



冶炼钒钛矿高炉操作炉型计算模拟研究

董晓森, 饶家庭, 郑 魁

(钒钛资源综合利用国家重点实验室, 攀钢集团研究院有限公司, 四川 攀枝花 617000)

摘要: 根据某钒钛磁铁矿冶炼高炉炉型设计参数和生产工况数据, 通过 MATLAB 计算软件建立该高炉操作炉型计算模型, 研究高炉运行中高温区域炉墙挂渣情况。计算结果表明: 受高炉边缘气流控制较弱影响, 高温区域炉墙的热负荷大多在 $12 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 以下, 冷却壁壁体温度接近炉壳温度, 冷却壁热面的渣皮厚度普遍高于 100 mm , 且渣皮厚度分布不均匀, 个别方向达到 200 mm 以上; 对比普通高炉, 冶炼钒钛磁铁矿高炉在同等热负荷下, 高温区域挂渣能力更强, 从安全性与渣皮稳定性考虑, 高炉冷却壁热负荷应控制在 $10.50 \sim 34.50 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

关键词: 高炉; 钒钛磁铁矿; 操作炉型; MATLAB 软件; 渣皮

中图分类号: TF512

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2024)03-0121-10

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2024.03.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Simulation of operation inner profile of blast furnace with smelting vanadium-titanium magnetite

Dong Xiaosen, Rao Jiating, Zheng Kui

(State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Pangang Group Research Institute Co., Ltd., Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: Based on the design parameters and production conditions of a vanadium-titanium magnetite smelting blast furnace, a numerical model of the vanadium-titanium blast furnace operation inner model was established through a MATLAB calculation software in order to study the slag adhering situation of the furnace wall within high temperature zone of the blast furnace operation. The predicated results show that the heat load of the furnace wall within high temperature zone is mostly below than $12 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ due to the weaker airflow control at the edge of the blast furnace. The temperature on cooling staves is close to that on shell. Besides, It is higher than 100 mm , and the slag skull thickness at the hot surface on staves is generally higher than 100 mm while unevenly distributed, even reaching up to more than 200 mm at specific directions. Compared with ordinary blast furnaces, vanadium-titanium magnetite smelting blast furnaces show stronger slag adhering capacity within high-temperature zones given the same thermal load. Considering safety and slag skull stability, the heat load of vanadium-titanium blast furnace cooling staves should be controlled within $10.50 \sim 34.50 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$.

Key words: blast furnace, vanadium-titanium magnetite, operation inner profile, MATLAB software, slag skull

收稿日期: 2023-02-28

作者简介: 董晓森, 1993 年出生, 男, 河北石家庄人, 硕士研究生, 工程师, 长期从事钢铁冶金研究工作, E-mail: xiaosendong@163.com。

0 引言

高炉投产后,随着炉衬的磨损、侵蚀及渣皮的形成,高炉内型逐渐由设计炉型向操作炉型演变^[1],其中,炉腹、炉腰、炉身下部炉墙处于高炉软熔带生成范围内,是高炉操作炉型维护的关键。一般炉龄中后期,这部分区域冷却壁前的砖衬基本上已经侵蚀殆尽,仅靠热面的渣皮作为保护层维持冷却壁正常工作,以减少高炉热损失。在高炉生产中,冷却壁热面的渣皮随冷却制度和炉况的变化不断生成和脱落,造成操作炉型处于动态变化之中,而这种变化在反映炉况变化的同时也反过来影响炉况,如渣皮结厚、黏结不均常引起煤气流分布失常;渣皮被完全侵蚀或者频繁脱落,易造成炉温不可控制波动,甚至烧毁冷却壁水管,导致高炉被迫停炉。因此,维持适当且稳定的渣皮厚度,对高炉稳定顺行至关重要^[2-4]。

维持高炉炉身、炉腰、炉腹和炉缸部位合理和相对稳定的冷却制度,是保持高炉炉型稳定和建立稳定渣皮的基础。目前,操作炉型已经引起了高炉生产现场技术人员较高的重视,同时国内外冶金工

作者也对高炉炉身下部、炉腰、炉腹以及炉缸炉底侵蚀进行了相关研究,建立了多种炉型管理模型,特别是炉缸炉底部位侵蚀数学模型的研究较多^[4-5],而针对钒钛磁铁矿冶炼高炉(简称钒钛高炉)操作炉型计算和模型开发的研究较少。

笔者在借鉴目前已有研究成果的基础上,针对某公司炼铁厂钒钛高炉风口上部采用铸铁冷却壁工况条件,利用传热反问题方法进行了传热计算,通过 MATLAB 编程技术,建立了高炉操作炉型计算模型,监控高炉渣皮变化,对保证高炉长寿和炉况稳定顺行具有实际意义。

1 几何模型建立

为了便于研究,以某公司炼铁厂一座 1 750 m³ 钒钛高炉为研究对象,建立炉腹、炉腰、炉身下部区域的基本几何结构模型。图 1 所示为几何模型的垂直剖面与局部放大,自下而上依次为 B1、B2、B3、S1 段冷却壁,从外到内依次为炉壳、填料层、冷却壁、镶砖、高铝砖及喷涂料,其中冷却壁材质为满镶砖球墨铸铁,其他参数见表 1。

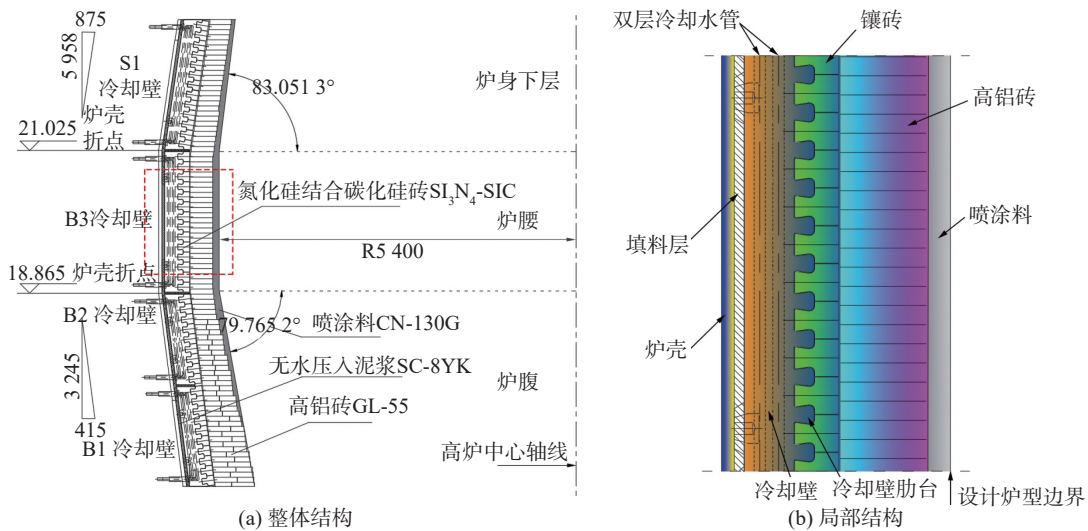


图 1 模型基本结构剖面

Fig. 1 The basic structure section of the model

表 1 炉墙设计参数

Table 1 The design parameters of furnace wall

炉壳厚度/mm	填料层厚度/mm	冷却壁厚度/mm	冷却壁高度/mm				冷却壁总数量/块	水管尺寸/mm
			B1	B2	B3	S1		
45	40	280	1 540	1 400	2 160	1 995	42×4	Φ45×6
肋台厚度/mm	镶砖厚度/mm	炉腰设计内型半径/mm	冷却壁热面总面积/m ²				炉身角/(°)	炉腹角/(°)
			B1	B2	B3	S1		
80	180	5 400	54.6	51.2	80.2	73	83.051 3	79.765 2

2 传热模型建立

一般开炉后不久, 高温区域炉衬几乎被侵蚀, 仅依靠热面渣皮维持生产, 这与近几年某公司炼铁厂高炉停炉检修实际情况相符, 因此, 根据图 1, 对传热结构进行简化, 如图 2 所示。

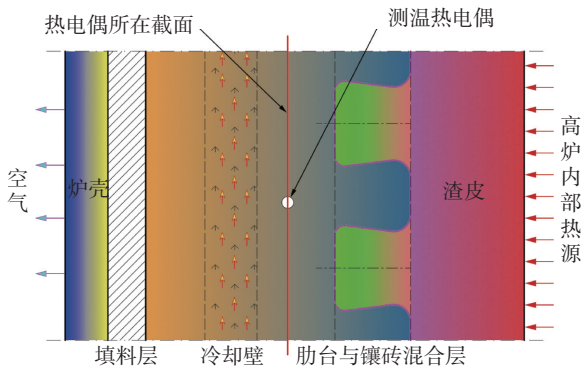


图 2 炉墙传热结构

Fig. 2 Heat transfer structure of furnace wall

根据图 2 进行传热分析, 可知高炉炉墙向外传递的热量由两部分组成, 分别为: ①冷却壁带走热量; ②炉壳散失热量。

由于某公司炼铁厂高炉没有炉壳温度的实时监控数据, 为了准确计算操作炉型, 以冷却壁内部单只热电偶测温点所在截面为起点, 根据测温数据依次向高炉内部进行计算, 进一步简化计算过程。

2.1 假设条件

根据高炉炉墙结构特点及实际情况, 对传热过程做出如下假设:

- 1) 炉墙传热为稳态传热过程, 忽略接触热阻;
- 2) 仅考虑内部径向传热, 各部位温度分布均匀, 无内热源;
- 3) 忽略细小结构对传热影响, 不考虑水垢热阻的影响;
- 4) 忽略炉墙的弧度, 在直角坐标系下进行传热分析;
- 5) 炉衬完全侵蚀, 仅肋台内镶砖保持完好。

基于上述假设条件, 文中传热模型可视为无内部热源的一维稳态传热过程。

2.2 传热计算

根据图 2 炉墙传热结构和基本假设, 对单个冷却壁进行传热计算。

单层冷却水带走的热量 $Q_{\text{水}}$:

$$Q_{\text{水}} = cm(t - t_0) \quad (1)$$

按经验公式^[5] 计算 $Q_{\text{散}}$:

$$Q_{\text{散}} = h_{\text{壳}}(t_{\text{壳}} - t_{\text{空}})F \quad (2)$$

$$h_{\text{壳}} = 9.3 + 0.058t_{\text{壳}} \quad (3)$$

考虑到冷却壁为双层冷却结构, 可得总热流强度 q :

$$q = \frac{2Q_{\text{水}} + Q_{\text{散}}}{F} \quad (4)$$

式中, $Q_{\text{水}}$ 、 $Q_{\text{散}}$ 分别为冷却水和炉壳传递热量, J/s; q 为炉墙总热流强度, W/(m²·s); c 为水的比热容, 4.174×10³ J/(kg·°C); m 为单层冷却结构的冷却水流量, kg/s; t 、 t_0 分别为出水与入水温度, °C; $h_{\text{壳}}$ 为炉壳与空气的等效对流传热系数, W/(m²·°C); $t_{\text{壳}}$ 、 $t_{\text{空}}$ 分别为炉壳的外表面与环境温度, °C; F 为单个冷却壁的散热面积, m²。

为了使计算更加准确, 依据表 2 数据, 推算高炉散失总热量在冷却壁与炉壳之间的分配比 w , 以使用 $Q_{\text{水}}$ 算出较为准确的 q , 公式如下:

$$w = \frac{2Q_{\text{水}}}{2Q_{\text{水}} + Q_{\text{散}}} \quad (5)$$

$$q = \frac{2Q_{\text{水}}}{wF} \quad (6)$$

表 2 高炉 B1~S1 段冷却系统和炉壳实测数据

Table 2 Measured data of cooling system and furnace shell of B1~S1 section of blast furnace

水流量均值/ (t·h ⁻¹)	水温差 均值/°C	炉壳温度 均值/°C	环境温度 均值/°C
2.57	2.06	43.42	21.00

稳态条件下, 炉墙沿径向的热通量保持一致, 基于傅里叶传热定律进行温度场计算:

$$q = -\lambda \text{grad}T \quad (7)$$

以热电偶所在截面为起点, 由热电偶测温值 t_i , 见表 2, 可得:

$$t_{\text{wall}} = \frac{q \Delta x_{\text{wall}}}{\lambda_{\text{wall}}} + t_i \quad (8)$$

$$t_{\text{mix}} = \frac{q}{\frac{\lambda_{\text{wall}}}{\Delta x_{\text{wall}}} + \frac{\lambda_{\text{mix}}}{\Delta x_{\text{mix}}}} + t_i \quad (9)$$

其中

$$\lambda_{\text{mix}} = \lambda_2 \left[\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} - 1 \right) v_1 + 1 \right] \quad (10)$$

式中, λ 为耐材导热系数, W/(m·°C); $\text{grad}T$ 为沿热

流方向的温度梯度; t_i 、 t_{wall} 、 t_{mix} 分别为热电偶测温值及该冷却壁与混合层热面的温度, $^{\circ}\text{C}$; Δx_{wall} 、 Δx_{mix} 分别为热电偶到冷却壁热面、混合层热面的距离, m ; λ_1 、 λ_2 、 λ_{wall} 、 λ_{mix} 分别为肋台、镶砖、冷却壁导热系数及混合层等效导热系数^[6], $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$; v_1 为肋台体积与混合层总体积之比, 取 0.5。

当渣皮存在时, 以渣皮凝固温度作为热面温度进行计算, 由式(7)推导得渣皮厚度 Δx_{slag} :

$$\Delta x_{slag} = \lambda_{slag} \frac{t_s - t_{mix}}{q} \quad (11)$$

采用 Hamilton and Crosser 模型^[7], 描述渣层的导热系数 λ_{slag} :

$$\lambda_{slag} = \frac{V_S \lambda_S + \alpha V_{Fe} \lambda_{Fe}}{V_S + \alpha V_{Fe}} \quad (12)$$

$$\alpha = \frac{3\lambda_S}{\lambda_S + \lambda_{Fe}} \quad (13)$$

式中, Δx_{slag} 为渣皮厚度, m ; λ_{slag} 、 λ_S 、 λ_{Fe} 为渣皮、炉渣和铁的导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$; t_s 为渣皮凝固温度, $^{\circ}\text{C}$; V_S 、 V_{Fe} 分别为渣皮中炉渣和铁珠所占体积分数^[8], %。

当 $\Delta x_{slag} > 0$, 仅表明炉墙具有了一定挂渣能力, 但炉墙内壁是否形成渣皮还取决于挂渣环境是否满足。一般炉墙内壁附近存在熔融渣铁流时才具备挂渣的可能性, 因此笔者认为当炉气温度大于渣铁融化温度时, 炉墙具备挂渣环境。

根据传热原理, 以风口区域理论燃烧温度和炉喉平均温度为上下边界条件, 根据风口到炉喉每段冷却壁的总热流强度计算对应温降, 从而构建高炉内部炉气温度场, 用以判断挂渣环境。根据课题组试验数据及相关文献^[8], 取渣铁融化温度为 1392°C 。

当 $\Delta x_{slag} < 0$ 或挂渣环境不满足, 炉墙可能发生侵蚀, 同理根据式(7)与冷却壁挂渣温度对内衬的残存厚度进行反算。其他参数见文献^[9-11], 详见表 3。

表 3 模型部分计算参数
Table 3 Some calculation parameters of the model

铸铁冷却壁导热系数/ $[\text{W}\cdot(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}]$	镶砖导热系数/ $[\text{W}\cdot(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}]$	渣皮导热系数/ $[\text{W}\cdot(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}]$	热电偶插入深度/ mm	不同温度下铁的导热系数/ $[\text{W}\cdot(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}]$				
				400 $^{\circ}\text{C}$	600 $^{\circ}\text{C}$	800 $^{\circ}\text{C}$	1 000 $^{\circ}\text{C}$	1 200 $^{\circ}\text{C}$
42.05-0.026 89t	17-0.009t	1.2	405	49.9	38.6	29.3	29.3	31.1

注: t为材料温度值, $^{\circ}\text{C}$ 。

2.3 模型算法实现

模型求解流程如图 3 所示。通过 MATLAB 编

程软件, 将图 3 求解流程予以实现, 将计算结果保存到数据库中并实现可视化。

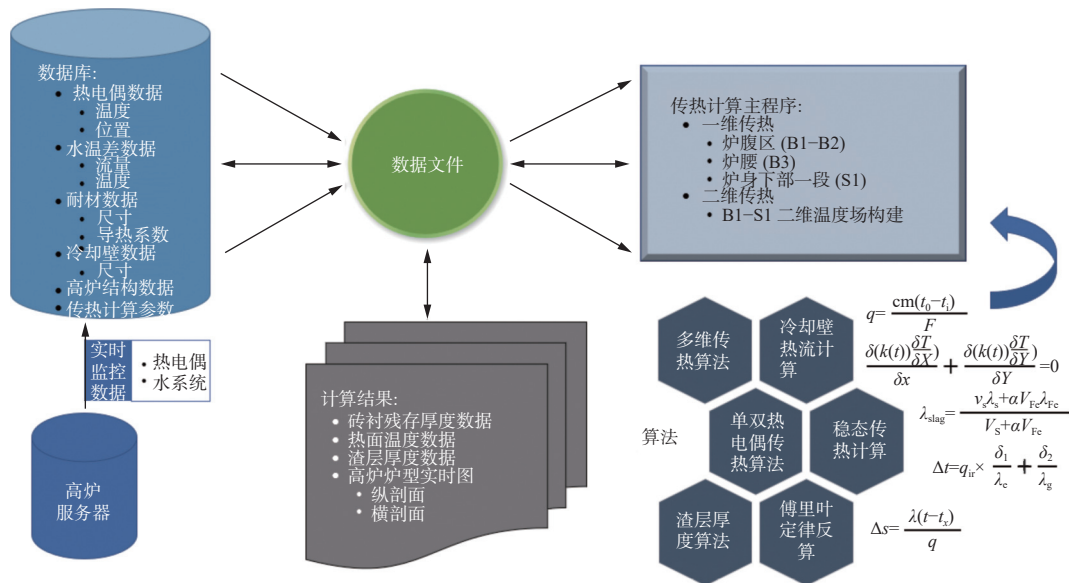


图 3 模型求解流程

Fig. 3 Model solution flow chart

3 结果分析与讨论

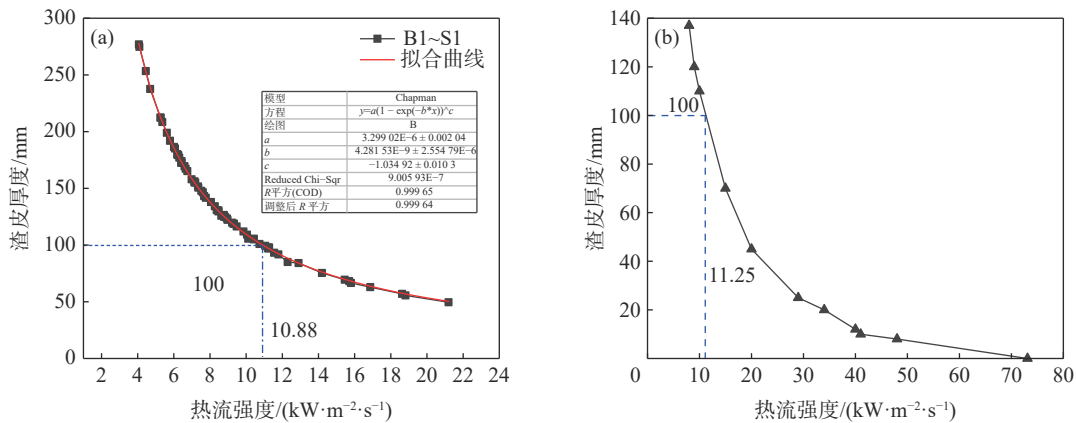
3.1 模型可靠性验证

图 4(a)、(b) 所示分别为同样采用满镶砖球墨铸铁冷却壁的钒钛高炉与普通高炉渣皮厚度与热流强度关系曲线, 可发现: 钒钛高炉高温区域的渣皮厚度随热流强度的减小而急剧增大, 这与普通高炉在同等热负荷条件渣皮厚度变化规律相同。同时同样形成 100 mm 以下的渣皮, 普通高炉需要炉墙上超过 11.25 kW/(m²·s) 的热负荷, 而钒钛高炉仅需 10.88 kW/(m²·s), 两者相差不大, 均在 11 kW/(m²·s) 左右, 差异性主要表现在钒钛高炉挂渣条件更低, 这符合钒钛矿冶炼渣皮内钛含量高, 黏度大, 更易于挂渣的实际情况。因此, 建立的计算模型准确可靠, 可用于研究高温区域炉墙挂渣情况。

值得注意的是, 图 4 所示钒钛高炉的渣皮厚度普遍高于 100 mm, 这与普通高炉的炉墙状况显著不同, 其渣皮厚度普遍低于 100 mm。主要原因是钒钛高炉的炉墙热负荷大多在 12 kW/(m²·s) 以下, 而普通高炉却正好与之相反。这与前人^[9]研究得出的相同炉况下, 普通高炉渣皮厚度为 12.5 ~ 78.9 mm, 而钒钛高炉渣皮厚度为 19.4 ~ 242.1 mm 的结论规律相同, 也进一步验证了模型准确性。

3.2 高炉挂渣分析

根据高炉近期的在线监控数据(炉况: 综合冶炼强度 1.238 t/(m³·d), 冷却系统 6~7 段水流量 396.4 m³/h、7~9 段水流量 563.9 m³/h), 计算当前操作炉型, 分别从圆周和高度方向上进行分析, 具体截面位置如图 5 所示, 其中高度方向沿风口中心线作截面, 计算结果如图 6 所示。



(a) 钒钛高炉; (b) 普通高炉^[9]

图 4 渣皮厚度与炉墙热流强度(热负荷)对应关系

Fig. 4 Correspondence between thickness of slag skull and heat flow intensity (heat load) of furnace wall

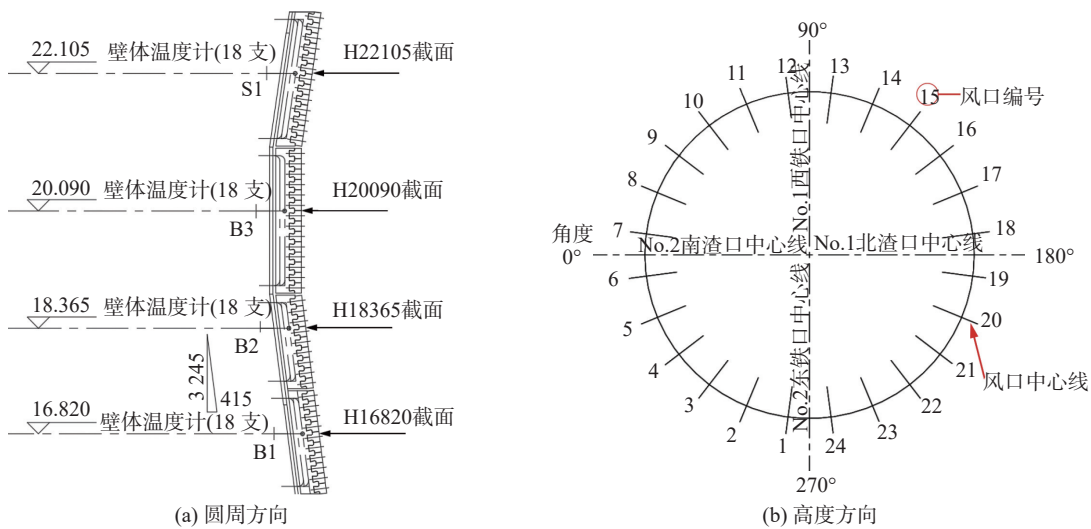


图 5 截面位置选取分布

Fig. 5 Distribution map of cross-section location selection

从图6可发现:该高炉当前的操作炉型已经完全远离初始设计炉型,内型线基本徘徊在原冷却壁外部镶砖层热面位置左右,但并未深入混合层,这表明目前冷却壁受到渣皮保护,暂未出现裸露情况。这与该高炉历次大修冷却壁均没有损坏的结果相符。

为深入研究冷却壁圆周方向渣皮分布的均匀性,根据图6数据得到图7,其中标尺的“角度”可参照图5(b)。图7中不同高度的冷却壁圆周方向上渣皮厚度分布并不均匀,易出现部分位置的渣皮厚度突然显著高于周边区域的“突刺”现象,其中渣皮厚度最大超过192 mm,出现在B3段周向158.6°(17号风口方向);最小仅剩8 mm,出现在B2段周向

17.1°(7~8号风口方向)。渣皮厚度波动幅度随高度的增加呈扩大趋势,最小为88.94%(B1),最大超过239.16%(S1),表现出极大的波动性,严重影响炉内煤气流的均匀分布。同时从图7可发现周向渣皮厚度均值随所在高度的增加先增大后减小,在72~93 mm,均小于100 mm。其中波动幅度计算公式:

$$\text{渣皮厚度波动幅度} = \frac{\text{最大厚度} - \text{最小厚度}}{\text{平均厚度}} \times 100\% \quad (14)$$

为简化高度方向上操作炉型的分析,取部分风口(1、10、13和22号)进行研究。

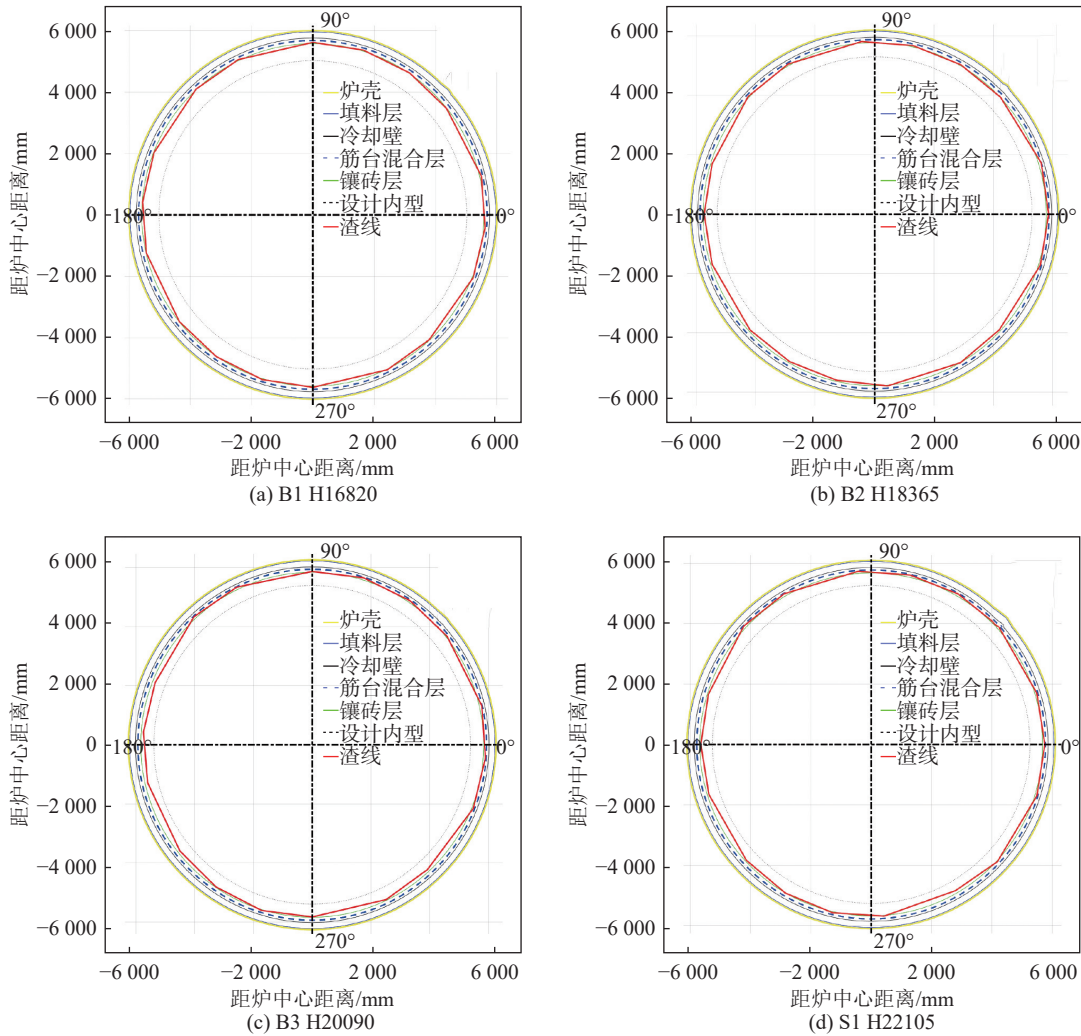


图6 操作炉型计算结果(圆周方向)

Fig. 6 The slag skull distribution on cooling stave with different heights

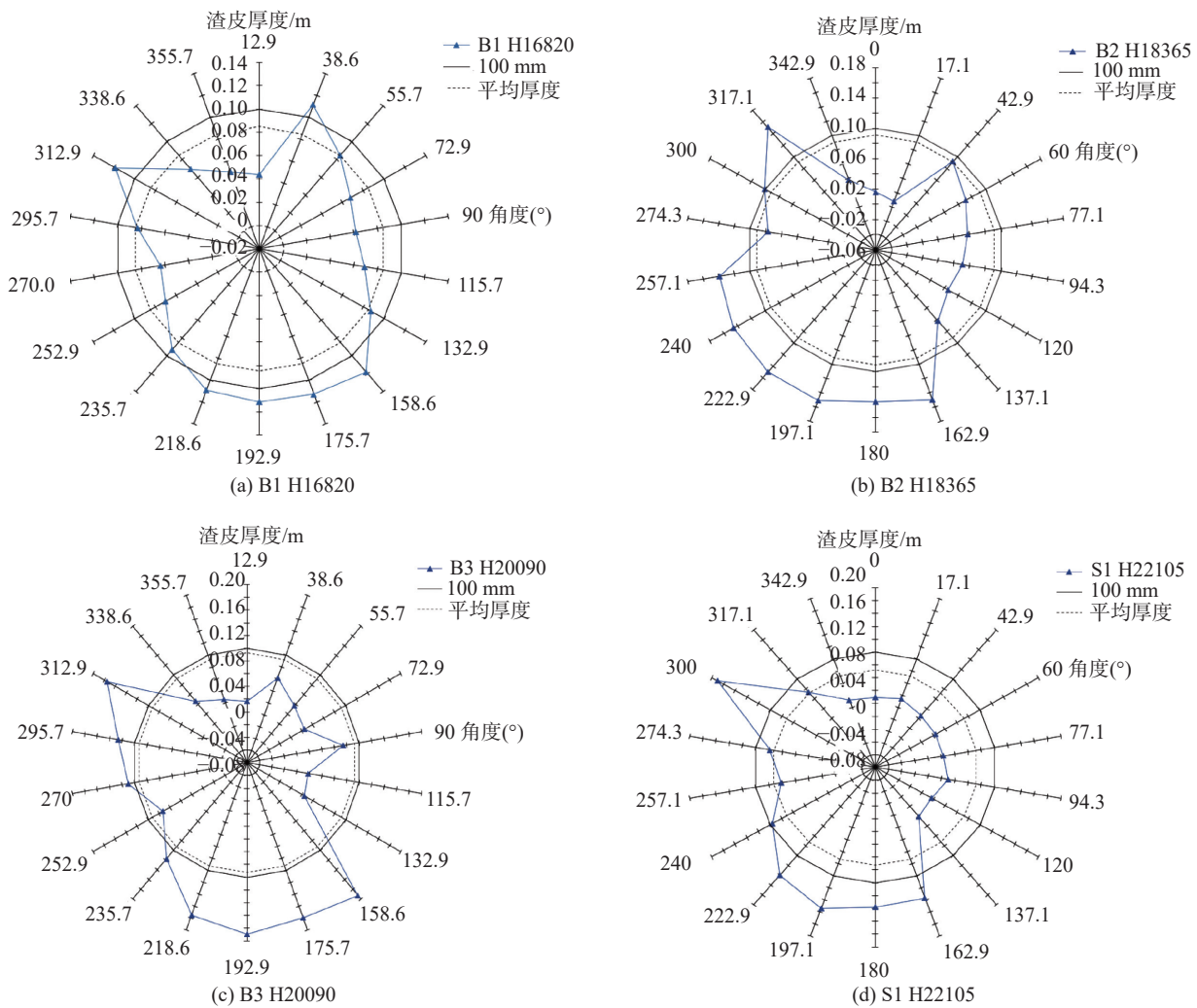


图 7 不同高度冷却壁的渣皮分布
 Fig. 7 The slag skin distribution of different heights of cooling stave

高炉操作炉型计算模型可以二维推导计算 24 个风口截面方向上的操作炉型, 其中模型运行的实效图, 详细如图 8(a)所示。图 8(b)所示为高炉设计炉型边界线到混合层热面的距离, 也称为设计内型厚度, 从中可知设计内型厚度随高度的增加呈逐步降低趋势, 这是为了保证内型的稳定性, 可防止炉料冲刷直接造成内衬脱落。

图 9 所示为不同风口方向的操作炉型垂直剖面, 可知: 不同风口截面的挂渣情况并不相同, 且沿高度方向分布大多不符合图 8(b)理想内型厚度随高度递减规律, 不利于渣皮稳定存在。同时最大渣皮厚度的位置没有明显规律。

为深入研究钒钛高炉的高温区挂渣情况, 分别选取 2019 年时间点 1(综合冶炼强度 $1.243 \text{ t}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$) 和时间点 2(综合冶炼强度 $1.332 \text{ t}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$), 与本节分析的高炉近期挂渣情况(记为时间点 0)进行对比,

结果表明: 时间点 1 和 2(2019 年)的炉墙内衬挂渣厚度(最大与最小值)显著高于时间点 0, 且最大渣皮厚度均超过 270 mm, 整个高温区域的渣皮厚度均值超过 130 mm, 这主要是因为该高炉时间点 0 期间开始发展边缘气流。另外, 不同时间点, 在周向和高度方向的渣皮厚度波动幅度基本上都超过 100%, 表明高炉高温区域的操作炉型长时间不稳定, 极易影响炉内边缘气流的分布与再分布。值得注意的是, 这种不均匀性分布, 使得在调整冷却制度时, 应综合考虑整个冷却段内的极限位置冷却壁状态, 避免造成局部冷却壁的烧损或结厚。

3.3 渣皮厚度影响因素研究

本节根据传热模型计算结果, 分析不同因素对高炉炉墙挂渣情况的影响, 探索钒钛高炉适宜的冷却制度和渣皮厚度。

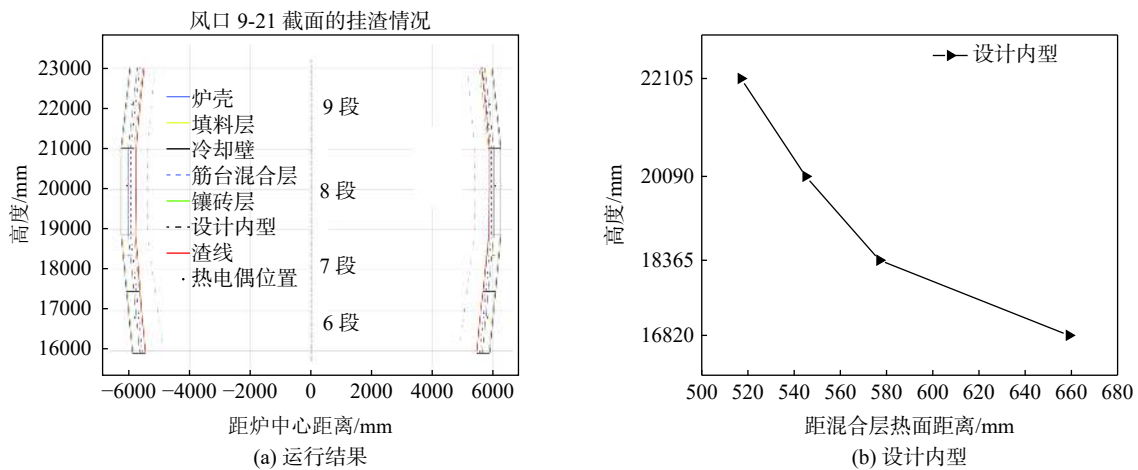


图 8 (a) Calculation results and (b) design profile from developed model

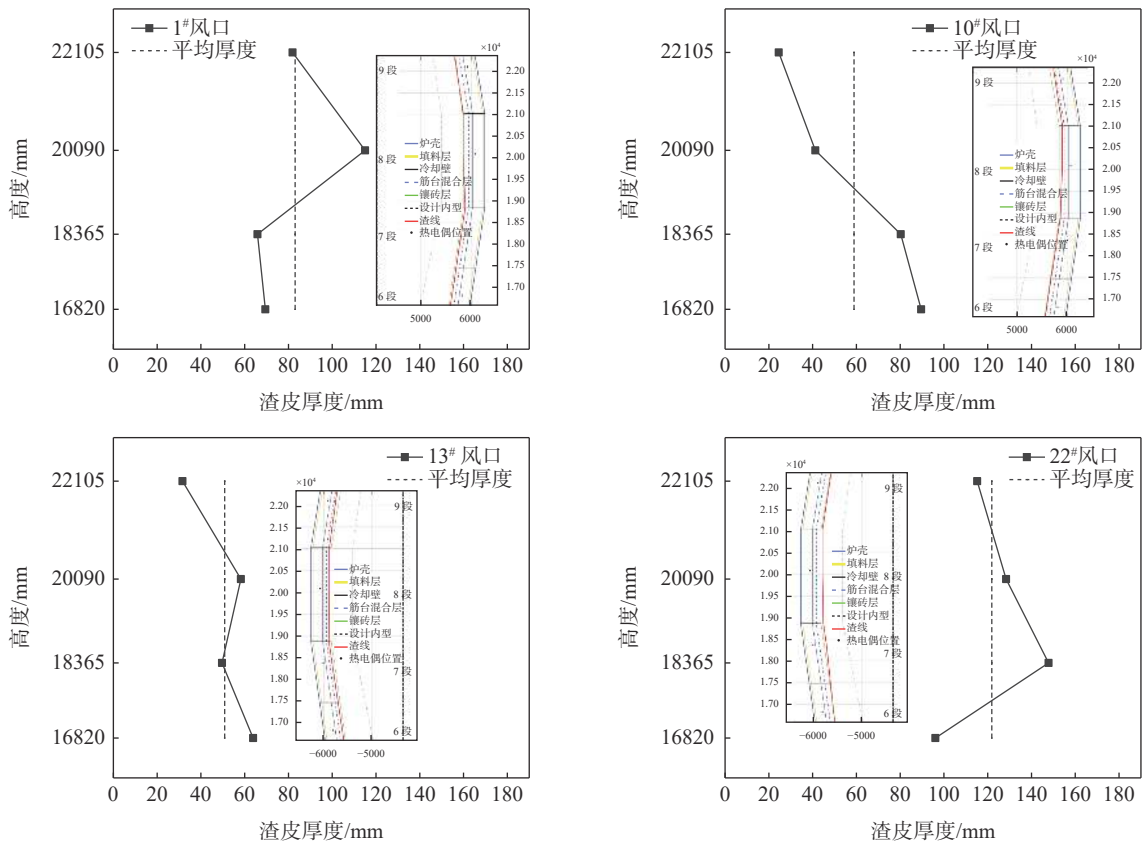


图 9 不同风口垂直截面高度方向的操作炉型

从图 10 可以看出,不同炉况下,整体上冷却壁内热电偶温度、冷却壁热面温度(不包括肋台)、混合层热面温度均随渣皮厚度的减薄呈递增趋势,其中热电偶温度随渣皮厚度变化的趋势并不显著,基本维持在 35 ~ 65 ℃,这与高温区域的炉壳表面温度(35 ~ 65 ℃)基本一致,且在时间点 1 和 2 热面区域

大部分位置的温度均低于 100 ℃,仅在时间点 0 高炉边缘气流得到发展条件下,才有超过 100 ℃ 情况出现,这表明炉墙内衬得到有效保护,但是对比图 10 普通高炉控制冷却壁渣皮厚度在 100 mm 以下时冷却壁仅在壁体热电偶的温度就超过 150 ℃,50 mm 以下渣皮时甚至热电偶温度超过 240 ℃,这说明该

高炉炉墙控制过冷, 冷却壁温度过低, 保护程度过大。

图 11 所示为不同时间点水温差与渣皮厚度关系, 可知在水流量确定条件下, 渣皮厚度随水温差增加呈现递减趋势, 且水温差较低 (<1 °C) 时, 随水温差减小, 渣皮厚度指数级增长。同时高温区域

B3 ~ S1 段比 B1 ~ B2 段的冷却壁水流量控制略高, 这可能是因为考虑到炉腰冷却壁区域的热负荷更高。对比不同流量下水温差和渣皮厚度变化关系, 可知随水流量的增加, 水温差与渣皮厚度关系曲线下移, 即同等水温差下, 冷却系统流量越高, 炉墙表面挂渣厚度越低。

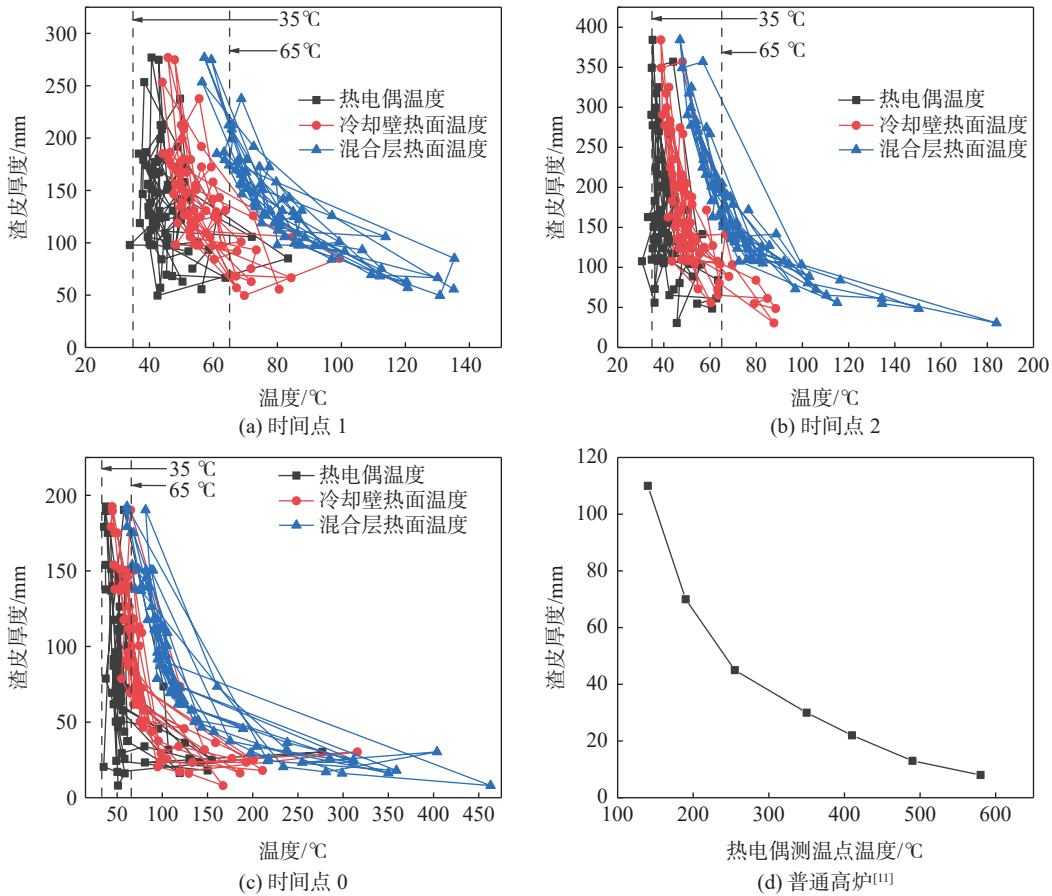


图 10 不同炉况下冷却壁内热电偶温度与渣皮厚度关系

Fig. 10 Relationship between temperature of the thermocouple on the cooling stave and slag skull thickness under different furnace conditions

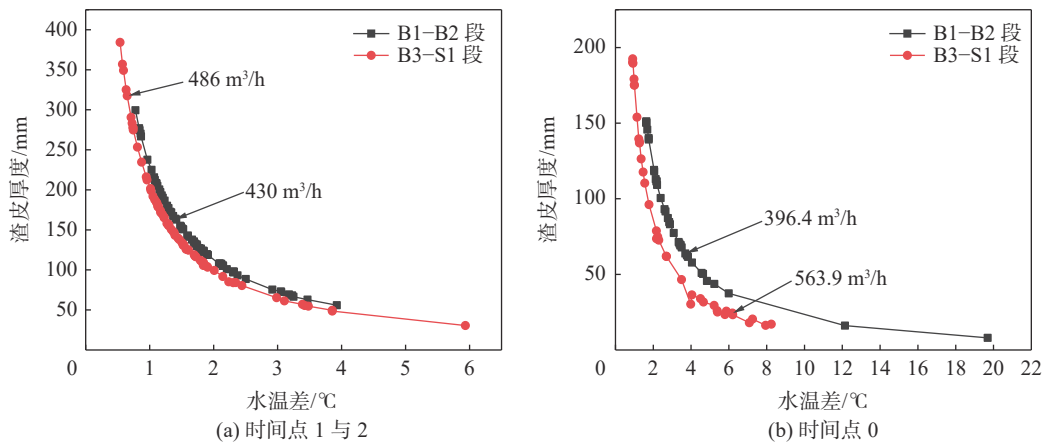


图 11 水温差与渣皮厚度关系

Fig. 11 Relationship between water temperature difference and slag skull thickness

由图12可知,随着炉内热负荷的不断增加,渣皮厚度逐渐下降。式(15)表明,渣皮厚度和热负荷相关性显著,在炉墙结构固定时,炉墙上的渣皮厚度主要取决于冷却壁热负荷。

$$y = a(1 - e^{(-bx)})^c \quad (15)$$

式中, y 为渣皮厚度, mm; x 为冷却壁热负荷, $\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; a, b, c 为常数,具体取值如图12所示。

由文献[12]可知,普通高炉铜冷却壁表面渣皮厚度控制在30~50 mm,而铸铁冷却壁表面渣皮一般控制在100 mm以下。从图12可知钒钛磁铁矿冶炼高炉渣皮厚度最高达到384 mm,最小仅约8 mm,表明钒钛磁铁矿冶炼高炉的高温区域挂渣厚度有较大的控制空间。

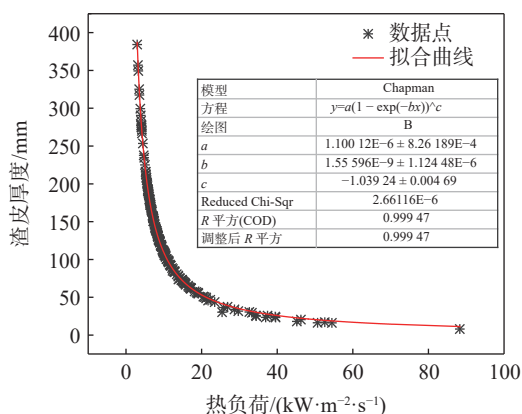


图12 冷却壁热负荷与渣皮厚度关系

Fig. 12 Relationship between the thermal load of the cooling stove and slag skull thickness

根据图12分析可知,对比普通高炉,钒钛高炉的显著特点是同等热负荷下,高温区域的挂渣能力更强,而其他方面并无过多不同点,因此,在综合考虑冷却壁安全性与热面渣皮稳定性的同时,认为钒钛高炉高温区的渣皮厚度控制应与普通高炉大体一

致,最大不应超过100 mm,最小不应小于30 mm,且应满足从下而上渣皮厚度呈递减趋势进行控制,相应地根据式(15),冷却壁热负荷应控制在10.50~34.50 $\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

4 结论

通过对钒钛磁铁矿冶炼高炉高温区域操作炉型进行研究,建立传热模型,计算得出高炉内衬表面挂渣情况,在验证模型准确性基础上,对渣皮厚度的影响因素进行分析,提出了钒钛磁铁矿高炉适宜的渣皮厚度,为实践工作提供技术支撑和参考。具体结论如下:

1)受高炉边缘气流弱影响,高温区域的炉墙热负荷大多在12 $\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 以下,渣皮厚度普遍高于100 mm,个别方向达到200 mm以上,这与普通高炉冶炼炉墙状况显著不同。

2)在圆周方向和高度方向上,高温区域渣皮厚度波动幅度大多超过100%,分布不均匀,而这种不均匀性分布会影响边缘气流分布与再分布,尤其在炉况不稳定时。

3)高温区冷却壁内热电偶温度基本维持在35~65 $^{\circ}\text{C}$,与炉壳温度相近,而炉墙热面温度也大多低于100 $^{\circ}\text{C}$,远低于同等条件下普通高炉。

4)在炉墙结构不变时,渣皮厚度主要取决于冷却壁热负荷,且在水流量确定条件下,渣皮厚度随水温差增加呈现递减趋势,而同等水温差条件下,冷却系统水流量越高,炉墙表面挂渣厚度相对减薄程度越大。

5)对比普通高炉,钒钛磁铁矿冶炼高炉在同等热负荷下,高温区域挂渣能力更强,从安全性与渣皮稳定性考虑,钒钛磁铁矿冶炼高炉冷却壁热负荷应控制在10.50~34.50 $\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

参考文献

- [1] Lin Chengcheng, Xiang Zhongyong. Characteristics of baosteel blast furnace profiles and their effects on operation[J]. Baosteel Technology, 2009, (2): 49-53.
(林成城, 项钟庸. 宝钢高炉炉型特点及其对操作的影响[J]. 宝钢技术, 2009, (2): 49-53.)
- [2] Chen Lingkun, Wang Yong, Fu Lianchun. Application of the blast furnace expert system to profile management on No. 4 BF at WISGCO[J]. Iron & Steel, 2000, 35(9): 5-9.
(陈令坤, 汪勇, 付连春. 高炉冶炼专家系统在炉型管理中的应用[J]. 钢铁, 2000, 35(9): 5-9.)
- [3] Chen Peidun, Shao Shudong, Xue Yuqing. On furnace shape management and smooth work of furnace status of BF operation[J]. China Metallurgy, 2006, 16(3): 48-49.
(陈培敦, 邵书东, 薛玉卿. 浅谈高炉操作炉型管理与炉况顺行[J]. 中国冶金, 2006, 16(3): 48-49.)

- (黄维刚, 方鸿生, 郑燕康. 硅对MN-B系空冷贝氏体钢组织与性能的影响[J]. 金属热处理学报, 1997, (1): 10-15.)
- [18] Ruijie Z, Zheng C, Bo L, *et al.* In-situ investigation of composition segregation and deformation streamline in bainitic steel on mechanical properties[J]. *Materials Science and Engineering:A*, 2022, 855: 143949.
- [19] Goulas C, Mecozzi M G, Sietsma J. Bainite formation in medium-carbon low-silicon spring steels accounting for chemical segregation[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A, Physical Metallurgy and Materials Science*, 2016, 47(6) : 3077-3087.
- [20] Liu Zongchang, Wang Haiyan, Wang Yufeng, *et al.* Morphology and formation mechanism of bainitic carbide[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2008, (1): 32-37.
(刘宗昌, 王海燕, 王玉峰, 等. 贝氏体碳化物的形貌及形成机制[J]. 材料热处理学报, 2008, (1): 32-37.)
- [21] Tan X, Xu Y, Yang X, *et al.* Austenite stabilization and high strength-elongation product of a low silicon aluminum-free hot-rolled directly quenched and dynamically partitioned steel[J]. *Materials Characterization*, 2015, 104: 23-30.
- [22] Bhadeshia H K D H. Bainite in steels[M]. Qinhuangdao: Yanshan University Press, 2020.
(Bhadeshia H K D H. 钢中贝氏体[M]. 秦皇岛: 燕山大学出版社, 2020.)
- [23] Królícka A, Janik A, Ak A, *et al.* The qualitative-quantitative approach to microstructural characterization of nanostructured bainitic steels using electron microscopy methods[J]. *Materials Science-Poland*, 2021, 39(2): 188-199.
- [24] Cornide J, Garcia-Mateo C, Capdevila C, *et al.* An assessment of the contributing factors to the nanoscale structural refinement of advanced bainitic steels[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, 577: S43-S47.

编辑 邓淑惠

(上接第 130 页)

- [4] Shi Lin, Cheng Susen, Zuo Haibin. Numerical simulation of erosion boundary identification of blast furnace lining[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2006, 18(4): 1-5.
(石琳, 程素森, 左海滨. 高炉炉衬侵蚀边界识别的数值模拟[J]. 钢铁研究学报, 2006, 18(4): 1-5.)
- [5] Li Junfeng, He Chuanyun, Ding Yuehua. Study on heat transfer and slag skull thickness in bosh and belly of blast furnace[J]. *Research on Iron and Steel*, 2014, 42(6): 12-15.
(李骏峰, 何川云, 丁跃华. 高炉炉腹炉腰传热及渣皮厚度的研究[J]. 钢铁研究, 2014, 42(6): 12-15.)
- [6] Chen Zeshao, Qian Jun, Ye Yihuo. Predicting theory of effective thermal conductivity of complex material[J]. *Journal of China University of Science and Technology*, 1992, 22(4): 416-424.
(陈则韶, 钱军, 叶一火. 复合材料等效导热系数的理论推算[J]. 中国科学技术大学学报, 1992, 22(4): 416-424.)
- [7] Zhang Feng, Xiao Jianzhuang, Song Zhiwen. The prediction models of thermal conductivity of concrete and their application[J]. *Ready-Mixed Concrete*, 2009, (2): 23-25,51.
(张枫, 肖建庄, 宋志文. 混凝土导热系数的理论模型及其应用[J]. 商品混凝土, 2009, (2): 23-25,51.)
- [8] Ji Xiulan, Liu Zengxun, Lü Qing. Analysis on slag skull on bf copper cooling stove for vanadium-bearing titaniferous magnetite smelting[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2012, 33(1): 65-69.
(计秀兰, 刘增勋, 吕庆. 冶炼钒钛磁铁矿高炉的铜冷却壁挂渣分析[J]. 钢铁钒钛, 2012, 33(1): 65-69.)
- [9] Liu Zengxun, Lü Qing. Heat transfer analysis for slag skull thickness of blast furnace[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2008, 29(3): 55-58.
(刘增勋, 吕庆. 高炉渣皮厚度的传热分析[J]. 钢铁钒钛, 2008, 29(3): 55-58.)
- [10] Cao Yingjie, Zhang Jianliang, Guo Hongwei. Calculation of blast furnace inner wall thickness[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2015, (1): 7-11.
(曹英杰, 张建良, 国宏伟. 高炉炉墙内型厚度的计算[J]. 钢铁研究学报, 2015, (1): 7-11.)
- [11] Liu Zengxun. Coupled thermos-mechanical analysis about blast furnace staves[D]. Shenyang: Northeastern University, 2009.
(刘增勋. 高炉冷却壁热力耦合分析[D]. 沈阳: 东北大学, 2009.)
- [12] Cheng Susen, Qian Liang, Zhao Hongbo. Monitoring method for blast furnace wall with copper staves[J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2007, 14(4): 1-5.

编辑 杨冬梅