

火积理论在高炉冷却壁性能评价中的应用

徐 迅^{1,2}, 吴俐俊¹, 陆祖安¹

(1. 同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804; 2. 南通大学杏林学院, 江苏 南通 226000)

摘要: 基于火积理论分析得出了高炉冷却壁的火积平衡方程式以及冷却壁中的火积耗散, 在此基础上定义了高炉冷却壁的热阻。根据最小热阻原理, 提出用高炉冷却壁的热阻来评价其传热性能的优劣的观点, 通过实例说明了高炉冷却壁热阻的计算方法, 比较了不同冷却水管间距下冷却壁热面最高温度及热阻之间的关系。结果表明, 随着冷却水管间距的改变, 冷却壁热阻与热面最高温度有相同的变化趋势。在一定的边界条件下, 高炉冷却壁的热阻可以评价其传热性能的优劣。

关键词: 火积理论; 高炉冷却壁; 热阻; 性能评价

中图分类号: TF066

文献标志码: A

Application of Entransy Theory to the Performance Evaluation of Blast Furnace Stave

XU Xun^{1,2}, WU Lijun¹, LU Zu'an¹

(1. College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Nantong University Xinglin College, Nantong 226000, China)

Abstract: Based on entransy theory, the entransy balance equation and the entransy dissipation of blast furnace stave are obtained. On this basis, the thermal resistance of blast furnace stave is defined. According to the principle of minimum thermal resistance, thermal resistance is proposed to evaluate the heat transfer performance of blast furnace stave. The calculation method of the thermal resistance of blast furnace stave is illustrated with a practical problem. The relationship of maximum temperature of the stave hot face and thermal resistance with different cooling pipe space is compared. The results show that with the change of cooling pipe space, maximum temperature of the stave hot face and thermal resistance have the same trend. Under the certain boundary conditions, the heat transfer performance of blast furnace stave can be evaluated by the thermal resistance.

Key words: entransy theory; blast furnace stave; thermal resistance; performance evaluation

高炉冷却壁是安装在高炉内部的重要冷却设备, 其性能的好坏直接影响高炉炼铁的成本, 更关系到高炉炼铁的一代炉龄。目前对高炉冷却壁的研究仅从热面最高温度、最大热应力等单一指标对其性能进行评价, 具有很大的局限性, 评价结果不够全面^[1-5]。因此, 寻求一个能对高炉冷却壁性进行综合评价的指标具有重要意义。

近年来, 过增元等^[6]由导热与导电过程的比拟引入了代表热量传递能力的物理量“火积”, 其定义为物体热容量与温度乘积值的一半, 物理意义为物体所具有的热量传递的总能力; 火积的耗散反映传热不可逆性引起的热量传递能力损失, 火积耗散的大小可以用来评价传热过程的优劣^[7]。在导热优化中, 程新广等^[8]提出了火积耗散极值原理及最小热阻原理, 验证了导热过程的优化可归结为在一定的约束条件下使导热热阻最小。本文将火积和火积耗散的分析方法应用到高炉冷却壁中, 通过火积耗散定义了高炉冷却壁的热阻, 并根据最小热阻原理, 提出在一定的边界条件下, 用高炉冷却壁的热阻来评价其传热性能的优劣。

1 火积理论概述

火积(E_h)表征物体传递热量的能力的物理量^[6], 定义式为

$$E_h = \frac{1}{2} Q_{vh} T \quad (1)$$

式中: Q_{vh} 为物体的定容热容量, J; T 为物体温度, K。

收稿日期: 2014-12-10

基金项目: 国家自然科学基金(51574179); 江苏省高校自然科学研究面上项目(15KJB450002)

第一作者: 徐 迅(1983—), 男, 博士生, 主要研究方向为工程传热及余热利用。E-mail: xinshoux2@126.com

通讯作者: 吴俐俊(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为工程传热及余热利用。E-mail: ljwu@tongji.edu.cn

由此得到了单位时间单位体积内火积的耗散率 ϕ_h , 称为火积耗散函数^[6].

$$\phi_h = -\dot{q} \cdot \nabla T \quad (2)$$

式中: \dot{q} 为热流密度, $W \cdot m^{-2}$; ∇T 是温度梯度, $K \cdot m^{-1}$.

以一维稳态导热为例, 如图 1 所示, 图中, T_1 , T_2 为两侧温度. 输入厚度为 d 的平板与输出平板的热流密度相等, 即

$$\dot{q}_1 = \dot{q}_2 \quad (3)$$

但是由于传热过程中火积的耗散, 输入平板和从平板输出的火积则不等, 它们的关系为^[6]

$$\dot{q}_1 T_1 = \dot{q}_2 T_2 + \int_0^d \phi_h dx \quad (4)$$

式中: x 为沿平板厚度的方向. 该式就是一维稳态导热中的火积平衡方程, 其物理意义为输入火积等于输出火积和耗散火积之和.

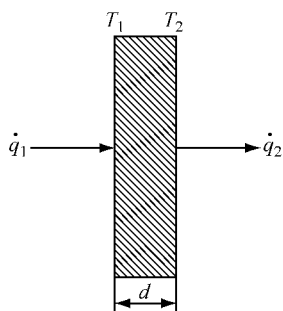


图 1 一维稳态导热示意

Fig.1 Diagram of one-dimensional steady heat transfer

对于三维问题, 整个体积中的火积耗散为

$$E_{h\phi} = \int_V \phi_h dV \quad (5)$$

式中: V 为物体的体积. 过增元等^[7]将火积耗散的概念用于导热问题的优化, 提出了导热过程优化的火积耗散极值原理.

基于火积耗散的概念, 过增元又根据热电比拟定义了多维导热问题中的当量热阻 R_h ^[6].

$$R_h = \frac{E_{h\phi}}{\dot{Q}_h^2} \quad (6)$$

式中: $E_{h\phi}$ 为火积耗散, $W \cdot K$; \dot{Q}_h 为边界上的总热流量, W . 即物体的热阻等于火积耗散除以热流量的平方.

建立了火积耗散和物体的当量热阻关系后, 火积耗散极值原理可归结为最小热阻原理^[8]. 它的表述为: “对于具有一定约束条件的导热问题, 如果物体的当量热阻最小, 则物体的导热性能最好.”

2 高炉冷却壁的当量热阻

高炉冷却壁可视为三维稳态导热, 其示意图如图 2 所示.

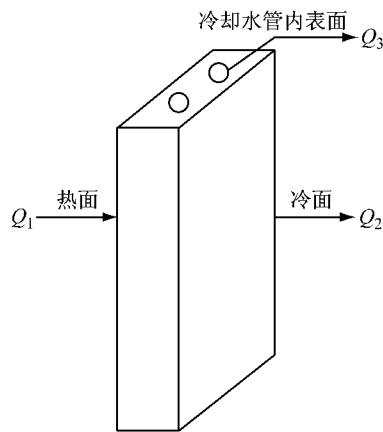


图 2 高炉冷却壁三维示意

Fig.2 Three-dimensional graph of blast furnace stave

从热面输入的热流为

$$\dot{Q}_1 = \int_s \dot{q}_1 dA_1 \quad (7)$$

式中: \dot{q}_1 为热面面元上的热流密度, $W \cdot m^{-2}$; A_1 为热面面积, m^2 .

从冷面输出的热流为

$$\dot{Q}_2 = \int_s \dot{q}_2 dA_2 \quad (8)$$

式中: \dot{q}_2 为冷面面元上的热流密度, $W \cdot m^{-2}$; A_2 为冷面面积, m^2 .

从冷却水管内表面输出的热流为

$$\dot{Q}_3 = \int_s \dot{q}_3 dA_3 \quad (9)$$

式中: \dot{q}_3 为水管内表面面元上的热流密度, $W \cdot m^{-2}$; A_3 为水管内表面面积, m^2 .

从热面输入热流应等于从冷面和从水管内表面输出热流之和, 关系式为

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 + \dot{Q}_3 \quad (10)$$

但由于传热过程中火积的耗散, 输入和输出高炉冷却壁的火积则不等, 关系式为

$$\dot{E}_{h1} = \dot{E}_{h2} + \dot{E}_{h3} + E_{h\phi} \quad (11)$$

式中: \dot{E}_{h1} 为从热面输入的火积, $W \cdot K$, $\dot{E}_{h1} = \int_s \dot{q}_1 T_1 dA_1$; \dot{E}_{h2} 为从冷面输出的火积, $W \cdot K$, $\dot{E}_{h2} = \int_s \dot{q}_2 T_2 dA_2$; \dot{E}_{h3} 为从水管内表面输出的火积, $W \cdot K$, $\dot{E}_{h3} = \int_s \dot{q}_3 T_3 dA_3$; $E_{h\phi}$ 为冷却壁中的火积耗散,

W·K. 该式就是高炉冷却壁三维稳态导热中的火积平衡方程,其物理意义为输入火积等于输出火积和耗散火积之和。

高炉冷却壁的热阻等于火积耗散除以热流量的平方。

$$R_h = \frac{E_{hf}}{\dot{Q}_h^2} = \frac{E_{hf}}{\dot{Q}_1^2} \quad (12)$$

根据最小热阻原理,高炉冷却壁性能的优化就可归结为在一定的边界条件下使其热阻最小。因此,在一定的边界条件下,高炉冷却壁的热阻可以用来评价其传热性能的优劣。

3 高炉冷却壁热阻计算实例

选取马钢高炉实验用冷却壁作为研究对象,冷却壁厚 0.2 m,宽为 0.6 m,高为 1.0 m,水管半径为 0.05 m,水速为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

冷却壁各材料热物性参数如表 1 所示。

表 1 冷却壁材料性能参数

Tab.1 The performance parameters of blast furnace stove's material

材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	导热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	定压比热容/ ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)
铸钢	7 800	52	486

高炉冷却壁的稳态传热可视为导热问题,其三维稳态导热微分方程为

$$\frac{\partial}{\partial x}(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda \frac{\partial T}{\partial z}) = 0 \quad (13)$$

式中: $\lambda(T)$ 表示温度为 T 时的导热系数, $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$; x, y, z 分别为沿冷却壁厚度、宽度、高度的方向。

冷面与周围空气的热交换为第三类边界条件,取冷面与周围空气间的自然换热系数为 $11 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ [9],空气温度取 30°C 。冷却水与冷却壁之间的热交换为第三类边界条件,冷却水温为 40°C 。经计算判断为管内湍流强制对流换热,冷却水管内表面与水的对流换热热阻计算得出换热系数 h_{wb} 为[10]:

$$h_{wb} = 0.023 v^{0.8} \lambda_w P_r^{0.4} / (d_1 v^{0.8}) \quad (14)$$

式中: v 为冷却水管内水流流速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; λ_w, v, P_r 均为冷却水管内水温为 30°C 时水的物性参数; d_1 为冷却水管当量直径, m 。

高炉煤气与冷却壁热面之间存在着较为复杂的热交换,即有对流和辐射 2 种形式的热量交换。炉气与冷却壁热面间的复合对流换热系数取 $232 \text{ W} \cdot$

$\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ [9]。实验室炉气温度取 400°C 。

采用有限元通用软件 ANSYS 对高炉冷却壁三维传热模型进行计算。在对冷却壁进行网格划分时,将冷却壁的热面、冷面和冷却水管内表面分别划分为面积相等的网格,这是为了在计算这 3 个面的火积流时每个节点具有相同的权重。通过 ANSYS 软件计算得到冷却壁温度场。

假设热面上共有 n 个节点,热面上的火积流计算式为

$$\dot{E}_{h1} = \frac{\sum_{i=1}^n \dot{q}_i T_i}{n} A_1 \quad (15)$$

式中: \dot{q}_i 为热面各节点的热流密度, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$; T_i 为热面各节点温度, K 。

冷面上的火积流计算式为

$$\dot{E}_{h2} = \frac{\sum_{j=1}^m \dot{q}_j T_j}{m} A_2 \quad (16)$$

式中: m 为冷面上的节点数; \dot{q}_j 为冷面各节点的热流密度, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$; T_j 为冷面各节点温度, K 。

冷却水管内表面上的火积流计算式为

$$\dot{E}_{h3} = \frac{\sum_{k=1}^l \dot{q}_k T_k}{l} A_3 \quad (17)$$

式中: l 为水管内表面上的节点数; \dot{q}_k 为水管内表面各节点的热流密度, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$; T_k 为水管内表面各节点温度, K 。

将各节点温度代入式(15)至(17)计算,可得到 $\dot{E}_{h1}, \dot{E}_{h2}, \dot{E}_{h3}$,代入式(11)、式(12)计算,可得高炉冷却壁的热阻 R_h 。

4 不同冷却水管间距下高炉冷却壁热阻分析

仍选取上述马钢高炉实验用冷却壁作为研究对象。在冷却壁整体尺寸限定的前提下,设计恰当的水管间距是优化冷却壁性能的关键。冷却壁物性参数和边界条件保持不变,选取不同的冷却水管间距,计算冷却壁热面最高温度及热阻,结果如表 2 所示。

热阻与热面最高温度的关系见图 3,可以看出:随冷却水管间距的改变,热面最高温度的变化与热阻的变化具有相同的趋势。在冷却水管间距为 0.3 m 时,热面最高温度和热阻均最小,表明冷却壁的传热性能达到最佳。由此可见,在一定的边界条件下,高炉冷却壁的热阻可以评价其传热性能的优劣。

表 2 不同冷却水管间距下的热面最高温度及热阻

Tab.2 Maximum temperature of the stove hot face and thermal resistance under the different cooling channel interval

冷却水管 间距/m	热面最高 温度/K	热阻/ (K · W ⁻¹)
0.20	479	0.002 98
0.25	466	0.002 92
0.30	454	0.002 87
0.35	466	0.002 92

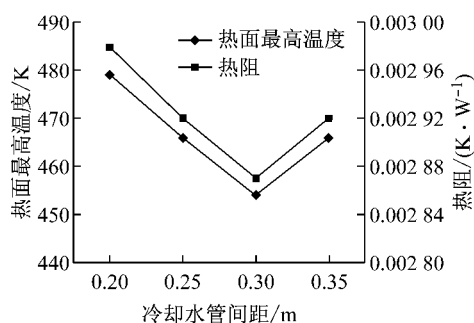


图 3 热面最高温度与热阻的关系

Fig.3 The relationship of maximum temperature of the stove hot face and thermal resistance

5 结语

将火积理论应用到高炉冷却壁的性能评价中,得到如下结论:

(1)基于火积理论分析得出了高炉冷却壁的火积平衡方程式以及冷却壁中的火积耗散,并在此基础上定义了高炉冷却壁的热阻。

(2)根据最小热阻原理,可知高炉冷却壁性能的优化就可归结为在一定的边界条件下使其热阻最小的问题,得出高炉冷却壁热阻可以作为评价其传热性能的指标。

(3)通过实例说明了高炉冷却壁热阻的计算方法,计算结果表明,随冷却水管间距的改变,冷却壁热面最高温度与热阻具有相同的变化趋势,证明了在一定的边界条件下高炉冷却壁的热阻可以评价其传热性能的优劣。

参考文献:

[1] 程素森,薛庆国,苍大强,等.高炉冷却壁的传热学分析[J].钢

铁,1999,34(5):11.

CHENG Susen, XUE Qingguo, CANG Daqiang, *et al.* Heat transfer analysis of blast furnace stove[J]. Iron and Steel, 1999,34(5):11

[2] 钱中,程惠尔,吴俐俊.基于热态实验的冷却壁传热分析[J].钢铁研究学报,2006,18(5):10.

QIAN Zhong, CHENG Huier, WU Lijun. Heat transfer analysis of cooling stove based on thermal state experiment [J]. Research on Iron and Steel,2006,18(5):10.

[3] 李静,吴俐俊,周伟国.高炉铸钢冷却壁冷却水管的优化研究[J].钢铁研究,2009,37(1):12.

LI Jing, WU Lijun, ZHOU Weiguo. Structure optimization of water cooling channel of cast steel stove[J]. Research on Iron & Steel,2009,37(1):12.

[4] XUE Qingguo, YANG Weiguo, CHENG Susen, *et al.* Designing for long campaign life blast furnace (2)—The simulation of temperature field of lining and cooling apparatus[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2000,7(1):30.

[5] WU Lijun, ZHOU Weiguo, SU Yunlong, *et al.* Heat transfer analysis of blast furnace stove[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2008,51(11-12):2824.

[6] 过增元,梁新刚,朱宏晔.火积——描述物体传递热量能力的物理量[J].自然科学进展,2006,16(10):1288.

GUO Zengyuan, LIANG Xingang, ZHU Hongye. Entransy——A physical quantity to describe the heat transfer ability of an object[J]. Progress in Natural Science,2006,16(10):1288.

[7] 过增元,程新广,夏再忠.最小热量传递势容耗散原理及其在导热优化中的应用[J].科学通报,2003,48(1):21.

GUO Zengyuan, CHENG Xinguang, XIA Zaizhong. Principle of potential capacity dissipation minimization and its application in the heat conduction optimization[J]. Chinese Science Bulletin, 2003,48(1):21.

[8] 程新广,孟继安,过增元.导热优化中的最小传递势容耗散与最小熵产[J].工程热物理学报,2005,26(6):1034.

CHENG Xinguang, MENG Ji'an, GUO Zengyuan. Potential capacity dissipation minimization and entropy generation minimization in heat conduction optimization [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005,26(6):1034.

[9] 邓凯,吴俐俊,程惠尔,等.结构参数对高炉铸钢冷却壁温度及热应力分布的影响[J].钢铁钒钛,2004,25(4):53.

DENG Kai, WU Lijun, CHENG Huier, *et al.* Influence of structure parameters on steady highest temperature and thermal stress of BF Cooling Stave[J]. Iron Steel Vanadium Titanium,2004,25(4):53.

[10] Wu LJ, Xu X, Zhou W G, *et al.* Heat transfer analysis of blast furnace stove [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2008,51(11-12):2824.