

# 凸起黑体辐射元件对锻压炉炉膛辐射换热的影响

支静涛<sup>1</sup>, 刘浩<sup>2</sup>, 苏贤伟<sup>1</sup>, 杨宏旻<sup>1</sup>

(1. 南京师范大学能源与机械工程学院, 江苏 南京 210042)

(2. 中国城市建设研究院有限公司, 北京 100120)

**[摘要]** 开展了利用黑体凸起结构强化钢厂热锻压炉炉膛辐射传热的数值研究. 采用 Gambit 软件设计出模拟炉膛段, 利用 Fluent 软件对炉膛段内辐射传热过程进行了耦合数值模拟, 获得了炉膛内烟气的流场、温度场以及锻钢表面辐射热流密度. 分析了炉壁表面黑度以及不同凸起结构对辐射传热效果的影响规律. 结果表明, 提高炉膛内壁黑度以及加装凸起辐射元件对炉膛内辐射传热有显著的强化作用. 通过 Gambit 模拟改变辐射元件的尺寸、形状, 得到最佳的安装方案可以提高炉膛内烟气 15% 的辐射传热效率.

**[关键词]** 黑度, 辐射换热, 数值模拟, 凸起辐射元件, 辐射热流密度

**[中图分类号]** TK01+8 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2016)01-0048-05

## The Effects of Raised Radiation Elements on Radiation Heat Transfer in Forging Furnace

Zhi Jingtao<sup>1</sup>, Liu Hao<sup>2</sup>, Su Xianwei<sup>1</sup>, Yang Hongmin<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210000, China)

(2. China Urban Construction Design & Research Institute Co. Ltd., Beijing 100120, China)

**Abstract:** This paper carries out numerical study on the enhancement of radiation heat transfer in forging furnace by raised radiation elements. The simulated furnace is designed by Gambit. The coupled heat transfer process in the furnace is numerically simulated by Fluent, from which details information of the flue gas temperature field and the radiation heat flux density in the furnace are obtained. The effects of furnace wall emissivity and different shapes of raised radiation elements on radiation heat transfer in forging furnace are analyzed. The results show that, the radiation heat transfer efficiency can be enhanced by increasing the furnace wall emissivity and installing raised radiation elements with high emissivity. By changing the size and shapes of the radiation elements, 15% increase of radiation heat transfer efficiency can be achieved.

**Key words:** emissivity, radiation heat transfer, numerical simulation, raised radiation element, radiation heat flux density

长久以来, 钢铁工业一直是一个高能耗、高污染的产业. 同时, 它也是节能潜力最大的行业之一. 伴随着经济的发展, 钢材需求量的递增, 钢铁产业面临着越来越严峻的节能减排压力. 近年来, 中国钢铁工业节能减排工作虽然取得了一些成绩, 但在提高二次能源回收利用水平方面还有待进一步提高. 提高加热炉的余热利用是节能减排的一项重要举措. 利用高温烟气的余热对钢材进行加热, 可以有效回收余热, 节约能源. 在加热通道中, 由于烟气温度较高, 辐射传热成为这一阶段最主要的传热方式, 其传热量占到总传热量的 80% 以上. 因此, 强化这一阶段的辐射传热对于烟气余热回收具有重要意义.

用 Fluent 数值模拟的方法对锻压炉炉膛内辐射换热进行模拟计算, 可以为实际工业过程提供理论依据. 张志诚等<sup>[1]</sup>人利用 Fluent 模拟计算, 得出乙烯裂解炉炉膛内烟气的流场、燃料燃烧和烟气温度场. 进而得到了在保持燃料量不变的情况下, 通过安装热辐射元件强化炉壁的辐射传热, 可以显著提高炉膛烟气的平均温度和传热效率; 在保持炉管内介质吸热量不变的条件下, 强化炉壁的辐射传热后可以减少 10% 的燃料量的结果. Detemmerman 等<sup>[2]</sup>以及 Heynderickx 等<sup>[3]</sup>, 利用 Fluent 和 CFD 方法对炉膛辐射传热

收稿日期: 2015-12-09.

通讯联系人: 杨宏旻, 教授, 研究方向: 燃烧与污染物控制理论与技术, E-mail: yanghongmin@njnu.edu.cn

行过深入研究并得到了炉膛和炉管内详细的浓度场、速度场和温度场的分布。蓝兴英等<sup>[4]</sup>、胡桂华等<sup>[5-6]</sup>,都曾用 CFD 方法对炉膛辐射传热进行过深入研究并得到了炉膛和炉管内详细的浓度场、速度场和温度场的分布。

本文在已有研究基础上,进行了以下几方面的工作:一是利用 Gambit 设计出模拟锻压炉炉膛段以及安装好的凸起黑体辐射元件;二是通过 Fluent 模拟炉膛中辐射传热情况;三是对计算结果进行分析,得出烟道内壁黑度以及加装凸起黑体辐射元件对于锻压炉炉膛内内辐射传热的影响,为实际钢厂中锻压炉炉膛的节能改造提供理论依据。

## 1 模拟对象及工况

用 Gambit 设计出长 2 m、宽 1 m、高 0.5 m 的模拟锻压炉炉膛段。辐射元件简化为烟道上表面几个凸起的立体结构,形状设计分别为立方体、圆柱体、半球型。其中,每种形状的辐射元件再分类为中间打孔和不打孔两种。所用材料在 Fluent 中自定义设置为  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 。以立方体辐射元件为例,如图 1 所示,在 2 m 长、1 m 宽的上表面上共布置了 21 个立方体辐射元件,各形状辐射元件具体参数如表 1 所示。右面为炉膛进口,高温烟气从此进入炉膛段。左面为烟气出口。下表面设置材料属性为钢,用来模拟实际过程中被加热的钢板。其余各面设置为绝热表面。利用 Gambit 对烟道进行网格划分,对辐射元件进行加密处理。得到的总网格数量约为 30 万个。

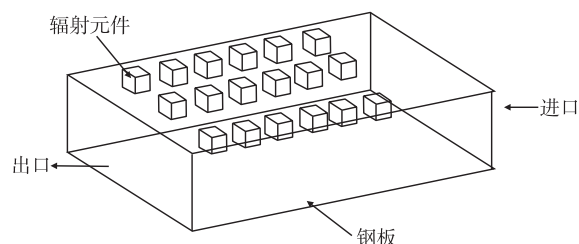


图1 安装立方体辐射元件的锻压炉炉膛几何模型

Fig.1 The geometrical model of forging furnace with cubical raised radiating elements

表1 辐射元件尺寸参数

Table 1 The dimensions of the radiating element

	长/m	宽/m	高/cm	半径/cm
立方体	15	15	15	—
圆柱体	—	—	15	7.5
半球体	—	—	—	7.5

## 2 数学模型

### 2.1 湍流模型

因湍流效应对辐射传热有一定的影响,故本文采用标准  $k-\varepsilon$  双方程模型<sup>[7]</sup>,其表达形式为:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j \phi)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S_\phi, \quad (1)$$

式中,  $\phi$  为广义因变量;  $\rho$  为气体密度;  $\Gamma_\phi$  为广义扩散系数;  $S_\phi$  为广义源项,  $j=1, 2, 3$ 。

### 2.2 辐射模型

在炉膛中,因壁面温度和烟气温度都很高,故辐射传热在这一区域在主导地位。选择合适的辐射模型对于本例中的数值模拟分析尤为重要。Fluent 中主要有五种辐射模型: DTRM 模型、P1 模型、Rosseland 模型、DO 模型、S2S 模型<sup>[8]</sup>。本文选择 DO 模型是因为其基本能满足所有光学深度区间的辐射问题的求解,且内存和计算机开销都适中<sup>[9]</sup>。在直角坐标系下,辐射传递方程可以写为以下形式:

$$\mu \frac{\partial I}{\partial x} + \xi \frac{\partial I}{\partial y} + \eta \frac{\partial I}{\partial z} = -(k_a + k_s)I + k_a I_b + \frac{k_s}{4\pi} \int_{4\pi} \phi(\Omega, \Omega') I d\Omega', \quad (2)$$

其中,  $k_a$  和  $k_s$  分别为介质的吸收系数和散射系数;  $I$  和  $I_b$  分别为辐射强度和黑体辐射强度。

## 3 边界条件

为方便计算,本次模拟采用的烟气统一为氮气。设炉膛右面为速度入口(velocity inlet),设进口烟气温度为 1 473 K,进口流速为 1 m/s,气体吸收率为 0.33。设置炉膛左面为出口,采用自由出口边界条件(outflow)。

内壁面除下表面外统一设置为不可渗透、无滑移绝热边界条件. 给定壁面温度 1 423 K, 黑度分别设置为 0.2、0.5、0.96 来研究不同黑度的炉膛内壁对炉膛内辐射换热的影响. 下表面设置为换热壁面来模拟加热钢板, 黑度设置为 0.28. 通过 Fluent 计算出通过底面钢板的辐射热流密度大小, 以此来判断不同情况下炉膛中辐射传热的强弱. 显然, 辐射热流密度越大, 辐射传热效果就越好.

加装的辐射元件所用材料为  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 形状及尺寸已在上文中给出. 其壁面黑度均设置为 0.96, 表面温度给定为 1373 K. 在这三种形状的基础上, 对辐射元件进行打孔处理又可以得到三种不同的工况(壁面黑度及温度保持不变).

4 计算结果分析

用 Fluent 模拟计算结果如表 2 所示, 其中第四、五列分别为经过最底面钢板的辐射热流密度、总热流密度. 将第四列数据用柱状图表示, 如图 2 所示. 可以清楚地看到随着改变墙壁黑度以及辐射元件的安装情况, 辐射传热效率随之改变.

表 2 各工况模拟计算结果  
Table 2 Calculation results

	进口温度/K	出口温度/K	辐射热流密度/(W/m <sup>2</sup> )	总热流密度/(W/m <sup>2</sup> )
1. 不安装辐射元件(0.2)	1 473	1 378	41 958	47 127
2. 不安装辐射元件(0.5)	1 473	1 365	42 823	47 996
3. 不安装辐射元件(0.96)	1 473	1 353	43 535	48 311
4. 安装立方体辐射元件(不打孔)	1 473	1 345	46 409	52 397
5. 安装半球形辐射元件(不打孔)	1 473	1 347	44 820	50 600
6. 安装圆柱体辐射元件(不打孔)	1 473	1 350	45 795	51 266
7. 安装立方体辐射元件(打孔)	1 473	1 340	48 243	53 969
8. 安装半球形辐射元件(打孔)	1 473	1 346	47 350	52 827
9. 安装圆柱体辐射元件(打孔)	1 473	1 351	48 066	53 687

观察图 2, X 轴上 1 到 9 分别对应表 2 中的 9 种工况. 观察工况 1 到 3, 可以发现, 在不额外安装辐射元件的情况下, 随着烟道内墙壁黑度的增加(从 0.2 到 0.5 到 0.96), 通过下表面钢材的辐射热流密度及总热流密度呈现出增大的趋势. 即烟道内墙壁黑度越高, 辐射效率也就越高. 若将墙壁黑度 0.96 作为不变量, 观察工况 4 到 6, 发现安装辐射元件后(此时墙壁黑度保持为 0.96), 其辐射热流密度以及总热流密度均有明显增大的趋势. 其中立方体(工况 4)结构辐射元件与圆柱体结构辐射元件效果较好, 半球形结构辐射元件(工况 5)效果略差. 此时, 再对工况 4 到 6 中的辐射元件进行打孔处理, 得到工况 7 到 9. 可以发现, 在辐射元件进行打孔处理后, 辐射热流密度和总热流密度又有显著增加. 同样地, 立方体(工况 7)和圆柱体结构(工况 9)的效果仍然好于半球形结构(工况 8).

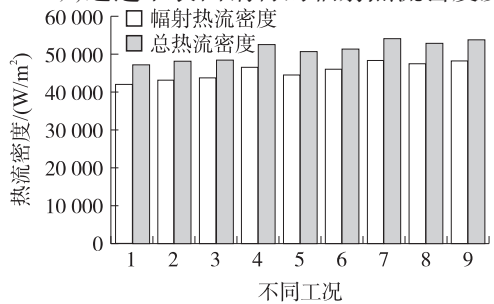


图 2 不同工况下通过钢板的辐射热流密度和总热流密度

Fig.2 The radiant heat flux and total heat flux through the steel plate in different working conditions

很显然, 增加墙体黑度对于炉膛内辐射传热具有一定的增强作用. 而在保持墙体高黑度的情况下, 另外安装辐射元件, 可以进一步的提高烟气辐射传热效率. 因为辐射元件的安装使原来光滑的壁面变成了凹凸不平的壁面, 从而增加了辐射面积<sup>[10]</sup>. 根据 Stefan-Boltzmann 定律, 炉膛壁面和钢板之间的辐射传热量可以表示为以下形式:

$$\phi = \sigma(\varepsilon_1 A_1 T_1^4 - \varepsilon_2 A_2 T_2^4), \tag{3}$$

式中,  $\phi$  为辐射热流量;  $\sigma$  为黑体辐射常数, 其值为  $5.67 \times 10^{-8}$ ;  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$  分别为炉壁和管壁的辐射率;  $A_1$ 、 $A_2$  分别为炉壁和管壁的表面积;  $T_1$ 、 $T_2$  分别为炉壁和管壁的热力学温度. 故当  $\varepsilon_1$  和  $A_1$  增大时, 辐射换热量会有显著增加. 因立方体结构的辐射元件增加的辐射面积较大, 故其对辐射换热的强化效果也最好. 在辐射

元件上打孔后,辐射热流密度又进一步增大<sup>[11]</sup>.这是因为打孔后,辐射元件的表面积进一步增大,随之辐射面积也进一步增大了<sup>[12]</sup>.同时,打孔处理又对辐射热流的传递起到了一个向着正下方的导向性作用<sup>[13]</sup>.

进一步分析计算所得数据,得出辐射传热效率增量.以墙体黑度为 0.2 并且不安装任何辐射元件的工况 1 作为比较的标准,通过计算得出了表 3 的结果.表中的 1 到 9 分别对应上文中提到的 9 中工况.可见,通过增加墙壁黑度,并且安装辐射元件以增加辐射面积从而提高锻压炉炉膛内辐射传热效率的方案是可行的.其中,辐射元件的形状最好选用立方体或圆柱体,并且对其进行打孔处理,这样能使其辐射传热效率的增加最高达到约 15%<sup>[14]</sup>.

表3 辐射传热效率增加量

Table 3 The improvement of radiation heat transfer efficiency

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
辐射传热效率增量	0	2.06%	3.76%	10.61%	6.82%	9.14%	14.98%	12.85%	14.56%

## 5 结论

(1)模拟结果表明,增加锻压炉炉膛内壁的黑度可以有效强化其辐射换热效率.因此选用高发射率的涂料对炉膛内壁进行加工可以起到节能减排的作用.

(2)安装凸起黑体辐射元件可以有效增加炉膛内壁的辐射面积,从而达到增加辐射换热效率的结果.且选用立方体或圆柱体结构的辐射元件效果最好,因为其能最大程度的增加辐射面积.

(3)在辐射元件内部打孔,增大了辐射元件的辐射面积,同时对辐射热流具有导向作用,可以更大程度地提高烟道内辐射换热效率.因此,选用高发射率的涂料加工烟道内壁,并安装打孔立方体辐射元件,对于钢铁厂的节能减排具有重要的意义.

## [参考文献](References)

- [1] 张志诚. 强化辐射对工业炉内传热过程影响的耦合模拟[J]. 工程力学, 2015, 32(1): 218-225.  
ZHANG Z C. Coupled simulation about the effect of enhanced radiation on heat transfer process in industrial furnace [J]. Engineering mechanics, 2015, 32(1): 218-225. (in Chinese)
- [2] DETEMMERMAN T, FROMENT G F. Three dimensional coupled simulation of furnaces and reactor tubes for the thermal cracking of hydrocarbons[J]. Oil & gas science and technology, 1998, 53(2): 181-194.
- [3] HEYNDERICKX G J, OPRINS A J M, MARIN G B, et al. Three-dimensional flow patterns in cracking furnaces with long-flame burners[J]. Aiche journal, 2001, 47(2): 388-400.
- [4] 蓝兴英, 高金森, 徐春明. 乙烯裂解炉内传递和反应过程综合数值模拟研究[J]. 石油学报(石油加工), 2004, 20(1): 46-51.  
LAN X Y, GAO J S, XU C M. Numerical simulation of translation and reaction process in ethylene pyrolyzer [J]. Acta petrolei sinica (petroleum processing section), 2004, 20(1): 46-51. (in Chinese)
- [5] HU G H, WANG H G, QIAN F. Numerical simulation on flow, combustion and heat transfer of ethylene cracking furnaces[J]. Chemical engineering science, 2011, 66(8): 1 600-1 611.
- [6] HU G H, WANG H G, QIAN F. Coupled simulation of an industrial naphtha cracking furnace equipped with long-flame and radiation burners[J]. Computers and chemical engineering, 2012, 38(1): 24-34.
- [7] 韩小良. 炉壁黑度对炉膛辐射换热影响的研究[J]. 全国性建材科技期刊, 2000, 6: 108-110.  
HAN X L. Effect of furnace wall emissivity on radiation heat transfer in furnace [J]. Journal of national building science and technology, 2000, 6: 108-110. (in Chinese)
- [8] 姜晓光, 聂宇宏, 谢凯弘. 基于 Fluent 的柴油机缸内辐射换热分析[J]. 科学技术与工程, 2008, 8(15): 46-51.  
JIANG X G, NIE Y H, XIE K H. Diesel engine cylinder internal radiation heat transfer analysis based on fluent [J]. Science technology and engineering, 2008, 8(15): 46-51. (in Chinese)
- [9] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 1-15.  
TAO W Q. Numerical heat transfer [M]. 2nd ed. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001: 1-15. (in Chinese)
- [10] 夏德宏, 吴永红, 高庆昌. 高发射率涂料在加热炉中的节能机理与应用[J]. 冶金能源, 2002, 21(6): 213-216.

- XIA D H, WU Y H, GAO Q C. Energy saving with the application of high emissive coating in reheating furnace[J]. Energy for metallurgical industry, 2002, 21(6):213-216.(in Chinese)
- [11] LAI Y G, PRZEKWAŚ A J, SUN R L T. Three-dimensional computation of the scavenging flow process in a motored two-stroke engine[J]. SAE international, 2003(3):78-80.
- [12] 王松汉. 乙烯装置技术与运行[M]. 北京:中国石化出版社, 2009:228-229.  
WANG S H. Ethylene plant technology and operations[M]. Beijing:China Petrochemical Press, 2009:228-229.(in Chinese)
- [13] 王艳云,李志安,刘红禹. FLUENT 软件对管壳式换热器壳程流体数值模拟方法可行性的验证[J]. 管道技术与设备, 2007, 6:334-336.  
WANG Y Y, LI Z A, LIU H Y. Confirmation of the feasibility of fluent software applied to the shell side fluid numerical simulation of the shell and tube heat exchanger[J]. Pipeline technique and equipment, 2007, 6:334-336.(in Chinese)
- [14] SHA W T, YANG C I, KAO T T, et al. Multidimensional numerical modeling of heat exchanger[J]. Journal of heat transfer, 1982, 104:417-425.

[责任编辑:陈 庆]