DOI: 10.19666/j.rlfd.202507004

不同煤粉颗粒辐射模型对 600 MW 超临界对冲燃烧锅炉辐射传热的影响研究

周东阳[1,2,3]，郑小刚[2,3]，张 骁[2,3]，唐 贝[2,3]，毕胜山[1]
（1. 西安交通大学能源与动力工程学院热流科学与工程教育部重点实验室，陕西 西安 710049；
2. 西安热工研究院有限公司，陕西 西安 710054；
3. 高效灵活煤电及碳捕集利用封存全国重点实验室，北京 102209）

［摘 要］在煤粉炉中，传热过程主要以辐射为主导，且随着炉膛尺寸的增大，煤粉颗粒的辐射贡献更为显著。值得注意的是，煤粉颗粒的燃尽率对其辐射特性具有重要影响，但现有多数数值模拟研究往往忽略此效应，将颗粒发射率与散射系数设为常数。为此，以 600 MW 超临界对冲燃烧锅炉为研究对象，采用计算流体动力学（CFD）方法对比了三类辐射特性模型对辐射传热预测结果的影响，具体包括常数模型（发射率和散射系数恒定）、线性模型（辐射特性随颗粒燃尽率呈线性变化）、普朗克平均系数模型（基于普朗克平均发射率和散射系数）。研究结果表明：相较于同时计入气体与颗粒辐射的情况，忽略颗粒辐射会使炉膛峰值温度高估约 300 K。在计入颗粒辐射的前提下，与普朗克平均系数模型相比，常数模型对燃烧器区域螺旋膜式壁传热量的估算偏低约 9%，对壁面平均热流密度峰值的估算也偏低约 12.5%；而线性模型则会高估该峰值。上述发现可为煤粉燃烧数值模拟中辐射特性模型的合理选取提供参考。

［关 键 词］煤粉燃烧；燃烧数值模拟；辐射传热；颗粒辐射特性

［引用本文格式］周东阳，郑小刚，张骁，等. 不同煤粉颗粒辐射模型对 600 MW 超临界对冲燃烧锅炉辐射传热的影响研究[J]. 热力发电，2026，55(4)：104-115. ZHOU Dongyang, ZHENG Xiaogang, ZHANG Xiao, et al. Research on the influence of different pulverized coal particle radiation models on radiative heat transfer in a 600 MW supercritical opposed-fired boiler[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(4): 104-115.

Research on the influence of different pulverized coal particle radiation models on radiative heat transfer in a 600 MW supercritical opposed-fired boiler

ZHOU Dongyang[1,2,3], ZHENG Xiaogang[2,3], ZHANG Xiao[2,3], TANG Bei[2,3], BI Shengshan[1]
(1. MOE Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;
3. National Key Laboratory of High-Efficiency Flexible Coal Power Generation and Carbon Capture Utilization and Storage, Beijing 102209, China)

Abstract: In pulverized coal-fired furnaces, the heat transfer process is dominated by radiation. With the increase in furnace size, the radiative contribution of pulverized coal particles becomes increasingly prominent. Notably, the burnout ratio of pulverized coal particles exerts a critical influence on their radiative properties. However, most existing numerical simulation studies tend to overlook this effect and set the particle emissivity and scattering coefficient as constants. To address this issue, this study takes a 600 MW supercritical opposed-fired boiler as the research object and employs computational fluid dynamics (CFD) to analyze the effects of three types of radiative property models on the prediction results of radiative heat transfer. These models include the constant model (emissivity and scattering coefficient remain constant), the linear model (radiative properties vary linearly with

收 稿 日 期：2025-07-01 修 回 日 期：2025-11-04 接 受 日 期：2025-11-18
基 金 项 目：国家重点研发计划项目（2022YFB4100703）；中国华能集团有限公司总部科技项目（HNKJ22-H19）
Supported by: National Key Research and Development Program Project (2022YFB4100703); Science and Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ22-H19)
第一作者简介：周东阳（1979），男，博士，高级工程师，主要研究方向为电厂仿真技术，zhoudongyang@tpri.com.cn。
通信作者简介：郑小刚（1979），男，高级工程师，主要研究方向为电厂仿真技术，zhengxiaogang@tpri.com.cn。

particle burnout ratio), and the Planck mean coefficient model (based on Planck mean emissivity and scattering coefficient). The results indicate that compared with the scenario where both gas and particle radiation are considered, neglecting particle radiation leads to an overestimation of the furnace peak temperature by approximately 300 K. When particle radiation is taken into account, compared with the Planck mean coefficient model, the constant model underestimates the heat transfer rate of the spiral membrane wall in the burner region by about 9% and the peak value of the average wall heat flux by 12.5%, while the linear model results in an overestimation of the peak value. These findings can provide a reference for the reasonable selection of radiative property models in the numerical simulation of pulverized coal combustion.
Key words: pulverized coal combustion; numerical simulation of coal combustion; radiative heat transfer; particle radiation characteristics

过去十年，能源结构持续优化，新能源占比稳步提升，但燃煤发电凭借高可靠性与稳定性，在未来仍将是能源供应的重要组成部分。对于大型煤粉燃烧锅炉，辐射传热占火焰与炉膛壁面总传热量的 90%以上[1]，且随着炉膛尺寸增大，煤粉、飞灰等固体颗粒的辐射贡献显著高于 CO_2、H_2O 等气态组分[2]。因此选择合适的颗粒辐射模型对准确预测大型锅炉辐射传热至关重要。

Mie 理论[3]虽能精确求解球形颗粒的辐射特性，但其计算成本极高，因此，Buckius、Hwang[4]以及 Johansson[5]等学者基于 Mie 理论提出了近似计算煤粉颗粒光谱特性的经验公式，然而，大多煤粉燃烧数值模拟基于颗粒辐射的光谱依赖性远低于气体这一假设，仍采用经验常数来表征煤粉颗粒的辐射特性[6]。

近年来，煤粉颗粒的燃尽率对辐射特性的影响受到广泛关注。吸收指数的测量表明，未燃尽碳的存在会显著提高颗粒的吸收[7]，为此有研究采用线性模型对煤粉颗粒的辐射特性进行表征[8]，即假设颗粒的发射率和散射率随燃尽率线性变化。Mie 理论同样揭示了燃尽率对煤粉颗粒辐射特性的影响，不同的是，小颗粒（直径<5 μm）的发射率随燃尽率增加而降低，较大颗粒的发射率在接近完全燃烧时先略有上升，然后迅速下降[9]。目前已有多种基于普朗克平均近似或灰气体加权和概念的颗粒辐射特性模型[10-11]被提出，旨在综合考虑颗粒辐射随颗粒燃尽率、粒径以及非均匀分布的非线性变化。

现有相关研究已取得一定进展：Singh 等人[12]发现，飞灰体积分数小于 2%时气体辐射占主导，超过 3%时颗粒吸收与散射效应显著增强，其辐射贡献超越气体；Zhang 等人[13]通过实验证实，忽略发射率与吸收率的独立性会导致辐射热通量计算误差超 60%；Yin 等人[14]指出，考虑燃尽率线性影响的模型比经验常数更能准确预测炉膛温度场；Guo 等人[15]在 2.5 MW 煤粉炉模拟中发现，线性模型低估燃烧区颗粒吸收率，忽略燃尽率影响会使燃尽后颗粒吸收系数被高估一个数量级。

上述研究证实了颗粒辐射的重要作用。然而，研究多局限于小规模工况，实际大型炉膛中各类辐射特性模型的差异尚未得到充分理解。因此，本研究旨在比较 600 MW 超临界对冲燃烧炉模拟中不同颗粒辐射特性模型，并详细分析其对温度预测和辐射传热的影响。

1 研究对象

本文的研究对象是一台 600 MW 超临界直流煤粉锅炉，具体如图 1 所示。该锅炉采用前后墙对冲燃烧、一次再热、单炉膛、尾部双烟道、挡板调节、平衡通风、固态排渣、全悬吊结构Π型配置。

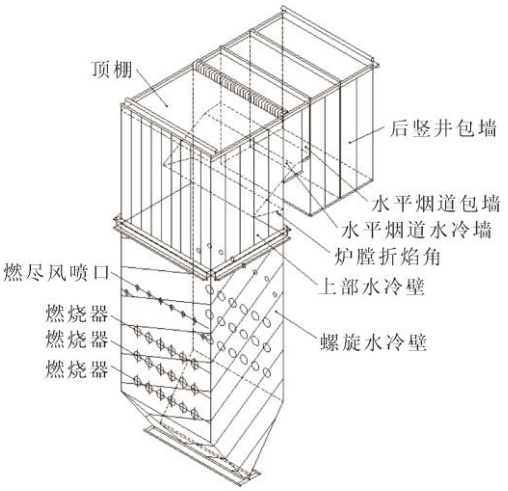


图 1 研究对象示意
Fig.1 Schematic diagram of the research subject

锅炉前后墙分别装有 3 层旋流燃烧器，每层 6 个。最上层燃烧器上方配有一层燃尽风（OFA）以及侧燃尽风。炉膛宽 22.16 m、深 15.46 m、高 62.00 m。炉膛由全焊接膜式水冷壁包围，包括下部螺旋膜式水冷壁以及上部垂直膜式水冷壁。

锅炉制粉系统采用 ZGM113N 型中速辊式磨煤

机，每层 6 个燃烧器共用 1 台磨煤机，一共 6 台磨煤机，其中 1 台作为备用。

2 锅炉全炉膛数值模拟

2.1 关键数学模型

炉内煤粉燃烧涉及复杂的物理和化学过程，包括煤粉热解和燃烧、湍流动力学以及传热传质等。

2.1.1 煤炭燃烧模型

本文采用欧拉−拉格朗日方法模拟气粒两相流。即在拉格朗日框架下，使用随机轨迹模型追踪流场中分散相的运动。煤颗粒随机轨迹模型的控制方程表示为：

$$m_{\mathrm{p}}\frac{\mathrm{d}\mu_{\mathrm{ip}}}{\mathrm{d}t}=C_{\mathrm{D}}\rho_{\mathrm{g}}\left(\frac{A_{\mathrm{p}}}{2}\right)(\mu_{\mathrm{ig}}-\mu_{\mathrm{ip}})\,|\mu_{\mathrm{ig}}-\mu_{\mathrm{ip}}|+m_{\mathrm{p}}g_{\mathrm{k}} \quad (1)$$

式中：A_{p} 为颗粒表面积；m_{p} 为颗粒质量；ρ_{g} 为密度；g_{k} 为重力加速度；C_{D} 为阻力系数；u_{ip} 和 u_{ig} 分别为离散相和气相的速度分量。

采用化学渗透脱挥发分（CPD）模型模拟燃料受热并发生脱挥发分过程。模型的 5 个官能团参数基于煤的氧碳（O/C）和氢碳（H/C）摩尔比，采用二维插值法确定，具体见表 1。

表 1 CPD 模型参数
Tab.1 Parameters of the CPD model

项目	数值
侧链分子量/(g·mol^{-1})	29.5
簇分子量/(g·mol^{-1})	330.6
煤晶格中桥键的初始分数	0.531
晶格配位数	4.89
炭桥键的初始分数	0

在模拟过程中，挥发分以 $CH_{2.2}O_{0.21}$ 表示，该化学式是在工业分析与元素分析的基础上确定的，同时确保了元素守恒与能量守恒。挥发分的燃烧过程采用改进的 JL 机理进行模拟，该机理包含 6 种物质组分与 4 个全局反应，具体见表 2。

表 2 改进 JL 机理反应机理动力学数据
Tab.2 Kinetic data of the WD reaction mechanism

反应式	反应方向	频率因子/(kmol·(m^3·s)$^{-1}$)	温度指数	活化能/(J·kmol^{-1})	反应级数
$CH_{2.2}O_{0.21}+0.95O_2\rightarrow CO+1.10H_2O$	f	1.59×10^{10}	0	2×10^{8}	$[CH_{2.2}O_{0.21}]^{0.7}\,[O_2]^{0.8}$
$CO+0.5O_2\rightarrow CO_2$	f	2.24×10^{6}	0	4.19×10^{7}	$[CO][O_2]^{0.25}[H_2O]^{0.5}$
$CO_2\rightarrow CO+0.5O_2$	r	6.16×10^{10}	–0.97	3.29×10^{8}	$[CO][O_2]^{-0.25}[H_2O]^{0.5}$
$H_2+0.5O_2\leftrightarrow H_2O$	f	5.69×10^{11}	0	1.46×10^{8}	$[H_2][O_2]^{0.5}$
	r	2.83×10^{13}	0	3.90×10^{8}	$[H_2O]$

本研究同时考虑了煤焦气化和氧化过程。非均相反应速率由动力学反应速率和扩散速率共同决定，其中前者以阿伦尼乌斯形式表示。采用三步表面反应机理来模拟煤焦气化和氧化过程。在燃烧过程中，煤焦表面首先被加热并发生氧化反应，具体模型参数见表 3。

表 3 表面反应机理参数
Tab.3 Parameters of the surface reaction mechanism

反应式	频率因子/(kmol·(m^3·s)$^{-1}$)	温度指数	活化能/(J·kmol^{-1})	反应级数	反应速率常数/(s·K$^{-0.75}$)
$C+0.5O_2\rightarrow CO$	5.00×10^{-3}	0	7.40×10^{7}	$[O_2]$	4.13×10^{-12}
$C+CO_2\rightarrow 2CO$	6.35×10^{-3}	0	1.62×10^{8}	$[CO_2]$	4.12×10^{-12}
$C+H_2O\rightarrow CO+H_2$	1.92×10^{-3}	0	1.47×10^{8}	$[H_2O]$	1.69×10^{-12}

2.1.2 湍流动力学模型

本文在雷诺平均纳维−斯托克斯（RANS）框架下，采用 RNG k-ε 模型结合标准壁面函数来模拟湍流。湍流动能k和耗散率 ε 的控制方程如下：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i)=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+P_k-\rho\varepsilon \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i)=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}P_k-C_{2\varepsilon}^{*}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3)$$

$$C_{2\varepsilon}^{*}=C_{2\varepsilon}+\frac{C_\mu\eta^3\left(1-\frac{\eta}{\eta_0}\right)}{1+\beta\eta^3} \quad (4)$$

$$\eta = \frac{Sk}{\varepsilon} \tag{5}$$

$$S = (2\boldsymbol{S}_{ij}\boldsymbol{S}_{ij})^{1/2} \tag{6}$$

上式中，常数项的具体取值见表 4。

表 4 RNG k-ε 模型常数
Tab.4 Constants of the RNG k-ε model

C_μ	σ_k	σ_ε	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	η_0	β
0.084 5	0.719 4	0.719 4	1.42	1.68	4.38	0.012

化学-湍流相互作用采用涡流耗散概念（EDC）模型进行建模，EDC 模型中的体积分数常数和时间尺度常数分别设置为 2.137 7 和 0.408 2。为了提高计算效率，采用了原位自适应制表（ISAT）模型。

2.1.3 辐射传输基本模型

在煤粉燃烧中，辐射是炉膛内主要的传热机制。考虑到辐射介质的吸收、发射和散射，辐射传递方程（RTE）可表示为：

$$\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}s} + (k_\mathrm{g} + k_\mathrm{p} + \sigma_\mathrm{p})I = k_\mathrm{g} n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + E_\mathrm{p} + \frac{\sigma_\mathrm{p}}{4\pi}\int_{4\pi} \Phi_\mathrm{p}(\hat{s},\hat{s}')I(\hat{s}')\mathrm{d}\Omega' \tag{7}$$

式中：k_g 为气体吸收系数；k_p 为颗粒吸收系数；σ_p 为颗粒散射系数；E_p 为等效颗粒排放量；Φ_p 为散射相函数。

采用灰气体加权和（WSGG）模型，并更新模型参数以考虑 H_2O 与 CO_2 的不同摩尔比（MR），从而确定气体混合物（CO_2 和 H_2O）的辐射特性。然后，气体吸收系数计算如下：

$$k_\mathrm{g} = -\ln(1-\varepsilon_\mathrm{mix})/L \tag{8}$$

式中：ε_mix 为气体混合物的总气体发射率，由 WSGG 模型确定；L 为整个炉子的光程长度。

粒子的辐射特性包括吸收系数、散射系数和发射率，计算方法如下：

$$k_\mathrm{p} = \lim_{V\to 0}\sum_{n=1}^{N}\left(\varepsilon_\mathrm{pn}\frac{A_\mathrm{pn}}{V}\right) \tag{9}$$

$$\sigma_\mathrm{p} = \lim_{V\to 0}\sum_{n=1}^{N}\left[(1-f_\mathrm{pn})(1-\varepsilon_\mathrm{pn})\frac{A_\mathrm{pn}}{V}\right] \tag{10}$$

$$E_\mathrm{p} = \lim_{V\to 0}\sum_{n=1}^{N}\varepsilon_\mathrm{pn}A_\mathrm{pn}\frac{\sigma T_\mathrm{pn}^4}{\pi V} \tag{11}$$

式中：f_pn 为颗粒物散射因子；ε_pn 为颗粒物发射率；A_pn 为颗粒物的投影面积。

2.2 模型网格划分

在炉膛网格划分的过程中，将炉膛不同区域进行拆分，分别进行独立的结构化六面体网格绘制，并在 ANSYS Fluent 软件中使用交界面（INTERFACE）的方法将不同区域的网格拼接在一起（图 2）。通过该方法，可以在保证燃烧器区域网格密度符合计算要求的情况下，将冷灰斗区域和垂直水冷壁区域的网格密度大幅度降低，从而大幅度降低炉膛网格数量。随后对网格进行无关性验证，当网格数量超过 550 万时，炉膛内流场速度不再随网格数量发生变化。为了兼顾计算精度与计算效率，确定炉膛网格总数为 551 万；网格质量 0.55~0.70 区间占比 17.4%，0.70 以上占比达 82.6%，0.90 以上占比 35.2%。

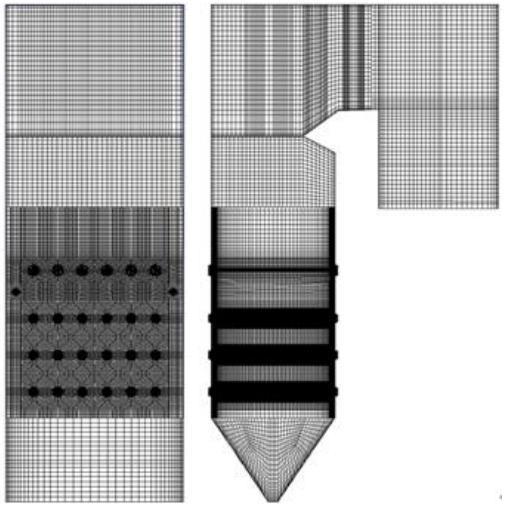


图 2 锅炉结构化网格模型
Fig.2 Structured mesh model of the boiler

3 颗粒辐射模型对锅炉炉膛温度分布与传热预测的影响研究

3.1 BMCR 工况数值模拟

3.1.1 模型边界条件

本节在最大连续运行（BMCR）工况下开展锅炉燃烧数值模拟研究，各燃烧器入口参数保持一致，风量、给煤量按总风量与总给煤量进行平均分配。

模型采用设计煤种，煤粉元素分析见表 5。其中，煤粉颗粒直径采用 *R-R* 公式进行定义。*R-R* 分布定义的颗粒直径 d 与大于此直径的颗粒的质量占比 Y_d 关系如下：

$$Y_d = \mathrm{e}^{-(d/\bar{d})^n} \tag{12}$$

式中：n 为分布指数；$\bar{d}$ 为平均直径。分布指数为 1.13，粒径范围为 3~250 μm，平均粒径为 57 μm，煤粉质量分数与煤粉直径大小的关系见表 6。

表 5 煤粉工业分析与元素分析
Tab.5 Proximate and ultimate analysis of the pulverized coal

	项目	数值
燃料特性	w_{ar}(C)/%	60.27
	w_{ar}(H)/%	3.82
	w_{ar}(O)/%	5.82
	w_{ar}(N)/%	0.91
	w_{ar}(S)/%	1.00
	w_{ar}(M)/%	8.50
	w_{ar}(A)/%	19.68
	w_{daf}(V)/%	37.49
	低位发热量 $Q_{net,ar}$/(kJ kg^{-1})	23 360
灰熔点	变形温度 T_{DT}/℃	1 240
	软化温度 T_{ST}/℃	1 250
	流动温度 T_{FT}/℃	1 280

表 6 煤粉质量分数与煤粉粒径关系
Tab.6 Relationship between mass fraction and particle size of the pulverized coal

项目	粒径/μm								
	>5	>10	>20	>50	>90	>30	>160	>200	>250
质量分数/%	93.87	80.30	61.70	42.30	18.70	7.80	3.20	1.20	0.50

模型边界条件设置如下：

1）燃烧器及燃尽风的内一次风、外一次风、内二次风、外二次风及侧燃尽风均采用质量流量入口边界条件，燃烧器旋流角度通过局部柱坐标系定义；

2）入口质量流量与风温依据设计说明书及一次风模型模拟结果设定，具体参数见表 7；

3）出口采用 outflow 边界条件，允许流体自由流出计算域，不对出口压力与流速施加特定约束；

4）炉膛壁面采用标准壁面函数，以模拟流体在壁面处的无滑移边界（即壁面接触处流体速度为零），壁面热交换采用对流边界条件，且设定均匀壁面水蒸气温度为 635 K，定辐射发射率为 0.6。

表 7 模型外部输入参数
Tab.7 External input parameters of the model

项目	风温/K	质量流量/(kg s^{-1})	旋流角度/(°)	给煤量/(kg s^{-1})
燃烧器内一次风	348	1.799		1.138
燃烧器外一次风	348	1.799		0.654
燃烧器内二次风	607	1.508		
燃烧器外二次风	607	6.564	30.0	
燃尽风内二次风	607	7.334	33.0	
燃尽风外二次风	607	5.123	15.0	
燃尽风中心风	607	0.319		
侧燃尽风二次风	607	3.688		
侧燃尽风中心风	607	2.080		

3.1.2 炉膛速度场分布特征

炉膛中心截面速度云图与颗粒运动轨迹如图 3 所示。模拟结果显示，在燃烧器区域中心，对冲燃烧器出口气流在炉膛中心形成上升气流，其速度随炉膛高度增加逐步提升，至燃尽风平面区域时，因与燃尽风气流的交互作用其速度显著增大，与实际情况下上升气流运行规律一致。此外，旋流燃烧器出口附近普遍存在回流区，这是由于入口气流的旋流角度引发的回流效应，与实际旋流燃烧器工作原理吻合，验证了模型对旋流流动特征的精准捕捉。

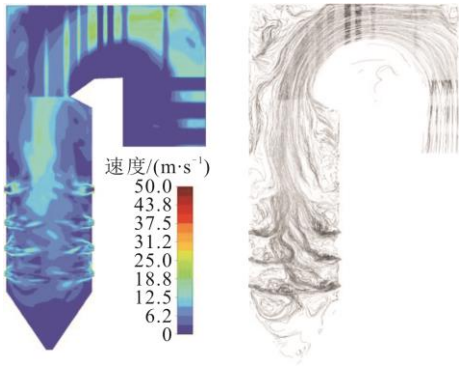


图 3 炉膛中心截面速度与颗粒迹线
Fig.3 Velocity and particle trajectory diagram of the furnace central cross-section

3.1.3 炉膛温度场分布特征

图 4 为炉膛中心截面的温度分布云图。由图 4 可知：自冷灰斗区域起，沿炉膛高度向上烟气温度逐步升高，峰值出现在上层燃烧器与燃尽风之间的区域；在燃尽风与屏式过热器之间的区域仍存在高温区，这是未燃尽煤粉及 CO 与燃尽风补充的氧气发生二次燃烧所致；当烟气流经屏式过热器后，因与水冷壁、过热器、再热器等受热面换热，烟气温度逐步下降。

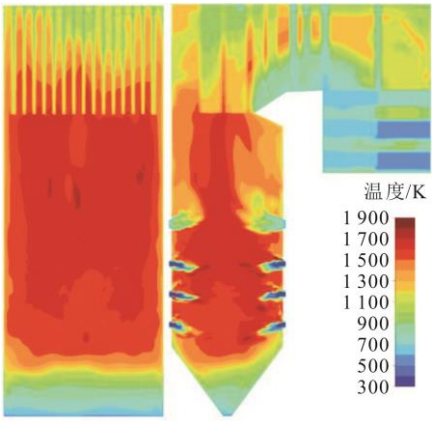


图 4 炉膛中心截面温度分布
Fig.4 Temperature distribution in the furnace central cross-section

图 5 呈现了燃尽风截面与中层燃烧器截面的温度分布特征。由图 5 可知，在 BMCR 工况下，因各燃烧器入口边界条件一致，燃烧器截面温度分布呈现沿横纵轴的镜像对称特征，炉膛中心区域燃烧反应最剧烈，最高温度达 1 888 K，与该类型锅炉设计的火焰中心温度区间相符。

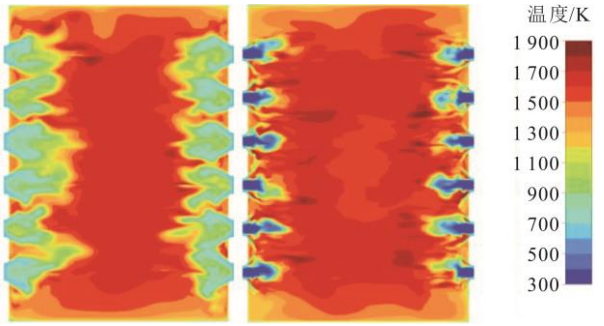


图 5 燃尽风截面（左）和中层燃烧器截面（右）温度分布
Fig.5 Temperature distributions in the overfire air cross-section (left) and the middle-layer burner cross-section (right)

上述现象与实际情况一致，充分表明本数值模拟模型的验证结果良好，能够准确反映炉膛内的温度分布特性。

3.1.4 数值模型验证

通过对比所建立目标锅炉的数值模型计算结果与实际锅炉运行测量结果，对数值模型的准确性进行验证。表 8 为典型工况条件下目标锅炉关键参数数值模拟结果与实际测量结果。

表 8 目标锅炉典型工况参数模拟值与实测值
Tab.8 The simulated and measured values of the target boiler parameters under typical working conditions

机组负荷	运行参数	模拟值	实测值	相对误差
600 MW	低压过热器出口温度/K	1 048.56	1 033.15	1.49%
	低压再热器出口温度/K	1 056.38	1 053.15	0.31%
	省煤器出口温度/K	698.03	693.15	0.27%
	炉膛出口 O_2 体积分数/%	1.92	1.98	3.03%
399 MW	低压过热器出口温度/K	957.49	953.15	0.46%
	低压再热器出口温度/K	953.55	943.15	1.10%
	省煤器出口温度/K	642.82	653.15	1.58%
	炉膛出口 O_2 体积分数/%	3.27	3.30	1.51%
250 MW	低压过热器出口温度/K	864.96	843.15	2.59%
	低压再热器出口温度/K	843.19	853.15	2.35%
	省煤器出口温度/K	593.00	573.15	3.46%
	炉膛出口 O_2 体积分数/%	3.84	3.96	3.03%

由表 8 可知，数值模型对目标锅炉不同区域烟气温度与组分含量等关键参数的计算结果与实际测量值偏差较小，相对误差均保持在 4%以下，具有良好的吻合度。

3.2 不同颗粒辐射模型

3.2.1 常数模型

在大多数煤炭燃烧模拟中，燃尽率的影响往往被忽略，而炭粒的发射率则被视为一个常数。常用的发射率值包括 0.70、0.80、0.85、0.90。在本研究中，将发射率和散射因子分别设定为 0.90 和 0.60。

3.2.2 线性模型

未燃煤和飞灰的辐射特性不同。在本模型中，假设颗粒的辐射特性随燃尽比呈线性变化。颗粒的发射率和散射系数计算如下：

$$\varepsilon_{\mathrm{pn}} = 0.4U_{\mathrm{C}} + 0.6 \tag{13}$$

$$f_{\mathrm{pn}} = 0.9U_{\mathrm{C}} + 0.6(1-U_{\mathrm{C}}) \tag{14}$$

式中：U_{C} 为颗粒中未燃烧碳的比例，范围从煤颗粒的 1 到飞灰的 0。

3.2.3 普朗克平均模型

本研究采用一种普朗克平均模型考虑颗粒辐射特性随燃尽比的非线性变化，采用米氏散射理论计算了不同粒径和不同燃尽比下颗粒的光谱吸收和散射效率。然后，利用这些效率来确定普朗克平均吸收和散射效率。将普朗克平均值拟合到颗粒粒径和燃尽比的多项式函数中，拟合公式如下：

$$Q_{\mathrm{abs}}(B,D) = a_{\mathrm{abs},1} \times B^{q_{\mathrm{abs},2}} + a_{\mathrm{abs},3} \tag{15}$$

$$Q_{\mathrm{sca}}(B,D) = a_{\mathrm{sca},1} \times B^{q_{\mathrm{sca},2}} + a_{\mathrm{sca},3} \tag{16}$$

$$a_{\mathrm{abs},i} = q_{\mathrm{abs},i,1}D^3 + q_{\mathrm{abs},i,2}D^2 + q_{\mathrm{abs},i,3}D + q_{\mathrm{abs},i,4} \tag{17}$$

$$a_{\mathrm{sca},i} = q_{\mathrm{sca},i,1}D^3 + q_{\mathrm{sca},i,2}D^2 + q_{\mathrm{sca},i,3}D + q_{\mathrm{sca},i,4} \tag{18}$$

式中：a 为拟合系数，量化了粒径对吸收和散射效率的影响；B 和 D 分别为燃尽比和颗粒直径；系数 q 见表 9。

表 9 普朗克平均系数模型的多项式系数
Tab.9 Polynomial coefficients of the Planck-mean model

i	$q_{\mathrm{abs},i,1}$	$q_{\mathrm{abs},i,2}$	$q_{\mathrm{abs},i,3}$	$q_{\mathrm{abs},i,4}$
		D=1~5 μm		
1	–0.032 15	0.345 9	–1.142	–0.146 4
2	–0.171 3	2.381	–4.253	4.982
3	0.032 62	–0.358 4	1.219	0.122 4
		D=5~250 μm		
1	1.7×10^{-7}	-7.84×10^{-5}	0.011 72	–1.208
2	2.47×10^{-5}	–0.020 31	9.236	–27.31
3	-1.67×10^{-7}	7.6×10^{-5}	–0.010 40	1.270
i	$q_{\mathrm{sca},i,1}$	$q_{\mathrm{sca},i,2}$	$q_{\mathrm{sca},i,3}$	$q_{\mathrm{sca},i,4}$
		D=1~10 μm		
1	6.544×10^{-4}	–0.029 10	0.362 9	–0.733 5
2	–0.010 32	–0.481 3	14.84	–12.53
3	-3.151×10^{-4}	8.981×10^{-3}	–0.100 8	0.596 7

续表

i	$q_{sca,i,1}$	$q_{sca,i,2}$	$q_{sca,i,3}$	$q_{sca,i,4}$
		D=10~250 μm		
1	-2.761×10^{-8}	2.358×10^{-5}	-6.887×10^{-3}	0.691 1
2	1.541×10^{-4}	–0.087 58	12.62	–66.94
3	-5.681×10^{-8}	2.728×10^{-5}	-4.009×10^{-3}	0.199 8

3.3 气体和颗粒辐射的贡献率

为评估气体和粒子辐射对温度预测的影响，本节对比了 3 种不同模拟工况：1）同时考虑气体和颗粒辐射；2）仅考虑气体辐射；3）仅考虑颗粒辐射，同时采用普朗克平均模型计算颗粒的辐射特性。图 6 展示了 3 种不同情形下炉膛横截面的温度分布。预测的峰值火焰温度分别为 2 191、2 491、2 231 K，与同时考虑气体和粒子辐射的情况相比，仅考虑气体辐射时峰值火焰温度被高估了 300 K，仅考虑粒子辐射时峰值火焰温度仅被高估了 40 K。这些结果表明，对于所研究的 600 MW 煤粉炉，颗粒辐射对温度分布的影响明显大于气体辐射。此外，同时考虑气体与颗粒辐射时，来自不同燃烧器的火焰在燃烧器区域能够融合成连续的火焰结构。相比之下，忽略颗粒辐射会大幅提高煤粉的加热速率，从而改变燃烧过程并影响炉膛内的整体火焰结构。以上结果凸显了颗粒辐射的关键作用：它不仅直接决定着燃烧器区域内煤粉的加热速率，还对炉膛内燃烧场预测结果的准确性有着重要影响。

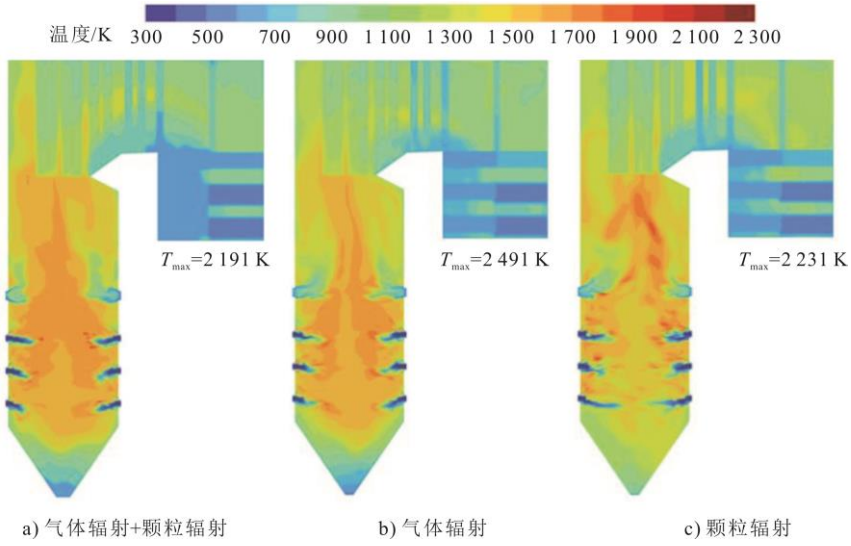


图 6 气体/颗粒单独作用或共同作用下的炉内温度分布

Fig.6 Temperature distributions inside the furnace under the individual or combined action of gas/particles

图 7 为颗粒与气体吸收系数的空间分布，以及它们沿炉膛高度的均值分布。从图 7 可明显看到，气体吸收系数比颗粒吸收系数低一个数量级，这表明颗粒辐射在炉膛中起关键主导作用。

在燃烧器出口附近，颗粒浓度相对较高且燃烧不完全，颗粒燃尽程度较低，导致颗粒吸收系数相对较大，高达 7.000 m^{-1}；在灰斗区域（0~10 m），颗粒吸收系数的平均值为 1.800 m^{-1}，而气体吸收系数的平均值为 0.052 m^{-1}；在燃烧器区域（10~25 m），颗粒吸收系数的平均值显著增加至 3.130 m^{-1}，而气体吸收系数的平均值则降至 0.041 m^{-1}；在过热空气（OFA）区域上方，颗粒吸收系数的平均值降至约 0.540 m^{-1}，而气体吸收系数的平均值保持在 0.053 m^{-1} 左右。

3.4 辐射模型对温度预测的影响

图 8 展示了分别采用常数模型、线性模型、普朗克平均模型时，中层燃烧器沿锅炉宽度与深度方向的中心截面温度分布。从结果可见：1）3 个模型计算得到的峰值火焰温度基本相当；2）与线性模型、普朗克平均模型相比，常数模型预测的炉膛中心温度略低，这意味着其模拟的火焰长度更短。该差异的根源在于：常数模型采用固定的颗粒发射率，未考虑煤粉燃尽率对颗粒辐射特性的动态影响，这直接导致模型高估了飞灰颗粒的发射率，进而造成炉膛内辐射热损失偏大，最终使火焰区域后部的温度降低；线性模型与普朗克平均模型预测的温度分布较为接近，核心原因是它们均纳入了“颗粒辐射特性随煤粉燃尽率变化”的关键影响因素，更贴合实际燃烧过程中的辐射规律。

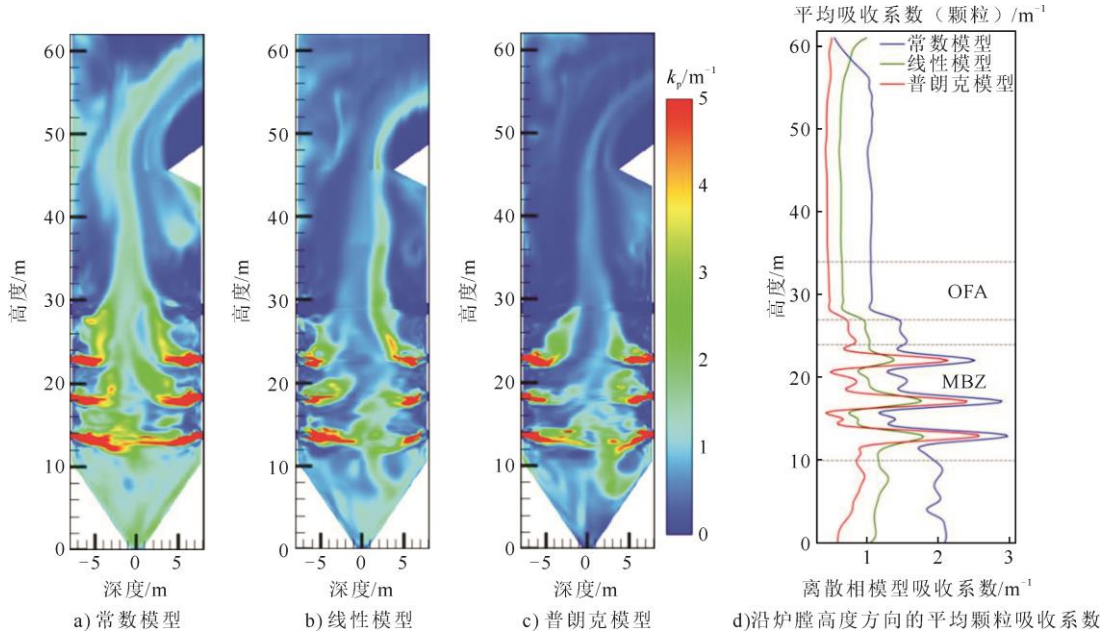


图 7 颗粒与气体的吸收系数空间分布

Fig.7 Distribution of the absorption coefficient of particles and gas

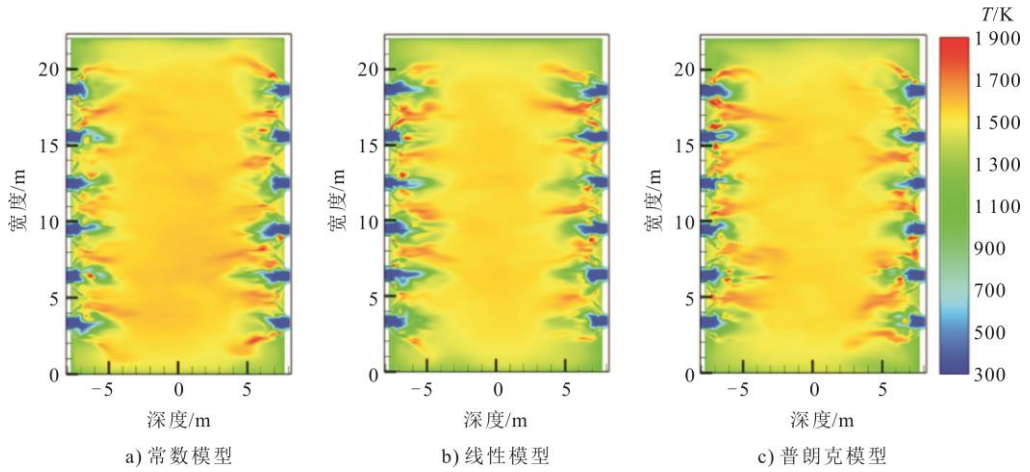


图 8 不同颗粒辐射特性模型预测的中层燃烧器中心截面温度分布

Fig.8 Temperature distributions in the central cross-section of the middle-layer burner predicted by different particle radiation characteristic models

图 9 为沿锅炉高度与深度方向上炉膛中心截面烟气温度分布，以及沿炉膛高度方向的质量平均温度分布曲线。从 3 个模型的预测结果来看，高温区域均集中在燃烧器周边，且最高温度的位置一致，均在最上层燃烧器区域与过热空气（OFA）区域的交界处。此外，各模型预测的峰值火焰温度也较为接近。在温度分布细节上，模型间的差异显著：1）普朗克平均系数模型的火焰分布最对称，而常数模型与线性模型则表现出明显差异，在炉膛前后墙附近均出现了温度不对称现象；2）常数模型预测的最高质量平均温度为 1 480 K，线性模型为 1 450 K，普朗克平均系数模型为 1 420 K。在主要换热区域，普朗克模型和线性模型得出的结果相似，最高质量平均温度均为 1 150 K，常数模型模拟结果为 1 050K。线性模型和普朗克平均模型预测的温度相当，这可能是由于煤粉在高温条件下快速燃烧，从而弱化了燃尽过程中辐射特性变化的影响。

3.5 辐射模型对传热预测的影响

图 10 展示了不同颗粒辐射特性模型计算得出的沿炉膛高度方向热流密度分布。各模型预测结果的核心差异体现在关键区域的热流密度数值与衰

减规律上：在线性模型的预测中，热流密度峰值达到 105 kW/m^2，显著高于普朗克模型（95 kW/m^2）和常数模型（100 kW/m^2），这表明线性模型高估了高温区域的辐射热流强度；进入炉膛上方换热器区域后，各模型的热流密度均呈衰减趋势，但线性模型衰减较缓慢，最终降至 55 kW/m^2，而普朗克模型衰减速率更快，预测值为 40 kW/m^2，这种差异源于线性模型无法充分考虑颗粒辐射的非线性特性；而普朗克模型的热流密度分布曲线无论在炉膛主体区域还是换热器区域，均表现出更合理的衰减趋势，尤其在换热器区域，预测值更贴近实际燃烧过程中辐射热流的衰减规律；常数模型对热流密度的整体预测值显著偏低，核心问题在于其假设颗粒吸收系数是固定不变的，这与实际燃烧中吸收系数随工况动态变化的规律不符，最终导致辐射传热计算出现较大偏差。

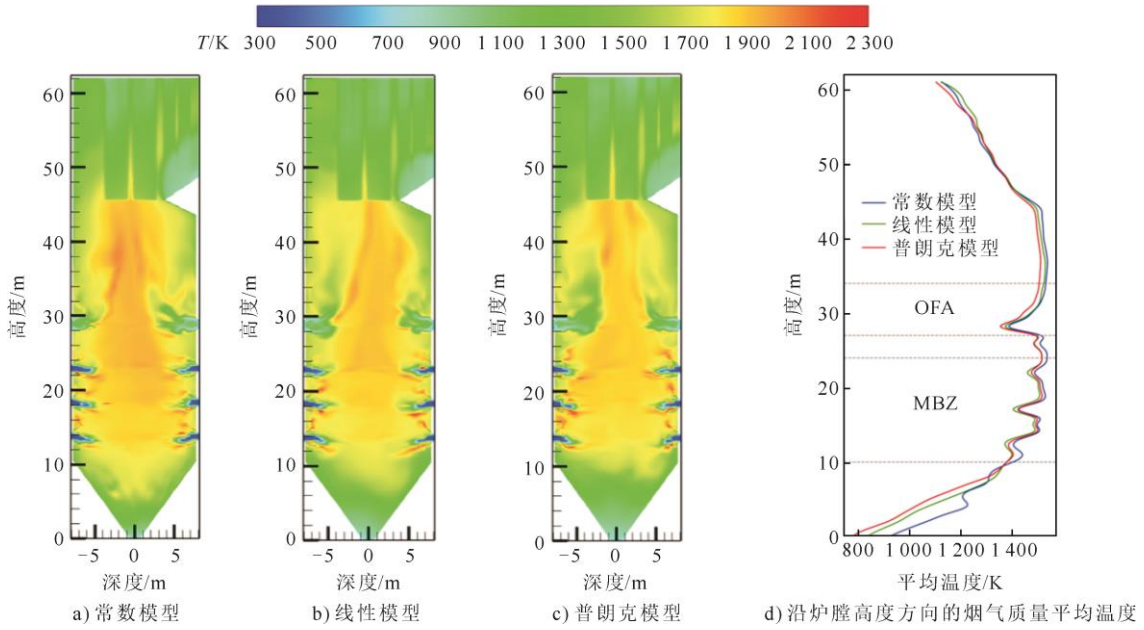


图 9 3 种颗粒辐射特性模型预测的炉膛中心截面烟气温度分布以及沿炉膛高度方向的烟气质量平均温度分布曲线

Fig.9 Flue gas temperature distributions on the furnace central cross-section and mass-averaged flue gas temperature profiles along the furnace height predicted by three models

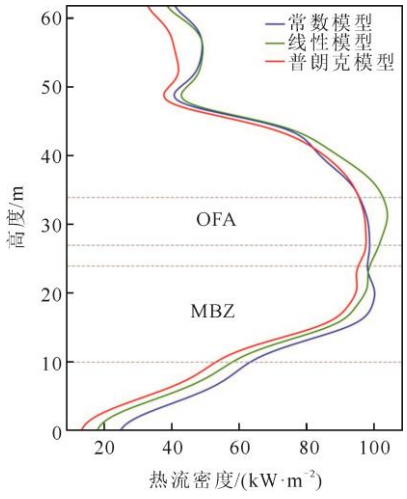


图 10 沿炉膛高度方向的炉壁平均热流密度分布

Fig.10 Distribution of the averaged heat flux on the wall along the furnace height

图 11 呈现了不同颗粒辐射特性模型计算得出的锅炉壁面热流密度分布。从图 11 可看出，3 类模型的热流密度峰值区域均集中在燃烧器区域，但模型间的分布差异十分明显。普朗克模型与线性模型的热流密度在锅炉壁面整体分布相对均匀，而常数模型的表现截然不同，其预测的侧墙热流密度低于另外 2 种模型，且热流密度峰值仅集中在前后墙的中心区域。这种分布差异的核心原因在于常数模型将颗粒辐射发射率设定为恒定值，这一设定一方面导致炉膛壁面在火焰区域的辐射热流预测值偏高，另一方面使炉内火焰形态更贴近前后墙而非均匀扩散，最终使得常数模型计算的燃烧器区域热流密度呈现前后墙分布略高于普朗克模型、线性模型，侧墙分布略低于后两者的特点，本质上，这仍是常数模型过高估计煤粉颗粒发射率导致的。

图 12 展示了不同颗粒辐射特性模型计算得出

的颗粒吸收系数空间分布特性。结合空间位置的变化，可清晰观察到模型预测结果的共性与差异：具体来看，在燃烧器出口区域，因该区域煤粉颗粒浓度较高且燃尽度较低，颗粒吸收系数整体相对较大，此时 3 种模型预测的吸收系数数值差异不大；但随着燃烧过程推进至炉膛中心火焰区及其下游区域，伴随颗粒性质从焦炭逐步向飞灰转变、颗粒燃尽度不断增加，3 种模型的预测差异开始显著显现，常数模型、线性模型、普朗克模型对炉膛中心火焰区的平均颗粒吸收系数的预测值分别为 2.34、1.33、1.13，对比数据可直接发现，常数模型的预测值远高于另外 2 种模型，即其严重高估了该区域颗粒群的吸收系数。

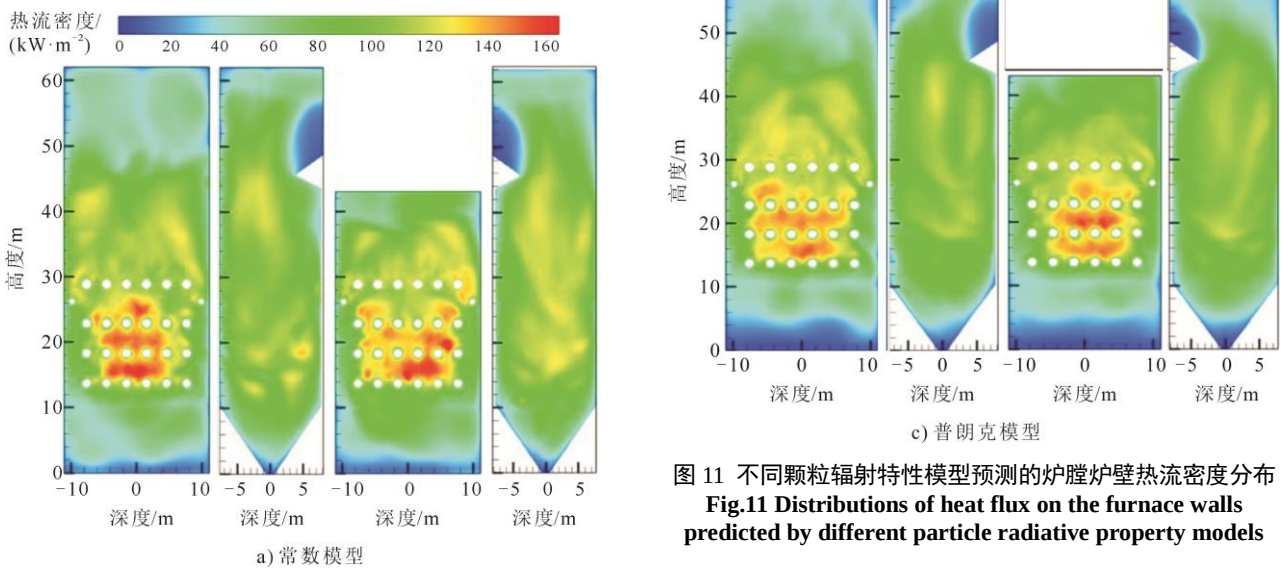


图 11 不同颗粒辐射特性模型预测的炉膛炉壁热流密度分布

Fig.11 Distributions of heat flux on the furnace walls predicted by different particle radiative property models

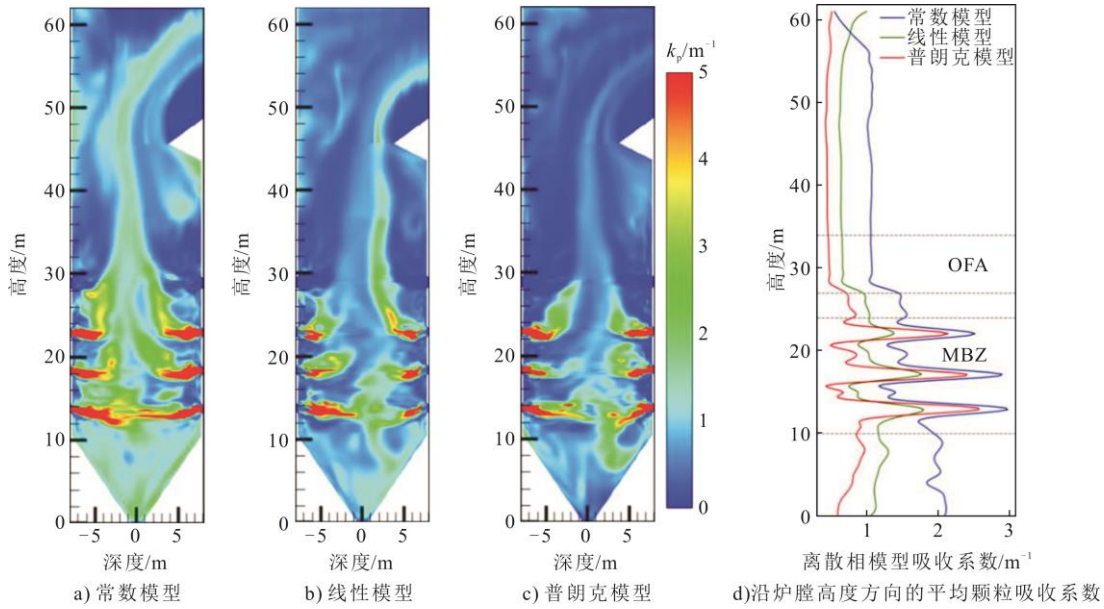


图 12 3 种颗粒辐射特性模型预测的颗粒群吸收系数空间分布

Fig.12 Distributions of particle absorption coefficients predicted by different particle radiative property models

图 13 进一步展示了 3 种颗粒辐射模型预报的颗粒群散射系数空间分布特性对比结果。从关键区域的预测数据来看，在燃烧器区域，三者的平均颗粒散射系数差异显著，常数模型为 0.15，线性模型为 0.55，普朗克平均系数模型则高达 1.11，明显可看出普朗克平均系数模型计算的散射系数结果远大于常数模型与线性模型。这种差异的根源在于各模型对燃尽度影响的处理方式不同，常数模型的颗粒散射系数始终固定，完全不随颗粒燃尽度变化，线性模型虽考虑了燃尽度对散射系数的影响，但采用的模型形式较为简化，未能充分反映实际变化规律，因此常数模型、线性模型的模拟结果均与更贴合实际的普朗克平均系数模型存在明显偏差。

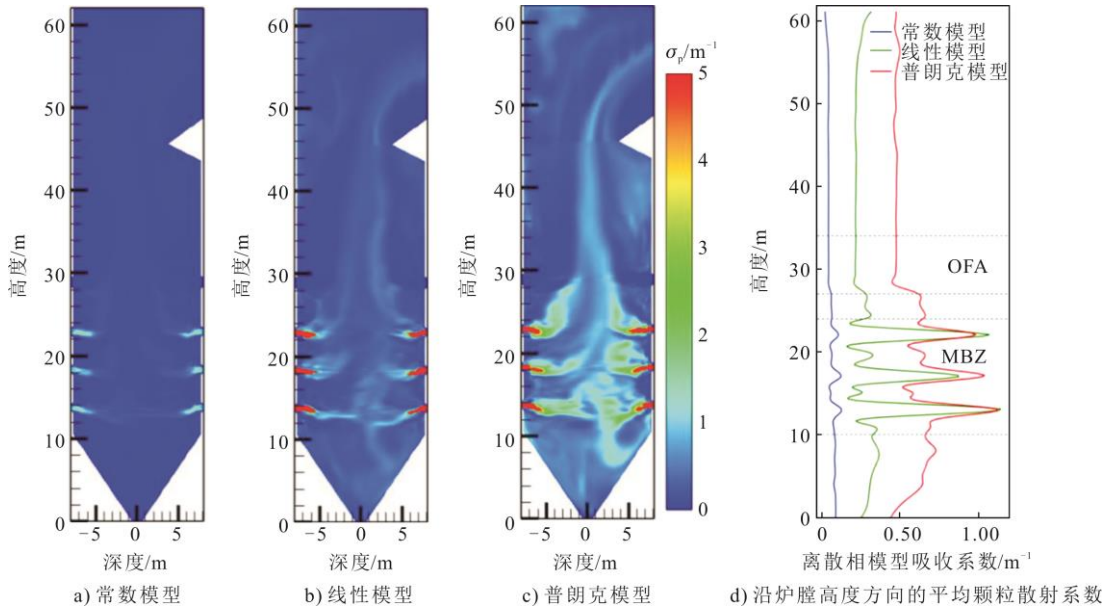


图 13 3 种颗粒辐射特性模型预报的颗粒群散射系数空间分布

Fig.13 Distributions of particle scattering coefficients predicted by different particle radiative property models

4 结 论

本文针对 600 MW 大型煤粉燃烧炉进行数值模拟，探究不同颗粒辐射特性模型对火焰温度和辐射传热预测的影响，采用 3 种模型计算颗粒的发射率和散射因子，包括恒定发射率和散射因子模型（常数模型）、随颗粒燃尽比线性变化的模型（线性模型）以及基于普朗克平均发射率和散射因子的模型（普朗克模型），得出以下结论。

1）在燃烧器区域（对应炉膛高度 10~25 m），颗粒与气体的吸收系数差异显著：平均颗粒吸收系数达 3.130 m^{-1}，而气体吸收系数仅为 0.041 m^{-1}，这一差异直接导致温度预测结果的偏差，仅考虑气体辐射时，预测的峰值火焰温度为 2 491 K，较实际情况高估 300 K；而采用气体-颗粒联合辐射的计算方式时，峰值火焰温度降至 2 191 K，更贴近实际燃烧工况。上述结果表明，在该燃烧器区域的火焰温度预测过程中不可忽略颗粒辐射的作用。

2）3 类模型对质量平均烟气温度的预测呈现明显差异：在质量平均烟气温度最大值方面，常数模型、线性模型、普朗克模型的预测值分别为 1 480、1 450、1 420 K；而进入换热器区域后，模型预测结果出现分化，普朗克模型与线性模型的预测值趋于一致，均为 1 150 K，常数模型的预测值则更低，仅为 1 050 K。

3）以普朗克模型的预测结果为基准，常数模型与线性模型对辐射传热的预测均存在高估现象：常数模型预测的壁面峰值热流密度为 100 kW/m^2，比普朗克模型的 95 kW/m^2 高出 5.3%；线性模型则对壁面峰值热流密度高估更明显，其预测值达 105 kW/m^2，比普朗克模型的预测值高出 10.5%。

[参 考 文 献]

[1] 吴国江. 电站煤粉锅炉炉膛对流换热的分析[J]. 上海交通大学学报, 1998(1): 121-123.
WU Guojiang. Analysis of convection heat transfer in pulverized-fuel boiler furnace[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1998(1): 121-123.

[2] 梁栋, 贺振宗, 毛军逵, 等. 散射对高温气体-碳黑颗

粒混合物辐射传输的影响[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(4): 588-597.
LIANG Dong, HE Zhenzong, MAO Junkui, et al. Influence of scattering effect of soot on radiative transfer in high temperature gas-soot mixtures[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(4): 588-597.

[3] BAEZ-CASTILLO L, ORTIZ-RASCÓN E, BRUCE N C, et al. Merging Mie solutions and the radiative transport equation to measure optical properties of scattering particles in optical phantoms[J]. Applied Optics, 2020, 59: 10591-10598.

[4] BUCKIUS R O, HWANG D C. Radiation properties for polydispersions: application to coal[J]. Journal of Heat Transfer, 1980, 102(1): 99-103.

[5] JOHANSSON R. Efficient treatment of non-grey radiative properties of particles and gases in modelling of radiative heat transfer in combustion environments[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 108: 519-528.

[6] MODEST M F, MAZUMDER S. Radiative heat transfer[M]. 4th ed. San Diego: Academic Press, 2022: 31-58.

[7] LI B, MAO S, ZHANG H. Laser attenuation and ranging correction in the coal dust environment based on Mie theory and phase ranging principle[J]. Atmosphere, 2023, 14(5): 845.

[8] LAUBSCHER R, ROUSSEAU P. Numerical investigation on the impact of variable particle radiation properties on the heat transfer in high ash pulverized coal boiler through co-simulation[J]. Energy, 2020, 195: 117006.1-117006.10.

[9] 张子贤, 常珂, 陈文娟, 等. 随燃尽率变化的燃煤锅炉辐射特性研究[J]. 燃烧科学与技术, 2025, 31(1): 94-103.
ZHANG Zixian, CHANG Ke, CHEN Wenjuan, et al. Radiation characteristics of coal fired boiler changing with burnout rate[J]. Combustion Science and Technology, 2025, 31(1): 94-103.

[10] KOCH M, PIELSTICKER S, TARLINSKI D, et al. Coupling radiative properties with detailed char conversion kinetics[J]. Fuel, 2024, 363: 130973.

[11] ASKARIZADEH H, PIELSTICKER S, NICOLAI H, et al. Radiation modelling considering burnout-dependent properties and cellwise non-uniform particle distributions in the numerical simulation of pulverised solid fuel combustion[J]. Fuel, 2025, 381: 133338.

[12] SINGH K, PATIL K, KUMAR P. Estimation of thermal emission from mixture of CO_2 and H_2O gases and fly-ash particles[J]. ASME Journal of Heat and Mass Transfer, 2025, 147(4): 042801.

[13] ZHANG F, YANG H, NING B S, et al. Reduced-scale experimental validation for the inapplicability of Kirchhoff's law for thermal radiation at ambient temperatures[J]. 2023. DOI: 10.2139/ssrn.4492881.

[14] YIN C. On gas and particle radiation in pulverized fuel combustion furnaces[J]. Applied Energy, 2015, 157: 554-561.

[15] GUO J, HU F, JIANG X, et al. Effects of gas and particle radiation on IFRF 2.5 MW swirling flame under oxy-fuel combustion[J]. Fuel, 2020, 263: 116634.

（责任编辑　邓玲惠）