

# 大型燃煤锅炉内辐射熵产及辐射焓试验研究

李 智, 张仲依, 娄 春

(华中科技大学 煤燃烧国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘 要:** 为了研究燃煤炉膛内辐射传热效率, 达到节约能源, 降低污染物排放的目的, 提出一种大型炉膛内辐射熵产及辐射焓的试验测量方法, 并应用于一台 200 MW 发电机组的 670 t/h 燃煤锅炉上。通过在锅炉上安装 CCD 相机获取炉内辐射图像, 基于辐射反问题求解方法重建炉膛底部、燃烧器区域及炉膛出口 3 个截面的炉内温度分布及辐射特性, 进而获得炉内煤粉燃烧介质和水冷壁的辐射熵产、辐射熵产数及辐射焓, 并分析了炉内温度分布的均匀性及壁面辐射热流对燃煤锅炉内辐射熵产和辐射焓的影响。结果表明, 随着燃煤锅炉内温度分布均方差增大, 煤粉燃烧介质吸收、发射及散射过程的不可逆性增大, 辐射传热效率越低, 燃烧介质产生的辐射熵产从 419 W/K 增至 629 W/K, 辐射熵产数从 0.048 增至 0.067; 随着水冷壁面热流增大, 水冷壁面辐射传热过程的不可逆性增大, 辐射传热效率降低, 水冷壁产生的辐射熵产从 1.566 kW/K 增至 4.575 kW/K, 辐射熵产数从 0.258 增大至 0.346; 在燃煤锅炉的燃烧器区域, 由于燃烧温度相对最高, 其辐射换热过程相对最剧烈, 有用功相对最多, 因而辐射焓相对最大; 而对于温度相对最低的炉膛出口区域, 其辐射换热过程相对最弱, 有用功相对最少, 因而辐射焓相对最小。由此可见, 对于实际炉膛而言, 提高炉膛内温度场的均匀性, 尤其是提高炉膛燃烧器区域内温度场的均匀性, 对于提高燃煤炉膛辐射传热效率具有重要的意义。

**关键词:** 燃煤锅炉; 辐射熵产; 辐射焓; 温度分布; 辐射特性

中图分类号: TK31

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2019)03-0088-06

## Experimental investigation on radiative entropy generation and radiative exergy in a large coal-fired boiler

LI Zhi, ZHANG Zhongnong, LOU Chun

(State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In order to study the efficiency of radiative heat transfer in the coal-fired furnace, and achieve the aim of saving energy and reducing pollutant emissions, this paper presented an experimental measurement method for radiation entropy generation and radiation exergy in large-scale furnaces. The method was applied in a 670 t/h coal-fired boiler of a 200 MW generator unit. The radiative images in the furnace were captured by CCD cameras installed on the boiler. The temperature distributions and radiative properties in three sections of the furnace were reconstructed by the solution of inverse radiation problem. And then, experimental results of radiative entropy generation, dimensionless radiative entropy generation, and radiative exergy of pulverized coal combustion medium and water cooling wall in the furnace were obtained. The effects of standard deviation of temperature distribution in furnace and radiative heat flux of wall on radiative entropy generation and radiative exergy were analyzed. The results show that with the increase of standard deviation of temperature distribution in coal-fired boilers, the irreversibility of absorption, emission and scattering process of pulverized coal combustion medium increase gradually, and the radiation heat transfer efficiency decreases gradually, and generated by combustion medium, the radiative entropy generation increases from 419 W/K to 629 W/K and the dimensionless radiative entropy generation increases from 0.048 to 0.067. With the increase of heat flow on water-cooled wall, the irreversibility of radiation heat transfer process on water-cooled wall increases gradually, and the radiative heat transfer efficiency decreases gradually, so the radiative entropy generation generated by the water cooling wall increases from

收稿日期: 2019-04-22; 责任编辑: 张晓宁 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.19042201

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51827808)

作者简介: 李 智(1996—), 男, 广西南宁人, 硕士研究生, 从事燃烧辐射熵产研究。E-mail: 941274708@qq.com。通讯作者: 娄 春(1977—), 男, 重庆人, 教授, 博士, 从事燃烧测量与辐射传热研究。E-mail: Lou\_chun@sina.com

引用格式: 李智, 张仲依, 娄春. 大型燃煤锅炉内辐射熵产及辐射焓试验研究[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(3): 88-93.

LI Zhi, ZHANG Zhongnong, LOU Chun. Experimental investigation on radiative entropy generation and radiative exergy in a large coal-fired boiler[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(3): 88-93.



移动阅读

1.566 kW/K to 4.575 kW/K and the dimensionless radiative entropy generation increases from 0.258 to 0.346. In the burner area of the furnace, due to the relatively highest combustion temperature, the radiation heat exchange process is the most intense, leading to the most available work, so the radiative exergy is the largest. In the furnace exit area where the temperature is relatively lowest, the radiation heat transfer process is relatively weakest, and the available work is relatively least, so the radiation exergy is relatively minimal. It can be seen that for the practical furnace, improving the uniformity of the temperature field in the furnace, especially increasing the uniformity of the temperature field in the furnace burner region, is of great significance for improving the radiation heat transfer efficiency of the coal-fired furnace.

**Key words:** coal-fired boiler; radiative entropy generation; radiative exergy; temperature distribution; radiative properties

## 0 引言

大型燃煤锅炉内的主要换热形式是辐射换热,提高辐射换热效率对于节约燃料、降低污染物排放具有重要意义。热力学第二定律是一种有效的分析传热效率方法,被用于研究燃烧系统中的能量转换与传热过程<sup>[1]</sup>。辐射熵和辐射焓是利用热力学第二定律分析高温燃烧系统中辐射换热效率的2个重要参数,辐射熵是描述辐射传热过程不可逆性的大小,辐射焓则表征了辐射传热过程中有用功的多少。在传热研究领域,Caldas等<sup>[2]</sup>提出了非灰参与介质内辐射熵产生的数值计算方法,该方法在已知介质温度及辐射特性(吸收系数、散射系数)的条件下可采用辐射传递方程求解方法计算出介质的辐射熵产;Liu等<sup>[3]</sup>完善了该方法并给出了被不透明固体壁面包围的半透明介质内的辐射熵产计算公式;Zhang等<sup>[4]</sup>研究了2个平行板间充满温度分布不均匀的参与介质的辐射熵产。此外,在辐射熵产数值求解的基础上,Candau<sup>[5]</sup>推导了辐射传热过程中的辐射焓强度;Liu等<sup>[6]</sup>给出了半透明介质中的辐射焓传递方程及数值求解方法,并从系统热力学分析角度证明了该数值求解方法的正确性。

基于上述理论研究,已有研究人员对高温燃烧系统内的辐射熵产开展了数值计算研究。楚双霞等<sup>[7]</sup>模拟了甲烷-空气扩散燃烧过程并进行熵产分析,发现辐射熵产在总熵产中不能被忽略,可选择适当的燃料入口雷诺数和玻尔兹曼数使系统的总熵产数最小,从而提高能量利用效率;Makhanlall等<sup>[8]</sup>对300 kW天然气-空气扩散燃烧室开展数值模拟研究,给出了不同当量比下火焰辐射熵产,发现在低当量比条件下,壁面辐射熵产较大,高当量比条件下,气体辐射熵产较大;Rajabi等<sup>[9]</sup>针对燃气轮机燃烧室的数值研究发现,由于辐射熵产在非贫燃条件下占据最主要地位,改变旋流数会影响辐射熵产。

针对燃烧系统辐射熵产的研究有利于采用熵产最小化方法来提高燃烧系统的辐射传热效率<sup>[10-11]</sup>。但已有研究均基于燃烧数值模拟结果,缺乏对实际

燃烧系统中辐射熵产的试验检测手段。本文提出了一种基于辐射反问题求解的大型炉膛内辐射熵产、熵产数、辐射焓的试验测量方法,利用CCD相机获取炉膛火焰图像,通过辐射传递反问题求解获得大型燃煤锅炉内温度分布及辐射特性参数<sup>[12-14]</sup>,带入辐射熵产模型中获得燃烧介质及壁面的辐射熵产,并在一台200 MW发电机组的670 t/h亚临界燃煤锅炉开始试验,对同一负荷工况下不同炉膛高度的试验结果进行炉内辐射传热分析。

## 1 原理及方法

### 1.1 辐射熵产、熵产数及辐射焓计算

燃煤锅炉炉膛可视为一个充满吸收、发射及散射介质,且其边界具有吸收、发射及反射特性的三维空间。根据Caldas、Liu等<sup>[2-3]</sup>的研究结果,炉内总辐射熵产 $S_G$ 按来源可分为:由于介质发射、吸收过程不可逆性产生的辐射熵产 $S_G^{ae}$ 、由于介质散射过程不可逆性引起的熵产 $S_G^s$ 、由于壁面辐射换热过程不可逆性引起的熵产 $S_G^A$ 。各种来源辐射熵产具体计算公式<sup>[15]</sup>如下:

$$S_G^{ae} = \int_V \int_0^\infty \kappa_{a,\lambda} \int_{4\pi} (I_{b,\lambda}(r) - I_\lambda(\mathbf{r}, \mathbf{s})) \left[ \frac{1}{T_\lambda(\mathbf{r}, \mathbf{s})} - \frac{1}{T_M(r)} \right] d\Omega d\lambda dV \quad (1)$$

$$S_G^s = \int_V \int_0^\infty \sigma_{s,\lambda} \int_{4\pi} \frac{1}{T_\lambda(\mathbf{r}, \mathbf{s})} \left[ \frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} I_\lambda(\mathbf{r}, \mathbf{s}') \Phi(\mathbf{s}', \mathbf{s}) d\Omega - I_\lambda(\mathbf{r}, \mathbf{s}) \right] d\Omega d\lambda dV \quad (2)$$

$$S_G^A = \int_A \int_0^\infty \int_{4\pi} \left[ \frac{I_\lambda(\mathbf{r}_w, \mathbf{s})}{T_M(\mathbf{r}_w)} - I_\lambda(\mathbf{r}_w, \mathbf{s}) \right] (\mathbf{n}_w, \mathbf{s}) d\Omega d\lambda dA \quad (3)$$

$$S_G = S_G^{ae} + S_G^s + S_G^A \quad (4)$$

其中, $\kappa_{a,\lambda}$ 为介质吸收系数; $\sigma_{s,\lambda}$ 为介质散射系数; $T_M$ 为炉内介质温度; $I_{b,\lambda}$ 为黑体单色光谱辐射强度; $I_\lambda$ 为单色光谱辐射强度; $T_\lambda$ 为普朗克温度; $\Phi(\mathbf{s}', \mathbf{s})$ 为辐射相函数; $\lambda$ 为波长; $\mathbf{s}$ 为入射方向矢量; $\mathbf{s}'$

为散射方向矢量;下标  $b$  表示黑体;  $L_{\lambda}(\mathbf{r}_w, \mathbf{s})$  为发射到壁上某一方向的辐射光束在波长  $\lambda$  下的光谱辐射熵强度;  $\mathbf{r}$  为位置矢量;  $\mathbf{n}_w$  为壁面上的法向矢量;  $\Omega$  为立体角;  $V$  为体积。其中,炉内介质温度、介质吸收系数、介质散射系数由测量得到,其他参数可通过计算得到<sup>[15]</sup>。

炉内的总辐射熵产数  $M$  表征炉内辐射传热过程的不可逆程度,总辐射熵产数越大,辐射传热不可逆程度越高,辐射传热效率越低。其可分为介质辐射传热过程中因发射、吸收过程不可逆性引起的无量纲熵产数  $M^{ae}$ 、介质辐射传热过程中因散射过程不可逆性引起的无量纲熵产数  $M^s$ 、因壁面辐射换热过程不可逆性引起的无量纲熵产数  $M^w$  以及总辐射熵产数  $M$ ,计算公式<sup>[15]</sup>如下:

$$M^{ae} = \frac{S_G^{ae} T_0}{Q} \quad (5)$$

$$M^s = \frac{S_G^s T}{Q} \quad (6)$$

$$M^w = \frac{S_G^w T_0}{Q} \quad (7)$$

$$M = \frac{S_G T_0}{Q} \quad (8)$$

式中,  $T_0$  为环境温度;  $Q$  为介质与壁面之间的辐射换热热流。

根据文献[5-6]的研究结果,炉内辐射熵损和辐射熵产之间的关系为

$$a^V = T_0(S_G^{ae} + S_G^s) \quad (9)$$

$$a^A = T_0 S_G^w \quad (10)$$

式中,  $a^V$  为由于介质吸收、发射、散射过程不可逆性造成的辐射熵损;  $a^A$  为由于壁面辐射热过程不可逆性造成的辐射熵损。

辐射熵  $E$  和辐射熵损的关系为

$$E = Q - (a^V + a^A) \quad (11)$$

## 1.2 炉内温度分布及辐射特性重建

炉内温度分布及辐射特性重建的原理在文献[12-14]已做详细讨论,其基本思想是利用 CCD 相机接收来自炉膛内不同方向的辐射强度,依据辐射传递原理建立辐射强度图像和炉内温度场、介质辐射特性的辐射强度成像模型,通过归一化建立辐射温度成像模型,再采用辐射反问题求解方法对 2 个模型求解,从而重建炉内温度分布及辐射特性。

考虑一个由吸收、发射、反射固体壁面及所包围的吸收、发射、散射介质构成的炉膛系统,将系统内的空间区域分成  $m$  个单元。用成像装置(如工业 CCD 相机)获取炉膛内的辐射信息,CCD 相机的成

像单元数为  $n$ 。根据辐射强度成像模型,CCD 相机接收到不同方向的辐射强度分布  $I$  与炉内温度分布  $T$  的关系为

$$I = A_l T \quad (12)$$

其中,  $I$  为 CCD 相机接收的辐射强度,  $I = \{I(j), j = 1, 2, 3, \dots, l\}$ ;  $T$  为炉内空间单位温度的 4 次方,  $T = \{T^4(i), i = 1, 2, 3, \dots, m\}$ ;  $A_l$  为系数矩阵,  $A_l \in R^{n(m+l)}$ , 与炉膛尺寸、CCD 相机成像参数、介质辐射特性、壁面发射率有关,可通过辐射传递求解得到。此外,根据辐射温度图像模型,还可建立 CCD 相机检测到的图像温度  $T_{\text{CCD}}$  与炉内温度分布  $T$  的线性关系为

$$T_{\text{CCD}} = A' T \quad (13)$$

式中,  $T_{\text{CCD}}$  为火焰温度图像,  $T_{\text{CCD}} = \{t_{\text{CCD}}(j)^4, j = 1, \dots, n\}$ , 表示炉膛中的三维温度场在 CCD 二维平面上的叠加;  $A'$  为对  $A$  做归一化。

炉内温度分布与辐射特性采用迭代求解方法,步骤如下:首先根据 CCD 相机拍摄的火焰辐射图像计算出辐射强度图像与辐射温度图像,再给定辐射特性初值,开始迭代计算,利用修正的 Tikhonov 正则化方法从图像温度  $T_{\text{CCD}}$  计算得到炉内温度分布  $T$ ,再利用最小二乘法求出辐射特性的更新值,两者交替迭代,直到辐射特性收敛至稳定值,即可重建出炉内温度分布及辐射特性。

重建得到炉内温度分布  $T$  后,可用温度分布均方差  $\sigma_T$  描述炉内温度的不均匀性,温度分布均方差越大,炉内温度越不均匀,  $\sigma_T$  的计算公式为

$$\sigma_T = \sqrt{\sum_{i=1}^m (T(i) - T_{\text{ave}})^2 / m} \quad (14)$$

式中,  $T_{\text{ave}}$  为炉内平均温度。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 试验对象及检测装置

试验选取一台 200 MW 发电机组的 670 t/h 亚临界燃煤锅炉,该锅炉采用四角切圆燃烧方式,燃烧器为直流燃烧器,煤种为混合贫煤,机组负荷为 190 MW。图 1 为燃煤锅炉炉膛及试验设备,利用四台 CCD 相机分别在炉膛底部(标高 12 m)、燃烧器区域(标高 22 m)、炉膛出口(标高 35 m)3 个截面拍摄炉内火焰辐射图像,炉膛截面尺寸为 10.8 m × 11.92 m,并基于辐射反问题求解方法重建 3 个高度下炉内各横截面二维温度分布及辐射特性<sup>[13-14]</sup>。

辐射熵产及辐射熵的计算利用离散坐标法,环境温度参考水冷壁,平均温度设为 450 °C,根据式(1)~(11)求解出该负荷工况下 3 个截面的局部辐



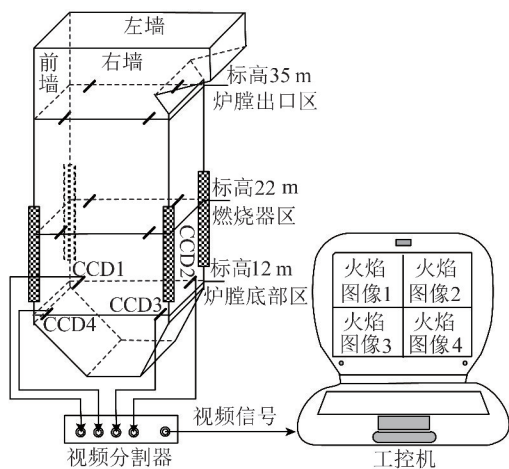


图1 燃煤锅炉炉膛及试验设备

Fig. 1 Coal-fired boiler furnace and experimental equipment

射熵产分布,得到各截面煤粉燃烧介质辐射熵产、水冷壁辐射熵产、煤粉燃烧介质辐射熵产数、水冷壁辐射熵产数以及辐射熵。

## 2.2 局部辐射熵产

图2为3个截面对应的炉膛内温度分布和局部辐射熵产分布。

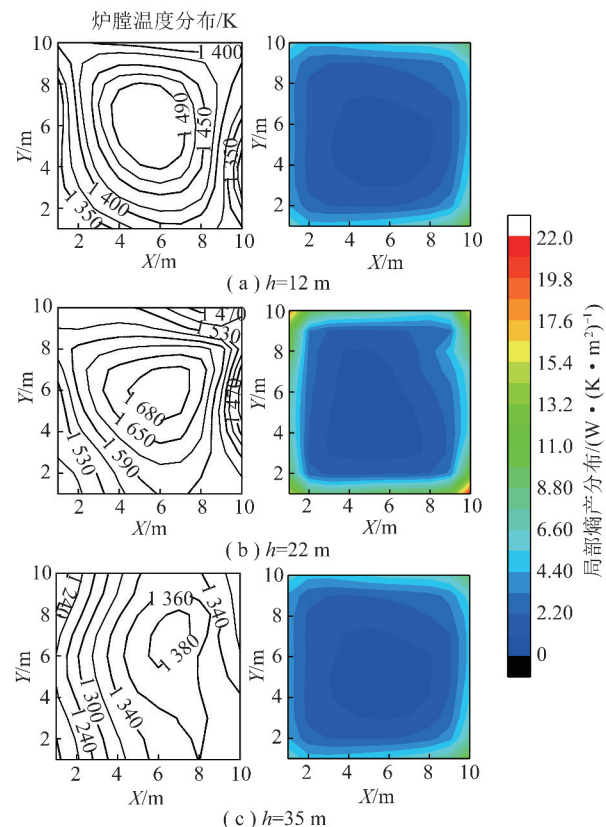


图2 3个截面下炉内温度分布和局部辐射熵产分布

Fig. 2 Temperature distributions and local radiative entropy generation distributions at three sections in furnace

由图3可知,3个截面局部辐射熵产均呈中间低、靠近水冷壁区域高的分布状态;而炉膛内温度分

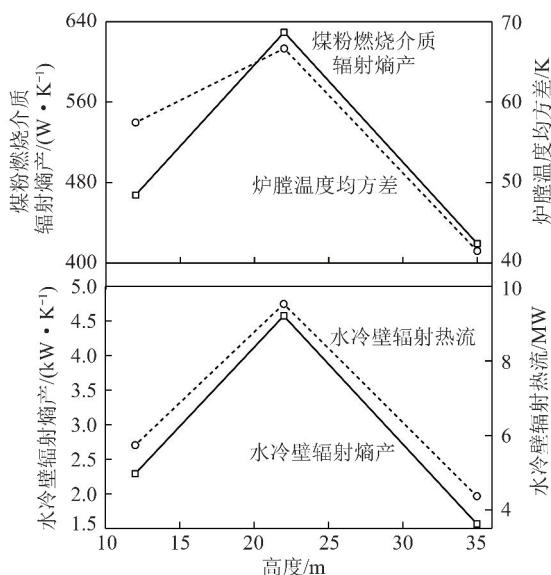


图3 3截面炉内辐射熵产、温度均方差和水冷壁辐射热流

Fig. 3 Radiative entropy generation, standard deviation of temperature distribution, and radiative heat flux of water wall at three sections

布与之相反,呈中间高,水冷壁附近的区域低的单峰分布。炉膛内温度的分布趋势是因为炉膛呈四角切圆布置,燃烧器位于炉膛中央,火焰也对应于集中炉膛中央。而局部辐射熵产的分布趋势是因为对于火焰集中的高温区域,煤粉燃烧介质温度均匀性较好,因此局部辐射熵产较低,而煤粉燃烧介质温度较低的水冷壁附近区域温度均匀性较差,因此煤粉燃烧介质局部辐射熵产较高。

## 2.3 燃煤锅炉炉内辐射熵产

图3为3个截面煤粉燃烧介质辐射熵产与炉内温度均方差,以及水冷壁辐射熵产与水冷壁辐射热流。可知,煤粉燃烧介质辐射熵产在燃烧器区域22m处达最大值,为629 W/K,同时燃烧器区的温度均方差也达最大值;而煤粉燃烧介质辐射熵产在出口处区域35m处达最小值,为419 W/K,同时燃烧器区的温度均方差也达最小值。说明对于煤粉燃烧介质,炉内温度均方差是影响其辐射熵产的重要因素,炉内温度均方差越大,煤粉燃烧介质发射、吸收、散射过程不可逆性越强,造成辐射熵产也越大。水冷壁面辐射熵产在燃烧器区域22m处达最大值,为4.575 kW/K,同时燃烧器区的水冷壁面辐射热流也达最大值;而壁面辐射熵产在出口处区域35m处达到最小值,为1.566 kW/K,同时出口处区域的水冷壁面辐射热流也达最小值。说明对于水冷壁,水冷壁辐射热流是影响其辐射熵产的重要因素,水冷壁辐射热流越大,水冷壁辐射换热过程不可逆性越强,造成的辐射熵产也越大。

## 2.4 燃煤锅炉内辐射熵产数

图4为3个截面煤粉燃烧介质辐射熵产数与炉内温度均方差,以及水冷壁面辐射熵产数与水冷壁辐射热流。可知,煤粉燃烧介质辐射熵产数在燃烧器区域22 m处达最大值,为0.067,同时燃烧器区的温度均方差也达最大值;而煤粉燃烧介质辐射熵产数在出口处区域35 m处达最小值,为0.048,同时燃烧器区的温度均方差也达最小值。说明对于煤粉燃烧介质,炉内温度均方差是影响其辐射熵产数的重要因素,炉内温度均方差越大,煤粉燃烧介质在辐射传热过程中因发射、吸收、散射过程不可逆性造成的辐射熵产数越大,煤粉燃烧介质辐射过程不可逆程度越高,辐射传热效率越低。水冷壁面辐射熵产数在燃烧器区域22 m处达最大值,为0.346;同时燃烧器区域的水冷壁面辐射热流也达最大值;而壁面辐射熵产数在出口处区域35 m处达最小值,为0.258,同时出口处区域的水冷壁面辐射热流也达最小值。说明对于水冷壁,水冷壁辐射热流是影响其辐射熵产数的重要因素,水冷壁辐射热流越大,水冷壁辐射换热过程的不可逆性引起的辐射熵产数越大,水冷壁辐射传热过程不可逆性程度越高,辐射传热效率越低。

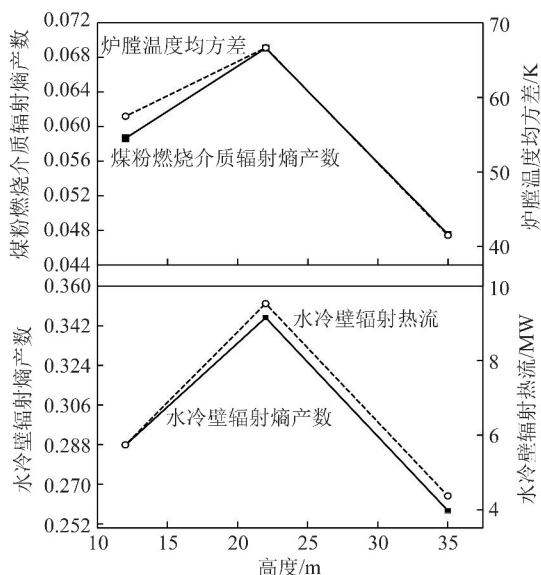


图4 3个截面炉内辐射熵产数、温度均方差和水冷壁辐射热流

Fig. 4 Dimensionless entropy generation, standard deviation of temperature distribution, and radiative heat flux of water wall at three sections

## 2.5 燃煤锅炉内辐射熵

图5为3个高度截面的辐射熵。可以看出,辐射熵在燃烧器区22 m处达最大值,为6.20 MW;在出口区35 m处达最小值,为3.10 MW。这是因为

燃烧器区温度较高,辐射换热过程较为剧烈,辐射换热量较多,有用功也较多,因此辐射熵也较大;而在炉膛出口处温度较低,辐射换热过程较弱,辐射换热量较少,有用功也较少,因此辐射熵也较小。

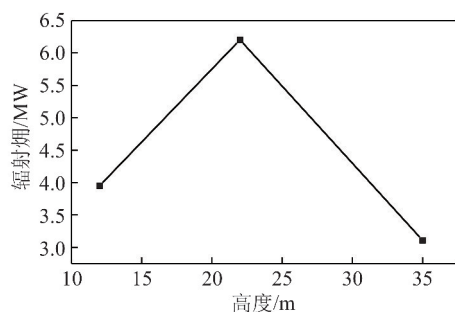


图5 3个截面下的炉内辐射熵

Fig. 5 Radiative exergy at three sections in furnace

## 3 结论

1) 基于大型燃煤锅炉内温度分布及辐射特性重建结果及辐射熵产计算模型,提出一种大型炉膛内辐射熵产、熵产数、辐射熵的试验测量方法。

2) 随着燃煤锅炉内温度分布均方差增大,煤粉燃烧介质吸收、发射及散射过程的不可逆性增大,辐射传热效率降低,产生的辐射熵产数从419 W/K增至629 W/K,辐射熵产数从0.048增至0.067;随着水冷壁面热流从增大,水冷壁面辐射传热过程的不可逆性增大,辐射传热效率降低,其产生的辐射熵产从1.566 kW/K增至4.575 kW/K,辐射熵产数从0.258增至0.346。

3) 在燃煤锅炉的燃烧器区域,由于燃烧温度相对最高,其辐射换热过程最为剧烈,有用功最多,因而辐射熵最大;而对于温度相对最低的炉膛出口区域,其辐射换热过程相对最弱,有用功相对最少,因而辐射熵相对最小。

4) 对于大型燃煤锅炉的实际运行,可通过提高炉膛温度分布的均匀性,尤其是燃烧器区域温度分布的均匀性,达到提高炉膛的辐射换热效率,减少有用功损失的目的。

## 参考文献 (References):

- [1] 韩巍,金红光,林汝谋. 化石燃料化学能释放的新认识[J]. 自然科学进展,2005,15(1):84-89.
- [2] CALDAS M, SEMIAO V. Entropy generation through radiative transfer in participating media: Analysis and numerical computation[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer,2005,96(3):423-437.
- [3] LIU L H, CHU S X. On the entropy generation formula of radiation heat transfer processes[J]. Journal of Heat Transfer: Transactions

- of the ASME, 2006, 128(5):504-506.
- [4] ZHANG Z N, LI Z C, LOU C. Numerical analysis of radiative entropy generation in a parallel plate system with non-uniform temperature distribution participation medium [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2019, 225:319-326.
- [5] CANDAU Y. On the exergy of radiation[J]. *Solar Energy*, 2003, 75(3):241-247.
- [6] LIU L H, CHU S X. Radiative exergy transfer equation thermophys [J]. *Journal of Heat Transfer: Transactions of the ASME*, 2009, 83:819-822.
- [7] 楚双霞, 刘林华. 甲烷-空气扩散燃烧过程熵产分析[J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(29):34-40.  
CHU Shuangxia, LIU Linhua. Analysis of entropy generation during methane-air diffusion combustion processes[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(29):34-40.
- [8] MAKHANLALL D, MUNDA J L, JIANG P. Radiation energy devaluation in diffusion combusting flows of natural gas[J]. *Energy*, 2013, 61:657-663.
- [9] RAJABI V, AMANI E. A computational study of swirl number effects on entropy generation in gas turbine combustors [J]. *Heat Transfer Engineering*, 2019, 40(3/4):346-361.
- [10] SCIACOVELLI A, VERDA V, SCIUBBA E. Entropy generation analysis as a design tool-A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 43:1167-1181.
- [11] 程雪涛, 梁新刚. 熵产最小化理论在传热和热功转换优化中的应用探讨[J]. *物理学报*, 2016, 65(18):234-240.  
CHENG Xuetao, LIANG Xingang. Discussion on the application of entropy generation minimization to the optimizations of heat transfer and heat-work conversion [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2016, 65(18):234-240.
- [12] 娄春, 周怀春, 姜志伟, 等. 炉膛内断面温度场与辐射参数同时重建实验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(14):98-103.  
LOU Chun, ZHOU Huaichun, JIANG Zhiwei, et al. Experimental investigation on simultaneous reconstruction of cross-section temperature distribution and radiation properties in a boiler furnace [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(14):98-103.
- [13] 娄春, 周怀春, 朱国良, 等. 煤粉炉内颗粒辐射特性的检测与分析[J]. *工程热物理学报*, 2007, 28(S2):217-220.  
LOU Chun, ZHOU Huaichun, ZHU Guoliang, et al. Analysis and measurement of radiative properties of particulate medium in a large-scale coal-fired boiler of power plant [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2007, 28(S2):217-220.
- [14] 娄春. 煤粉炉内三维温度场及颗粒辐射特性重建 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2007:136-140.
- [15] 楚双霞. 非相干辐射传递过程的热力学分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009:57-67.