

铜冷却壁炉墙内型管理传热学反问题模型

钱亮 程素森

李维广 沈海波 张劲草

(北京科技大学)

(首钢总公司)

摘要 铜冷却壁要长期安全地工作,在其热面必须有渣皮覆盖;同时铜冷却壁的高导热能力很可能导致炉墙结瘤,因此,对炉墙监控有利于高炉长寿,同时也是实现长寿和高效的结合点。结合首钢高炉的现场实际情况,采用传热学反问题的方法,开发了铜冷却壁炉墙内型管理模型,对渣皮状况进行跟踪,从而为高炉操作提供依据和条件,有利于避免铜冷却壁裸露、炉墙结瘤等异常发生。

关键词 铜冷却壁 内型管理 反问题 模型

Model for inner profile control of furnace wall lined with copper cooling stave based on the inverse problems in heat transmission

Qian Liang Cheng Suse

Li Weiguang Shen Haibo Zhang Jincao

(University of Science and Technology Beijing)

(Shougang Corporation)

Abstract The hot surface of copper cooling stave need to be covered by the slag in order to allow it working safely for a long time, meanwhile, high heat transmission feature of copper cooling stave may cause skull generated on the furnace wall. The monitoring system of furnace wall will be helpful for long campaign of blast furnace and is critical for realizing high efficiency of blast furnace. The paper introduces the development of model for inner profile control of furnace wall lined with copper cooling stave based on philosophy of the inverse problem on heat transmission with purpose of wall slag tracking with respect to actual condition on site of blast furnace in Shougang Co., this model lays basis and provide preconditions for furnace operation and effectively protects the copper cooling stave losing liner and prevents the furnace wall from skull generation.

Key words copper cooling stave inner profile control inverse problem model

1 引言

对铜冷却壁的设计条件包括全尺寸铜冷却壁温度场计算软件的开发和全尺寸冷却壁热态实验炉的建立,这两个工具现在已由北京科技大学和其他几个单位合作完成,这标志着中国具备了独立研制铜冷却壁技术的能力,在铜冷却壁设计参数对温度场及热损等因素的影响方面^[1]以及铜冷却壁的设计参数带来的热工特性和应力测试方面^[2]都做了大量的工作,为我国铜冷却壁的技术发展奠定了基础。同时于2001年初,我国铜冷却壁生产线建成投产,完成了铜冷却壁的国产化,并于2002年3月为停炉大修的首钢2号高炉安装了3层(分别位于炉腹、炉腰以及炉身下部)共120块铜冷却壁,这是我国高炉首次正式使用国产铜冷却壁^[3]。而且还开发出具有自主知识产权的复合扁孔型铜冷却壁及其生产

线,这些都证明了我国已经具有了自主研发、制造、生产铜冷却壁的能力。

铜冷却壁长期工作的热面温度应低于150℃^[3]。这就要求铜冷却壁在工作期间始终应该有渣皮保护,同时由于铜冷却壁高的导热能力,其热面的渣皮有时会很厚,存在结瘤的隐患。此情况发生时,应该及时的调整煤气分布来消除结瘤,维护高炉的高效生产。所以,内型管理保证了铜冷却壁的使用性能,也是实现长寿和高效的结合点。这就要求对铜冷却壁所在的炉墙进行计算机监控和模拟,即时反映炉墙内型变化和铜冷却壁的工作状态,而我国多数大高炉的铜冷却壁炉墙都没有实现监控措施。首钢2号高炉现有的专家系统并没有铜冷却壁内型管理模块,所以我们和首钢合作,也作为国家经贸委铜冷却壁项目的一部分后期工作,开发了基于

现场实际情况的铜冷却壁炉墙内型管理模型。

2 方法选择

就铜冷却壁炉墙而言,空气和炉壳、炉墙内侧和煤气以及冷却水和水管壁都作为对流边界处理,其余部分的传热形式为导热,反应导热规律的基本定律是傅立叶定律: $q = -\lambda \cdot gradt$

其中 q 为热流强度, W/m^2 ; λ 为导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$; $gradt$ 为温度梯度。从公式中可以看到,不论是求铜冷却壁热面温度,还是求炉衬或渣皮厚度(温度梯度项里包括了温度和厚度信息),热流都是一个很重要的参数,只要通过某种方法确定了热流,温度和距离就可求。现在一般有两种方法可以实测计算热流:

(1) 在同一直线上不同深度的地方安装两个热电偶,然后用傅立叶定律的一维形式求热流。铜冷却壁的厚度一般为 $120 \sim 150 \text{ mm}$ ^[3],首钢 2 号高炉的铜冷却壁的厚度为 140 mm ,水管热面距铜冷却壁热面只有 67 mm ,再减去 37 mm 的肋,就只剩下了 30 mm 可以用来布置热电偶,这样的安装在技术上有难度。另外,就是铜冷却壁在这段距离内的温差即使在没有渣皮时也只有 10°C (图 1a),有 40 mm 渣

皮时仅为 5°C (图 1b),此温差相对于热电偶自身误差太小,必然带来较大的计算误差。

而且,在铜冷却壁肋部分(如图 1 所示),由于有导热系数相差很大的镶砖存在,热流的方向不再水平,变得很混乱;在有渣皮存在时(图 1b),虽然在渣皮内热流方向基本水平,可是肋段的波动却变大,这是因为进入铜冷却壁的总体热流大大减小了,从而放大了镶砖和肋导热系数不同对传热的影响。这样根据两个热电偶计算的热流来推导热面温度和渣皮厚度显然是不合适的,因为在和热电偶同一直线上的温度梯度并非线性。

首钢 2 号高炉一部分铜冷却壁上在不同的深度安装了两个热电偶,原本是想据此计算热流,可是由于两个热电偶不在同一直线上,位于不同的部位,温度跟踪的结果发现生产过程中距离热面较远的热电偶大多时候竟然比另一个热电偶温度更高,如果还要按照它们在同一直线的情况计算,则热流流向炉内,这显然是不对的。这充分说明了由于铜冷却壁的导热能力强,使得各个部位温度对冷却条件和渣皮的变化特别敏感。

(2) 利用冷却水温差统计。我们的计算结果表

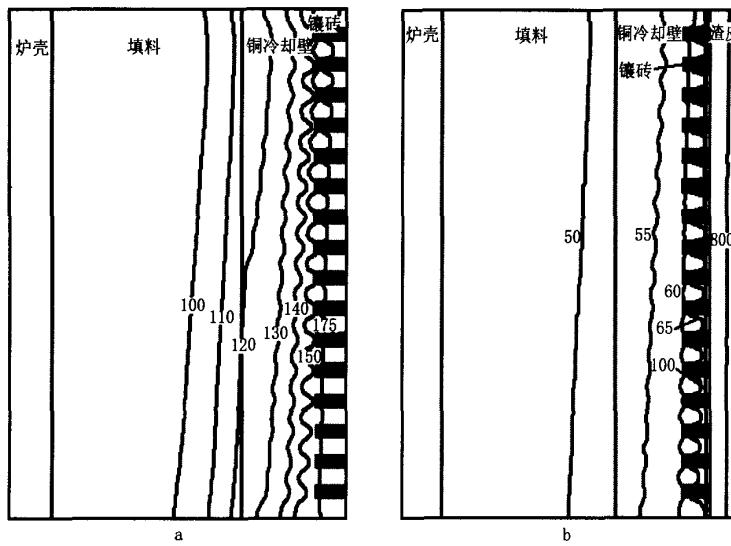


图 1 铜冷却壁剖面等温线

明,在冷却水带走的热量和从炉壳散失的热量中,冷却水带走的热量占整个热量的 $99.9\% \sim 99.8\%$ (有渣皮时,进入的热量少,比例稍有下降),所以可以看出这种方法在计算铜冷却壁的总热损失时是很精确的。但是,这种方法只能反应整个冷却壁的热损失水平,不能作为计算温度和厚度的热流,原因之一就是从热

电偶向前推导的过程中必然要经过温度梯度变化较大的肋段,这必然有很大的误差;另一个原因是实际的铜冷却壁从下向上,温度必然是逐渐降低的,这就必然影响了热流的分布,并非平均热流所能反映。

考虑到以上的情况,本模型采用三维传热学反问题方法。

3 反问题模型建立方法描述

文献[4]中给出了“反问题”的具体数学描述及解法说明。具体到传热学反问题就为已知部分边界和部分温度(热电偶温度)求部分边界(炉衬或渣皮厚度)和部分温度。在解的过程中可以先假设要求的部分边界已经存在,从而可以求出所有的温度,然后比较已知的部分温度和所求的温度,从而确定前面假设的边界是否就为实际边界。首钢2号高炉大部分铜冷却壁上只有一根热电偶,这给判断反问题的结果带来了困难,所以本模型首先预设了各种可能的边界条件,得到其中的温度及其热流的变化规律,从而弥补热电偶不足的缺陷。

(1)图2为各种边界条件下温度和热损的变化规律,其中图2a为随渣皮厚度的变化情况,图2b为铜冷却壁裸露时随煤气温度的变化。从中可以看

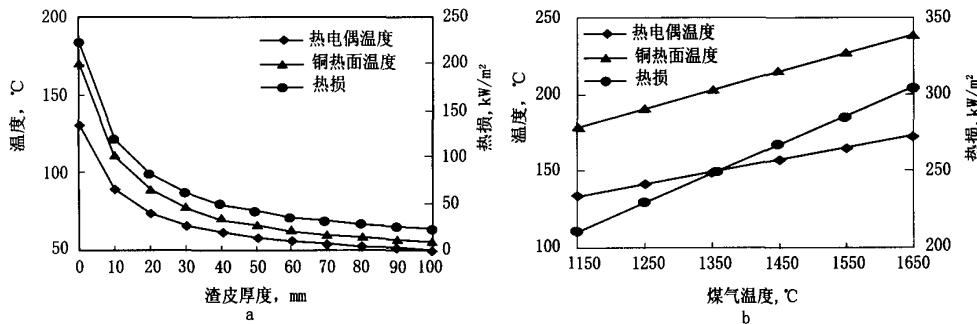


图2 铜冷却壁温度和热损的变化

冷却壁前端渣皮从有变到无,则必然经过图2a中渣皮为0 mm的状态,然后达到图2b中某一煤气温度下对应的状态,所以可以用图2a中渣皮为0 mm的状态作为一个判断铜冷却壁是否裸露的标准,称为“裸露标准”,如果热电偶温度高于了裸露标准就说明铜冷却壁裸露,反之则说明铜冷却壁没有裸露。从图2中可以看出,首钢2号高炉铜冷却壁的裸露标准为130.4 °C,对应的煤气温度取1150 °C,渣皮为0 mm,水速为1.5 m/s,水温为40 °C。

图3为铜冷却壁在生产过程中的内衬变化情况,把有炉衬的时期称为“有衬期”,把没有炉衬保护的时期称为“无衬期”。就首钢2号高炉而言,开炉前在铜冷却壁的前端砌筑了1 m厚的砖衬,分析热电偶温度变化,发现炉衬仅仅存在了约1年的时间,以15年的设计炉龄看,在大部分时间内铜冷却壁都处在无衬期,所以渣皮的存在状态直接决定了铜冷却壁的寿命。厚炉衬并不能延长高炉寿命,只会增加高炉建设成本。根据炉衬越厚铜冷却壁热电

出无论铜冷却壁裸露与否,热面温度都保持很低,保持在250 °C以下,因此在铜冷却壁的热面很容易形成渣皮。从图2就可以根据热电偶温度对应出此时的热流,而且,此处的热电偶温度是一个三维模拟计算的结果,包括了肋段引起的热流波动信息,也包括了热面边界上煤气温度从下向上的波动(只是这个波动在计算中是一个固定的趋势)信息。通过此种方法,解决了只有一根热电偶的热流问题。从图2中还可以看出当铜冷却壁处在裸露状态时,即使煤气温度为1150 °C,铜冷却壁的热面温度已经为171.4 °C,超过了铜冷却壁长期工作应维持的热面温度150 °C,所以要保证铜冷却壁的安全,在其热面必须要有约10 mm厚度以上的渣皮保护。

(2)渣皮越薄热电偶温度越高(图2a);在裸露时煤气温度越高,热电偶温度越大(图2b)。如果铜

偶温度会越低的趋势,通过比较热电偶温度和热电偶历史最高温度判断是否有炉衬存在。通过比较热电偶温度和裸露标准来判断是否已经进入了无衬期,以及是否已经裸露或有渣皮覆盖。这样就确定了铜冷却壁炉墙内部炉衬的状态,这种分类思想能简化反问题的计算模型,提高计算速度。

(3)不同铜冷却壁的裸露标准不同,即使同一块冷却壁,在不同时期不同的操作参数下裸露标准也不一样。影响裸露标准的因素包括铜冷却壁所有的设计参数,如冷却通道形状及直径、冷却通道间距、冷却水管布置、冷却壁本体材质和镶砖导热系数、热面几何形状等等。但在实际生产中,铜冷却壁的尺寸参数和材质参数都已确定,影响裸露标准的因素就只剩变化的因素,如冷却水流速、冷却水温度。图4是在其余参数不变的情况下,分别计算了冷却水流速和冷却水温度对裸露标准的影响,从中可以看出冷却水温度越低,流速越大,裸露标准越小,在裸露时越容易形成渣皮;随着冷却水流速的增

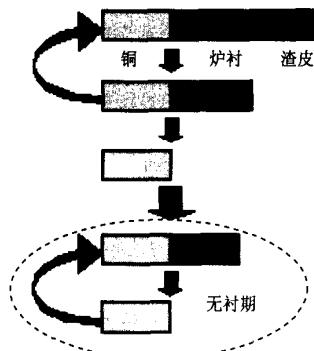


图3 内衬变化示意图

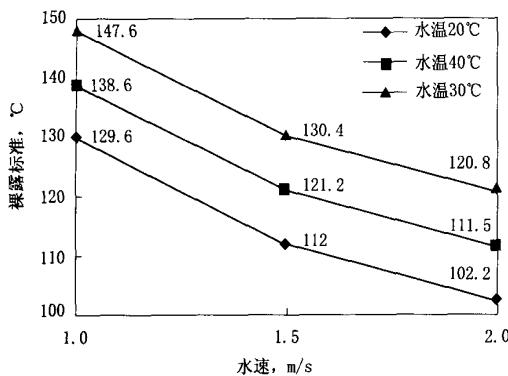


图4 水速和水温对裸露标准的影响

大,其对裸露标准的影响减小;冷却水流速越大,此时水温对裸露标准的影响越大。另一个影响裸露标准的因素是热电偶的安装位置,热电偶到热面的距离直接影响了裸露标准。通过传热学模型可以计算出不同铜冷却壁以及不同参数下的炉墙裸露标准,从而对炉墙的内衬状态进行划分。

4 操作实践和结果分析

有了不同边界的信息和炉墙内衬状态的确定,就可以通过反问题的建立来迭代计算渣皮的厚度。此处得到的炉衬或者渣皮的过程都基于一块铜冷却壁,如果直接进行圆周上或高度上的连接必然是折线,这显然和实际情况不符。在此选用数学方法进行了处理,利用平滑度较高的自然三次样条插值法对所得的结果进行了平滑,使结果更符合实际情况。

软件给出了每段铜冷却壁的评定信息。图5为评定标准说明,图6为某个时刻各段铜冷却壁的评定显示,从图5说明中可以看出此时刻各段铜冷却壁都有渣皮覆盖。图7为圆周上各段的显示,从中可以看出7段有一块比较突出的渣皮,根据位置信息可以找到在高炉中的相关位置,从而通过调整布料等方式消除突出区域,排除高炉操作隐患。在结

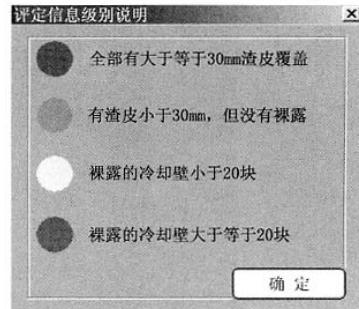


图5 评定标准

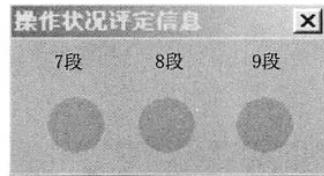


图6 评定信息显示

瘤已经形成,影响高炉操作时,通过模型也可以定位结瘤区域,为快速准确的消除结瘤打下基础。

程序中还实现了高度方向上的效果图,各段具体的渣皮厚度和热面温度比较柱状图以及历史查询模块,以不同的方式显示了渣皮厚度、热面温度和各层的具体状态,并用颜色和文字两种形式给出了铜冷却壁裸露和热面温度超界的预警信息。

在首钢2号高炉生产的2005年7月份,没有异常发生,一直都有渣皮覆盖,图8是本模型计算的7月29号全天热面温度和渣皮厚度的变化趋势,从中可以看出在有渣皮覆盖时,即使渣皮变化较大,热面温度的波动也不大(原因如图2所示:在有渣皮覆盖时,热损迅速降低,随着渣皮的继续增厚,热损变化变小),这样铜冷却壁内部温度变化就小,有利于高炉长寿;渣皮在较厚的时候将变得不稳定,容易波动,这必然引起高炉操作的波动。而且在渣皮增厚的时候必然侵占炉容,降低高炉生产效益。所以有合适厚度的渣皮既能保证高炉长寿,又能最大化高炉冶炼强度,渣皮的状态是高炉长寿和高效的结合点。从图8中可以看出,首钢2号高炉的渣皮在40mm时较稳定(夏季的结果),就前面讨论的保证铜冷却壁安全生产需10mm渣皮标准,此高炉的冶炼强度还可以再提高,或者可以适当的减少水量。

借着2005年2月下旬首钢2号高炉降料面的时机,组织了相关人员从风口进入高炉内部,观察实测渣皮的结果为:铜冷却壁炉墙大部分地方有渣皮存在,图9为7段西北部的渣皮照片,实测厚度为

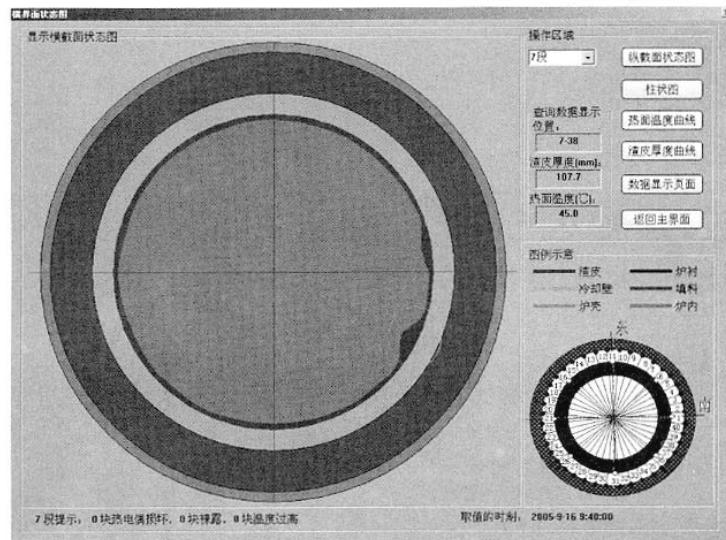


图 7 圆周方向上的状态显示

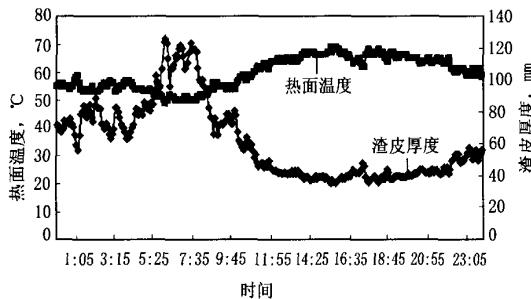


图 8 首钢 2 号高炉渣皮厚度和热面温度随时间的变化



图 9 首钢 2 号高炉 7 段西北部渣皮现场

50mm, 这和在冬季的时候模型计算相符(冬季和夏季由于冷却水温度不同会带来渣皮厚度的变化), 这就从实践的角度验证了本程序。

为了避免服务器意外或其余原因而带来的程序崩溃, 开发了连接数据库错误报告和自动重新连接数据库的功能, 保证了程序的连贯性和稳定性。

5 结论

(1) 本文在分析了两种测热流方法的基础上,

确立了用三维传热学反问题的方法解决实际铜冷却壁计算问题, 从而计算预测铜冷却壁热面温度及其渣皮厚度。2号高炉降料面时实测的渣皮厚度证明了本模型计算结果的正确性。

(2) 本模型显示了铜冷却壁的渣皮厚度及整体铜冷却壁的渣皮状况, 有利于防止铜冷却壁裸露和炉墙结瘤等异常的发生。跟踪的结果显示铜冷却壁渣皮较厚的时候比较容易波动, 维持适当厚度的渣皮有利于高炉长寿和高效。

6 致谢

在本模型的开发过程中, 得到了首钢炼铁厂技术科的积极配合, 同时机控室的陈国宏、朱飞翔以及操作室的刘利峰等也给予了大力协助, 在此一并表示深深的感谢。

7 参考文献

- 程素森, 张丽英, 吴志华. 冷却壁冷却水管结垢对高炉炉墙温度场分布的影响. 炼铁, 1994(4): 58~59
- 余京鹏, 吴启常, 苍大强. 铜冷却壁水流通道特性分析. 炼铁, 2003(4): 10~13
- 刘琦. 采用铜冷却壁延长高炉炉体寿命. 炼铁, 2002(6): 7~10
- T. P. Fredman. A direct integration approach to accretion layer estimation in the blast furnace stack. ISSTech 2003 Conference Proceedings. 1103~1111

联系人: 钱亮

E-mail: qianliang780526@yahoo.com.cn

(100083)北京市海淀区学院路北京科技大学冶金与生态工程学院
本课题受国家自然科学基金资助(项目批准号: 60472095)

收稿日期: 2005-12-19