

异常炉况高炉冷却板及炉衬非稳态温度场

程素森 孙磊 杨天钧

北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083

摘要 以鞍钢新一号3200 m³高炉冷却设备采用的冷却板为研究对象,探讨了异常炉况给冷却板寿命带来的危害,建立了异常炉况高炉冷却板及炉衬三维非稳态温度场数学模型,计算了当渣皮脱落、炉内煤气流温度突然升高、边缘气流发展时冷却板的温度变化,以及冷却水流速和渣层厚度对冷却板最高温度及热量损失的影响。

关键词 高炉;冷却板;炉衬;异常炉况;温度场

分类号 TF 777

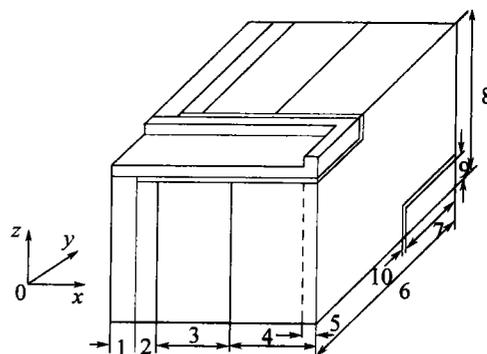
高炉长寿是一项系统的综合技术,是从设计、制造、施工、操作到维护的系统工程,并与原料条件有密切关系^[1-3]。冷却设备的寿命在很大程度上决定了高炉寿命^[4-13]。因此,在研究高炉长寿问题时,首先应研究冷却设备的长寿问题。冷却板或炉衬的热面温度对延长冷却板寿命有决定性作用。应用传热学理论对冷却板的温度场进行研究,可使冷却板的性能不断得到改进,延长其寿命。

在高炉顺行时,炉况基本处于稳定,冷却板和炉衬的传热属于稳态导热问题。在此状况下工作的冷却板温度场已经有些研究工作。但在异常炉况时,冷却板及炉衬的温度变化属于非稳态传热问题,目前很少看到相关报道。

随着高炉生产的进行,冷却板前端的耐火砖由于磨损和侵蚀而消失,致使冷却板直接暴露在炉气中,反复地承受剧烈的温度变化,造成了冷却板和炉衬温度变化剧烈,冷却板非稳定热负荷所产生的热应力不容忽视。另外,当高炉炉料不顺时有时会产生悬料或者边缘气流发展,都会使炉墙工作面温度急剧升高。本文就是通过模拟高炉操作过程中的各种不稳定状况下高炉炉衬及冷却板的温度场的变化,从而分析高炉炉衬及冷却板的破坏情况,以便在设计上起到预防作用。

1 温度场数值模拟计算

高炉冷却板及炉衬组成的传热物理模型见图1。



1—炉壳; 2—炉壳填充层; 3—炉衬一层; 4—炉衬二层; 5—冷却板壁厚度; 6—冷却板水平间距; 7—冷却板半宽度; 8—冷却板垂直间距; 9—冷却板半高度; 10—冷却板填充层。

图1 冷却板及炉衬传热物理模型

Fig.1 Heat transfer physical model for cooling plate and lining

冷却板及炉衬传热的数学模型如下:

$$\frac{\partial}{\partial x}(k \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k \frac{\partial T}{\partial z}) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中, T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; k 为导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

初始条件视实际计算情况而定。边界条件包括:

(1) 炉壳外表面。空气与炉壳的对流边界条件, 对流换热系数 $\alpha_s, \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$;

(2)炉内工作面.炉气与工作面的对流边界条件,对流换热系数 α_m , $W/(m^2 \cdot K)$;

(3)冷却板内表面.冷却水与冷却板的对流边界条件,对流换热系数 α_n , $W/(m^2 \cdot K)$;

(4)其他表面.由于对称性视为绝热条件.

2 计算结果及分析

2.1 渣皮脱落

计算条件:炉内温度 1200°C ,冷却水流速 2.5 m/s ,冷却板垂直间距 0.6 m ,冷却板水平间距 0.8 m ,渣层厚度由 0.01 m 直至完全脱落.

由图2可见,当 0.01 m 的渣皮突然脱落,在 30 min 内,铜冷却板的最高温度从 94°C 上升到 150°C ,铸铁冷却板的最高温度从 200°C 上升到 340°C .铜冷却板温度上升速率 $1.87^\circ\text{C}/\text{min}$,而铸铁冷却板为 $4.67^\circ\text{C}/\text{min}$.由此可见,渣皮的突然脱落可能导致冷却板局部温度上升速率过快,由于热应力与温度差成正比,因此,渣皮的突然脱落导致冷却板局部热应力增大,这也是冷却板的损坏的主要原因.从温度上升速率来看,铸铁冷却板的最高温度上升速率是铜冷板上速率的2倍,铜冷却板的冷却效果较铸铁冷却板要好.但是在此计算条件下,当铜冷却板完全裸露在炉气中时,它的最高温度已经大于铜的临界允许温度 150°C ,这样会使冷却板处于过热状态而受到损坏.这种情况下可以通过提高冷却水的水流速度的方法来避免铜冷却板处于过热.铸铁冷却板虽然它上升到较高的温度,但并没有超过铸铁的临界允许温度 760°C .然而,它的温度变化较大,随之产生的热应力也较大.如果反复出现这种温度波动,会使冷却板长期处于较高的热疲劳状态,

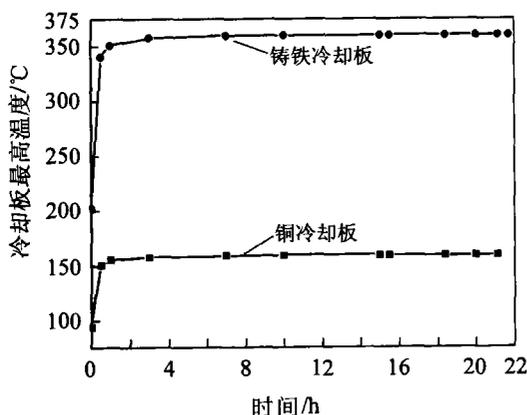


图2 冷却板最高温度随时间的变化

Fig.2 Relations of the max temperature of cooling plates with time

缩短冷却板的使用寿命.

由图3可以看出,无论是使用铜冷却板还是铸铁冷却板,炉衬的热面最高温度相差不大.这是因为冷却板的冷却特点是“点”冷却,也就是说冷却板的作用范围在冷却板的附近是明显的,在远离冷却板的地方,特别是在这种冷却板的垂直间距和水平间距较大的情况下,冷却范围相对较小.从图3也可以看出,在没有渣皮的保护下,炉衬最高温度从 730°C 很快上升到 930°C 左右,在不到 30 min 的时间内,炉衬温度上升了 200°C 左右,温度上升速率为 $6.67^\circ\text{C}/\text{min}$ 之多,这样的热冲击对炉衬砖的损坏是较大的.由此可见,非稳定的操作导致渣皮脱落不但对冷却板有坏处,对炉衬的损坏更严重.

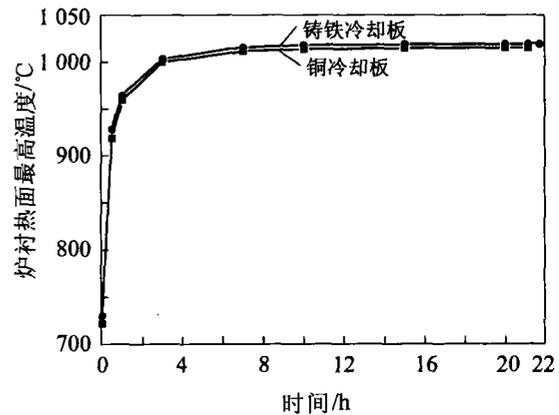


图3 炉衬最高温度随时间的变化

Fig.3 Relations of the max temperature of lining with time

图4是冷却板附近一点的温度随着时间的变化.由图4可以很明显的看出铜冷却板和铸铁冷却板之间的冷却效果的差别.对比图3与图4,这也说明冷却板的冷却效果是“点”冷却,对其附近砖衬冷却效果明显.

从图5可以看出,当渣皮脱落时会产生一峰值热流强度,这一峰值热流强度就是由于渣皮脱落导致的热流冲击.如果这种热流冲击不断持续,就会对冷却板的寿命有较大的影响.由图5也可以看出,使用铜冷却板热量损失比使用铸铁冷却板的热量损失要大一些,但铜冷板前端更容易挂渣皮和保持砖衬.

2.2 煤气流温度突然升高

计算条件:炉内温度由 1200°C 快速上升至 1400°C ,冷却水流速 2.5 m/s ,冷却板垂直间距 0.6 m ,冷却板水平间距 0.8 m .

当高炉边缘气流过分发展或悬料时,高炉炉

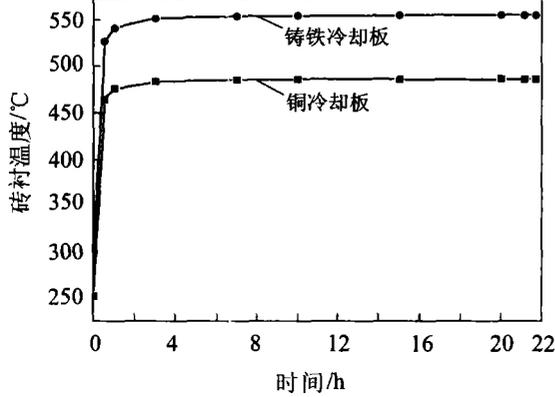


图4 靠近冷却板砖衬温度随时间的变化

Fig.4 Relations of the temperature of brick lining close to cooling plates with time

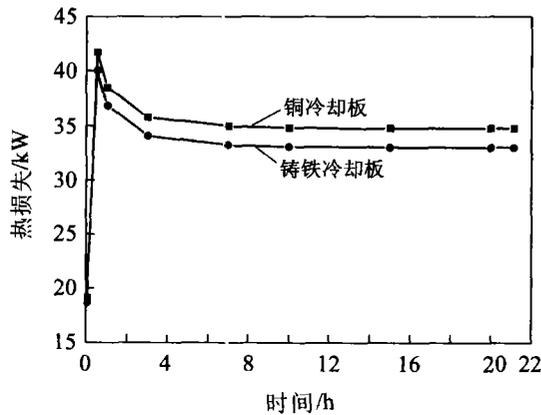


图5 热损随时间的变化

Fig.5 Heat loss through blast furnace wall with time

衬附近内气体温度会局部升高,分别计算了当炉内煤气流温度由1200°C升高到1400°C的过程中,冷却板的最高温度、炉衬的最高温度以及靠近冷却板炉衬温度和通过炉衬的热量损失的变化,见图6~图9.由图可见,铜、铸铁冷却板和炉衬的最

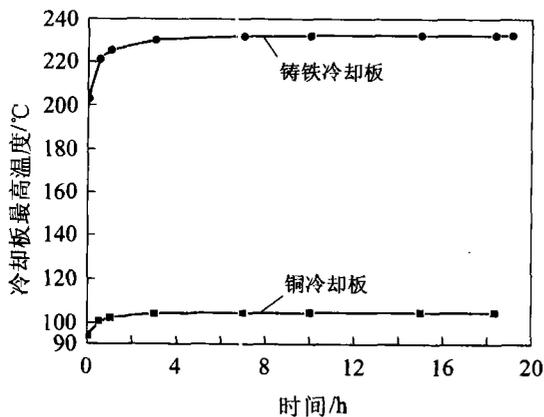


图6 冷却板最高温度随时间的变化

Fig.6 Relations of the max temperature of cooling plates with time

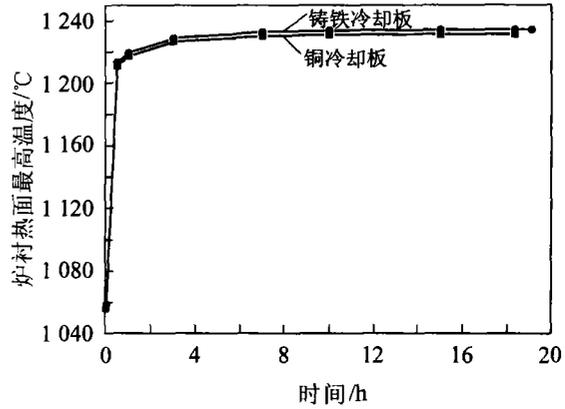


图7 炉衬最高温度随时间的变化

Fig.7 Relations of the max temperature of lining with time

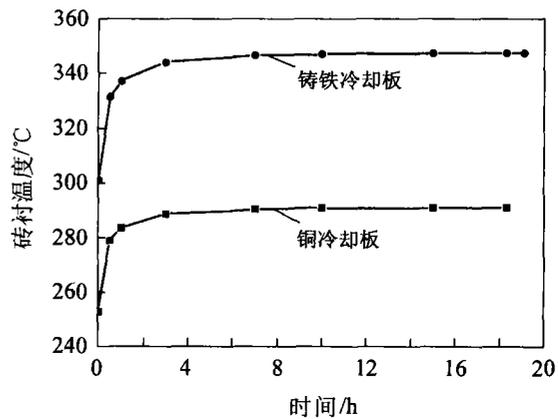


图8 靠近冷却板砖衬温度随时间的变化

Fig.8 Relations of the max temperature of brick lining close to cooling plates with time

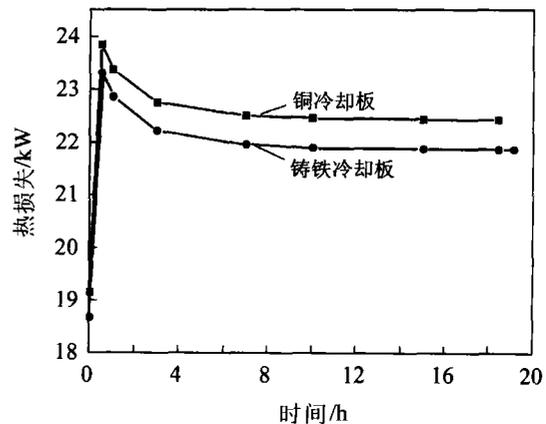


图9 热损随时间的变化

Fig.9 Heat loss through blast furnace wall with time

高温都在30 min内都有不同程度的上升.铜冷却板上上升了6°C左右,铸铁冷却板上上升了20°C左右,炉衬最高温度却上升了160°C,达到1200°C,靠近冷却板的砖衬温度上升了30°C.通过炉壳散失和冷却水带走的热量(也即热量损失)首先达到了一峰值,然后回落至稳态.从图中可以看到,

炉内煤气流温度的突然升高会导致炉衬温度的升高, 炉衬温度超过其损坏的临界温度, 烧毁炉衬, 致使炉墙不光滑。

2.3 炉内对流换热系数增大

计算条件: 炉内温度 1200°C , 冷却水流速 2.5 m/s ; 冷却板垂直间距 0.6 m , 冷却板水平间距为 0.8 m 。

当高炉边缘气流发展时, 炉内煤气流与炉墙之间的对流换热系数会突然增大, 图10~图13计算了当炉内气体的对流换热系数由 $232\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 增大到 $500\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 的过程中, 冷却板及炉衬最高温度的变化以及热损失的变化情况。

由图10可见, 无论是铜冷却板还是铸铁冷却板, 它们的最高温度都会增大, 但增加的幅度不大. 它们的最高温度没有超过临界允许温度, 冷却板还处于安全状态. 如图11, 炉衬的最高温度过高, 这部分炉衬将会被烧毁. 图12说明了铜冷却板的冷却效果比铸铁冷却板的要好, 图13说明对流换热系数的增大会产生一个对炉墙的

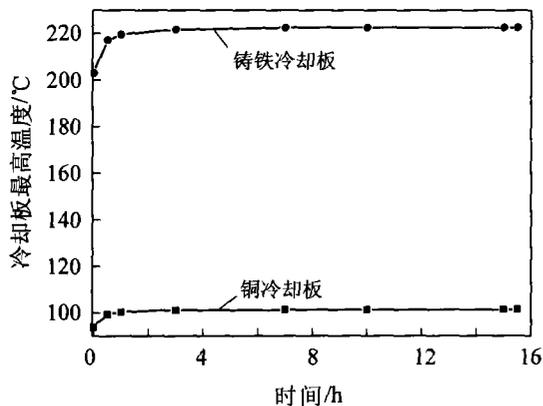


图10 冷却板最高温度随时间的变化

Fig.10 Relations of the max temperature of cooling plates with time

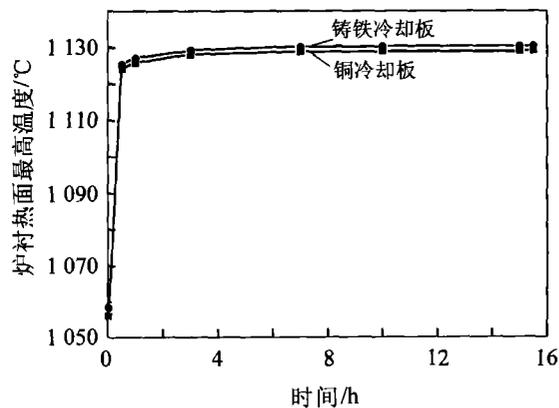


图11 炉衬最高温度随时间的变化

Fig.11 Relations of the max temperature of lining with time

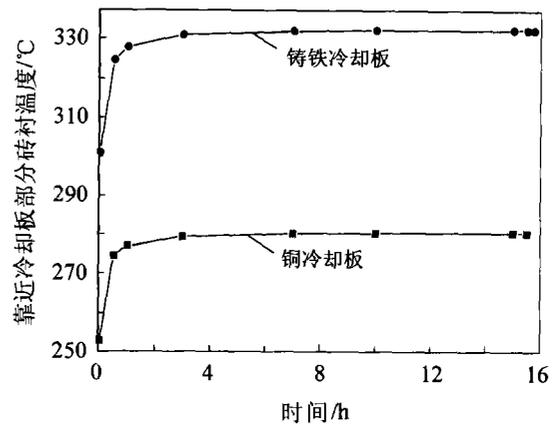


图12 靠近冷却板部分炉衬温度随时间的变化

Fig.12 Relations of the max temperature of brick lining close to cooling plates with time

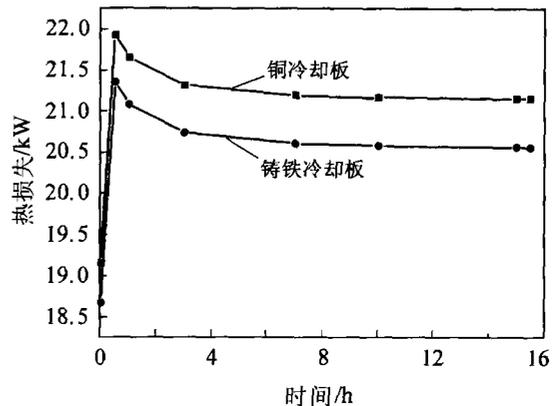


图13 热损随时间的变化

Fig.13 Heat loss through blast furnace wall with time

尖峰热流冲击。

2.4 冷却水速对冷却板最高温度的影响

在不同炉内煤气流温度下, 水流速度对铜冷却板最高温度的影响计算结果如图14所示。

计算条件: 铜冷却板垂直间距 0.6 m , 铜冷却板水平间距 0.8 m , 渣层厚度 0.01 m 。由图14可见, 提高冷却板内的水流速度对于减低冷却板温度的影响是明显的, 水速越高, 冷却板的最高温度将越低, 而它对于砖衬的热面温度及热流密度虽稍有影响但其幅度甚小. 对于铜冷却板, 所关心的是水流速度提高到何值才能使冷却板的最高温度低于 150°C , 这是铜的允许临界温度. 如图14所示, 为了保证冷却板的最高温度 $T_{\text{max}} < 120^{\circ}\text{C}$, 在炉内煤气流温度为 1600°C 时, 水流速度应大于 3 m/s ; 在炉内煤气流温度为 1400°C 时, 水流速度应大于 2.0 m/s , 在炉内温度 1200°C 时, 水速只要在 1.2 m/s 即可. 从理论上来说, 按照上述参数冷却的冷却板, 可以维持长期可靠的工作, 使冷却板

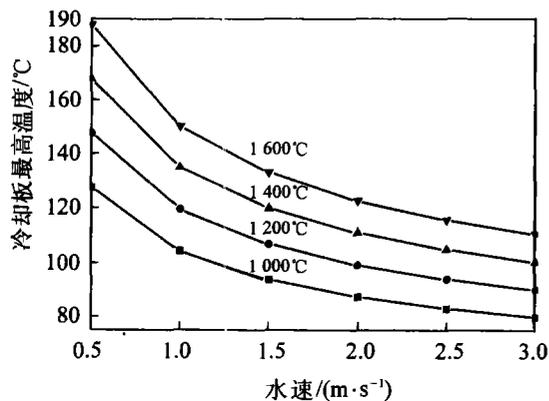


图 14 冷却水流速对冷却板最高温度的影响

Fig.14 Influence of cooling water rate on the max temperature of cooling plates

处于无过热状态. 由图 14 也可以看出, 当冷却水速由 0.5 m/s 增加到 1.5 m/s 时, 冷却能力增加迅速. 随着冷却水速继续增加, 冷却能力的增加在减小. 由于水的阻力损失与水速的平方成正比, 水的阻力增加将会更迅速.

2.5 渣层厚度对冷却板最高温度的影响

渣层厚度在不同炉内温度时对冷却板最高温度的影响如图 15 所示.

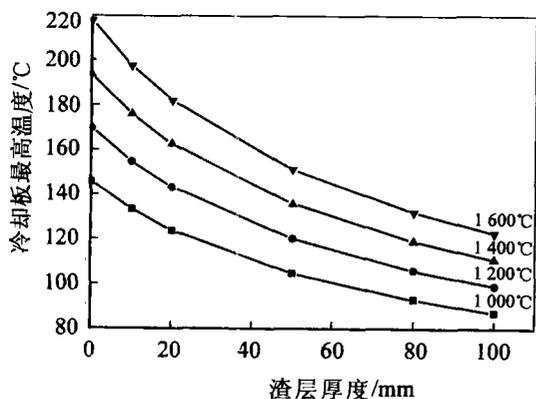


图 15 渣层厚度对冷却板最高温度的影响

Fig.15 Influence of slag-metal skull thickness on the max temperature of cooling plates

计算条件: 冷却水速 2.0 m/s, 铜冷却板垂直间距 0.6 m, 铜冷却板水平间距 0.8 m. 由图 15 可见, 渣层厚度对冷却板最高温度的影响是相当明显的, 渣层越厚对冷却板的保护作用越大, 冷却板的最高温度就越低. 其他条件不变, 要使冷却板温度 < 150°C, 当炉内温度在 1200°C 时渣层厚度应大于 15 mm; 当炉内温度在 1400°C 时渣层厚度应大于 35 mm; 当炉内温度在 1600°C 时渣层厚度应大于 55 mm.

3 结论

(1) 高炉冷却板及炉衬三维温度场数值模型计算的非稳态计算模拟预测了高炉几种常见异常情况下的热损坏状况, 对高炉的设计和优化可以起到重要作用.

(2) 当高炉内侧的保护渣皮脱落使冷却板完全暴露炉气中时, 冷却板及炉衬的最高温度将会在很短时间内迅速上升, 此时会产生很大的热应力. 如果反复进行这种热冲击会使炉衬及冷却板过早疲劳坏掉, 而且会造成巨大的热损失.

(3) 当高炉发生悬料时, 炉内气体温度会出现波动, 这样会使冷却板及炉衬的最高温度也随之升高. 若炉内气体温度过高, 会使炉衬被烧毁, 使冷却板裸露于炉气当中.

(4) 当高炉内边缘气流发展时, 会使炉内气体的对流换热系数增大, 此时也会对冷却板及炉衬造成热冲击, 使冷却板和炉衬的温度在很短时间内迅速上升, 烧毁炉衬.

(5) 铜冷却板比铸铁冷却板效果好, 在没有渣壳的保护下, 它的热损失会较大.

(6) 冷却水速对冷却板的温度影响也是相当明显的, 为了确保铜冷却板的最高温度小于 120°C, 必须确保冷却水速达到一定的值.

(7) 形成的渣层对冷却板的保护作用根据厚度不同而变化, 渣层越厚对冷却板的保护作用越大, 冷却板的最高温度就越低. 在其他条件不变的情况下, 要使冷却板温度低于 150°C, 当炉内温度在 1200°C 时渣层厚度应大于 15 mm; 当炉内温度在 1400°C 时渣层厚度应大于 35 mm; 当炉内温度在 1600°C 时渣层厚度应大于 55 mm.

参 考 文 献

- 徐矩良. 关于高炉寿命的几点看法[A]. 高炉长寿及快速修补技术研讨会论文集[C]. 宜昌, 1999
- 项钟庸. 高炉长寿技术的进步[J]. 国外钢铁, 1996, 21(2): 20
- 程素森, 杨天钧, 薛庆国. 长寿高炉冷却器布置计算传热学分[J]. 北京科技大学学报, 2002, 24(1): 15
- Cheng S S, Xue Q G, Yang W G, et al. Design for long campaign blast furnace (1) [J]. J Univ Sci Technol Beijing, 1999, 6(3): 30
- 程素森, 杨天钧, 薛庆国, 等. 长寿高炉设计指标及评价系统初探[J]. 钢铁, 2000, 35(5): 10
- 程素森, 薛庆国, 苍大强, 等. 高炉冷却壁传热学分

- 析[J]. 钢铁, 1999, 34(5): 11
- 7 程素森, 杨天钧, 杨为国. 高炉铜冷却壁传热学分析[J]. 钢铁, 2001, 36(2): 8
- 8 杨天钧, 程素森, 吴启常. 面向 21 世纪中国长寿高效高炉[J]. 钢铁, 1999, 35(增刊): 84
- 9 程素森, 杨天钧, 马祥. 冷却水水垢对冷却器冷却能力影响的传热学分析[J]. 钢铁, 2002, 37(7): 16
- 10 Cheng S S, Yang T J, Xue Q G, et al. Numerical simulation of the lower shaft and the hearth bottom of blast furnace [J]. J Univ Sci Technol Beijing, 2003, 10(3): 16
- 11 Cheng S S, Yang T J, Cang D Q. Long campaignship BF with overheating free cooling staves [J]. J Iron Steel Res, 2003, 10(3): 1
- 12 Cheng S S, Yang T J, Xue Q G, et al. Optimum design and layout of the cooling apparatus for long campaignship blast furnace [J]. J Univ Sci Technol Beijing, 2003, 10(4): 24
- 13 程素森, 杨天钧. 影响高炉炉墙热负荷因素分析[J]. 北京科技大学学报, 2002, 24(4): 407

Unsteady State Temperature Field for Blast Furnace Cooling Plate and Lining in Abnormal Operation Process

CHENG Susen, SUN Lei, YANG Tianjun

Metallurgical and Ecological Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

ABSTRACT The cooling plate was used as the cooling apparatus in 3200 m³ of new No.1 blast furnace and the abnormal operation endangering the cooling plate life was discussed by numerical computations. A three-dimensional unsteady state temperature field mathematical model for the cooling plate and lining was established in the time of abnormal operation. As the slag-metal skull fell off, the gas flow rate and temperature abruptly increased, and peripheral gas overdeveloped, the temperature change of the cooling plate was computed. The influence of the thickness of the slag-metal skull and the cooling water rate on the temperature field of the cooling plate and the heat loss was analyzed.

KEY WORDS blast furnace; cooling plate; lining; abnormal operation; temperature field