

# 大型高炉合理炉缸冷却制度

宁晓钧<sup>✉</sup> 左海滨 张建良 杨天钧

北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083

<sup>✉</sup> 通信作者, E-mail: ningxj@ustb.edu.cn

**摘要** 合理的炉缸冷却制度是保证大型高炉长寿的基础,不同冷却制度对高炉炉缸的温度分布和侵蚀状况具有直接影响. 结合某4000 m<sup>3</sup>级高炉,根据传热学理论建立了高炉炉缸、炉底温度场物理模型和数学模型,通过数值模拟对“大水量、小温差”和“小水量、大温差”这两种不同炉缸冷却制度进行了研究,分析了不同冷却制度对炉缸温度场、炉缸侵蚀状况及高炉寿命的影响. 结果表明,在炉役初期砖衬较厚时,不同冷却制度对炉内温度分布的影响区别不大;随着砖衬的不断减薄,不同冷却制度对炉内温度分布的影响逐渐明显;当砖衬侵蚀到一定程度后,再好的冷却也无济于事,但采用“大水量、小温差”并加强冷却可以减缓砖衬的侵蚀,延长高炉寿命.

**关键词** 高炉; 炉缸; 冷却系统; 热流; 数值模拟

**分类号** TF 549<sup>+</sup>.4

## Rational cooling water system for a large blast furnace hearth

NING Xiao-jun<sup>✉</sup>, ZUO Hai-bin, ZHANG Jian-liang, YANG Tian-jun

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

<sup>✉</sup> Corresponding author, E-mail: ningxj@ustb.edu.cn

**ABSTRACT** Since the temperature distribution and erosion of blast furnace hearth are directly affected by cooling system, a rational cooling water system is the assurance for long campaign life of large blast furnace. Combined with a 4000 m<sup>3</sup> blast furnace, physical and mathematical models of temperature fields of blast furnace hearth and bottom were built according to heat transfer theory. Two different hearth cooling systems, namely “low water capacity and large temperature difference” and “large water capacity and small temperature difference”, are both investigated by modeling and numerical simulation. Effects of different cooling systems on hearth temperature field, hearth erosion and blast furnace life are also analyzed. The results indicate that during the initial period with thicker brick lining, effects of different cooling systems on blast furnace temperature distribution are nearly the same. As the brick lining gradually becomes thinner, different cooling systems have much different effects on temperature distribution. When the brick lining is eroded to a certain level, even the best cooling system is of no use, but “large water capacity and small temperature difference” and enhanced cooling measures will slow down the erosion and prolong the campaign life.

**KEY WORDS** blast furnaces; hearths; cooling systems; heat flux; numerical simulation

随着炼铁技术的进步,高炉不断往大型化、长寿化、节能和环保的方向发展. 现代炼铁生产采用精料、高压、高风温 and 喷吹燃料等强化冶炼措施,生铁产量得到提高,炼铁焦比得到降低,与此同时,高炉设备和炉身、炉缸炉底的工作负荷进一步加重<sup>[1]</sup>. 由于高炉设计和砌筑的不足及缺乏有效的监控措施,高炉的炉衬和冷却设备损坏加快,尤其是炉缸破损情况加剧,炉缸烧穿事故时有发生,高炉大中修频

繁,这严重影响到高炉的长寿和经济效益的提高<sup>[2]</sup>.

合理的炉缸炉底结构、良好的耐材质量和搭配以及合理的冷却制度是保证高炉长寿的基础<sup>[3]</sup>. 炉缸炉底冷却的目标是,通过强化冷却,将铁水凝固线(1150℃)乃至碱金属和锌对高炉内衬起破坏作用的温度(800~1030℃)向砖衬热端推移,以降低炉衬温度,形成稳定的凝结渣铁保护层(结渣温度区

收稿日期: 2010-11-25

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重大项目(2008BAB32B05)

间为 1 150 ~ 1 200 ℃), 保护炉衬以延长高炉寿命<sup>[4-10]</sup>. 本文结合某 4 000 m<sup>3</sup> 级高炉, 根据传热学理论建立高炉炉缸、炉底温度场物理模型和数学模型, 通过数值模拟研究“大水量、小温差”和“小水量、大温差”不同冷却制度对炉缸寿命的影响规律.

## 1 计算模型

### 1.1 物理模型

该 4 000 m<sup>3</sup> 级高炉炉缸采用“石墨砖 + 微孔炭砖 + 陶瓷杯”的耐火材料砌筑结构. 炉底最下层为两层高导热石墨砖(EG), 中间两层为普通炭砖(E-5), 其上为一层微孔炭砖(EM-10), 最上面为一层高铝砖(陶瓷垫), 炉底满铺炭砖, 周边砌筑一环石墨砖(EGF). 铁口区域与炉壳顶砌一层高导热性石墨砖(EGFD), 从炉底满铺炭砖向上, 共 30 层. 石墨砖向内, 交错砌筑一层超微孔炭砖(EM-15), 再向炉内为陶瓷杯. 非铁口区域从炉壳向内分别为石墨砖、两层超微孔炭砖和陶瓷杯, 石墨砖与超微孔炭砖咬砌. 铁口区域没有采用加厚砌筑, 而是利用增大高导热性的石墨砖厚度的方式提高传热能力. 炉缸冷却系统为炉壳外水夹套冷却, 无冷却壁.

在计算过程中, 为了提高软件计算速度及考虑到高炉的实际情况, 采用了如图 1 所示的物理模型, 并依据砖衬侵蚀状况的不同进一步将其细分为图 2 中五种类型.

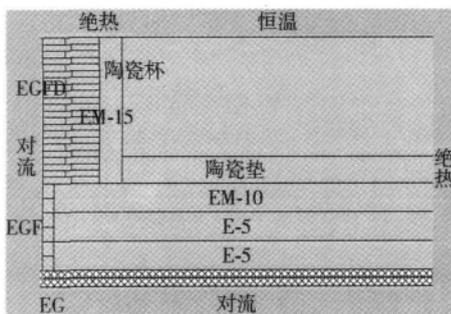


图 1 高炉炉缸、炉底物理模型结构

Fig. 1 Physical model structure of the blast furnace hearth and hearth bottom

### 1.2 数学模型

考虑到高炉炉缸为圆柱形, 扇形柱体比立方体的控制单元体更符合炉缸炉底的实际情况, 其计算结果更准确. 根据壳体的能量平衡原理建立微分控制方程, 考虑到对称性, 建立柱坐标系下的二维非稳态导热模型, 计算方法采用有限差分法.

控制方程为

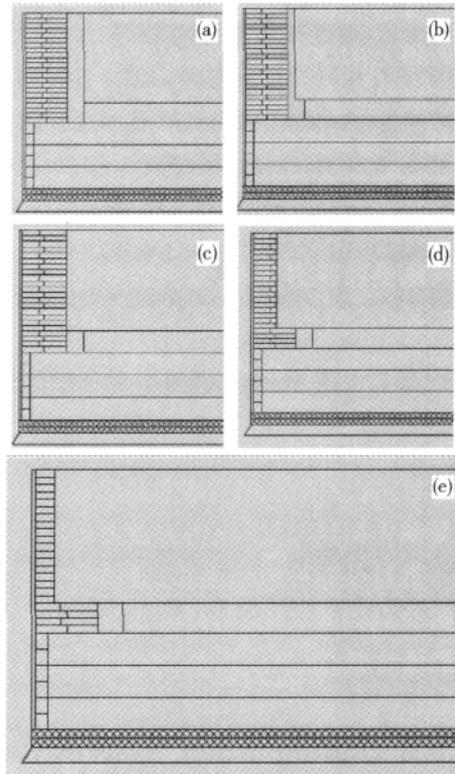


图 2 高炉炉缸、炉底物理模型. (a) 砖衬完好; (b) 陶瓷杯侵蚀一半; (c) 陶瓷杯完全侵蚀; (d) 砖衬剩 559 mm; (e) 砖衬剩 305 mm

Fig. 2 Physical model of the blast furnace hearth and hearth bottom: (a) intact hearth; (b) half of the ceramic cup being eroded; (c) ceramic cup being entirely eroded; (d) 559 mm brick lining remained; (e) 305 mm brick lining remained

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho H) = \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( kr \frac{\partial T}{\partial r} \right). \quad (1)$$

式中:  $\tau$  为时间, s;  $\rho$  为控制体密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $k$  为导热系数,  $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $r$  为半径方向的坐标;  $z$  为坐标;  $T$  为温度, K;  $H$  为铁水热焓,  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ .  $H = VC_p T$ . 其中  $V$  为铁水体积,  $\text{m}^3$ ;  $C_p$  为定压比热容,  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . 根据能量平衡, 单元体热焓的增量 = 各相邻单元体的热量 + 内热源产生的热量.

计算范围为铁口中心线以下, 铁口中心线平面铁水温度设为 1 500 ℃, 炉缸侧壁和炉底为对流换热, 炉缸中心由于是对称结构, 取绝热边界条件. 计算过程中考虑砖衬的导热系数随温度变化的情况, 并且考虑铁水凝固时释放潜热对温度场分布的影响, 将凝固潜热作为节点的热源项处理, 迭代结束同时求得节点的温度和凝固率.

计算过程中, 铁水的导热系数取  $17.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , 根据已有研究结果, 考虑到流动传热, 按照  $85.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  计算. 渣的导热系数按照  $2.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  计算. 炉缸、炉底冷却为强制对流换热, 对

流换热系数为:

$$h_f = 0.023 \frac{\lambda}{D} Re_f^{0.8} Pr_f^{0.4}$$

式中,  $\lambda$  为热导率 ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ),  $D$  为直径 (m),  $Re$  为雷诺数,  $Pr$  为普朗特数. 计算所用陶瓷杯的导热系数为  $2.5 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ , 炉底高铝砖导热系数为  $4.0 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ , 其他砖衬的物性参数如表 1 所示.

表 1 不同砖衬的热导率

**Table 1** Thermal conductivities of different brick linings

类型	热导率/( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )	温度范围/ $^{\circ}C$
EM-15	$16.32875 + 0.00119t$	25 ~ 1600
EG	$131.56429 - 0.12274t + 3.95899 \times 10^{-5}t^2$	25 ~ 1600
E-5	$12.13643 + 0.00216t$	25 ~ 1600
EM-10	$13.33571 + 0.00053t - 2.29167 \times 10^{-6}t^2$	25 ~ 1600
EGFD	$192.48571 - 0.18049t + 6.07143 \times 10^{-5}t^2$	25 ~ 1600
EGF	$136.68125 - 0.14631t + 5.39211 \times 10^{-5}t^2$	25 ~ 1600
RAM	$23.61833 - 0.01122t + 6.62879 \times 10^{-6}t^2$	25 ~ 1000

## 2 计算结果及分析

按照铁口区域的砌砖结构, 计算不同侵蚀程度下的平均热流密度. 计算条件为炉缸侧壁和炉底取第三类边界条件, 冷却水对流换热系数根据管内强制对流换热准数方程计算得到, 冷却水温为  $20^{\circ}C$ , 假设炉底尚未侵蚀. 不同砖衬厚度时的平均热流密度如表 2 所示.

表 2 不同砖衬厚度下热流密度

**Table 2** Heat flux intensities of brick linings with different thicknesses

砖衬厚度/mm	1416	1194	1016	559	305
平均热流密度/( $kW \cdot m^{-2}$ )	4.063	7.048	19.157	51.860	61.496

从表 2 可以看出, 开始阶段炉缸热负荷较小, 冷却强度并不需要很大. 随着陶瓷杯逐渐被侵蚀, 热负荷逐渐增大. 当陶瓷杯侵蚀一半左右时, 平均热流密度超过  $7 kW \cdot m^{-2}$ , 局部尖峰热流密度可能超过  $10 kW \cdot m^{-2}$ ; 当陶瓷杯侵蚀掉以后, 平均热流密度接近  $20 kW \cdot m^{-2}$  的水平, 局部尖峰热流密度当然更高, 因而需要足够大的冷却强度.

根据热量平衡原理, 当控制一定的水温差时, 根据平均热流密度可以计算出需要的水量, 冷却水流量 ( $t \cdot s^{-1}$ ) = 冷却面积 ( $m^2$ )  $\times$  平均热流密度 ( $W \cdot m^{-2}$ ) / ( $c \cdot \Delta t$ ),  $c$  为比热容 ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ),  $\Delta t$  为温差 ( $K$ ). 同理根据冷却水流量可以计算出水温差大小. 对于某  $4000 m^3$  高炉的冷却情况, 由于只计算了铁口以下平均热流密度, 现用该热流密度表示整个

炉缸的平均热流密度, 炉缸水流量分别为  $450 t \cdot h^{-1}$ 、 $1000 t \cdot h^{-1}$ 、 $1500 t \cdot h^{-1}$  和  $3000 t \cdot h^{-1}$  时, 不增加冷却水流速 (即对流换热系数保持不变) 条件下, 不同砖衬厚度下水温差如图 3 所示.

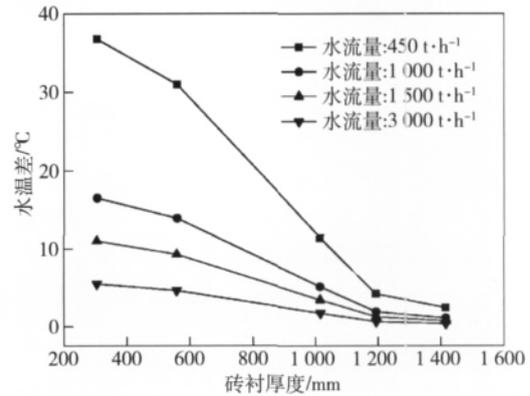


图 3 不同砖衬厚度和水流量条件下水温差 (水速不变)

Fig. 3 Temperature differences at different brick lining thicknesses and water flow rates (constant velocity)

同时考虑提高水速的情况, 在水速增加的同时, 由对流换热的准数方程可知, 对流换热系数增大, 此时不同砖衬厚度和水流量条件下水温差变化如图 4 所示.

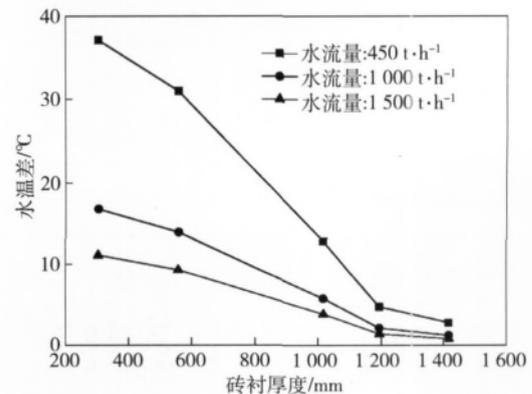


图 4 不同砖衬厚度和水流量条件下水温差 (水速增加)

Fig. 4 Temperature differences at brick lining thicknesses and water flow rates (increasing velocity)

由图 3 和图 4 可以看出: 在砖衬较厚时, 不同冷却条件下水温差变化不大, 随着砖衬的减薄, 水温差逐渐增大, 水量越小, 水温差增速越大; 当砖衬厚度减薄到一定程度时, 由于有凝固层生成, 热流密度增加的速度减慢, 水温差的增速降低; 此外, 在水流量不变的情况下, 水速增加时水温差稍有降低的趋势, 但是降低趋势不太明显.

## 3 不同炉缸冷却制度分析

中国高炉工作者对于炉缸炉底是采用“大水

量、小温差”还是“小水量、大温差”的冷却制度争论多年;近年来,“大水量、小温差”的理念得到越来越多的认可.从总的热量传输来看,两种方式带走的总热量是相同的,但对炉内温度分布的影响不同.考察陶瓷杯被完全侵蚀的极限情况下,不同冷却条件即不同水温时炉内温度分布如图 5 所示.

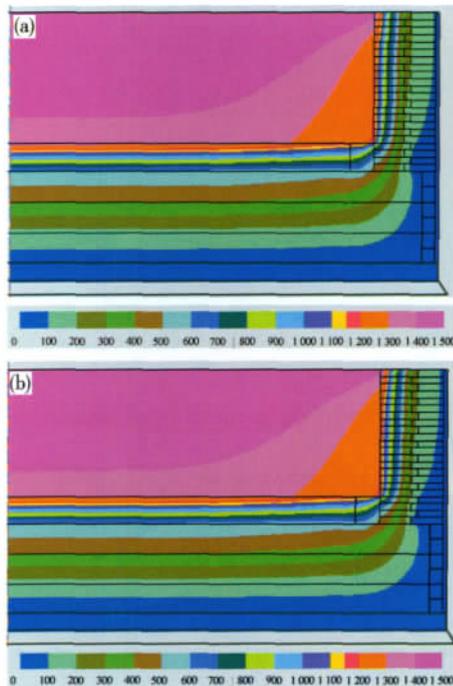


图 5 不同冷却方式下炉内温度分布. (a) 小水量、大温差(水温 30℃); (b) 大水量、小温差(水温 20℃)

Fig. 5 Temperature distributions by using different water cooling methods: (a) low water flow rate and large temperature difference, the cooling water temperature of 30℃; (b) high water flow rate and small temperature difference, the cooling water temperature of 20℃

从图 5 中看出,当冷却水温升高后,相同对流换热系数下,“大水量、小温差”的冷却方式由于水量大,温差变化较小,冷却水仍可以保持较低温度,冷却强度大.从图 5(b) 中可以看出,等温线向炉内移动,越在低温区越明显,蓝色区域有所扩大;而当水量小时,水温上升较多,炭砖高温部分扩大,见图 5(a),高温区各种侵蚀加剧,因此可能更容易损坏,这种现象随着侵蚀加剧即热流密度不断增大会越来越明显.同时,由于石墨砖的导热能力随着温度的升高而下降,当靠近炉壳部位的温度升高后,由于炭砖导热系数下降,炉缸热阻增加,热量不能及时导出,砖衬温度升高,更容易损坏.

从以上分析可以看出“小水量、大温差”在炉役初期是没有问题的,而且可以显著节约用水和动力消耗;但当侵蚀较严重后,就应该适当加大水量,以确保足够的冷却强度.一般而言,加大水量从而

增加水流速是最为有效办法,水速提高一方面可以提高冷却水与炉壳间的对流换热系数,另一方面可以使水温差控制在适当低的水平,进而使冷却水温降低.

当冷却水流量不足时,会造成水温差升高,以至水温升高,此时如使用工业水作为冷却介质,结垢的趋势增强,因热阻增加导致冷却能力下降;同时由上面不同冷却水温时的计算可知,在第三类边界条件下,冷却介质温度升高,会使炉内砖衬温度进一步升高,侵蚀加剧.为避免上述现象恶性循环,冷却水量应该根据实际侵蚀情况及时进行调整.

因此,在高炉实际生产过程中,应该加强对炉缸炉底侵蚀状态的实时监测,并及时调整炉缸炉底的冷却制度,以减缓砖衬的侵蚀,延长高炉寿命.

#### 4 结论

(1) 通过不增加冷却水流速和提高水速两种方法来增加冷却水量,对不同砖衬厚度和水流量条件下水温差变化的研究表明:在炉缸砖衬较厚时,不同冷却条件下水温差变化不大,随着砖衬的减薄,水温差逐渐增大,水量越小,水温差增速越大;当砖衬厚度减薄到一定程度时,由于有凝固层生成,热流密度增加的速度减慢,水温差的增速降低.

(2) 通过对炉缸不同冷却制度下的温度场计算表明:不同冷却制度下,在炉役初期区别不大;但当砖衬减薄后,由于冷却水量不同造成冷却水温差变化,进而会对炉内温度分布产生影响.水温升高,炉内高温区扩大,这种影响随着砖衬的减薄越发明.经验表明,当砖衬侵蚀到一定程度后,即使再好的冷却也无济于事,但采用“大水量、小温差”并加强冷却无疑可以减缓砖衬的侵蚀.

#### 参 考 文 献

- [1] Zhang S R, Yin H. Current situation and existing problems of blast furnace ironmaking in China. *Iron Steel*, 2007, 42(9): 1 (张寿荣, 银汉. 中国高炉炼铁的现状和存在的问题. 钢铁, 2007, 42(9): 1)
- [2] Zhang F M, Dang Y H. Present situation and development of long campaign life technologies of large BF in China. *Iron Steel*, 2004, 39(10): 75 (张福明, 党玉华. 我国大型高炉长寿技术发展现状. 钢铁, 2004, 39(10): 75)
- [3] Gritsishin K, Mudron Y. The refractory lining of blast furnaces and modernization of their cooling system. *Metallurgist*, 2006, 50(7/8): 351
- [4] Zhang S R, Yu Z J. Long Campaign Life Technologies of BF in

- WISCO. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009  
(张寿荣, 于仲洁. 武钢高炉长寿技术. 北京: 冶金工业出版社, 2009)
- [5] Jung J S, Sur Y K, Kim G Y. Estimation of hearth erosion state at blast furnace by numerical model. *Iron Steel*, 1999, 34( Suppl ): 119  
( Jung J S, Sur Y K, Kim G Y. 送风状态下以数模法估算炉缸侵蚀状态. 钢铁, 1999, 34( 增刊 ): 119)
- [6] Tjihuis G J. Evaluation of lining/cooling systems for blast furnace bosh and stack. *Iron Steel Eng*, 1996, 78( 3 ): 43
- [7] van Laar J, Tjihuis G J, Spreij M, et al. Blast furnace lining life: a quantitative analysis of lining/cooling systems. *I & SM*, 1994, 21( 12 ): 25
- [8] Han E Z, Wei H C, Liu L J, et al. Isotherm plot and thermal stress calculations for the “ceramic cup” hearth of blast furnace. *Iron Steel*, 1995, 30( 11 ): 7  
( 韩二中, 卫华成, 刘兰菊, 等. 高炉“陶瓷杯”炉缸等温线及热应力计算. 钢铁, 1995, 30( 11 ): 7)
- [9] Du G, Chen L. Two dimensional model of thermal conduction for the hearth and bottom of the blast furnace. *Refractories*, 1999, 33( 4 ): 216  
( 杜钢, 陈亮. 二维传热数模在高炉炉缸炉底结构设计中的应用. 耐火材料, 1999, 33( 4 ): 216)
- [10] Cheng S S, Yang T J, Zuo H B, et al. Design of lower shaft and hearth bottom for long campaign blast furnace. *J Iron Steel Res*, 2004, 16( 5 ): 10  
( 程树森, 杨天钧, 左海滨, 等. 高炉炉身下部及炉缸、炉底冷却系统的传热学计算. 钢铁研究学报, 2004, 16( 5 ): 10)