文章编号：1008－8857(2022)01－0016－07　**DOI**: 10.13259/j.cnki.eri.2022.01.003

基于多场协同理论的炉膛燃烧传热分析

郭开放，曾卓雄，徐晓东，程　恒，公　雪
（上海电力大学 能源与机械工程学院，上海 200090）

摘　要：为了探究炉膛传热性能，利用场协同理论对不同条件下的炉膛燃烧流场进行了分析。结果表明：在炉膛燃烧区壁面附近及中心部分区域，协同角 α 较小，而介于这两部分的大块区域，协同角 α 较大。协同角 β 大的区域占比相对较大。在整个燃烧区域，尤其是喷口附近，协同角 γ 较大，且分布比较均匀。协同角 φ 分布也比较均匀，大角度 φ 主要集中在壁面附近。在炉膛中心大部分区域以及炉膛顶部及折焰角处协同角 θ 较大，但是在喷口附近，协同角 θ 较小。

关键词：场协同；燃烧；数值模拟；炉膛
中图分类号：TK223.23　　**文献标志码**：A

Analysis of heat transfer and combustion flow in the furnace based on multi-field synergy theory

GUO Kaifang，ZENG Zhuoxiong，XU Xiaodong，CHENG Heng，GONG Xue
(College of Energy and Mechanical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: The heat transfer performance under different conditions was analyzed by the field synergy theory to explore the combustion flow field in the furnace. The results showed that smaller synergy angle α was found near the wall and in the center of combustion zone, while larger synergy angle α was observed in the large zone between these two parts. The zone with larger synergy angle β accounted for a relatively large fraction. In the whole combustion zone, especially near the nozzles, the distribution of larger angle γ was more uniform. The distribution of angle φ was also relatively uniform, and the large angle φ was concentrated near the wall. The larger synergy angle θ was distributed in most parts of the furnace center as well as the top and the furnace arch. But near the nozzles, the synergy angle θ was smaller.

Keywords: field synergy; combustion; numerical simulation; furnace

随着我国化石能源利用的不断增加，快速上升的氮氧化物排放量对环境造成了严重的破坏。控制和减少煤燃烧产生的 NO_x，主要是控制燃料型 NO_x 的生成。由于烟气脱硝装置投资和运行

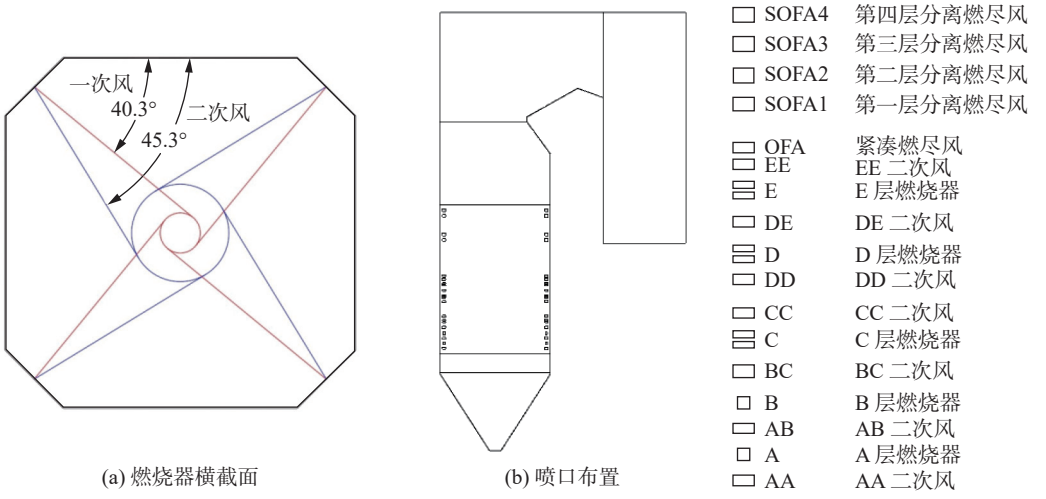
收稿日期：2020－05－04
基金项目：国家重点研发计划项目 (2018YFB0604204)
第一作者：郭开放 (1993—)，男，硕士研究生。研究方向：流动传热与燃烧。
E-mail：suepguokaifang@163.com

费用都十分昂贵，国际上的主流研究方向之一是采用低 NO_x 燃烧技术。王鹏涛等[1]分析了三次风比对 NO_x 排放的影响规律。王康等[2]研究了不同煤粉细度及煤粉体积浓度对 NO_x 生成的影响，结果表明煤粉细度的减小明显降低了 NO_x 的体积分数。赵星海等[3]结合空气分级及富氧燃烧技术，对锅炉炉内温度场以及 NO_x 排放特性进行了数值模拟。刘建全等[4]对不同结构的燃烧器 NO_x 生成特性进行了对比，分析了不同运行因素对 NO_x 排放特性的影响。张秀霞[5]通过实验研究了锅炉分级燃烧中将一部分热风作为火下风(below fire air, BFA)与空气分级及燃料分级相结合的的燃烧技术，获得了使 NO_x 排放量最低的最佳配风量。Ribeirete 等[6]评估了空气分级对锅炉整体性能以及污染物排放的影响，通过实验得到了最佳过量空气系数。Houshfar 等[7]通过实验研究了不同燃料、不同分级燃烧的规律，获得了最低 NO_x 排放量时的工况。王文洁等[8]以 75 $t\cdot h^{-1}$ 循环流化床锅炉为研究对象，采用数值模拟方法对其物料流动与燃烧时 NO_x 排放特性进行了研究。

炉膛内煤粉燃烧是极为复杂的过程，涉及诸如煤粉燃烧流动、传热传质等许多物理化学过程。场协同理论从流场、压力场和温度场相互配合的角度重新审视传热的物理机制，能够统一认识现有传热现象的物理本质，取得了较好的应用效果，但其在锅炉燃烧中的应用极少，因此有必要结合场协同理论分析炉膛整体流动及 NO_x 排放。

1　计算对象

某 330 MW 的四角切圆锅炉采用浓淡分离直流型燃烧器和同心反切燃烧技术组织燃烧，一次风在炉膛中心形成一个顺时针小切圆，二次风在外围形成一个逆时针大切圆。一次风喷口 A、B 内浓外淡，C、D、E 下浓上淡；与一次风相间布置的二次风喷口共有 7 个。在主燃烧区上部有 1 层紧凑燃尽风(OFA)和 4 层分离燃尽风(SOFA)。基准工况下喷口无摆角。燃烧器横截面及喷口布置如图 1 所示。锅炉燃用煤的煤质特性如表 1 所示，表中：$Q_{net,\ ar}$ 为低位发热量；M_{ar}、A_{ar}、V_{ar}、F_{car} 分别为水分、挥发分、灰分、固定碳质量分数；C_{ar}、H_{ar}、O_{ar}、N_{ar}、S_{ar} 分别为碳、氢、氧、氮、硫元素质量分数。



(a) 燃烧器横截面　　(b) 喷口布置

图 1　燃烧器横截面及喷口布置

Fig. 1　Cross section of burner and the nozzle layout

表 1　煤质特性

Tab. 1　Coal property

工业分析				元素分析					$Q_{net,ar}/(MJ\cdot kg^{-1})$
M_{ar}	A_{ar}	V_{ar}	F_{car}	C_{ar}	H_{ar}	O_{ar}	N_{ar}	S_{ar}	
13.10	14.73	32.34	39.83	57.57	3.18	10.79	0.52	0.11	21.43

2 计算模型及条件

采用混合分数/概率密度函数模拟气相湍流燃烧，湍流模型为 RNG k–ε 模型，采用 P1 辐射模型计算辐射传热，P1 辐射模型中发射率（黑度）为 0.6，采用双平行反应模型模拟煤粉挥发分的析出，采用动力扩散控制燃烧模型模拟焦炭燃烧，采用随机轨道方法跟踪煤粉颗粒。压力–速度耦合的求解方法为 SIMPLE 方法，对流项为二阶中心差分，扩散项为二阶迎风差分。

基于多场协同理论，各协同角表达式分别为

$$\alpha=\arccos\frac{|U\cdot\nabla u|}{|U||\nabla u|}=\arccos\left|\frac{u\dfrac{\partial u}{\partial x}+v\dfrac{\partial u}{\partial y}+w\dfrac{\partial u}{\partial z}}{\sqrt{u^2+v^2+w^2}\sqrt{\left(\dfrac{\partial u}{\partial x}\right)^2+\left(\dfrac{\partial u}{\partial y}\right)^2+\left(\dfrac{\partial u}{\partial z}\right)^2}}\right| \tag{1}$$

$$\beta=\arccos\frac{|U\cdot\nabla T|}{|U||\nabla T|}=\arccos\left|\frac{u\dfrac{\partial T}{\partial x}+v\dfrac{\partial T}{\partial y}+w\dfrac{\partial T}{\partial z}}{\sqrt{u^2+v^2+w^2}\sqrt{\left(\dfrac{\partial T}{\partial x}\right)^2+\left(\dfrac{\partial T}{\partial y}\right)^2+\left(\dfrac{\partial T}{\partial z}\right)^2}}\right| \tag{2}$$

$$\gamma=\arccos\frac{|\nabla T\cdot\nabla u|}{|\nabla T||\nabla u|}=\arccos\left|\frac{\dfrac{\partial T}{\partial x}\cdot\dfrac{\partial u}{\partial x}+\dfrac{\partial T}{\partial y}\cdot\dfrac{\partial u}{\partial y}+\dfrac{\partial T}{\partial z}\cdot\dfrac{\partial u}{\partial z}}{\sqrt{\left(\dfrac{\partial T}{\partial x}\right)^2+\left(\dfrac{\partial T}{\partial y}\right)^2+\left(\dfrac{\partial T}{\partial z}\right)^2}\sqrt{\left(\dfrac{\partial u}{\partial x}\right)^2+\left(\dfrac{\partial u}{\partial y}\right)^2+\left(\dfrac{\partial u}{\partial z}\right)^2}}\right| \tag{3}$$

$$\varphi=\arccos\frac{|\nabla p\cdot\nabla u|}{|\nabla p||\nabla u|}=\arccos\left|\frac{\dfrac{\partial p}{\partial x}\cdot\dfrac{\partial u}{\partial x}+\dfrac{\partial p}{\partial y}\cdot\dfrac{\partial u}{\partial y}+\dfrac{\partial p}{\partial z}\cdot\dfrac{\partial u}{\partial z}}{\sqrt{\left(\dfrac{\partial p}{\partial x}\right)^2+\left(\dfrac{\partial p}{\partial y}\right)^2+\left(\dfrac{\partial p}{\partial z}\right)^2}\sqrt{\left(\dfrac{\partial u}{\partial x}\right)^2+\left(\dfrac{\partial u}{\partial y}\right)^2+\left(\dfrac{\partial u}{\partial z}\right)^2}}\right| \tag{4}$$

$$\theta=\arccos\frac{|U\cdot\nabla p|}{|U||\nabla p|}=\arccos\left|\frac{u\dfrac{\partial p}{\partial x}+v\dfrac{\partial p}{\partial y}+w\dfrac{\partial p}{\partial z}}{\sqrt{u^2+v^2+w^2}\sqrt{\left(\dfrac{\partial p}{\partial x}\right)^2+\left(\dfrac{\partial p}{\partial y}\right)^2+\left(\dfrac{\partial p}{\partial z}\right)^2}}\right| \tag{5}$$

式中：T 为温度；p 为压力；u、v、w 分别为 X、Y、Z 三个方向的速度分量；α 为速度矢量 U 与速度梯度 ∇u 之间的协同角，β 为速度矢量 U 与温度梯度 ∇T 之间的协同角，γ 为温度梯度 ∇T 与速度梯度 ∇u 之间的协同角，φ 为压力梯度 ∇p 与速度梯度 ∇u 之间的协同角，θ 为速度矢量 U 与压力梯度 ∇p 之间的协同角。

一次风从 A、B、C、D 层燃烧器喷入，E 层燃烧器停用。二次风喷口、紧凑燃尽风喷口、分离燃尽风喷口全开。采用均等配风方式，总风量为 353.7 $m^3\cdot s^{-1}$，总煤量为 36.8 $kg\cdot s^{-1}$，其中燃烧器喷口的煤粉浓淡比为 7:3。一次风率为 21%，二次风率为 49%，燃尽风率为 30%。按照电厂实验数据给定锅炉边界条件，一次风进口温度为 343 K，二次风和燃尽风进口温度为 614 K，冷灰斗底部壁面平均温度为 472 K，炉膛壁面平均温度为 654 K，过热器区域烟道壁面平均温度为 792 K，再热器区域烟道壁面平均温度为 696 K，省煤器区域烟道壁面平均温度为 549 K。炉膛整体为规则形状，采用结构化网格处理。为减小计算中的伪扩散，将炉膛主燃区横截面划分为辐射状，对燃烧器喷口附近区域进行加密处理，并进行了网格无关性验证，网格数目约为 190 万。

3　结果分析

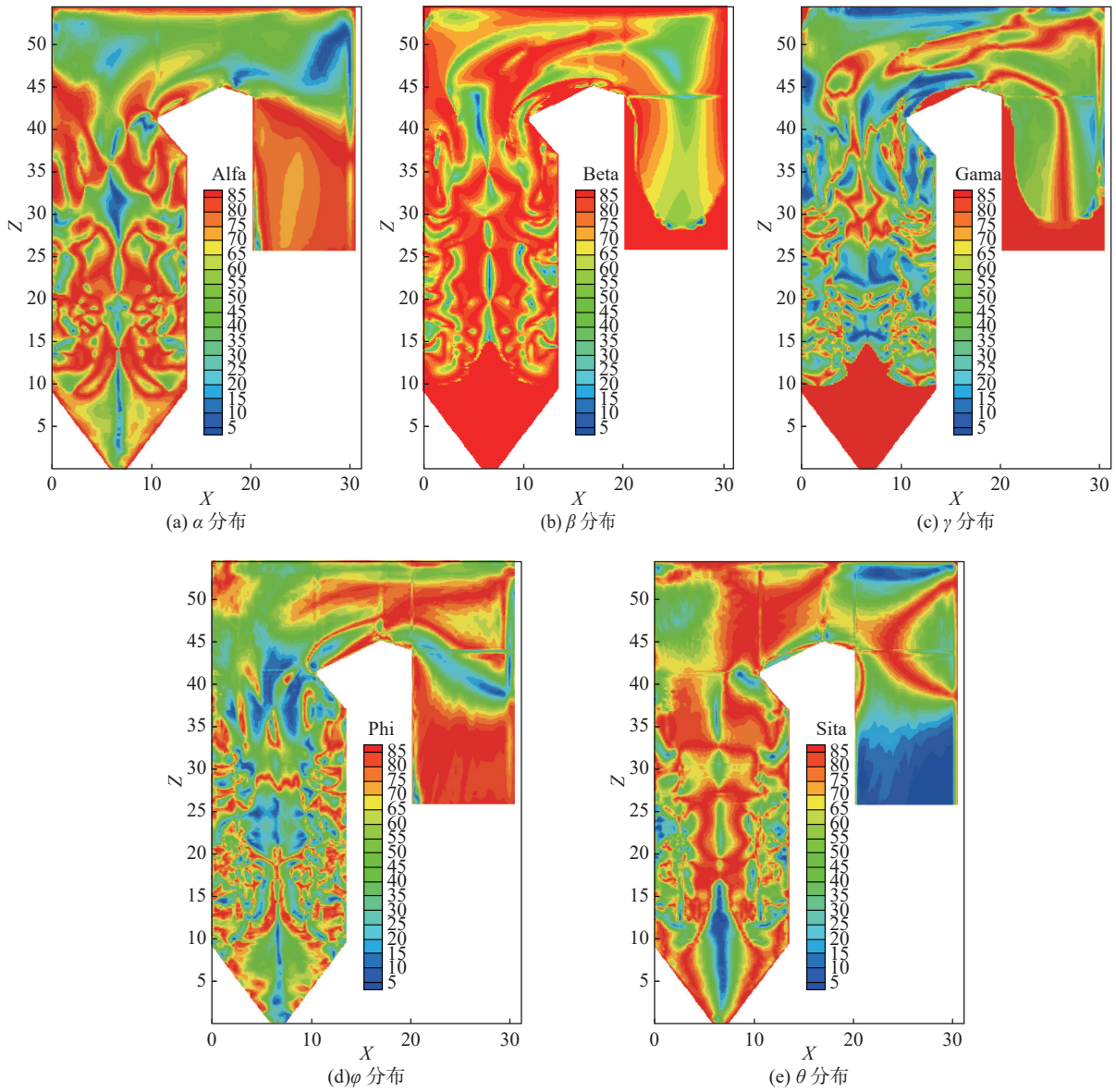
将炉内同一位置处的烟气含氧量、烟气温度、NO_x 质量浓度的模拟结果与文献 [1] 中的实验结果进行了比较，结果如表 2 所示，由表中可见，实验值和模拟值的相对误差均小于 3.5%。该模拟结果可以较好地反映炉内的温度，表明本文采用的模型和方法可行。

表 2　模拟结果和实验结果的比较

Tab. 2　Comparison of simulation results and experimental ones

参数名称	实验值	模拟值	相对误差/%
烟气含氧量（体积分数）/%	3.60	3.51	2.50
烟气温度/K	1 523	1 474	3.22
NO_x质量浓度/（$mg \cdot m^{-3}$）	345	337	2.32

图 2 为炉膛中心截面协同角分布。图 2(a)



(a) α 分布　(b) β 分布　(c) γ 分布

(d) φ 分布　(e) θ 分布

图 2　炉膛中心截面协同角分布

Fig. 2　Synergy angle distribution in the central section of furnace

为炉膛中心截面协同角 α 分布。在炉膛燃烧区壁面附近及中心部分区域，协同角 α 较小，表明速度与速度梯度的协同性较好，而介于这两部分之间的大块区域，协同角 α 较大。图 2(b) 为炉膛中心截面协同角 β 分布，其规律类似于图 2(a) 中协同角 α 的分布规律，协同角 β 大的区域占比相对较大，协同角 β 越小，速度与温度场协同性越好，流动换热能力增强[9–11]。

图 2(c) 为炉膛中心截面协同角 γ 分布。在整个燃烧区域，尤其是喷口附近，协同角 γ 较大，且分布比较均匀。协同角 γ 越大，表明强化传热的综合性能越高。图 2(d) 为炉膛中心截面协同角 φ 分布，类似于 γ 分布，协同角 φ 分布也比较均匀，大角度 φ 主要集中在壁面附近。φ 越大，表明压力梯度与速度梯度的协同性越好，流体的流动阻力越小。图 2(e) 为炉膛中心截面协同角 θ 分布，在炉膛中心大部分区域以及炉膛顶部及折焰角处，流线与压力梯度接近垂直，协同角 θ 较大，表明传热功耗大。但是在喷口附近，协同角 θ 较小。

图 3 为部分截面烟气温度分布。射流所在的截面温度分布能直观反映射流轨迹和火焰形状。通过分析一次风截面温度可以看出，距离燃烧器喷口较近的射流根部温度较低，这对燃烧器安全运行是有利的。炉内特别是燃烧器所在区域存在强烈的湍流，形成了高温切圆，且燃烧器所在区域为高温区，最高温度接近 1 550 K。

表 3 为 A/B 层与 Z 轴不同竖直摆角工况，表 4 为 DD/DE 层不同摆角工况，表 5 为 EE/OFA 层不同摆角工况。表 3～5 中 Z 轴正方向为从炉膛底部到顶部方向。分别改变 A/B 层、DD/DE 层、EE/OFA 层喷口摆角，结果发现，在改变的角度范围内，协同角 β、α、γ、φ 及 θ 整体变化不大，但是 A/B 层的 γ 值变化范围稍大些，结合图 2(a)～(e) 的情况来看，局部区域内协同角较优。

图 4 为不同工况下沿锅炉高度方向 NO 排放质量浓度分布。增大 DD、DE 层入射方向沿顺时针方向的偏转角度时，炉膛底部的 NO 质量浓度先增加后减少。沿锅炉高度方向上看，最高 NO 排放质量浓度均出现在主燃区。该区域内煤粉集中燃烧，是产生 NO 的主要区域。工况 1 的主燃区 NO 质量浓度最高，这是由于工况 1 中主燃区中心煤粉燃烧充分，产生更多的燃料型 NO。而工况 5、6、7 与工况 1(基准)相比，燃

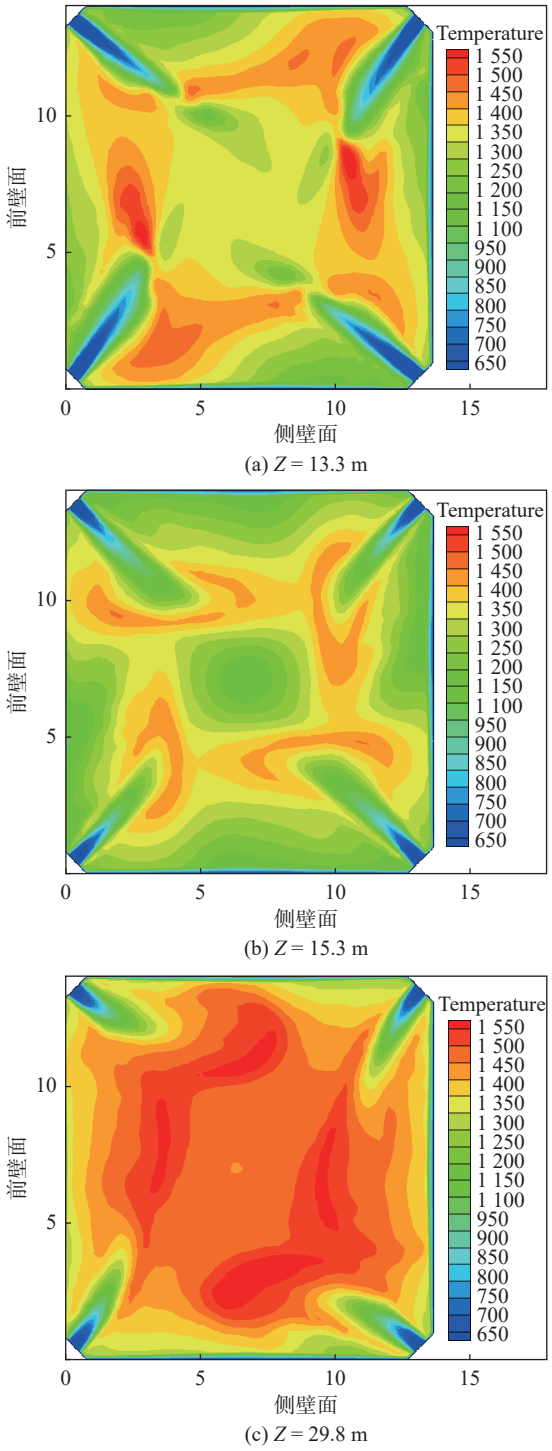


图 3 部分截面烟气温度分布

Fig. 3 Temperature distribution of flue gas in some sections

表 3　A/B 层与 *Z* 轴不同竖直摆角工况

Tab. 3　Synergy angles under different vertical swing angles of A/B layer

工况	均等风工况下A/B层与Z轴正方向夹角/(°)	α	β	γ	φ	θ
工况1(基准)	0	62.91	75.18	55.06	57.77	56.25
工况2	5	62.78	75.96	57.82	59.17	56.91
工况3	10	64.89	74.84	51.44	57.33	58.11
工况4	15	62.72	74.98	58.96	58.87	56.58
工况5	20	64.15	74.28	50.48	57.84	58.53

表 4　DD/DE 层不同摆角工况

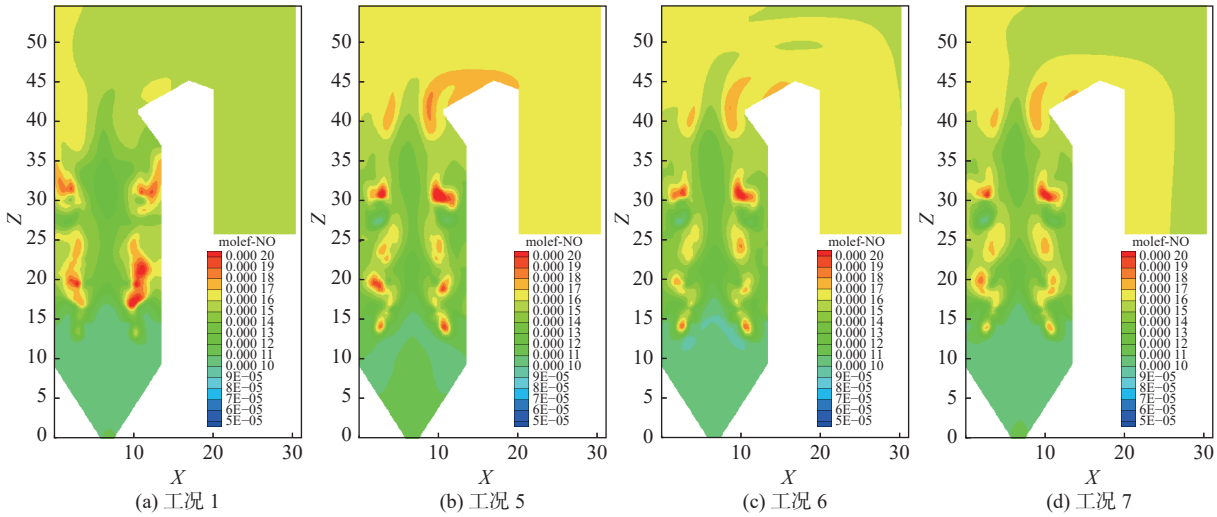
Tab. 4　Synergy angles under different vertical swing angle conditions of DD/DE layer

工况	均等风工况下的DD/DE层与Z轴正方向夹角/(°)	α	β	γ	φ	θ
工况6	5	62.95	76.28	57.14	59.18	56.92
工况7	10	62.91	76.13	56.66	59.05	56.72
工况8	15	62.95	75.88	56.24	59.08	56.46

表 5　EE/OFA 层不同摆角工况

Tab. 5　Synergy angles under different vertical swing angle conditions of EE/OFA layer

工况	均等风工况下的EE/OFA层与Z轴正方向夹角/(°)	α	β	γ	φ	θ
工况9	5	62.68	75.89	57.35	59.18	56.73
工况10	10	62.66	75.03	57.65	58.95	56.67
工况11	20	63.64	76.42	58.10	58.26	56.57



(a) 工况 1　(b) 工况 5　(c) 工况 6　(d) 工况 7

图 4　不同工况下沿锅炉高度方向 NO 质量浓度分布

Fig. 4　NO distribution along the height of furnace under different working conditions

尽风层和折焰角区域的局部 NO 质量浓度升高。随着 DD、DE 层入射方向沿顺时针方向的偏转角度增大，煤粉在主燃区的停留时间缩短，使得 NO 质量浓度下降，更多的未燃尽煤粉在炉膛上方燃烧，从而使整体燃烧效率下降。

4　结　论

对不同条件下的炉膛燃烧流场进行了数值模拟，分析了多场协同角度、烟气温度以及 NO 排

放质量浓度，主要结论为：在炉膛燃烧区壁面附近及中心部分区域，协同角 α 较小，而介于这两部分之间的大块区域，协同角 α 较大。协同角 β 大的区域占比相对较大。在整个燃烧区域，尤其是喷口附近，协同角 γ 较大，且分布比较均匀。协同角 φ 分布比较均匀，大角度 φ 主要集中在壁面附近。在炉膛中心大部分区域以及炉膛顶部及折焰角处，协同角 θ 较大，但是在喷口附近，协同角 θ 较小。

参考文献：

[1] 王鹏涛, 王乃继, 程晓磊, 等. 煤粉工业锅炉空气深度分级数值模拟研究 [J]. 洁净煤技术, 2018, 24(5): 68 − 76.

[2] 王康, 许开龙, 张海, 等. 煤粉细度对 NO_x 生成的影响 [J]. 燃烧科学与技术, 2018, 24(1): 34 − 38.

[3] 赵星海, 白贵生. 墙式切圆锅炉分级富氧燃烧对 NO_x 生成量影响的数值模拟 [J]. 热力发电, 2017, 46(5): 63 − 68.

[4] 刘建全, 孙保民, 白涛, 等. 稳燃特性对 1 000 MW 超超临界锅炉 NO_x 排放特性影响的数值模拟 [J]. 机械工程学报, 2011, 47(22): 132 − 139.

[5] 张秀霞. 焦炭燃烧过程中氮转化机理与低 NO_x 燃烧技术的开发 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012.

[6] RIBEIRETE A, COSTA M. Impact of the air staging on the performance of a pulverized coal fired furnace[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 32(2): 2667 − 2673.

[7] HOUSHFAR E, SKREIBERG Ø, TODOROVIĆ D, et al. NO_x emission reduction by staged combustion in grate combustion of biomass fuels and fuel mixtures[J]. Fuel, 2012, 98: 29 − 40.

[8] 王文洁, 凌玲, 杨茉. 75 $t \cdot h^{-1}$ 循环流化床锅炉气固流动与燃烧的数值模拟 [J]. 上海理工大学学报, 2018, 40(3): 217 − 224.

[9] GUO Z Y, LI D Y, WANG B X. A novel concept for convective heat transfer enhancement[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1998, 41(14): 2221 − 2225.

[10] GUO Z Y, WANG S. Novel concept and approaches of heat transfer enhancement[M]//CHENG P. Proceedings of Symposium on Energy Engineering in the 21st Century (SEE2000) Volume I-IV. New York: Begell House, 2000: 119 − 126.

[11] 文亚琪, 魏敏, 武俊峰, 等. 基于 Fluent 多晶硅还原炉内部辐射换热的模拟分析 [J]. 石河子大学学报:自然科学版, 2016, 34(5): 654 − 660.

信息

我国首个百万 t 级 CCUS 项目全面建成

1 月 29 日，我国首个百万 t 级碳捕集、利用与封存（CCUS）项目——齐鲁石化−胜利油田 CCUS 项目全面建成。该项目每年可减排二氧化碳 100 万 t，相当于植树近 900 万棵，预计未来 15 年可实现增油 296.5 万 t。这是目前国内最大的 CCUS 全产业链示范基地和标杆工程。

该项目于 2021 年 7 月启动建设，由齐鲁石化二氧化碳捕集、胜利油田二氧化碳驱油与封存两部分组成。在碳捕集环节，齐鲁石化新建 100 万 $t \cdot a^{-1}$ 液态二氧化碳回收利用装置，主要包括压缩单元、制冷单元、液化精制单元以及配套工程，回收煤制氢装置尾气中的二氧化碳，提纯后纯度可达 99% 以上；在碳利用与封存环节，胜利油田运用超临界二氧化碳易与原油混相的原理，已在正理庄油田建成 10 座无人值守注气站，向附近 73 口井注入二氧化碳，增加原油流动性，大幅提高原油采收率。

（王 波）