

成鹏飞,李鹏飞,胡帆,等.煤粉无焰富氧燃烧的数值模拟方法进展[J/OL].洁净煤技术:1-12[2021-01-12].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676.TD.20201230.1803.007.html.

煤粉无焰富氧燃烧的数值模拟方法进展

成鹏飞¹, 李鹏飞¹, 胡帆¹, 刘璐¹, 王飞飞², 张健鹏³, 米建春⁴, 柳朝晖¹, 郑楚光¹

(1.华中科技大学 煤燃烧国家重点实验室, 武汉 430074; 2.华中科技大学 环境科学与工程学院, 武汉 430074;

3.四川大学 空天科学与工程学院, 成都 610065; 4.北京大学 工学院, 北京 100871)

摘要: 无焰富氧燃烧是煤粉清洁燃烧技术的前沿发展方向之一, 可在捕集高浓度 CO₂ 的同时显著降低 NO_x 排放, 并提升富氧燃烧稳定性和热力性能。计算流体力学 (CFD) 作为燃烧研究的重要手段之一, 具有快捷、成本低和数据丰富的优点, 有效促进了无焰富氧燃烧技术发展。基于笔者团队对煤粉富氧燃烧和无焰燃烧的多年研究积累, 本文对近十几年来煤粉无焰富氧燃烧 CFD 模拟方法和模拟研究进展进行了总结: 首先强调了煤粉无焰燃烧的实验和数学定义; 然后详述了煤粉无焰富氧燃烧 CFD 模拟方法进展, 并总结了煤粉无焰富氧燃烧的模拟研究情况; 最后展望了煤粉无焰富氧燃烧 CFD 研究的发展方向。

关键词: 煤粉燃烧; 富氧燃烧; 无焰燃烧; 数值模拟

中图分类号: TK16

文献标志码: A

Progress in numerical methods for flameless oxy-fuel combustion of pulverized coal

CHENG Pengfei¹, LI Pengfei¹, HU Fan¹, LIU Lu¹, WANG Feifei², ZHANG Jianpeng³, MI Jianchun⁴, LIU Zhaohui¹, ZHENG Chuguang¹

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

2.School of Environmental Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074,China;

3.School of Aerospace Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065,China;

4.College of Engineering, Peking University, Beijing 100871,China)

Abstract: As one of clean combustion technologies, the flameless oxy-fuel combustion of pulverized coal can obtain high CO₂ concentration, significantly reduce NO_x emissions, improve the combustion stability and thermal performance. Computational fluid dynamics (CFD) has the advantages of fast running, low cost, and rich data. Based on our long-term research experience on oxy-fuel and flameless combustion of pulverized coal, this paper reviews the development of the numerical methods in the flameless oxy-fuel combustion of pulverized coal. The experimental and mathematical definitions of coal flameless combustion are firstly introduced. Then the progress of the CFD methods for flameless oxy-fuel combustion of pulverized coal is discussed in detail. Next, the numerical studies on flameless oxy-coal combustion are reviewed. Some suggestions for future numerical research of the flameless oxy-coal combustion are proposed finally.

Key words: pulverized coal combustion; oxy-fuel combustion; flameless combustion; numerical simulation

收稿日期: 2020-10-08 责任编辑:

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFB0605300); 国家自然科学基金项目 (52076095)

作者简介: 成鹏飞 (1996—), 男, 山东日照人, 硕士, 研究方向为固体燃料无焰富氧燃烧。E-mail: pfcheng@hust.edu.cn

通讯作者: 李鹏飞, 男, 副教授 (博导), 主要从事无焰燃烧与富氧燃烧研究。E-mail: pfl@hust.edu.cn

0 引言

煤炭占我国 2019 年能源消费结构的 57.7%, 其基础能源地位短期不会改变。为实现我国“2030 年碳达峰, 2060 年碳中和”的目标, 碳捕集、利用与封存 (CCUS) 技术是清洁煤技术的关键战略发展方向。富氧燃烧是最具潜力的碳捕集技术之一^[1,2], 与其他碳捕集方式相比, 其在 CO₂ 减排成本、大型化和与现有技术的兼容度等方面具有优越性。该技术采用高纯度氧代替助燃空气, 并结合烟气外部再循环。化石燃料在此氛围下燃烧产生的烟气组分主要是高浓度 CO₂ 和 H₂O(g), 以较小代价冷凝压缩后可实现 CO₂ 捕集, 从而实现 CO₂ 封存或资源化利用。

虽然富氧燃烧具备碳捕集优势, 但仍需进一步改善其燃烧性能, 如 CO₂ 的高热容和稀释作用可能造成较低的绝热火焰温度、较长的着火延迟与燃尽时间, 并可能降低燃烧稳定性; 而且, 还需进一步降低富氧燃烧污染物 (如 NO_x 等) 生成。

无焰燃烧具备清洁高效优势, 该技术通过强射流卷引起的烟气内循环使反应物被充分稀释并加热至超过自燃点, 整体表现为容积式燃烧, 燃烧稳定性好, 无明显火焰锋面, 温度场、组分浓度场均匀, 热力性能好, NO_x 等污染物生成大幅降低。

因此, 为进一步实现燃煤低碳、高效与清洁利用, 可将富氧燃烧与无焰燃烧创新性地结合, 实现无焰富氧燃烧。由于两种技术均需要烟气再循环, 它们的结合存在形式上的合理性, 即无焰富氧燃烧可以同时耦合烟气外循环和内循环。烟气内循环对反应物的稀释作用是实现无焰燃烧的核心条件之一, 而富氧燃烧的烟气外循环特征可增强对反应物的初始稀释, 有利于无焰燃烧的实现与调控。无焰富氧燃烧相比常规有焰富氧燃烧方式具备优势, 此方向已引起国际燃烧界极大关注, 多位学者^[3-5]均指出无焰富氧燃烧是该领域的前瞻研究方向之一。

计算流体力学 (CFD) 以其快捷、成本低、数据丰富的优点已成为燃烧研究的重要手段之一。国内外众多学者在大量实验研究和理论分析的基础上, 对煤粉无焰富氧燃烧进行了模拟研究并获得了较为准确的结果。对不同工况的预测结果进行对比分析, 可研究燃烧过程的挥发分析出、燃烧反应及污染物生成特性, 为技术发展提供依据和指导。

为了进一步提高煤粉无焰富氧燃烧的数值模拟准确性, 推动该技术的基础科学进步和工程技术发展, 本文介绍了煤粉无焰燃烧的定义, 总结了煤

粉无焰富氧燃烧的 CFD 模拟方法和数值模拟研究进展, 并进行了研究展望。

1 煤粉无焰燃烧定义

煤粉无焰富氧燃烧是基于无焰燃烧的拓展, 因此对煤粉无焰燃烧进行准确定义是十分必要的, 这包括实验定义和数学定义。

1.1 实验定义

实验定义方面, 气体燃料的无焰燃烧定义为无可见火焰峰面, 而基于 Li 等^[6]、Weber 等^[7]和 Smart 等^[8]对煤粉无焰 (富氧) 燃烧的实验研究, 煤粉等固体燃料的无焰燃烧可定义为气相挥发分的燃烧没有明亮可见火焰锋面, 但焦炭燃尽过程可能存在零星火星, 如图 1 所示。

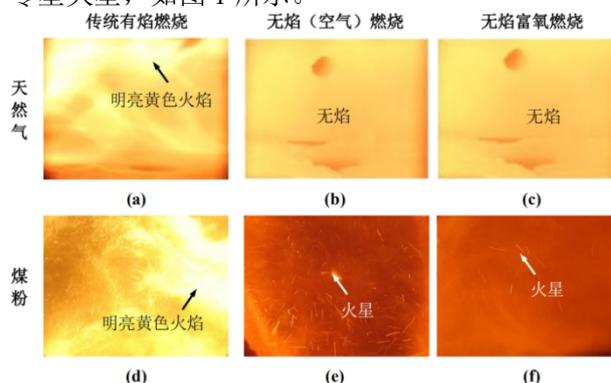


图 1 天然气和煤粉的传统有焰燃烧、无焰 (空气) 燃烧和无焰富氧燃烧^[6]

Fig.1 Traditional flame combustion, flameless (air) combustion and flameless oxy-fuel combustion of natural gas and pulverized coal

1.2 数学定义

Cavaliere 等^[9]提出了气体燃料无焰燃烧的基本数学定义: $T_u > T_i > (T_b - T_u)$, 其中, T_u 为初始混合温度, T_b 为理论燃烧温度, T_i 为燃料自燃点, $T_b - T_u$ 为燃烧过程的温升。为了更直接地指导无焰燃烧组织及揭示无焰燃烧与传统燃烧之间物理本质的区别, 众多学者还提出了以不同操作参数或无量纲数作为变量组合的气体燃料燃烧理论图谱。如 Luan 等^[10]采用了反应物温度与入口氧浓度来更直接地指导非绝热系统中的无焰燃烧组织, Wunning 等^[11]采用了炉膛温度和烟气卷吸率来揭示无焰燃烧的炉内烟气循环特征, 张扬等^[12]采用了反应物温度与达姆科勒数来揭示非绝热系统中无焰燃烧的湍流化学反应特征。由于煤粉等固体燃料的无焰燃烧过程存在颗粒的弥散、热解和非均相反应, 不能直接采用气体燃料的无焰燃烧定义和燃烧理论图谱。

Feng 等^[13]提出的煤粉燃烧模式数学判据如表 1 所示, 将煤粉无焰燃烧定义在气体燃料的基础上添加了一个新的时间尺度要求 $t_{mix} < ct_i$, 其中, t_{mix} 为颗粒从进入炉膛到均匀分布的混合时间尺度, 可采用积分涡时间尺度近似并按式 (1) 计算:

$$t_{mix} = \frac{L_L}{\left(\frac{3}{2}u_r^2\right)^{1/2}} \approx \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{l}{Iu} \quad (1)$$

L_L 、 l 、 u_r 、 u 、 I 分别为积分涡长度尺度、流场特征尺度、脉动速度、时均速度和湍流强度; t_i 为着火时间尺度, 由颗粒加热过程主导并按颗粒由初始温度 T_i 升温至着火温度 T_f 所需的时间计算, 如式(2):

$$t_i = \frac{T_f - T_i}{dT_p/dt} \quad (2)$$

dT_p/dt 为颗粒升温速率, 可通过对流换热和辐射换热理论求解, 由于颗粒升温过程中辐射换热功率低于对流换热功率的 20%, 可忽略辐射换热影响并按式 (3) 简化计算颗粒升温速率:

$$dT_p/dt = \frac{3}{r_0 \rho_c C_p} [h(T_u - T_i)] \quad (3)$$

r_0 、 ρ_c 、 C_p 、 h 分别为颗粒半径、颗粒密度、颗粒热容和对流换热系数; c 为表征混合时间尺度与着火时间尺度之间数学关系的变量, 其值与湍流的强度有关并按式 (4) 计算:

$$c = \left(L_L \frac{k^{1/2}}{\nu} \right)^{1/2} \quad (4)$$

k 、 ν 分别为湍动能和气体粘度, 积分涡长度尺度还可由流场特征尺度近似^[13]。

表 1 煤粉燃烧模式数学判据^[13]

Table.1 Mathematical criteria of coal combustion mode

条件	燃烧模式
$T_u < T_i$ & $T_b - T_u < T_i$	无反应
$T_u < T_i$ & $T_b - T_u > T_i$	反馈燃烧
$T_u > T_i$ & $T_b - T_u > T_i$	高温燃烧
$T_u > T_i$ & $T_b - T_u < T_i$ & $t_{mix} > ct_i$	高温燃烧
$T_u > T_i$ & $T_b - T_u < T_i$ & $t_{mix} < ct_i$	无焰燃烧

2 煤粉无焰富氧燃烧的 CFD 模型

煤粉无焰富氧燃烧高精度 CFD 模拟方法的研究近十几年取得了显著进展。现基于煤粉无焰富氧燃烧的物理化学过程, 以流动、传热、燃烧、污染物生成的思路, 将 CFD 模型从湍流模型、辐射模型、挥发分析出模型、均相燃烧模型、均相反应机理、焦炭燃尽模型、燃料氮转化机理和动态自适应机理算法等方面进行介绍。

需指出, 本文提及的算法、机理和子模型的应用不受软件平台的限制。文中提及的模型和算法, 如 EDC 模型、动态自适应机理算法等, 在商业软件 Fluent 和开源程序 OpenFOAM 上均可实现。

2.1 湍流模型

受计算资源限制, 现有燃烧 CFD 研究大多采用基于 Navier-Stokes 方程的雷诺平均模拟 (RANS), 其中, k - ϵ 模型的应用最为普遍。标准 k - ϵ 模型^[14]通过两个不同的输运方程确定湍流长度和时间尺度, 可以较小的计算量模拟复杂流动, 符合部分工程计算的精度要求, 在早期煤粉无焰燃烧 CFD 研究中多被采用^[15,16]。重整化 (RNG) k - ϵ 模型与标准 k - ϵ 模型相似, 但在 ϵ 方程中加了一个条件来提高精度, 并基于重整规划群理论得到 k - ϵ 方程中的常数。该模型包含低雷诺数效应和旋流修正的子模型, 可应用于复杂剪切流、旋转流、流动分离等场合, 如部分煤粉富氧燃烧模拟^[17]。可实现 k - ϵ 模型, 相较于标准 k - ϵ 模型增加了一个湍流粘性公式和新的耗散率传输方程, 能够较精确地预测平面和圆形射流扩散作用, 对旋流、回流、流动分离和二次流预测较好, 因此该模型可以更好地预测煤粉无焰燃烧的烟气强卷吸作用, 在当前煤粉无焰富氧燃烧 CFD 研究中应用较多^[18,19]。

由于 k - ϵ 模型中的 ϵ 方程包含不能在壁面计算的项, 须使用壁面函数, 包括标准壁面函数、非平衡壁面函数和增强壁面处理。标准壁面函数对平衡湍流边界层通过对数校正法提供壁面边界条件, 非平衡壁面函数可以考虑压力梯度并可计算分离、再附、撞击等问题。标准壁面函数和非平衡壁面函数都允许近壁区域使用相对较粗的网格, 但仅适用于高雷诺数流动。增强壁面处理结合了混合边界模型和两层边界模型, 适用于低雷诺数流动和复杂近壁面现象, 但网格要求较密。

燃烧模拟还可采用 k - ω 湍流模型, 包括标准 k - ω 模型和剪切压力传输 (SST) k - ω 模型, 如郭军军等^[20]的煤粉富氧燃烧模拟。该模型可较好地预测近壁区绕流和旋流, 不需要使用壁面函数, 但需在近壁区设置密集网格。

此外, 为了提高计算精度, 当前已有少数基于大涡模拟的气体燃料无焰燃烧和煤粉富氧燃烧 CFD 研究。大网格尺度直接求解、亚网格尺度 (SGS) 参数模化是湍流火焰大涡模拟的核心之一, 传统 SGS 模型假设小尺度湍流结构近似均匀且各向同性, 但实际湍流的各向异性对湍流混合层等未分辨尺度的影响使该假设可能被打破。华中科技大学 Lu 等^[21]基于甲烷/氢气无焰燃烧的大涡模拟研究提出

了非线性梯度型结构的 SGS 模型,相较于传统 SGS 模型可以捕捉湍流混合层的各向异性,从而更好地预测无焰燃烧的火焰结构。

2.2 辐射模型

P1 模型和离散坐标 (DO) 模型能同时考虑散射和气体与颗粒间的辐射换热,因此煤粉燃烧辐射模拟通常选用这两个模型之一,如涂焱杰等^[22]和 Stadler 等^[23]的煤粉无焰燃烧模拟分别采用了 P1 模型和 DO 模型。P1 模型可以在光学厚度大于 1 的场合以相对较低的计算量得到较为准确的结果;DO 模型适用广泛,考虑因素多,精度更高。气体辐射特性计算多采用灰气体加权 (WSGG) 模型,计算量小且易与 CFD 计算相结合^[20]。值得注意的是,富氧气氛下,高浓度 CO₂ 和 H₂O(g) 对气体辐射特性有显著影响,Smith 等^[24]开发的空气 WSGG 模型对气体发射率的预估偏低,需在该模型的基础上进行修正。Rehfeldt 等^[25]提出的考虑富氧气氛修正的 WSGG 模型对气体发射率的预测误差函数值相较于空气 WSGG 模型减小了 98% 以上。华中科技大学 Guo 等^[26]还提出了基于光谱 k 分布直接得到权重因子和吸收系数及改进吸收系数多项式的方法,并通过比较辐射源相和辐射热通量对模型新参数进行验证。结果表明,该方法可显著提高非等温非均质 CO₂/H₂O 混合物辐射特性的模拟精度,适用于富氧燃烧模拟。

2.3 挥发分析出模型

挥发分析出模型方面,可选择的模型有恒定速率模型、单一速率模型、两步竞争反应速率模型和化学渗透析出 (CPD) 模型。恒定速率模型认为挥发分以恒定速率析出。单一速率模型认为脱挥发分速率以一阶形式依赖于颗粒中残留挥发分含量^[27],在少数煤粉无焰燃烧 CFD 研究中被采用^[28]。两步竞争反应速率模型由 Kobayashi^[29]基于实验结果提出,通过一对平行一阶不可逆反应的两个竞争速率来控制不同温度范围内的脱挥发分并加权得到脱挥发分速率,预测精度较高。部分煤粉无焰富氧燃烧 CFD 研究采用了此模型^[18]。CPD 模型可以分析煤粉结构在快速加热过程中的物理和化学变化,计算简单且预测效果好。该模型中煤粉挥发分析出的键桥断裂和热解产物生成机制为:煤结构被假定为连接芳香族团簇的化学键桥简化晶格或网络,其中不稳定键桥 ϵ 分解产生反应键桥 ϵ^* 并通过两条竞争反应路径裂解,一条路径生成焦炭 c 和轻质气体 g_2 ,另一条路径先生成侧链 δ 并最终分解生成轻质气体 g_1 ^[16]。CPD 模型可准确预测挥发分析出速率和重烃 (焦油)、轻质气体、碳氢元素组分。该模型可考

虑单组分或多组分挥发分析出,在当前煤粉无焰及富氧燃烧 CFD 研究中被广泛采用^[20,30]。多组分析出 CPD 模型比单组分模拟效果更好,如神华烟煤析出的挥发分可被考虑为 C₂H₂、H₂O、CO₂、CH₄、CO、CH₃ 和 CH₂ 的多组分混合物。Saha 等^[31]在煤粉无焰燃烧模拟研究中评估了单一速率模型、双步竞争速率模型和 CPD 模型的预测效果。结果表明,相较于其它两种基于经验速率关系的简化全局动力学模型,CPD 模型预测结果与实验结果吻合最好。

2.4 均相燃烧模型

常用均相燃烧模型中,层流有限速率模型、涡耗散模型 (EDM) 和涡耗散概念模型 (EDC) 均是基于组分质量分数的输运方程解,反应速率以源项形式出现在组分输运控制方程中。层流有限速率模型使用 Arrhenius 公式计算化学源项,忽略湍流脉动的影响,不能准确预测具有高度非线性 Arrhenius 化学动力学的湍流火焰。EDM 模型和 EDC 模型在燃烧 CFD 研究中应用较为广泛。早期煤粉无焰及富氧燃烧 CFD 研究多采用 EDM 模型耦合总包反应机理^[16,32]。EDM 模型是快速反应模型,忽略化学反应时间尺度,反应速率仅由湍流混合中的大涡混合时间尺度 k/ϵ 控制,燃烧在湍流出现时 ($k/\epsilon > 0$) 即可进行,不需要外加点火源。该模型假设每一步的反应速率相同,因此只能处理一步或两步总包反应机理,而不能耦合基于 Arrhenius 速率的多步反应机理来预测化学动力学控制的活性自由基和中间组分。由于煤粉无焰及富氧燃烧中发生有限速率反应,存在强烈的湍流化学相互作用,基于快速反应模型的模拟误差较大,当前煤粉无焰及富氧燃烧 CFD 研究多采用基于有限速率反应的 EDC 模型耦合总包或详细反应机理^[33,34]。EDC 模型假设反应发生在小湍流结构的精细涡中 (又称为良好尺度),这些结构在 Kolmogorov 尺度均匀混合,使湍流耗散变为热量。湍流精细结构的容积比率 ϵ^* 和流体在该结构中的特征停留时间尺度 τ^* 按式 (5)、(6) 计算:

$$\epsilon^* = C_\xi \left(\frac{\nu \epsilon}{k^2} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (5)$$

$$\tau^* = C_\tau \left(\frac{\nu}{\epsilon} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

其中, ϵ^* 表示良好尺度数量, ν 为运动粘度, C_ξ 为容积比率常数 2.1377, C_τ 为时间尺度常数 0.4083。精细涡中的燃烧被视为发生在定压反应器中,初始条件取单元中当前的组分和温度,反应进行的时间为 τ^* ,由 Arrhenius 速率控制。化学反应源项 R_i ,即流

体内组分 i 的平均化学反应速率最终由式(7)得出:

$$R_i = \frac{\rho(\varepsilon^*)^2}{\tau^* [1 - (\varepsilon^*)^3]} (Y_i^* - Y_i) \quad (7)$$

其中, Y_i^* 为经过 τ^* 反应时间后的组分 i 质量分数。值得注意的是, 式(3)的反应速率计算在低湍流雷诺数下 ($Re_t < 65$) 可能出现过早点火的问题, 可通过修正 EDC 模型常数解决。Shiehnejadhesar 等^[35] 还提出了基于层流有限速率与湍流反应速率的权重来计算低雷诺数下有效反应速率的方法。实际无焰燃烧的温度梯度和组分浓度梯度低、反应速率低、反应区域分布广, 因此可能需要修正 EDC 模型参数来捕捉极低氧水平下分布式无焰燃烧的反应特征。Li 等^[36] 在无焰燃烧模拟研究中将 C_τ 由 0.4083 增大至 1.5 或 3.0 来降低模拟反应速率, 提高预测精度; Evans 等^[37] 将 C_τ 和 C_ξ 分别由 0.4083、2.1377 修正为 3.0、1.0, 显著改善了无焰燃烧模拟性能; Parente 等^[38] 还进一步推导了 C_τ 和 C_ξ 与无量纲 Re 数、Damkohler(Da) 数的显式关联, 如式(8)、(9):

$$C_\tau \propto \frac{1}{Da \eta \sqrt{Re_t + 1}} \quad (8)$$

$$C_\xi \propto Da \eta^2 (Re_t + 1)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

且结果亦表明, 应增大 C_τ 值、减小 C_ξ 值来表征低 Re 数和 Da 数的无焰燃烧体系。相较于 EDM 模型, EDC 模型可以考虑湍流与化学反应交互, 耦合高精度详细反应机理还可进一步提升精度并预测中间组分。Vascellari 等^[39]、Lupant 等^[40] 和 Jin 等^[41] 的煤粉无焰燃烧模拟研究均表明: 相较于 EDM 模型, EDC 模型的宏观模拟结果与实验值吻合更好, 且微观尺度下对湍流化学相互作用的预测更加准确; 详细反应机理的模拟结果优于总包机理。火焰面模型和组分输运 PDF 模型也是常用的燃烧模型, 虽然其在煤粉富氧燃烧模拟中有部分应用, 但目前在煤粉无焰燃烧模拟中应用较少。

2.5 均相反应机理

无焰及富氧燃烧需采用针对性开发和验证的反应机理。富氧气氛下, 高浓度 CO_2 主要通过反应 $CO_2 + H \leftrightarrow CO + OH$ 和 $CH_2 + CO_2 \leftrightarrow CH_2O + CO$ 影响反应路径, CO 浓度显著增加^[42]。华中科技大学 Hu 等^[43] 详细地比较验证了 7 种版本的 JL 总包反应机理在不同燃烧氛围的预测效果, 发现其针对甲烷无焰富氧燃烧自主修正的机理相对于其它机理, 可以显著改善无焰富氧燃烧中主要组分浓度的预测。针对富氧气氛, 他们还基于大量富氧燃烧实验, 采用误差函数方法对 7 种详细反应机理的预测效果进行

定量评估, 并在综合预测能力最佳的 USC-Mech II 详细机理的基础上进行了系统地机理简化与验证, 得到了仅包含 22 种组分和 19 步反应的简化机理, 简化后的机理经实验验证适用于富氧燃烧模拟^[42]。

2.6 焦炭燃尽模型

煤粉挥发分析出后的焦炭与氧化剂发生气固非均相燃烧, 由于焦炭的多孔性结构, 燃烧可能发生在颗粒外部表面或内部气孔表面。常用焦炭燃尽模型包括内部控制反应速率 (intrinsic) 模型、多步表面反应模型、动力学/扩散控制模型和燃尽动力学 (CBK) 模型。基于 Simth 宏观孔隙模型^[44] 的 intrinsic 模型仅包含一步焦炭氧化反应, 反应速率同时考虑氧化剂向颗粒表面的扩散和内在化学动力学的影响, 多被用于早期煤粉无焰燃烧 CFD 研究^[16,45]。实际煤粉无焰燃烧存在强烈的烟气再循环, 气相中 O_2 浓度被高度稀释, CO_2 和 $H_2O(g)$ 浓度高, 因此气化反应对焦炭燃尽有重要影响, 单一氧化反应机制的 intrinsic 模型对无焰燃烧的模拟精度可能受限。多步表面反应模型可以考虑焦炭燃尽的一步氧化反应和两步气化反应, 对低 O_2 、高 CO_2 和 $H_2O(g)$ 氛围下的焦炭燃尽过程模拟效果较好, 因此在当前煤粉无焰燃烧 CFD 研究中被广泛应用^[34,46]。动力学/扩散控制模型假设表面反应速率同时受扩散过程和反应动力学的影响, 且燃烧过程中颗粒尺寸不变, 颗粒密度随反应的进行而逐渐减小。部分煤粉无焰燃烧 CFD 研究采用了此模型^[47]。基于 intrinsic 模型发展而来的 CBK 模型包含对热失活及灰分抑制的定量描述, 最有可能接近真实燃尽率, 但未考虑 CO 对氧化反应的抑制作用和焦炭气化反应的影响。华中科技大学通过修正该模型的物性参数、扩散系数和反应机理, 使该模型更适用于富氧燃烧模拟^[48]。

2.7 燃料氮转化机理

煤粉燃烧 NO_x 预测通常采用半经验的后处理模拟方法。相比于 NO_x 后处理, 耦合含氮详细反应机理的有限速率模拟可以考虑煤粉无焰燃烧再循环烟气中的初始 NO 对着火的加速作用和湍流-化学- NO 反应交互, 从而准确预测着火和主反应区, 并得到含氮中间组分分布和燃料氮转化路径^[49]。在实际燃烧 CFD 模拟中, 含氮详细反应机理的组分和反应数较多, 直接应用于模拟计算成本较高, 因此可进行机理简化。华中科技大学 Hu 等^[49] 基于大量实验数据开发了一种适用于空气和富氧气氛的燃料氮骨架反应机理, 并结合有限速率 EDC 模型模拟研究了 IFRF 煤粉无焰燃烧。相比于原始反应机理, 该骨架机理经验证可在不显著降低计算精度

的条件下实现约 18.6 倍的计算加速。将该燃料氮骨架机理应用于煤粉无焰燃烧模拟可精确预测 NO 生成，获得如图 2 和图 3 所示的含氮组分分布和燃料氮转化路径。图 2 显示的含氮组分分布包含了燃料氮关键中间组分 NH₃ 和 HCN 分布，可为燃料氮原位抑制技术提供支撑。图 3 中的数字和箭头颜色表示各路径反应速率。

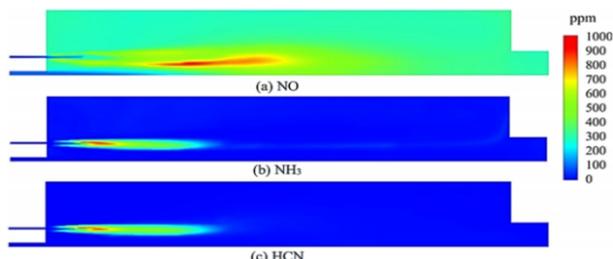


图 2 含氮组分分布：(a) NO，(b) NH₃，(c) HCN^[49]

Fig.2 In-furnace distributions of nitrogen components: (a) NO,

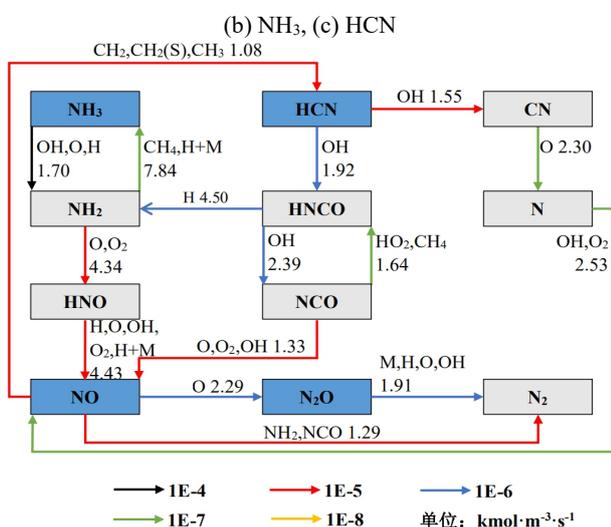


图 3 煤粉无焰燃烧燃料氮转化路径^[49]

Fig.3 Fuel-N conversion path of flameless coal combustion

2.8 动态自适应机理算法

燃烧时的火焰化学成分在不同区域差别很大，因此不必在模拟全程使用统一的反应动力学机理。动态自适应机理算法可将详细机理在当地简化为精确子机理，实现计算加速。其主要流程如下：①选择目标组分 A，通过直接关系图法在每个网格单元内按式 (10) 计算非目标组分 B 对目标组分 A 生成的贡献：

$$r_{AB} = \frac{\max_i (v_{A,i} \omega_i \delta_{B,i})}{\max_i (v_{A,i} \omega_i)} v_{A,i} \quad (10)$$

$$\delta_{B,i} = \begin{cases} 1, & \text{如果第 } i \text{ 步反应包含组分 B} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

其中， ω_i 为基元反应 i 的化学反应速率， $v_{A,i}$ 为 A 组分在反应 i 中的化学计量数。当 $r_{AB} > \varepsilon$ (ε 为指定误差) 时组分 B 被保留在动态机理中。每个非目标

组分对目标组分 A 生成的贡献都要被计算。②采用相同的方法确定目标组分的间接贡献组分，如果第一步中的非目标组分 B 被保留，再计算其余非目标组分 K 对组分 B 的贡献 r_{BK} ，如果 $r_{BK} > \varepsilon$ ，则保留 K 组分。③将所有与保留组分无关的反应机理从总机理中去除，得到每个网格单元的当地简化机理。简化后的求解方程变为低维常微分方程，从而缩短计算时间。煤粉无焰燃烧 CFD 研究中可采用耦合详细反应机理的有限速率模拟来提高预测精度，但组分数、反应数较多的详细反应机理可能导致实际计算过程较为耗时，因此可采用动态自适应机理算法实现计算加速。华中科技大学刘璐等^[50]在耦合燃料氮骨架机理与动态自适应反应机理算法的 IFRF 煤粉无焰燃烧模拟研究中发现：炉内速度场、温度场、组分浓度场的模拟结果与实验数据吻合较好，验证了动态自适应反应机理算法在燃烧模拟研究中的可行性与准确性；燃烧活跃反应和活跃组分分布如图 4 所示，由该图得出，主反应区在活跃反应数和组分数较多的给粉管下游混合区位置；相比于骨架机理，耦合动态自适应反应机理算法可进一步实现 6.94 倍计算加速，该骨架机理相较于原始详细反应机理已实现 18.6 倍的加速，因此，相较于原始机理，耦合骨架机理与动态自适应机理算法可在不显著降低计算精度的条件下实现约 126 倍的计算加速。

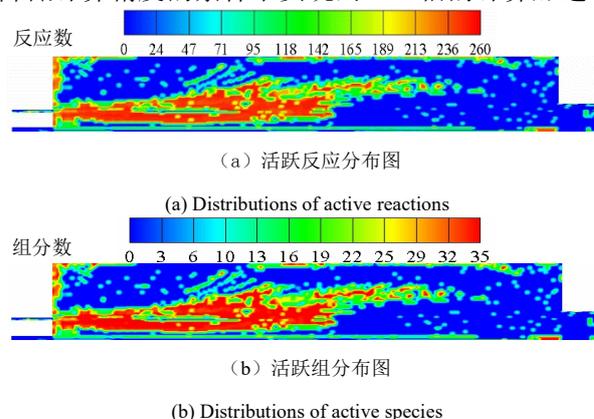


图 4 动态自适应机理算法的活跃反应和活跃组分分布图^[50]

Fig.4 Distributions of active reactions and species in dynamic adaptive mechanism algorithm

3 煤粉无焰富氧燃烧模拟研究进展

国内外众多学者对煤粉无焰富氧燃烧的基准实验、微观反应区域分析、宏观反应特征、污染物生成、工业应用优化等进行了大量数值模拟研究。

3.1 基准实验

IFRF 是最早研究无焰燃烧的机构之一，Weber 等^[7]和 Schaffel 等^[16]先后基于 0.58 MW 煤粉无焰燃烧炉进行了相同工况下的燃烧实验和数值模拟，测

得温度场、速度场、组分浓度场的实验和模拟结果基本一致。由于该研究详细给定了边界条件、计算域和实验数据，便于进行模拟验证，之后许多学者在煤粉无焰燃烧模拟研究中以该 IFRF 燃烧炉为模拟对象，通过对比相同工况的模拟和实验数据来验证 CFD 模型的可靠性。

3.2 微观反应区域分析

通过数值模拟研究，可对煤粉无焰燃烧状态和反应特征进行微观反应区域分析。Jin 等^[41]在基于 IFRF 无焰燃烧炉的模拟研究中定量分析了煤粉无焰燃烧的微观特征，根据湍流非预混火焰的不同状态，用计算得到的 Damkohler (Da_t)数和 Karlovitz (Ka)数将煤粉无焰燃烧状态定量描述为 $Da_t < 10$ 且 $Ka \gg 1$ ，这证明煤粉无焰燃烧为缓慢化学反应并在整个燃烧炉中分布式进行。华中科技大学 Zhang 等^[51]在基于 IFRF 无焰燃烧炉的模拟研究中从微观角度分析了射流条件（预热温度、速度）对均相燃烧反应和焦炭非均相燃尽反应的影响，并以 Da_t 、 Da_{O_2} 、 Da_{CO_2} 、 Da_{H_2O} 分别代表均相反应、焦炭与 O_2 反应、焦炭与 CO_2 反应、焦炭与 H_2O 反应的无量纲 Da 数来描述湍流化学相互作用。结果表明： Da_t 峰值在所有工况下均低于 0.65，且随着流速的增大而减小，但由于预热温度对湍流扩散和化学动力学的双重作用， Da_t 几乎不受预热温度的影响； Da_{O_2} 、 Da_{CO_2} 和 Da_{H_2O} 分别在 0.5-1.0、0.002-0.012 和 0.0004-0.003 范围内，因此焦炭氧化反应由扩散/动力学机制决定，焦炭气化反应则由湍流扩散效应主导；在高射流速度和预热温度条件下，燃料和氧化剂射流的汇合使焦炭燃尽反应提前受到湍流扩散的影响。

3.3 宏观反应特征

不同工况条件对煤粉无焰富氧燃烧的着火特性、燃烧特性（气化反应特性、流场、温度场、组分浓度场等）、燃尽特性有显著影响。钟莹等^[47]在基于自主设计的小型煤粉无焰燃烧炉的模拟研究中发现初始氧化剂条件对燃烧特性影响显著：相较于 O_2/N_2 和 O_2/Ar 气氛， O_2/CO_2 气氛下混合和回流强度高，温度场和组分浓度场均匀；预热温度升高可均匀炉内温度场并提高燃烧效率和燃尽率； O_2 体积分数增大会导致炉内温度升高且不利于温度均匀；射流速度升高可以增强炉内射流混合而且有利于实现无焰燃烧。Stadler 等^[23]在基于 40 kW 煤粉无焰燃烧炉的模拟研究中发现：燃烧过程的焦炭气化反应份额随燃烧温度的升高而升高；温度场受气化反应的影响可忽略不计。Saha 等^[52,53]在基于 60 kW 无焰燃烧炉的模拟研究中发现：氧化剂 O_2 浓度或射流雷诺数的升高使挥发分析出速率增加，射流

雷诺数提高还会降低总体碳消耗率。涂垚杰等^[22]在基于华中科技大学 0.3 MW 煤粉炉的模拟研究中发现：高温预热不是实现煤粉无焰燃烧的必要条件；相较于双喷嘴对称布置，单喷嘴偏心布置的射流流量集中，烟气再循环强烈，回流距离远，有利于无焰燃烧的建立，这在 Li 等^[6]基于该台架的模拟和实验研究中得到直观显示，如图 5 所示。梅振锋等^[46,54]在基于 IFRF 燃烧炉的无焰燃烧模拟研究中发现一次风速对炉内温度分布影响显著：当一次风与二次风平行或背离入射时，一次风速提高可以增强射流卷吸并延迟燃料与空气的混合，降低峰值温度，有助于建立无焰燃烧，但速度过高可能会破坏一次风和二次风分离所产生的富燃和富氧区域，导致高温区。Zhang 等^[19]在基于 IFRF 燃烧炉的无焰富氧燃烧模拟研究中发现气化反应对燃烧反应特征影响显著：焦炭在空气或 O_2/CO_2 气氛下的气化反应份额均超过 50%；着火特性方面，空气或 CO_2/O_2 气氛下的焦炭气化反应均会增加点火延迟，特别是 CO_2/O_2 气氛；燃烧特性方面，气化反应导致火焰温度在空气和 O_2/CO_2 气氛下分别降低约 50 K 和 80 K；焦炭燃尽方面，气化反应使煤焦表面结构被破坏而产生额外的孔隙，反应表面积增大，从而加快了燃尽反应速率，使初级燃烧区的燃尽率略有提高，一定程度上弥补了低 O_2 浓度对焦炭燃尽的抑制作用。此外，Zhang 等^[55]还发现 CO_2 和 $H_2O(g)$ 的物理化学性质对无焰富氧燃烧的温度及传热特性影响显著： CO_2 和 $H_2O(g)$ 的气化反应、热容和热辐射特性均会导致燃烧温度降低，且随着 $H_2O(g)$ 含量的增加，气化反应和热容特性的影响逐渐减弱，热辐射特性的影响逐渐增强； $H_2O(g)$ 含量的增加会减弱总传热效果并提高热辐射份额。Tu 等^[56]在基于 IFRF 燃烧炉的无焰富氧燃烧模拟研究中发现：随着 $O_2/CO_2/H_2O(g)$ 气氛中 $H_2O(g)$ 的增加， $H_2O(g)$ 相较于 CO_2 的低热容等特性导致的燃烧温升会增大烟气体积并增强烟气内循环，挥发分 H_2 和 CO 含量的增加会促进煤粉着火， $H_2O(g)$ 与 CO_2 的焦炭气化反应竞争会促进 H_2 生成并抑制 CO 生成。Kuang 等^[57]在基于 IFRF 燃烧炉的无焰富氧燃烧模拟研究中还发现：射流速度过高会增加 CO 排放，这是由于烟气停留时间降低，且高 CO_2 浓度抑制了 CO 转化；在换热方面，射流速度升高会显著增强对流换热，而炉内温度下降，但更均匀的温度分布和更强烈的对流换热可能会弥补温度降低导致的辐射热损失。

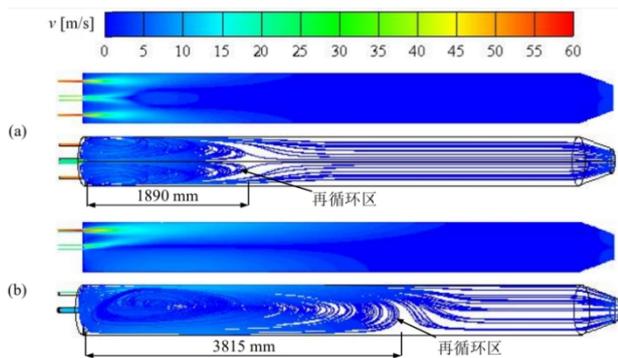


图5 不同无焰燃烧器流场：(a) 双喷嘴对称二次风 (b) 单喷嘴偏心二次风^[6]

Fig.5 Flow fields of different flameless burner: (a) symmetrical secondary streams; (b) asymmetric secondary stream.

3.4 污染物生成

煤粉无焰燃烧可显著降低 NO_x 排放；煤粉无焰（空气）燃烧 NO_x 生成以燃料型 NO 为主，热力型 NO 、快速型 NO 和 N_2O 中间体路径较少，可忽略不计， NO 再燃还原不可忽略；富氧气氛下无空气氮源，因此煤粉无焰富氧燃烧的 NO_x 生成均为燃料型 NO ，且由于 CO_2 和 $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$ 对燃烧反应特性影响显著，富氧气氛下燃料 N 向 NO 的转化率及 NO 再燃还原效果与空气相比有所差别^[58]；不同初始条件对煤粉无焰（富氧）燃烧 NO_x 的生成有显著影响。Saha 等^[31]在基于 15 kW 无焰燃烧炉的模拟研究中发现：通过 NO 再燃还原，褐煤和黑煤的 NO 排放总量分别减少了 47% 和 39%。Mei 等^[46,59]在基于 IFRF 无焰燃烧炉的模拟研究中发现：总燃料 N 转化为 NO 的比例相比于有焰燃烧减少了一半以上；相较于二次风速，一次风速对 NO 排放影响显著，当一次风速由 26 m/s 提高至 67 m/s 时，主反应区氧浓度显著降低，从而强烈抑制了燃料 N 向 NO 的转换，使 NO 排放降低了 200 ppm；燃料射流角或喷嘴间距的提高会降低 NO 排放，当射流角由 -10° （相对入射）变为 $+10^\circ$ （背离入射），射流卷吸增强，燃料型 NO 降低了 96 ppm，当喷嘴间距由 0.1 m 增加至 0.6 m，一、二次风汇流区向下游移动且峰值温度降低，出口 NO 排放降低了 147 ppm。Wang 等^[60]在基于 IFRF 无焰燃烧炉的煤粉掺混生物质无焰燃烧的模拟研究中发现：富氧气氛或生物质混燃均有利于减少煤粉无焰燃烧的 NO_x 排放，当生物质掺混比例由 0 至 30%，无焰（空气）燃烧的 NO_x 排放减少了 73 ppm，无焰富氧燃烧减少了 141 ppm。

3.5 大型化锅炉概念设计

通过数值模拟研究，可对基于煤粉无焰燃烧的大型工业锅炉进行燃烧器设计和工况优化。例如，Schaffel 等^[61]通过数值模拟方法对 130 MW 无焰燃

烧锅炉进行了概念设计，并对燃烧器间的距离和喷嘴位置进行了优化。Adamczyk 等^[62]提出了 1000 MW 大型煤粉无焰富氧燃烧锅炉的概念设计并通过 CFD 模拟筛选了不同几何构型中的最优结果。锅炉系统的几何结构如图 6 所示，包含 8 个相同的由散热屏隔开的炉段，每个炉段独立点火以便控制锅炉负荷。对于富氧燃烧的组织，与传统富氧燃烧中氧化剂与再循环烟气的混合方式不同，该燃烧系统中的氧化剂是单独射流，而燃料由再循环烟气送入炉膛。对于无焰燃烧的实现，燃料、氧化剂喷嘴布置在锅炉顶壁并相隔一定距离来延迟混合，由其喷嘴截面积所确定的射流速度（40-70 m/s）及炉顶的烟气出口布置方式均导致了炉内强烈的烟气内部再循环并延长了燃料停留时间。他们还研究了不同过量氧系数和烟气循环率下的燃烧效率，将模拟结果嵌入整体工艺流程模型中，总能效相较于标准富氧燃烧电厂预计提高 3% 以上。

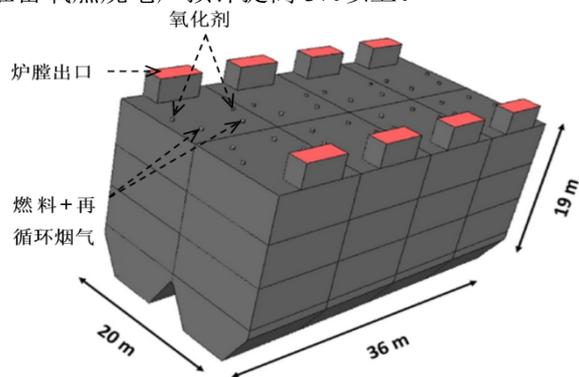


图6 1000 MW 煤粉无焰富氧燃烧锅炉几何结构图^[62]

Fig.6 Geometric structure of 1000 MW flameless oxy-coal combustion boiler

4 煤粉无焰富氧燃烧 CFD 研究展望

大涡模拟是煤粉无焰富氧燃烧模拟研究的重要发展方向。当前煤粉燃烧模拟大都基于雷诺平均方法，虽可以较小计算量模拟高雷诺数的复杂流动，但不能反映湍流细节和瞬时信息。大涡模拟的精度和计算量介于雷诺平均模拟和直接数值模拟之间，既可以得到相较于雷诺平均模拟更多的诸如大尺度涡结构的瞬时信息，又可使计算成本远低于直接数值模拟。目前国内外已有气体燃料无焰燃烧和煤粉富氧燃烧的大涡模拟研究，并耦合了火焰面、EDM、EDC、组分输运 PDF 等多种燃烧模型，如 Li 等^[63]的甲烷无焰燃烧模拟采用了大涡模拟耦合 EDC 模型或部分搅拌反应器 (PaSR) 模型，Zhou 等^[64]的 CH_4/H_2 无焰燃烧模拟采用了大涡模拟耦合组分输运 PDF 模型，Wen 等^[65]的煤粉富氧燃烧模拟采用了大涡模拟耦合三混合分数火焰面模型，

Edge 等^[66]的煤粉富氧燃烧模拟采用了大涡模拟耦合 EDM 模型。对煤粉无焰富氧燃烧的大涡模拟研究目前还鲜有报道,但随着计算资源的发展和计算精度要求的提高,未来可利用大涡模拟获得煤粉无焰富氧燃烧的更多细节特征。

燃烧模型方面,火焰面进程变量(FPV)模型和组分输运 PDF 模型均为煤粉无焰富氧燃烧模拟可探索的发展方向。FPV 模型引入了进程变量,经验证可考虑无焰燃烧中烟气稀释对温和反应的影响。该模型计算基于预建表和查表进行,计算速度相对较快,因此可望应用于煤粉无焰富氧燃烧工程优化模拟。组分输运 PDF 模型可完备考虑湍流脉动对有限速率反应的影响,也是煤粉无焰富氧燃烧模拟的发展方向之一。基于该模型,一方面可探索不同小尺度混合模型对煤粉无焰富氧燃烧的适应性,另一方面可进行煤粉无焰富氧燃烧的 RANS 及大涡模拟研究。目前已有应用 FPV 模型和组分输运 PDF 模型的气体燃料无焰及富氧燃烧模拟研究,如 Ihme 等^[67]和 Zhou 等^[64]的无焰燃烧模拟分别采用了 FPV 模型和组分输运 PDF 模型。

详细反应机理及其动态自适应模拟是煤粉无焰富氧燃烧模拟的又一发展方向。总包反应机理虽可以较低的计算成本预测燃烧过程主要组分的变化趋势,但无法预测中间自由基,无法捕捉诸如点火和熄火等过程的细节信息。将详细反应机理用于有限速率反应模拟可获得中间组分,模拟精度高、信息全面,且通过适当的机理简化或动态自适应机理算法还可在保证模拟精度的同时降低计算成本^[49,50]。当前已有部分气体燃料无焰及富氧燃烧的详细反应机理模拟,如 Cao 等^[68]的无焰燃烧模拟。

最后,为了推动煤粉无焰富氧燃烧技术的工业化应用,还应继续开展基于大型工业锅炉的 CFD 研究,对大型化燃烧器设计和锅炉技术参数进行优化调整。如前文所述的 Schaffel 等^[61]和 Adamczyk 等^[62]分别进行了 130 MW 无焰燃烧锅炉和 1000 MW 大型煤粉无焰富氧燃烧锅炉的概念设计,并通过 CFD 模拟进行了优化分析。

5 结语

无焰富氧燃烧方式不仅可改善富氧燃烧热力性能,还可在获得高浓度 CO₂ 烟气的同时显著降低 NO_x 生成。本文综述了煤粉无焰富氧燃烧数值模拟方法研究进展,总结如下:

(1) 由于存在非均相反应,煤粉无焰燃烧的实验和数学定义与气体燃料存在较大区别。

(2) 数值模拟方法方面,煤粉无焰富氧燃烧

模拟已在网格划分、湍流模型、辐射模型、挥发分析出模型、均相燃烧模型、均相反应机理、焦炭燃尽模型、燃料氮转化机理和动态自适应反应机理算法等方面取得了显著进展。

(3) 基于上述数值方法进展,已在基准对照实验、微观反应区域分析、宏观反应特征、污染物生成及大型化锅炉概念设计等方面开展大量研究。

(4) 开展大涡模拟、采用 FPV 或组分输运 PDF 模型、耦合高精度详细反应机理及动态自适应机理算法、进行工业应用优化,是煤粉无焰富氧燃烧模拟研究的重要发展方向。

参考文献

- [1] DUAN Yuanqiang, DUAN Lunbo, WANG Jia, et al. Observation of simultaneously low CO, NO_x and SO₂ emission during oxy-coal combustion in a pressurized fluidized bed[J]. Fuel, 2019, 242: 374-381.
- [2] WANG Chengxin, BI Haobo, JIANG Xuedan, et al. Experimental study on ignition and combustion of coal-rice husk blends pellets in air and oxy-fuel conditions[J]. Journal of the Energy Institute, 2020, 93(4): 1544-1558.
- [3] YIN Chungen, YAN Jinyue. Oxy-fuel combustion of pulverized fuels: combustion fundamentals and modeling[J]. Applied Energy, 2016, 162: 742-762.
- [4] CHEN Lei, YONG Sze Zheng, GHONIEM Ahmed F. Oxy-fuel combustion of pulverized coal: characterization, fundamentals, stabilization and CFD modeling[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2012, 38(2): 156-214.
- [5] 刘沁雯, 钟文琪, 邵应娟, 等. 固体燃料流化床富氧燃烧的研究动态与进展[J]. 化工学报, 2019, 70(10): 3791-3807.
- [6] LIU Qinwen, ZHONG Wenqi, SHAO Yingjuan, et al. Research trends and recent advances of oxy-fuel combustion of solid fuels in fluidized beds[J]. CIESC Journal, 2019, 70(10): 3791-3807.
- [7] LI Pengfei, WANG Feifei, TU Yaojie, et al. Moderate or intense low-oxygen dilution oxy-combustion characteristics of light oil and pulverized coal in a pilot-scale furnace[J]. Energy & Fuels, 2014, 28: 1524-1535.
- [8] WEBER Roman, SMART John P, KAMP Willem Vd. On the (MILD) combustion of gaseous, liquid, and solid fuels in high temperature preheated air[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2004, 30(2): 2623-2629.
- [9] SMART John P, RILEY Gerry S. Combustion of coal in a flameless oxidation environment under oxyfuel firing conditions: the reality[J]. Journal of the Energy Institute, 2012, 85: 131-134.

- [9] CAVALIERE Antonio, JOANNON Mara De. Mild combustion[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2004, 30(4): 329-366.
- [10] LUAN Congcong, XU Shunta, SHI Bing, et al. Re-recognition of the MILD combustion regime by initial conditions of T_{in} and XO_2 for methane in a nonadiabatic Well-Stirred Reactor[J]. Energy & Fuels, 2020, 34(2): 2391-2404.
- [11] WUNNING Joachim Alfred, WUNNING Joachim Georg. Flameless oxidation to reduce thermal NO-Formation[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1997, 23: 81-94.
- [12] 张扬, 张琦, 吴玉新, 等. 基于 PSR 的非绝热 MILD 燃烧研究[J]. 工程热物理学报, 2018, 40(1): 231-234.
- ZHANG Yang, ZHANG Qi, WU yuxin, et al. On non-adiabatic MILD combustion based on the PSR model[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2018, 40(1): 231-234.
- [13] FENG Lele, ZHANG Qi, WU Yuxin, et al. Theoretical analysis on the criteria of MILD coal combustion[J]. Energy & Fuels, 2019, 33: 11923-11931.
- [14] LAUNDER Brian, SPALDING Dudley Brian. Lectures in mathematical models of turbulence. Academic Press, London, England, 1972.
- [15] KIM Ju Pyo, SCHNELL U, SCHEFFKNECHT G, et al. Numerical modelling of MILD combustion for coal[J]. Progress in Computational Fluid Dynamics, 2007, 7(6): 337-346.
- [16] SCHAFFEL Natalia, MANCINI Marco, SZLEK Andrzej, et al. Mathematical modeling of MILD combustion of pulverized coal[J]. Combustion and Flame, 2009, 156(9): 1771-1784.
- [17] ÁLVAREZ Lucia, GHAREBAGHI Maryam, POURKASHANIAN Mohamed, et al. CFD modelling of oxy-coal combustion in an entrained flow reactor[J]. Fuel Processing Technology, 2011, 92(8): 1489-1497.
- [18] LIU Ruo chen, AN Enke, WU Kun, et al. Numerical simulation of oxy-coal MILD combustion with high-velocity oxygen jets[J]. Journal of the Energy Institute, 2017, 90(1): 30-43.
- [19] ZHANG Zewu, LU Bowen, ZHANG Liqi, et al. Computational study on the effect of gasification reaction on pulverized coal MILD combustion diluted by N_2 and CO_2 [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 158: 113806.
- [20] 郭军军, 胡帆, 蒋旭东, 等. 0.5 MW 富氧燃烧煤粉炉循环倍率对辐射传热的影响[J]. 工程热物理学报, 2019, 40(1): 223-228.
- GUO Junjun, HU Fan, JIANG Xudong, et al. Effect of flue gas recycle ratio on radiative heat transfer in a 0.5 MW oxy-fuel combustion furnace[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2019, 40(1): 223-228.
- [21] LU Hao, ZOU Chun, SHAO Shujing, et al. Large-eddy simulation of MILD combustion using partially stirred reactor approach[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37(4): 4507-4518.
- [22] 涂垚杰, 刘豪, 赵然, 等. 0.3 MW 煤粉炉 MILD 燃烧的数值计算[J]. 燃烧科学与技术, 2013, 19(5): 444-451.
- TU Yaojie, LIU Hao, ZHAO Ran, et al. Numerical calculation of MILD combustion for pulverized coal on 0.3 MW furnace[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2013, 19(5): 444-451.
- [23] STADLER Hannes, TOPOROV Dobrin, FORSTER Malte, et al. On the influence of the char gasification reactions on NO formation in flameless coal combustion[J]. Combustion and Flame, 2009, 156(9): 1755-1763.
- [24] SMITH T F, SHEN Z F, FRIEDMAN J N. Evaluation of coefficients for the weighted sum of gray gases model[J]. Journal of Heat Transfer, 1982, 104(4): 602-608.
- [25] REHFELDT Sebastian, KUHR Christian, EHMANN Martin, et al. Modeling of radiative properties of an Oxyfuel atmosphere with a weighted sum of gray gases for variable carbon dioxide and water vapor concentrations[J]. Energy Procedia, 2011, 4: 980-987.
- [26] GUO Junjun, LI Xiangyu, HUANG Xiaohong, et al. A full spectrum k-distribution based weighted-sum-of-gray-gases model for oxy-fuel combustion[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 90: 218-226.
- [27] BADZIOCH S, HAWKSLEY P G W. Kinetics of thermal decomposition of pulverized coal particles[J]. Industrial & Engineering Chemistry Process Design & Development, 1970, 9(4): 521-530.
- [28] MAO Zhihui, ZHANG Liqi, ZHU Xinyang, et al. Investigation on coal moderate or intense low-oxygen dilution combustion with high-velocity jet at pilot-scale furnace[J]. Applied Thermal Engineering. 2017, 111: 387-396.
- [29] BOCKELIE M J, DENISON M K, CHEN Z, et al. CFD modeling for entrained flow gasifiers for Vision 21 energyplex systems[A]. Proceedings of the 19th annual international Pittsburgh Coal Conference[C], Pittsburgh, PA, USA, 2002, 24-26.
- [30] 熊彪, 李鹏飞, 郭军军, 等. 半焦掺混煤粉 MILD 燃烧的数值模拟及分析[J]. 燃烧科学与技术, 2018, 24(5): 407-412.
- XIONG Biao, LI Pengfei, GUO Junjun, et al. Numerical

- simulation and analysis of MILD combustion of residual char blended with pulverized coal[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2018, 24(5): 407-412.
- [31] SAHA Manabendra, CHINNICI Alfonso, DALLY Bassam B, et al. Numerical study of pulverized coal MILD combustion in a self-recuperative furnace[J]. *Energy & Fuels*, 2015, 29: 7650-7669.
- [32] CHUI Eddy H, DOUGLAS Mark A, TAN Yewan. Modeling of oxy-fuel combustion for a western Canadian sub-bituminous coal[J]. *Fuel*, 2003, 82(10): 1201-1210.
- [33] CUI Kai, LIU Bing, WU Yuxin, et al. Numerical simulation of oxy-coal combustion for a swirl burner with EDC model[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2014, 22(2): 193-201.
- [34] KUANG Yucheng, HE Boshu, TONG Wenxiao, et al. Numerical simulation of pulverized coal MILD-oxy combustion under different oxygen concentrations[J]. *Journal of the Energy Institute*, 2020, 93(4): 1713-1725.
- [35] SHIEHNEJADHESAR Ali, MEHRABIAN Ramin, SCHARLER Robert, et al. Development of a gas phase combustion model suitable for low and high turbulence conditions[J]. *Fuel*, 2014, 126(12): 177-187.
- [36] LI Pengfei, WANG Feifei, MI Jianchun, et al. A Parente. Mechanisms of NO formation in MILD combustion of CH₄/H₂ fuel blends[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(33): 19187-19203.
- [37] EVANS Michael J, MEDWELL Paul R, TIAN Zhao F. Modeling lifted jet flames in a heated coflow using an optimized Eddy Dissipation Concept model[J]. *Combustion Science and Technology*, 2015, 187(7): 1093-1109.
- [38] PARENTE Alessandro, MALIK Mohammad Rafi, CONTION Francesco, et al. Extension of the Eddy Dissipation Concept for turbulence/chemistry interactions to MILD combustion[J]. *Fuel*, 2016, 163: 98-111.
- [39] VASCELLARI Michele, CAU Giorgio. Influence of turbulence-chemical interaction on CFD pulverized coal MILD combustion modeling[J]. *Fuel*, 2012, 101: 90-101.
- [40] LUPANT Delphine, LYBAERT Paul. Assessment of the EDC combustion model in MILD conditions with in-furnace experimental data[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 75: 93-102.
- [41] JIN Xudong, ZHOU Yuegui. Numerical analysis on microscopic characteristics of pulverized coal moderate and intense low-oxygen dilution combustion[J]. *Energy & Fuels*, 2015, 29: 3456-3466.
- [42] HU Fan, LI Pengfei, GUO Junjun, et al. Evaluation, development, and validation of a new reduced mechanism for methane oxy-fuel combustion[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2018, 78: 327-340.
- [43] HU Fan, LI Pengfei, GUO Junjun, et al. Global reaction mechanisms for MILD oxy-combustion of methane[J]. *Energy*, 2018, 147: 839-857.
- [44] SMITH I W. The combustion rates of coal chars: A review[J]. *Symposium on Combustion*, 1982, 19(1): 1045-1065.
- [45] 安恩科, 冯祥, 张浏骏, 等. 煤粉无焰燃烧的数值模拟[J]. *同济大学学报(自然科学报)*, 2014, 42(7): 1105-1110.
- AN Enke, FENG Xiang, Zhang Liujun, et al. Numerical simulation of pulverized-coal flameless combustion[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2014, 42(7): 1105-1110.
- [46] MEI Zhenfeng, LI Pengfei, WANG Feifei, et al. Influences of reactant injection velocities on moderate or intense low-oxygen dilution coal combustion[J]. *Energy & Fuels*, 2014, 28: 369-384.
- [47] 钟莹. 煤粉无焰燃烧的基础实验研究及数值模拟[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [48] 皮理刚. 富氧燃烧条件下焦炭燃尽过程的数值模拟研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [49] HU Fan, LI Pengfei, WANG Kai, et al. Evaluation, development, and application of a new skeletal mechanism for fuel-NO formation under air and oxy-fuel combustion[J]. *Fuel Processing Technology*, 2020, 199: 106256.
- [50] 刘璐, 李鹏飞, 胡帆, 等. 基于动态自适应反应机理的煤粉无焰燃烧 NO_x 生成数值模拟[A]. 中国工程热物理学会 [C].
- [51] ZHANG Zewu, LU Bowen, ZHAO Zhengong, et al. Heterogeneous reactions behaviors of pulverized coal MILD combustion under different injection conditions[J]. *Fuel*, 2020, 275: 117925.
- [52] SAHA Manabendra, DALLY Bassam B, MEDWELL Paul R, et al. Burning characteristics of Victorian brown coal under MILD combustion conditions[J]. *Combustion and Flame*, 2016, 172: 252-270.
- [53] SAHA Manabendra, DALLY Bassam B, CHINNICI Alfonso, et al. Effect of co-flow oxygen concentration on the MILD combustion of pulverised coal[J]. *Fuel Processing Technology*, 2019, 193: 7-18.
- [54] 梅振锋, 王飞飞, 张健鹏, 等. 一次风风速对高温预热空气下的煤粉 MILD 燃烧的影响[J]. *工程热物理学报*, 2014, 35(4): 782-786.
- MEI Zhenfeng, WANG Feifei, ZHANG Jianpeng, et al. Effect

- of primary air stream velocity on MILD combustion of pulverized coal in high temperature preheated air[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2014, 35(4): 782-786.
- [55] ZHANG Zewu, LI Xiaoshan, ZHANG Liqi, et al. Effect of H₂O/CO₂ mixture on heat transfer characteristics of pulverized coal MILD-oxy combustion[J]. *Fuel Processing Technology*, 2019, 184: 27-35.
- [56] TU Yaojie, LIU Hao, SU Kai, et al. Numerical study of H₂O addition effects on pulverized coal Oxy-MILD combustion[J]. *Fuel Processing Technology*, 2015, 138: 252-262.
- [57] KUANG Yucheng, HE Boshu, TONG Wenxiao, et al. Effects of oxygen concentration and inlet velocity on pulverized coal MILD combustion[J]. *Energy*, 2020, 198: 117376.
- [58] STADLER Hannes, CHRIST Dominik, HABERMEHL Martin, et al. Experimental investigation of NO_x emissions in oxycoal combustion[J]. *Fuel*, 2011, 90(4): 1604-1611.
- [59] MEI Zhengfei, LI Pengfei, MI Jianchun, et al. Diffusion MILD combustion of firing pulverized-coal at a pilot furnace[J]. *Flow Turbulence Combust*, 2015, 95: 803-829.
- [60] WANG Xuebin, ZHANG Jiaye, XU Xinwei, et al. Numerical study of biomass co-firing under oxy-MILD mode[J]. *Renewable Energy*, 2020, 146: 2566-2576.
- [61] SCHAFFEL-MANCINI Natalia, MANCINI Marco, SZLEK Andrzej, et al. Novel conceptual design of a supercritical pulverized coal boiler utilizing high temperature air combustion (HTAC) technology[J]. *Energy*, 2010, 35(7): 2752-2760.
- [62] ADAMCZYK Wojciech P, BIALECKI Ryszard A, DITARANTO Mario, et al. CFD modeling and thermodynamic analysis of a concept of a MILD-OXY combustion large scale pulverized coal boiler[J]. *Energy*, 2017, 140: 1305-1315.
- [63] LI Zhiyi, TOMASCH Stefanie, CHEN Zhi X., et al. Study of MILD combustion using LES and advanced analysis tools[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2020.
- [64] ZHOU Hua, YANG Tianwei, DALLY Bassam, et al. LES/TPDF investigation of the role of reaction and diffusion timescales in the stabilization of a jet-in-hot-coflow CH₄/H₂ flame[J]. *Combustion and Flame*, 2020, 211: 477-492.
- [65] WEN Xu, Hendrik NICOLAI, Henrik SCHNEIDER, et al. Flamelet LES of a swirl-stabilized multi-stream pulverized coal burner in air and oxy-fuel atmospheres with pollutant formation[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2020.
- [66] EDGE Penelope J, GUBBA Sreenivasa Rao, MA Lin, et al. LES modelling of air and oxy-fuel pulverised coal combustion-impact on flame properties[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(2): 2709-2716.
- [67] IHME Matthias, ZHANG Jian, HE Guowei, et al. Large-Eddy simulation of a Jet-in-Hot-Coflow burner operating in the oxygen-diluted combustion regime[J]. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2012, 89(3): 449-464.
- [68] CAO Zhenjun, ZHU Tong. Effects of CO₂ dilution on methane ignition in moderate or intense low-oxygen dilution (MILD) combustion: a numerical study[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2012, 20(4): 701-709.