉铁口铁水流红外热图像对铁水流渣铁比计算也具有重要价值,这是因为铁口铁水流是铁水和炉渣的混合物,而铁水发射率和炉渣发射率有显著差异,因此铁水和炉渣在红外热图像也会表现出有差异,故铁水流红外热图像为渣铁比计算、炉缸渣铁状态评估提供了重要数据来源。Jiang 等^[71]利用实时在线检测的铁水温度数据,提出了基于 Attention-wise 深度传递网络的高炉炼铁过程硅含量、磷含量、硫含量等多项铁水质量指标预测方法。结合可见光视觉,He 等^[72-73]研究了高炉铁口处铁水流速和流量检测方法,为分析炉缸内压力及铁水液位提供了关键数据支撑。Jiang 等^[74-75]利用高炉铁口处铁水流图像,构建了新型高炉铁口堵口时间智能监测模型,为高炉炼铁过程智能堵口提供了技术手段。此外,利用高炉铁口处铁水流图像,还可以对喷口、卡焦、跑大流等异常出铁状况进行实时智能监测。这些研究的开展,将为大型高炉出铁过程关键信息智能感知系统的研发提供关键技术支撑,有助于高炉出铁操作数字化智能化水平的提升。

综上,为了直观对比 3 种红外测温方式的优缺点,表 2 对这些方式进行了总结。相比红外测温仪和比色测温仪,红外热像仪可以获取被测对象的红外热图像,即被测物体的二维面源温度信息,能够显示整个被测物体或者某一区域的表面温度,一定程度上保证了被测对象处于测温视场内,在众多工业过程有着广泛的应用。尽管如此,其同样容易受到粉尘、烟雾、水蒸气等环境因素的干扰,致使其测温结果存在误差^[76],需要针对干扰因素的红外测温补偿方法来克服环境因素的干扰。幸运的是,许多学者已经开展了针对不同干扰因素的红外测温补偿方法,Pan 等^[77-80]系统地研究了粉尘对红外测温的影响,并从红外测温原理和数据驱动等角度构建了温度补偿模型以克服粉尘造成的红外测温误差。Zhang 等^[81]分析了测温距离、大气透射率等对红外测温精度的影响,并构建了基于数据拟合的温度补偿模型。方向发射率、红外热像仪的视场角和测温角度等因素对红外测温结果的影响也有相关学者进行了研究^[82-84]。

结合红外热成像技术在温度检测上的优势和红外测温补偿方法的国内外研究进展以及红外热成像技术在高炉出铁过程智能化应用研究中巨大作用价值,红外热成像技术在解决高炉铁水温度在线准确检测难题及推动高炉出铁过程智能化方面上最具潜力。

表 2 红外测温方法对比

Table 2 Comparison of infrared temperature measurement methods

红外测温方法	测温原理	检测区域	优点	缺点
红外测温仪	利用被测对象表面温度与物体某波段内辐射强度间的标定关系实现测温	点区域	非接触,连续在线,安全便携	检测区域有限,易受粉尘、烟雾、水蒸气等环境因素影响
比色测温仪	利用被测对象表面温度与物体两个相邻窄波段内辐射强度的比值间的标定关系实现测温	点区域	非接触,连续在线,安全便携,受环境影响小	检测区域有限,设计复杂,对辐射强度比值敏感
红外热成像仪	利用被测对象表面温度与物体某波段内辐射强度间的标定关系实现测温	二维面源区域	非接触,连续在线,提供红外热图像,可对快速运动物体成像检测	易受粉尘、烟雾、水蒸气等环境因素影响

2.5 其他测温技术

除了上述利用检测设备获取铁水温度外,不少学者也开展了机理驱动的温度预报模型和数据驱动的温度预报模型方面的研究。本文主要聚焦铁水温度检测仪器设备,因此,将机理驱动和数据驱动的温度预报模型归在其他测温技术,并做简单介绍。

1) 机理驱动预报模型

机理驱动的预报模型主要指根据高炉炼铁工艺原理建立的机理数学模型。以铁水温度预报为目的的机理分析模型主要有法国钢铁研究院提出的 Wu 模型^[26]、日本新日铁开发的 Tc 模型^[85]等。这些模型大多利用高炉热量平衡和质量平衡,推导出代表高炉炉热状态的指数,发展了高炉静态平衡模型。Wu 模型构建炉热 Wu 指数来刻画炉内高温区的热平衡,并结合高炉反应机理和煤气、熔融生铁成分等数据来计算 Wu 指数,进而通过 Wu 指数的变化情况来描述高炉炉内铁水温度的变化情况。Tc 模型主要指炉热指数模型,通过构建铁水温度、炉渣温度、生铁硅含量与炉热指数间的关系来量化表示高炉炉内热状态。这些模型加深了人们对高炉局部运行情况的认识,具有一定可解释性,但由于高炉冶炼过程极其复杂,很难建立精准的机理模型,致使机理预报模型存在准确性不高的问题,尤其在炉况波动较大时,静态机理模型更加难以适用。

2) 数据驱动预报模型

数据驱动的预报模型主要利用神经网络、支持向量机、极限学习机等机器学习算法来刻画高炉炼铁过程变量与铁水温度的映射关系,即以过程变量作为机器学习模型的输入,以撇渣器后快速热电偶实测铁水温度作为模型的预测输出。这种方式无需深入研究高炉冶炼过程的复杂机理,主要聚焦数据间高精度映射关系的获取,尤其随着人工智能和计算算力的提升,数据驱动的预报模型受到很多学者的青睐^[86]。周平等^[87]构建了集成自编码与 PCA 的高炉多元铁水质量随机权神经网络,实现了对高炉铁水温度的在线估计。

Zhang 等^[88]以炉压、顶压、富氧流量等高炉炼铁过程变量为输入,提出了一种改进的极限学习机算法,建立了高炉熔融金属温度的软测量模型。Zhou 等^[89]针对高炉非线性时变的特点,提出了带有遗忘因子的随机向量函数链接神经网络,并引入 Cauchy 分布函数加权 m 估计来增强改进网络的鲁棒性,以实现铁水温度的在线精确估计。

基于数据驱动的铁水温度预测模型效果很大程度上取决于输入数据的质量和规模,高炉炼铁过程十分复杂,部分传感器的检测值存在误差或是错误的,且不同传感器的采样周期不同,致使用于训练的数据质量无法保证。此外,数据驱动预报模型属于黑箱模型,不确定性大,难以准确刻画或适应复杂多变的高炉炉况。

3 主要问题和展望

近年来,在“双碳”战略实施背景下,为实现高炉炼铁过程的绿色低碳高效生产,对高炉铁水温度在线检测的精确度和稳定性要求越来越高。虽然红外视觉测温方法在高炉出铁口铁水温度在线检测中取得较好效果,但在高炉出铁场这种复杂场景下仍有一些难题需要解决。本节讨论了高炉铁水温度在线检测存在的主要问题,并展望了未来研究方向。

3.1 主要问题

1) 环境干扰认知问题。(1) 现有测温手段缺少对高炉出铁场环境干扰因素的精准识别。出铁场粉尘、炉渣等环境因素是影响红外视觉测温精度的重要因素,且这些干扰具有间歇性出现的动态特性,虽然红外热成像技术可以获取被测对象二维面源温度信息,但容易受到环境干扰因素的影响,需对环境干扰进行精准识别以判断是否存在环境干扰;(2) 现有测温手段缺少对环境干扰因素的实时量化。环境干扰因素的浓度、透射率等物性参数的实时量化是针对性补偿红外测温误差的依据,但红外热成像不具有量化环境干扰因素物性参数的功能,

如何在识别干扰因素的基础上实现对环境干扰因素的量化值得思考。

2) 实时动态识别问题。红外视觉测温方式可以获取铁水流的红外热图像,但红外热图像中不仅含有感兴趣的铁水区域,也含有炉渣、背景等区域,如何识别出铁水区域对于精准测温十分重要。比如,出铁口处铁水流是铁水和炉渣的混合物,直接计算区域温度平均值的做法无法获取准确的铁水温度,需进行渣铁动态精准识别,才能获取铁水温度。同理,在撇渣器处测温时,也需要将铁水区域与炉渣、保温层等非感兴趣区域进行识别区分。虽然有学者通过设定温度阈值的方式来识别出铁水,但仅靠设定阈值难以适应高炉出铁场的恶劣环境和复杂多变的高炉炉温状况。

3) 检测精度问题。(1) 实验室温度标定问题。红外热像仪出厂前在实验室标定时所处检测环境良好,不存在出铁场内粉尘等环境干扰因素,也未考虑粉尘、炉渣等干扰因素的影响,显然,在实验室标定好的红外热成像仪难以直接用于高炉出铁场内的复杂测温场景。(2) 高炉现场温度补偿问题。尽管现有文献研究了出铁场粉尘对红外视觉测温的影响,但粉尘、环境温度、测温距离等因素均会影响红外测温结果,现有研究缺少对这些影响因素的综合考虑,因此,高炉铁水温度的误差补偿效果还有较大的提升空间。

4) 稳定性问题。稳定性是工业检测仪器设备面临的一个重要问题。(1) 仪器设备自身防护能力。很多红外热成像仪在实验室良好环境下能有效工作,但在复杂工业现场存在失准的风险,一个重要原因便是高炉出铁场存在高温辐射、炉渣飞溅、动态非均匀分布粉尘及不规则振动等干扰。因此,必须防护好红外热成像检测设备,才能长期稳定在线地检测铁水温度。(2) 仪器材料的使用寿命。由于红外热成像仪需要连续在线地工作,但红外探测器、红外镜头等组件随着使用工作时间的增加和环境温度的升高,可能存在老化的风险。因此,如何在高炉出铁场复杂环境内保证红外热成像仪的使用寿命值得思考。

3.2 展望

结合高炉铁水温度在线准确检测尚存在的问题,还需要检测技术的进一步发展,本文对未来研究方向进行了展望。

1) 环境干扰因素的认知

高炉出铁场环境干扰认知为铁水温度在线精准检测提供了必要的先验环境信息。(1) 环境干扰因素的精准识别。在高炉出铁场这种复杂工业场景内存在粉尘、炉渣等动态干扰因素,严重影响红外测温精度,需进一步研究环境干扰因素的精准识别方法,为针对性的动态补偿提供判断条件;(2) 环境干扰因素的实时量化。高炉现场粉尘具有非均匀分布特点,粉尘的浓度、透射率等物性

参数的实时量化为动态补偿红外测温误差提供依据,因此,如何在复杂出铁场内定量描述粉尘等干扰因素值得深入探索。尤其随着人工智能和目标检测算法的发展,利用气体目标检测算法对高炉出铁场粉尘干扰进行识别与量化成为可能。

2) 铁水温度在线补偿

现有红外测温补偿方法大多从红外辐射测温原理或数据驱动角度来构建补偿模型,基于辐射测温原理的模型中参数确定往往是研究难点,而基于数据驱动的补偿模型面临数据采集工作量大或难以采集的问题,联合红外测温原理与数据驱动模型有望为铁水温度补偿在线补偿提供一个新思路。此外,现有铁水温度在线补偿方法大多针对单个干扰因素,在高炉现场存在多种干扰因素,如现场测温距离与实验室标定距离不一样,检测光路中存在粉尘、炉渣等环境干扰因素,因此,针对多个干扰因素的温度补偿模型尚需进一步研究,以保证红外视觉测温方式的精确度。

3) 多源信息协同检测

现有铁水测温方法往往只用到单一信息源,如红外视觉测温方法只利用了铁水流的红外辐射能量,多源信息协同检测可能存在互补的作用。因此,可以结合红外视觉信息和其他与铁水温度相关的信息源,研究多源信息协同检测方法,充分利用多源信息间的互补性或协同性,提高红外视觉测温结果的精确度,这将会是高炉铁水温度在线精准检测的一个重要研究方向。

4) 炉温趋势分析

由于高炉现场大多采用快速热电偶测温方式,致使一次出铁周期中只能获取有限个铁水温度点,难以刻画铁水温度的变化趋势。而红外视觉测温方式可以连续在线地获取高炉铁水温度,通过对铁水温度变化趋势的挖掘分析,如稳定不变、缓慢上升、快速上升、缓慢下降、快速下降等趋势,有望为高炉炉温趋势判断提供科学指导,使得及时发现异常炉温状态、精准调控炉况、保证高炉稳定顺行成为可能。

5) 铁水质量闭环控制

高炉炼铁的目的就是生产满足质量要求的铁水。由于传统铁水测温技术无法在线精确获取铁水温度信息,致使高炉铁水质量闭环控制缺少在线可靠的铁水温度数据支撑。在线准确的铁水温度为铁水质量的优化控制提供了关键反馈信息,有助于高炉炉长及时调节高炉的入炉原料、喷煤量、鼓风量等操作参数,以达到提升铁水质量和降低高炉能耗排放的目的。因此,如何科学地利用在线铁水温度信息,实现铁水质量闭环控制是十分值得探索的。

总体而言,通过开展上述研究方向,有望使高炉铁水红外视觉测温技术更加适用于复杂的高炉现场,推动高

炉炼铁过程铁水温度检测的无人化与标准化,提升高炉出铁场操作的智能化程度。

4 结 论

高炉铁水温度检测技术是钢铁行业关键信息检测的重要内容,实时在线、准确稳定地获取铁水温度更是高炉现场迫切期望解决的难题。综合对比现有铁水测温技术,红外视觉测温方法在实时在线准确获取铁水温度上具有巨大潜力,但也面临着粉尘等干扰因素造成的测温误差,尚未在全国高炉炼铁过程推广应用。因此,在高炉铁水温度在线准确检测方面仍需要科研与工程人员的不断探索与紧密合作,深入研究环境干扰因素的认知、铁水温度在线补偿、多源信息协同检测等方面的问题,革新现有快速热电偶测量铁水温度的方式,实现高炉出铁场铁水温度的在线准确检测,为高炉炼铁过程数字化智能化转型升级提供检测技术支撑。

参考文献

- [1] 姚同路,吴伟,杨勇,等.“双碳”目标下中国钢铁工业的低碳发展分析[J]. 钢铁研究学报,2022,34(6): 505-513.
YAO T L, WU W, YANG Y, et al. Analysis on low-carbon development of China's steel industry under “dual-carbon” goal [J], Journal of Iron and Steel Research, 2022,34(6):505-513.
- [2] 钢铁工业调整升级规划(2016-2020年)[J]. 中国钢铁业,2016(12):5-13.
The iron and steel industry adjustment and upgrade plan(2016-2020) [J]. Iron and Steel Sector in China, 2016(12):5-13.
- [3] 徐可可,张晓刚:让科技创新有能力引领世界钢铁发展潮流[N]. 中国冶金报,2022-11-29(001), DOI:10.28153/n.cnki.ncyjb.2022.002046.
XU K K, ZHANG X G: Let scientific and technological innovation have the ability to lead the world steel development trend [N]. China Metallurgical News, 2022-11-29(001), DOI:10.28153/n.cnki.ncyjb.2022.002046.
- [4] 储满生,王宏涛,柳政根,等. 高炉炼铁过程数学模拟的研究进展[J]. 钢铁,2014(11):1-8.
CHU M SH, WANG H T, LIU ZH G, et al. Research progress on mathematical modeling of blast furnace ironmaking process[J]. Iron and Steel, 2014(11):1-8.
- [5] 徐匡迪. 低碳经济与钢铁工业[J]. 钢铁,2010,45(3): 1-12.
XU K D. Low carbon economy and iron and steel industry[J]. Iron and Steel, 2010,45(3):1-12.
- [6] 李俊方. 高炉炼铁过程数据驱动建模及智能优化[D]. 杭州:浙江大学,2022.
LI J F. Data-Driven modeling and intelligent optimization for blast furnace ironmaking process [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.
- [7] 李军朋. 高炉冶炼过程的铁水硅含量分析及其建模研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2015.
LI J P. Analysis and modeling research on hot metal silicon content of blast furnace smelting process [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2015.
- [8] 蒋珂,蒋朝辉,谢永芳,等. 高炉铁水质量信息在线检测方法综述[J]. 冶金自动化,2022,46(02):19-33, 45.
JIANG K, JIANG ZH H, XIE Y F, et al. A review of on-line detection method for quality information of molten iron in blast furnace [J]. Metallurgical Industry Automation, 2022,46(2):19-33,45.
- [9] JIANG Z H, PAN D, GUI W H, et al. Temperature measurement of molten iron in taphole of blast furnace combined temperature drop model with heat transfer model[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2018, 45(3): 230-238.
- [10] CHILDS P R N, GREENWOOD J R, LONG C A. Review of temperature measurement [J]. Review of Scientific Instruments, 2000, 71(8): 2959-2978.
- [11] 余跃,陈学刚,裴忠治,等. 高温测量技术及其在熔池测温中的应用进展[J]. 有色冶金节能,2020, 36(2): 6-12.
YU Y, CHEN X G, PEI ZH ZH, et, al. High temperature measurement technology and its application in molten pool [J]. Energy Saving of Non-Ferrous Metallurgical, 2020, 36(2): 6-12.
- [12] 解瑞东,朱尽伟,张航,等. 激光增材制造温度场检测分析与控制综述[J]. 激光与光电子学进展,2020, 57(5): 050003.
XIE R D, ZHU J W, ZHANG H, et al. Review of detection, analysis and control of temperature field in laser additive manufacturing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(5): 050003.
- [13] 周萌,毛岩鹏,王文龙,等. 应用于微波场的温度测量方法的研究进展[J]. 电子测量与仪器学报,2022, 36(11): 221-235.
ZHOU M, MAO Y P, WANG W L, et al. Research progress of temperature measurement methods applied to

- microwave field[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(11): 221-235.
- [14] SAXEN H, GAO C, GAO Z. Data-driven time discrete models for dynamic prediction of the hot metal silicon content in the blast furnace—A review [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2012, 9(4): 2213-2225.
- [15] UEDA S, NATSUI S, NOGAMI H, et al. Recent progress and future perspective on mathematical modeling of blast furnace[J]. ISIJ International, 2010, 50(7): 914-923.
- [16] KUANG S, LI Z, YU A. Review on modeling and simulation of blast furnace [J]. Steel Research International, 2018, 89(1): 1700071.
- [17] KOZLOV V, MALYSHKIN B. Accuracy of measurement of liquid metal temperature using immersion thermocouples [J]. Metallurgist, 1969, 13(6): 354-356.
- [18] 张华, 谢植. 钢水连续测温传感器的准确度提高和结构优化[J]. 计量学报, 2008, 29(1): 38-41.
ZHANG H, XIE ZH. Accuracy improvement and structure optimization of continuous temperature measurement sensor for liquid steel[J], Acta Metrologica Sinica, 2008, 29(1): 38-41.
- [19] 胡纪五, 薛秀琴, 王为仁. 高炉铁水连续测温技术的研究[J]. 仪器仪表学报, 1987, 8: 433-436.
HU J W, XUE X Q, WANG W R. Study on continuous temperature measurement of hot metal in blast furnace [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1987, 8: 433-436.
- [20] USAMENTIAGA R, PEREZ L, MOLLEDA J, et al. Temperature measurement of streams of molten pig iron during pouring using infrared computer vision[C]. 2011 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, IEEE, 2011: 1-6.
- [21] 任彦军, 王家伟, 张晓兵, 等. 基于 LM 算法 BP 神经网络的高炉-转炉界面铁水温度预报模型[J]. 钢铁, 2012(9): 40-42.
REN Y J, WANG J W, ZHANG X B, et al, Prediction model of hot metal temperature for BF-BOF interface based on LM BP neural network [J]. Iron and Steel, 2012(9): 40-42.
- [22] GEERDES M, CHAIGNEAU R, LINGIARDI O. Modern blast furnace ironmaking: An introduction [M]. Amsterdam: Ios Press, 2020.
- [23] 杨士岭. 高炉出铁口炮泥加工机理及开铁口装备研究[D]. 济南: 山东大学, 2011.
- YANG SH L. Study on the machining mechanism of blast furnace taphole clay and tapping equipment [D]. Jinan: Shandong University, 2011.
- [24] 李志峰. 高炉炉前设备研究与实践[J]. 中国金属通报, 2018(8): 202-203.
LI ZH F. Research and practice on pre-furnace equipment of blast furnace [J]. China Metal Bulletin, 2018(8): 202-203.
- [25] 孙国军, 董亚锋. 铁口连续测温系统在宝钢 3 号高炉的应用[J]. 炼铁, 2017, 36(5): 47-49.
SUN G J, DONG Y F. Application of Tiekou continuous temperature measuring system in No. 3 blast furnace of baosteel [J]. Ironmaking, 2017, 36(5): 47-49.
- [26] STAIB C, MICHARD J. French experiments for controlling the blast furnace operation using a computer on line[C]. Iron Making Conf. Proc. PittsBurgh, 1964, 23: 3-50.
- [27] JIMENEZ J, MOCHON J, DE AYALA J S, et al. Blast furnace hot metal temperature prediction through neural networks-based models [J]. ISIJ International, 2004, 44(3): 573-580.
- [28] BAJZEK T. J. Thermocouples: A sensor for measuring temperature[J]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2005, 8(1): 35-40.
- [29] 杨兆欣, 顾正华, 张文清, 等. 基于热电偶的低速风洞气流温度误差补偿方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(5): 68-76.
YANG ZH X, GU ZH H, ZHANG W Q, et al. The error compensation method of the low-speed wind tunnel flow temperature based on the thermocouple [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(5): 68-76.
- [30] 石思顺, 郑孝天, 陈书瀚, 等. 连续测量铁水温度新装置及其应用[J]. 冶金自动化, 1980(6): 48-52.
SHI S SH, ZHENG X T, CHEN SH H, et al. A new device for continuous measurement of hot metal temperature and its application [J]. Metallurgical Automation, 1980(6): 48-52.
- [31] MEE D K. Automatic temperature measurement for casting furnaces using an immersion thermocouple [J]. Ntis, Springfield, VA(USA), 1983, 27: 1983.
- [32] 张华, 谢植. 钢水连续测温传感器动态测温的仿真研究[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(10): 1775-1780.
ZHANG H, XIE ZH. Simulation study on dynamic temperature measurement of liquid steel continuous temperature measurement sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(10): 1775-1780.

- [33] 薛鹏,王毅,陈显著. 黑体空腔钢水连续测温系统的应用实践[J]. 山东冶金, 2008(5): 36, 39.
- XUE P, WANG Y, CHEN X ZH. Application practice of continuous temperature measurement system for molten steel in blackbody cavity [J]. Shandong Metallurgy, 2008(5): 36, 39.
- [34] 刘勇霞. 黑体空腔钢水连续测温传感器传热模型及应用研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
- LIU Y X. Heat Transfer model and application research of blackbody cavity liquid steel continuous temperature measurement sensor [D]. Shenyang: Northeastern University, 2011.
- [35] 谢植, 次英, 孟红记, 等. 基于在线黑体空腔理论的钢水连续测温传感器的研制[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(5): 446-448.
- XIE ZH, CI Y, MENG H J, et al. Development of continuous temperature measuring sensor for liquid steel based on blackbody cavity [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(5): 446-448.
- [36] 王丰, 吴爱华. 红外测温技术在高温液体连续测温系统中的应用[J]. 冶金自动化, 2007(6): 47-50.
- WANG F, WU AI H. Application of infrared temperature measurement technology in continuous temperature measurement system of high temperature liquid [J]. Metallurgical Automation, 2007(6): 47-50.
- [37] 史新清. 黑体空腔连续测温传感器快速测量研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2017.
- SHI X Q. The fast measurement research of blackbody cavity liquid steel continuous temperature sensor [D]. Shenyang: Northeastern University, 2017.
- [38] 方勇杰. 黑体空腔钢水连续测温传感器同轴度检测方法研究及 DSP 实现[D]. 沈阳: 东北大学, 2019.
- FANG Y J. Research on coaxiality detection method of liquid steel temperature sensors of the black body cavity type and DSP implementation [D]. Shenyang: Northeastern University, 2019.
- [39] MIYAHARA H, OHSUMI A. Immersion-type optical fiber pyrometer for continuous caster [J]. NKK Technical Review, 1997, 76: 79-81.
- [40] MALDAGUE X P V. Nondestructive evaluation of materials by infrared thermography[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2012.
- [41] SPEAKMAN J R, WARD S. Infrared thermography: Principles and applications [J]. Zoology, 1998, 101: 224-232.
- [42] USAMENTIAGA R, VENEGAS P, GUEREDIAGA J, et al. Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing[J]. Sensors, 2014, 14(7): 12305-12348.
- [43] 杨风暴. 红外物理与技术[J]. 北京: 电子工业出版社, 2014.
- YANG F B. Infrared physics and technology [J]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014.
- [44] 曹鼎汉. 维恩位移定律及其应用[J]. 红外技术, 1994, 16(2): 46-48.
- CAO D H. Wien displacement law and its application [J]. Infrared Technology, 1994, 16(2): 46-48.
- [45] VOLLMER M. Infrared thermal imaging [M]. Cham: Springer International Publishing, 2021: 666-670.
- [46] ZHANG Y, CHEN Y, FU X, et al. The research on the effect of atmospheric transmittance for the measuring accuracy of infrared thermal imager[J]. Infrared Physics & Technology, 2016, 77: 375-381.
- [47] DEWITT D P, NUTTER D G. Theory and practice of radiation thermometry [M]. New York: Wiley, 1989.
- [48] ZHANG Z, TSAI B K, MACHIN G. Radiometric temperature measurements: I. Fundamentals [M]. Pittsburgh: Academic Press, 2009.
- [49] 罗格爾斯基. 红外探测器[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- ROGELSKY A. Infrared detector [M] Beijing: Machinery Industry Press, 2014.
- [50] MANARA J, ZIPF M, STARK T, et al. Long wavelength infrared radiation thermometry for non-contact temperature measurements in gas turbines [J]. Infrared Physics & Technology, 2017, 80: 120-130.
- [51] PAN D, JIANG Z, GUI W, et al. Influence of dust on temperature measurement using infrared thermal imager[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(6): 2911-2918.
- [52] 张志强, 王萍, 于旭东, 等. 高精度红外热成像测温技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(5): 10-18.
- ZHANG ZH Q, WANG P, YU X D, et al. Study on high accuracy temperature measurement technology of infrared thermal imager [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(5): 10-18.
- [53] 钟山, 廖扬华. 铁水温度连续测量的专用辅助装置及铁水温度连续测量系统: CN200910050563.0 [P]. 2009-10-14.
- ZHONG SH, LIAO Y H. A special auxiliary device for continuous measurement of molten iron temperature and a continuous measurement system for molten iron

- temperature; CN200910050563.0[P]. 2009-10-14.
- [54] SUGIURA M, OOTANI Y, NAKASHIMA M. Radiation thermometry for high-temperature liquid stream at blast furnace[C]. SICE Annual Conference (SICE), 2011 Proceedings of IEEE, 2011: 472-475.
- [55] 廖盼盼, 张佳民. 红外测温精度的影响因素及补偿方法的研究[J]. 红外技术, 2017, 39(2): 173-177.
- LIAO P P, ZHANG J M. Research on influence factors for measuring and method of correction in infrared thermometer[J]. Infrared Technology, 2017, 39(2): 173-177.
- [56] 任晶秋, 钟攀, 张琳, 等. 人体红外测温枪的温度测量补偿研究[J]. 电子测量技术, 2021, 44(16): 62-67.
- REN J Q, ZHONG P, ZHANG L, et al. Research on temperature measurement compensation of human infrared temperature measuring gun[J], Electronic Measurement Technology, 2021, 44(16): 62-67.
- [57] 王磊. 基于辐射测温理论的比色测温仪的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2019.
- WANG L. Research on colorimetric thermometer based on radiation thermometer theory [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2019.
- [58] 吴凡. 基于比色法的高温火焰温度场测量系统研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- WU F. Research on temperature field measurement system for high-temperature flame based on dual-wavelength pyrometric technique [D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
- [59] 凌俊. 基于彩色 CCD 的激光熔覆熔池温度场检测方法研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2023.
- LING J. Research on melt pool temperature field detection method in laser cladding based on color CCD[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2023.
- [60] 刘润. 基于光纤比色测温技术的 AOD 炉铁水温度在线监测系统研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2011.
- LIU R. In study of molten iron temperature on-line monitoring system on AOD Furnace based on the technology of optical-fiber colorimetric thermometer[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2011.
- [61] 杨显涛. 基于底枪的 AOD 炉红外温度监控系统的温度补偿研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2018.
- YANG X T. Research on temperature compensation of AOD furnace infrared temperature monitoring system based on bottom gun [D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2018.
- [62] 杨立, 杨桢. 红外热成像测温原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- YANG L, YANG ZH. Temperature measurement principle and technology of infrared thermography[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [63] 马琳, 刘春阳, 谢赛宝, 等. 基于人像识别和感兴趣区域定位的红外图像测温研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(2): 186-192.
- MA L, LIU CH Y, XIE S B, et al. Research on infrared image temperature measurement based on portrait recognition and region of interest localization[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(2): 186-192.
- [64] BAGAVATHIAPPAN S, LAHIRI B B, SARAVANAN T, et al. Infrared thermography for condition monitoring-A review[J]. Infrared Physics & Technology, 2013, 60: 35-55.
- [65] USAMENTIAGA R. Temperature measurement of molten pig iron with slag characterization and detection using infrared computer vision [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 61(5): 1149-1159.
- [66] 潘冬, 蒋朝辉, 桂卫华, 等. 基于红外热图像面源信息映射特征的高炉铁水温度检测[C]. 第 28 届中国过程控制会议论文集, 2017.
- PAN D, JIANG ZH H, GUI W H, et al. Temperature measurement of molten iron based on plane source information mapping feature of infrared thermal image[C]. Proceedings of the 28th China Process Control Conference, 2017.
- [67] PAN D, JIANG Z H, XU C, et al. Polymorphic temperature measurement method of molten iron after skimmer in ironmaking process[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-11.
- [68] PAN D, JIANG Z H, CHEN Z, et al. Temperature measurement method for blast furnace molten iron based on infrared thermography and temperature reduction model[J]. Sensors, 2018, 18(11): 3792.
- [69] PAN D, JIANG Z H, CHEN Z, et al. Temperature measurement and compensation method of blast furnace molten iron based on infrared computer vision[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2018, 68(10): 3576-3588.
- [70] PAN D, JIANG Z H, CHEN Z, et al. Compensation method for molten iron temperature measurement based on heterogeneous features of infrared thermal images[J].

- IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(11): 7056-7066.
- [71] JIANG K, JIANG Z, XIE Y, et al. Prediction of multiple molten iron quality indices in the blast furnace ironmaking process based on attention-wise deep transfer network[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-14.
- [72] HE L, JIANG Z, XIE Y, et al. Velocity measurement of blast furnace molten iron based on mixed morphological features of boundary pixel sets[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-12.
- [73] HE L, JIANG Z, XIE Y, et al. Mass flow measurement of molten iron from blast furnace, based on trusted region stacking using single high-speed camera [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-11.
- [74] JIANG Z, DONG J, PAN D, et al. A novel intelligent monitoring method for the closing time of the taphole of blast furnace based on two-stage classification [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 120: 105849.
- [75] JIANG Z, DONG J, PAN D, et al. A new monitoring method for the blocking time of the taphole of blast furnace using molten iron flow images[J]. Measurement, 2022, 204: 112155.
- [76] VOLLMER M, MOLLMANN K P. Infrared thermal imaging: Fundamentals, research and applications[M]. New York: John Wiley & Sons, 2017.
- [77] PAN D, JIANG Z H, GUI W H, et al. Influence of dust on temperature measurement using infrared thermal imager[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 20(6): 2911-2918.
- [78] PAN D, JIANG Z H, GUI W H, et al. Compensation method for the influence of dust in optical path on infrared temperature measurement [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 70: 1-11.
- [79] PAN D, JIANG Z H, MALDAGUE X, et al. Research on the influence of multiple interference factors on infrared temperature measurement [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(9): 10546-10555.
- [80] PAN D, JIANG Z H, LI Y, et al. Intelligent compensation method of infrared temperature measurement for multiple interference factors[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(19): 18550-18559.
- [81] ZHANG Y, CHEN Y, FU X, et al. A method for reducing the influence of measuring distance on infrared thermal imager temperature measurement accuracy [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 100: 1095-1101.
- [82] 潘冬, 蒋朝辉, 桂卫华. 基于方向发射率校正的红外测温补偿方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 43(6): 213-220.
- PAN D, JIANG ZH H, GUI W H. Infrared temperature compensation method based on directional emissivity correction[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 43(6): 213-220.
- [83] MUNIZ P R, CANI S P N, MAGALHAES R S. Influence of field of view of thermal imagers and angle of view on temperature measurements by infrared thermovision[J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(3): 729-733.
- [84] CARDONE G, IANIRO A, DELLO IOIO G, et al. Temperature maps measurements on 3D surfaces with infrared thermography[J]. Experiments in Fluids, 2012, 52: 375-385.
- [85] 那树人. 对炉热指数 T_e 的理解与计算[J]. 包头钢铁学院学报, 2001(3): 227-231.
- NA SH R. Explanation and calculation of the hearth thermal state parameter T_e [J]. Journal of Baotou University of Iron and Steel Technology, 2001(3): 227-231.
- [86] FANG Y, JIANG Z, PAN D, et al. Soft sensors based on adaptive stacked polymorphic model for silicon content prediction in ironmaking process[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 70: 1-12.
- [87] 周平, 张丽, 李温鹏, 等. 集成自编码与 PCA 的高炉多元铁水质量随机神经网络建模[J]. 自动化学报, 2018, 44(10): 1799-1811.
- ZHOU P, ZHANG L, LI W P, et al. Autoencoder and PCA based RVFLNs modeling for multivariate molten iron quality in blast furnace ironmaking[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(10): 1799-1811.
- [88] ZHANG H, YIN Y, ZHANG S. An improved ELM algorithm for the measurement of hot metal temperature in blast furnace [J]. Neurocomputing, 2016, 174: 232-237.
- [89] ZHOU P, LI W, WANG H, et al. Robust online sequential RVFLNs for data modeling of dynamic time-varying systems with application of an ironmaking blast furnace [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2019, 50(11): 4783-4795.

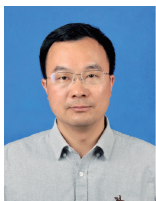
作者简介



潘冬,2015 年于中南大学获得学士学位,2021 年于中南大学获得博士学位,现为中南大学讲师,主要研究方向为红外热成像、视觉检测、深度学习、图像处理、误差建模与补偿。

E-mail:pandong@csu.edu.cn

Pan Dong received his B. Sc. degree from Central South University in 2015, and received his Ph. D. degree from Central South University in 2021. He is currently a lecturer at Central South University. His main research interests include infrared thermography, vision-based measurement, image processing, and deep learning.



蒋朝辉(通信作者),2003 年于湘潭大学获得学士学位,2006 年于中南大学获得硕士学位,2011 年于中南大学获得博士学位,现为中南大学教授,主要研究方向为检测技术与自动化装备、图像处理、工业 VR、复杂工业过程的建模与优化控制。

E-mail:jzh0903@csu.edu.cn

Jiang Zhaohui (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Xiangtan University in 2003, received his M. Sc. degree from Central South University in 2006, and received his Ph. D. degree from Central South University in 2011. He is currently a professor at Central South University. His main research interests include detection technology and automatic

equipment, image processing, industrial VR, modeling and optimal control of complex industrial processes.



许川,2021 年于中南大学获得硕士学位,现于中南大学攻读博士学位,主要研究方向为图像处理、数据分析、机器视觉和复杂工业过程建模。

E-mail:csuxuchuan@outlook.com

Xu Chuan received his M. Sc. degree in Automatic Control from Central South University in 2021. He is currently pursuing his Ph. D. degree at Central South University. His main research interests include image processing, data analysis, machine learning and complex industrial process modeling.



桂卫华,1976 年于中南大学获得学士学位,1981 年于中南大学获得硕士学位,现为中南大学教授,中国工程院院士,主要研究方向为复杂工业过程检测、建模与控制。

E-mail:gwh@csu.edu.cn

Gui Weihua received his B. Sc. degree from Central South University in 1976, and received his M. Sc. degree from Central South University in 1981. He is currently a professor at Central South University and Academician of the Chinese Academy of Engineering. His main research interests include measurement, modeling and control of complex industrial process.