

标准旋流火焰场的燃烧特性实验与模拟研究

李祎鹏¹ 黄 骞¹ 马 鹏¹ Reinhold Kneer² 李水清¹

(1. 热科学与动力工程教育部重点实验室, 清华大学能源与动力工程系, 北京 100084;

2. 传热传质研究中心, 亚琛工业大学, 亚琛 52062)

摘 要 本文搭建了 4.2 kW 标准化的旋流燃烧机理实验台, 通过调节配风构造了三种旋流强度 (旋流数 $S=0$ 、0.5 和 0.9) 的燃烧工况, 测量并比较了不同旋流数下的流场结构及温度特性。相比直流燃烧火焰, 全旋流燃烧火焰 = 的长度缩短, 径向展宽增大。基于 OpenFOAM 对各工况的数值模拟结果与试验测得的火焰形貌、回流区结构及温度分布特性吻合较好。利用拉格朗日方法追踪了直径 40 μm 颗粒在旋流场中的运动轨迹, 发现部分颗粒被回流区卷吸重新进入高温区。分析颗粒运动轨迹上的聚并核函数演化, 发现其在高温回流区取值较大, 在下游随着温度和湍流耗散率的降低而逐渐减小。本研究为煤粉旋流燃烧过程中的细颗粒物生成提供了前期的基础。

关键词 旋流燃烧; 回流区; 温度场; 流场模拟; 碰撞核函数

中图分类号: TK123 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2022)04-1091-06

Experimental and Numerical Study on the Combustion Characteristics of Standard Swirl Flame

LI Yi-Peng¹ HUANG Qian¹ MA Peng¹ Reinhold Kneer² LI Shui-Qing¹

(1. Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Institute of Heat and Mass Transfer, RWTH Aachen University, Augustinerbach 6, 52062 Aachen, Germany)

Abstract In this paper, we develop a 4.2 kW standard mechanistic swirl burner for pulverized coal combustion. By adjusting the primary and secondary air flowrates, three conditions with different swirl intensities (with the swirl number $S=0$, 0.5 & 0.9) are investigated. We measured the flow field and temperature distributions for the three cases. Under the full-swirl condition, the flame is decreased in length and stretched in radial range, as compared to the direct-flow condition. Numerical simulation using OpenFOAM for each case agree reasonably well with the measured flame appearance, recirculation zone, and temperature distributions. We further tracked the trajectories of 40- μm inertial particles in the swirl flame, revealing that some particles flowing downstream are possible to reenter the high temperature area through recirculation. The evolution of the coagulation kernel of fine particles is quantified along the ‘coal’ particle trajectory. It is found that the coagulation kernel takes much larger values in the high temperature area, while flowing downstream the collision frequency decreases dramatically. This work provides insights on fine particulate formation in the swirl combustion of pulverized coal.

Key words swirl combustion; recirculation zone; temperature distribution; CFD; coagulation kernel

0 引 言

旋流对冲燃烧是我国燃煤机组广泛采用的一种燃烧组织方式, 可增强煤粉火焰稳定性^[1]。随着火电机组宽负荷调峰运行的深化, 燃烧器旋流特性 (特别是旋流强度) 改变, 会极大影响炉内煤粉燃烧及污染物生成特性^[2]。因此, 亟需加深对旋流强度

影响煤粉燃烧特性及污染物生成特性的机理认知。

旋流煤粉燃烧的火焰结构与流场结构密切相关。文献 [3] 结合 PIV 测量与大涡模拟 (LES), 发现高温火焰区域与入口的带状拟序结构及高煤粉浓度、高涡度区域基本重合: 近轴线入口区域内流场

收稿日期: 2021-03-09; 修订日期: 2022-03-23

基金项目: 国家自然科学基金委中德合作项目 (No.51761135126); 国家自然科学基金委杰出青年项目 (No.51725601)

作者简介: 李祎鹏 (1998-), 男, 博士研究生, 主要从事煤粉燃烧过程实验与模拟研究。

通信作者: 李水清, 教授, 博导, lishuiqing@tsinghua.edu.cn。

涡度、煤粉浓度相对较低；靠近入口区域，煤/焦颗粒分布呈带状结构，颗粒大量集中于气相拟序结构边缘，并在下游趋于均匀分布。

旋流燃烧的湍流场对煤粉颗粒燃烧全过程均有复杂而重要的影响。数值模拟研究^[4]表明，在煤粉颗粒阵列挥发分燃烧阶段，湍流会促进上游颗粒挥发分的释放，并延缓下游颗粒的脱挥发分速率。而对焦炭燃烧阶段，文献^[5]研究表明，在较小 Damkohler 数下，强烈的湍流作用（脉动速度）增强了焦炭颗粒表面的传质速率；而高 Damkohler 数下湍流效应减弱，煤粉颗粒团的外层颗粒在竞争中优先消耗氧气，抑制了颗粒团内层颗粒与氧气的反应，使焦炭转化率降低。

针对煤粉旋流燃烧的污染物生成特性，本文主要关注飞灰细颗粒物，其对环境及人体危害较大，且可从除尘设备逃逸^[6]。煤粉燃烧过程的超细颗粒物主要来自可挥发矿物质经成核、异相凝结等机制转化为颗粒相，并通过碰撞聚并长大^[7]。Gao 等^[8]基于群平衡理论框架，发展了细颗粒物全粒径预测模型，可准确模拟典型烟煤、褐煤层流燃烧中飞灰细颗粒物粒径分布特性。而在旋流燃烧过程中，煤粉颗粒的浓度分布、其“温度-时间”历史均与层流燃烧有较大不同，对细颗粒物的生成演化（特别是聚并长大过程）有较大影响，值得进一步探究。

现有研究多关注煤粉旋流燃烧时的流场特性，如温度、速度、组分及煤粉浓度分布等，但对不同旋流强度下煤粉燃烧的“温度-时间”历史及细颗粒物生成特性的认识尚显不足。为此，本文从实验和理论两方面开展研究。本文首先搭建了 4.2 kW 煤粉旋流燃烧标准实验平台，通过配风调节改变旋流强度。本文研究了旋流数为 0、0.5 和 0.9 的工况，获得了各旋流数下的流场结构及烟温特性。进而，采用 OpenFOAM 开展了各工况下冷、热态流场模拟，并追踪了具有典型煤粉粒径（40 μm）的惰性颗粒在旋流火焰场中的运动轨迹，根据其“温度-时间”历史，计算了细颗粒聚并核函数沿煤粉颗粒轨迹的演化特性。本文结果为开发煤粉旋流燃烧下细颗粒物生成模型提供了良好基础。

1 实验系统

1.1 标准旋流燃烧实验平台

本文以 Toporov 等^[9]提出的旋流煤粉燃烧器为基础，设计了一种可变旋流强度的标准化旋流煤粉燃烧器，如图 1 所示。该燃烧器由中心钝体、环形一次风直流喷口和同轴环形二次风喷口组成。其中，二次风分旋流二次风和直流二次风。燃烧器出

口旋流强度可通过调节直流和旋流的流量配比改变。一次风为甲烷与空气的预混气。在燃烧器下方搭建横截面 400 mm×400 mm 的下行燃烧室，高度为 600 mm。采用 WRR-B 铂铑热电偶（测温范围 0~1600°C，精度 5°C）测量燃烧温度。

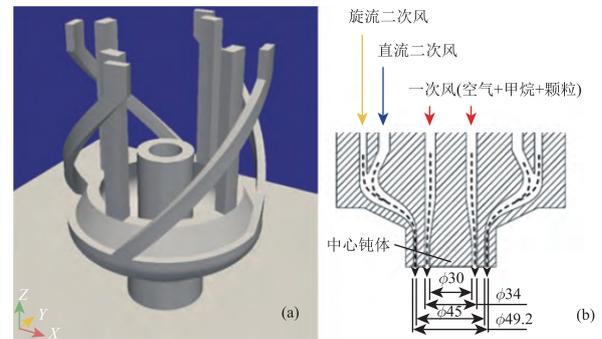


图 1 燃烧器 (a) 三维及 (b) 二维结构

Fig. 1 Burner (a) 3-dimensional and (b) 2-dimensional structures

1.2 粒子图像测速 (PIV) 系统

PIV 系统由高速摄像机及平面连续激光器组成。连续激光器（型号：MGL-W-532-18W）最大功率 18 W，波长 532 nm。高速相机（型号：PHANTOM v311）最大分辨率 1280×800 像素，最高帧率不小于 10000 fps，最小曝光时间低于 40 μs。利用 PIVlab 应用进行图像后处理。

1.3 实验工况

为确定合理的标准化实验工况，采用无量纲旋流数 S 表征燃烧器出口旋流强度，其定义为流体角动量的轴向通量（旋转动量矩） $G_\theta/\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ 与轴向动量通量 $G_x/\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和等效半径 R/m 的乘积之比：

$$S = \frac{G_\theta}{G_x R} \quad (1)$$

注意到，常见对冲燃烧锅炉中，旋流燃烧器出口处二次风旋流数为 1.07，三次风旋流数为 0.5；切向燃烧锅炉的炉内旋流数约 0.5~1^[10]。为此，本文采用三种配风方式，使各工况旋流数分别为 0（全直流）、0.5（二次风半旋流半直流）及 0.9（二次风全旋流）。各工况的实际流量列于表 1。各实验工况的旋流强度与实际煤粉锅炉相当，能反映炉内旋流强度对火焰及流场结构的影响。

2 流场模拟方法

针对上述各燃烧工况，利用 OpenFOAM v5 开展冷态及热态流场数值模拟，获取流场、温度场分

布特性, 为研究细颗粒物湍流碰撞率提供基础参数。计算域包含燃烧器流道及整个燃烧室, 各部件尺寸(如燃烧器一、二次风喷口半径, 燃烧室结构等)均与实际设备一致。根据旋流火焰模拟需求^[11], 划分计算域网格总数为 1099734, 均为六面体网格。采用 RANS 稳态模拟。

表 1 各工况实际流量
Table 1 Flow rate of each experimental condition

工况	CH ₄ /(L/min)	压缩空气/(L/min)		
		一次风	二次直流	二次旋流
S=0.0	7	50	87.50	0
S=0.5	7	50	43.75	43.75
S=0.9	7	50	0	87.50

甲烷的燃烧采用 PaSR 模型, 其将空间划分为均匀混合与完全不混合这两种理想状态, 其中完全不混合区域通过对流、扩散等机制转变为均匀混合。PaSR 模型式为:

$$\frac{c_{1,s} - c_{0,s}}{\tau} = f_r(c_1) \cdot \frac{\tau_c}{\tau_c + \tau_{\text{mix}}} = \frac{c_{0,s} f_{0,r}(c)}{c_{0,s} + S_r \tau + S_r \tau_{\text{mix}}} \quad (2)$$

$$f_r(c) = P_r - S_r \quad (3)$$

其中, c 为区域平均混合物浓度, 下标 1 代表反应器出口, 0 代表反应器入口; τ 为整体时间尺度, τ_c 和 τ_{mix} 分别为混合及化学反应时间尺度; P_r 、 S_r 分别为化学反应源项中的生成与消耗速率; f 为化学反应速率, 下标 r 为第 r 个化学方程式, s 代表参考组分, 0、1 分别为初始值与终值。

模拟中的边界条件设置与实验一致。其中, 各入口为流量控制, 出口为压力出口。气体的初始组分浓度与各实验工况相同。壁面采用无滑移、绝热条件。

稳态热流场收敛后, 通过添加惰性颗粒, 研究颗粒在旋流火焰场中的“温度-时间”历史。颗粒参数按煤粉颗粒选取, 其密度设为 1000 kg/m³, 初始温度 300 K, 粒径 40 μm。颗粒于一次风喷口处随机释放。

3 结果与讨论

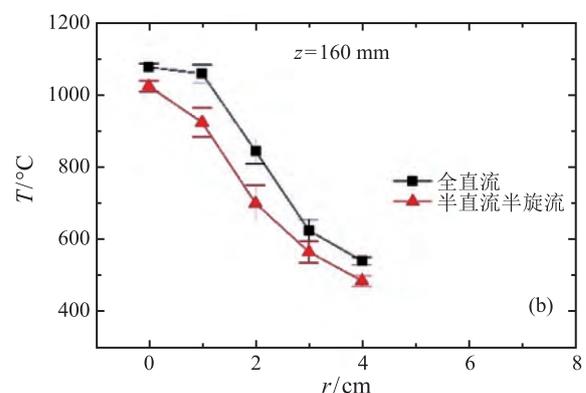
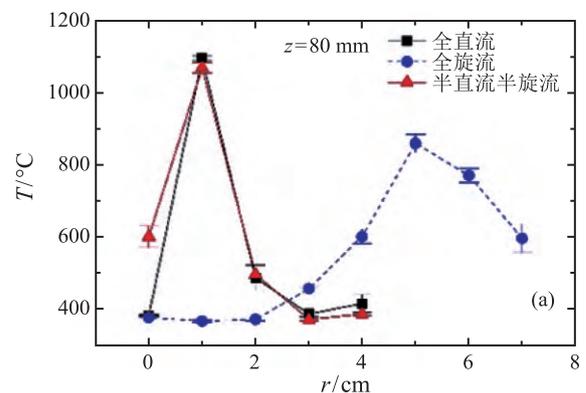
3.1 旋流燃烧温度场

观察三种实验工况下的旋流煤粉火焰, 可见随旋流强度增加, 火焰轴向长度缩短, 径向展宽增大。为定量研究旋流强度对火焰结构的影响, 测量了甲

烷燃烧(无煤粉)时三种工况下燃烧室内温度分布, 结果如图 2。其中 z 为燃烧室中心轴线方向, $z=0$ 对应燃烧器出口; r 为燃烧室内径向方向, $r=0$ 对应中心轴线。由图 2(a) 可见, 轴向 $z=80$ mm 处, 二次风全旋流工况温度均低于 1500 K, 这是由于其火焰长度小于 80 mm, 高温区位于出口附近区域。径向分布上, 二次风全旋流工况的温度峰值位于较远处 ($r=5$ cm), 这是由于高旋流强度下离心力使火焰沿径向扩张, 与实验中“倒皇冠状”火焰一致(如图 3(a))。而 $z=80$ mm 处二次风全直流与半旋流半直流工况温度分布相似, 二者高温区均位于中心轴线附近 ($r \sim 1$ cm), 可达 1400 K 左右, 表明其高温区可延伸至更下游区域。两工况下轴线 ($r=0$) 处温差达 200 K, 这是因为中间钝体导致直流火焰中心区温度较低, 而半旋流工况下中心区域回流区较小, 温度较高。随着轴向距离增大至 160 mm(图 2(b))、240 mm(图 2(c))、320 mm(图 2(d)), 二次风全直流和半旋流工况的温度均沿径向递减, 表明下游火焰不存在中心低速回流区。二次风全直流工况的温度均高于半旋流工况, 因为半旋流工况下湍流作用促进了组分混合, 缩短了火焰长度, 因此在下游降温更快。

3.2 全旋流冷态速度场

利用 PIV 测量了全旋流工况下燃烧器出口区域的冷态流场, 发现燃烧器环形出口中心区域的流



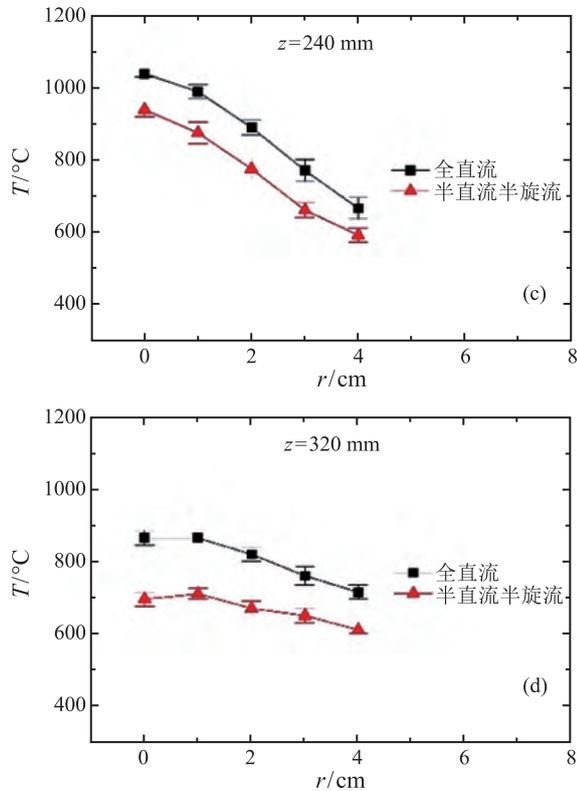


图 2 各实验工况不同轴向位置处的温度径向分布: (a) $z=80$ mm; (b) $z=160$ mm; (c) $z=240$ mm; (d) $z=320$ mm
Fig. 2 radial distribution of temperature under each experimental condition: (a) $z=80$ mm; (b) $z=160$ mm; (c) $z=240$ mm; (d) $z=320$ mm

体速度矢量方向朝上, 呈现明显的回流特性, 与强旋流工况 ($S>0.6$) 下的理论预测一致。PIV 测得的流场结构及流速可为本文流场数值模拟提供验证支撑。

3.3 冷态流场的模拟与验证

针对甲烷全旋流燃烧工况开展稳态流场数值模拟, 获得的火焰结构 (温度场云图) 如图 3(a) 左侧所示, 可见高温区分布与观测的“倒皇冠”状火焰 (右侧) 基本一致。图 3(b) 所示为轴向 $z=80$ mm 处温度径向分布, 可见模拟结果与实验值趋势相似, 特别是径向温度峰值均出现在 $r=50$ mm 处。在中心回流区域, 模拟得到的温度值较测量值偏高 50~150 K。这可能是模拟中忽略了壁面的散热所致。

图 4 所示为模拟所得的热态流场结构, 可见轴线附近区域存在明显回流。回流区的范围可由轴线速度分量为 0 (即 $u_z=0$) 的点所包络的空间来表征, 在图中以黄色曲面加以标示。可见高温火焰区位于中心回流区外侧边缘, 二者有较为紧密的联系。

3.4 甲烷全旋流燃烧的流场模拟结果

利用 OpenFOAM 对各实验工况下的冷、热态

流场开展数值模拟。全旋流冷态工况下, 模拟表明在环状喷口中心钝体区域存在回流, 与 PIV 结果一致。而半旋流工况下中心钝体处的回流区缩小, 与图 2(a) 所揭示的特性 (该工况下中心轴线处温度高于全旋流工况) 一致。进一步提取二次风喷口下方 1 cm 处的采样点, 模拟所得的稳态流速为 2.288 m/s; 而该处 PIV 测得的时均流速 (100 帧, 对应 0.03 s) 为 2.000 m/s, 二者误差为 15%, 一致性较好。

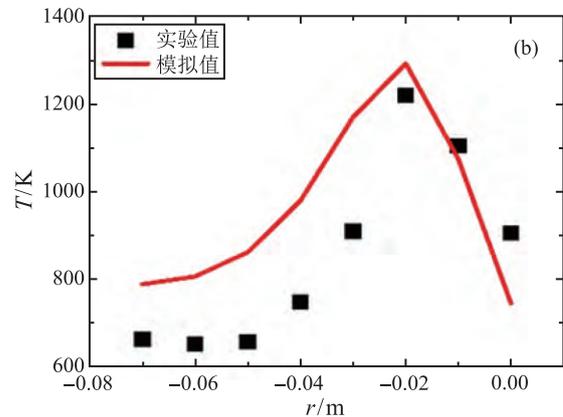


图 3 全旋流工况模拟温度场与实际火焰结构对比 (a); 轴向 $z=80$ mm 处模拟与测量温度分布对比 (b)

Fig. 3 Comparison of simulative flame structure and actual flame under non-swirl condition (a); Comparison of simulative temperature distribution and measurement at $z=80$ mm (b)

3.5 离散相颗粒轨迹分析

在全旋流热态流场内加入 $40 \mu\text{m}$ 的惰性颗粒, 颗粒从一次风喷口随机释放并穿越高温气相火焰。通过颗粒轨迹追踪, 发现部分颗粒经过高温区后, 由于回流区的卷吸重回高温区 (见图 5(a)), 这与煤粉颗粒在旋流燃烧器出口处的轨迹相似。提取多个颗粒的速度演化, 发现颗粒在高温火焰区 (停留小于 0.05 s) 的速度较高, 且速率波动幅度较大; 在火焰区下游 (停留时间大于 0.1 s) 大多数颗粒的速度大幅降低, 但部分颗粒因卷吸重进回流区而再次加

速, 速度幅值与初始阶段相当, 这一过程持续了约 0.1 s。由颗粒温度历史 (图 5(a)) 可见, 在火焰区颗粒温度可达 2000 K; 当颗粒重进回流区时, 温度再次升高 (约 1400 K), 这有利于煤粉火焰的稳定性。

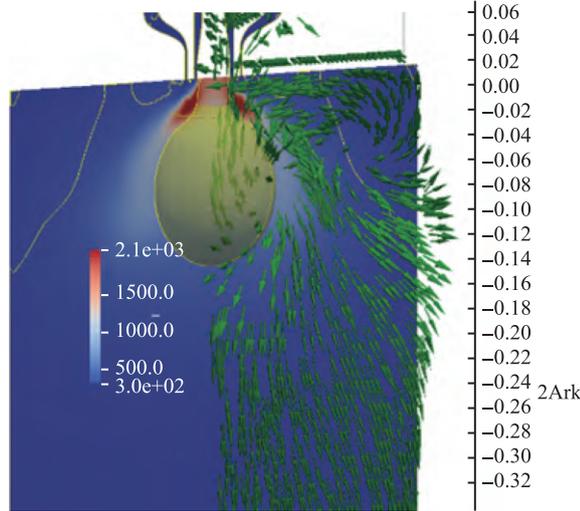


图 4 全旋流燃烧工况下的温度场、流场结构与中心回流区 (黄色曲面标示垂直方向速度 $u_z=0$)

Fig. 4 Temperature field, flow field structure and central recirculating zone for the fully-swirling condition. The boundary of the yellow sphere denotes the surface where the vertical velocity $u_z = 0$

3.6 细颗粒碰撞核函数

煤粉燃烧过程中, 矿物蒸气的成核生成了初始超细颗粒, 但超细模态最终的粒径分布特性主要由碰撞聚并机制决定。在燃烧湍流场中, 超细颗粒物的湍流 Stokes 数 (颗粒的弛豫时间与湍流时间尺度即 Kolmogorov 时间之比) 很小, 可视为零惯性颗粒, 颗粒间的湍流聚并核函数 β (m^3/s) 的形式为:

$$\beta(D_1, D_2) = \sqrt{\frac{8\pi\varepsilon}{15\nu}} \cdot \frac{(D_1 + D_2)^3}{8} \quad (4)$$

其中, D_1 、 D_2 为两颗粒直径, m; ν 为流体运动黏度, m^2/s ; ε 为湍流耗散率, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$ 。则两类颗粒的碰撞频率 $n_{c12}/\text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ 为:

$$n_{c12} = \beta \cdot n_1 n_2 \quad (5)$$

其中, n_1 、 n_2 分别是粒径为 D_1 、 D_2 的颗粒数浓度, m^{-3} 。

图 5(a) 示出了典型颗粒 (被卷吸重进高温区) 轨迹上的湍流耗散率 ε 分布, 可见回流区温度及流场湍流耗散率均有较高值, 二者联系较为紧密。进而, 可计算颗粒轨迹上的碰撞核函数 β 的演化。结果如图 5(b)~(d) 所示, 分别绘出了粒径 D_1 为 0.1

μm 、 $1 \mu\text{m}$ 、 $10 \mu\text{m}$ 的颗粒与不同 D_2 粒径颗粒碰撞聚并的 β 值。显见 β 随粒径增加而增大。同时, 煤粉颗粒轨迹上的碰撞核函数演化与湍流耗散率、温度演化趋势大致相同, 三者的峰值基本重合 ($t < 0.05 \text{ s}$ 及 $t \approx 0.1 \text{ s}$)。因此旋流火焰场中, 细颗粒物在高温火焰区的碰撞频率较高, 而焰后的湍流耗散率及聚并核函数 β 均逐渐降低。

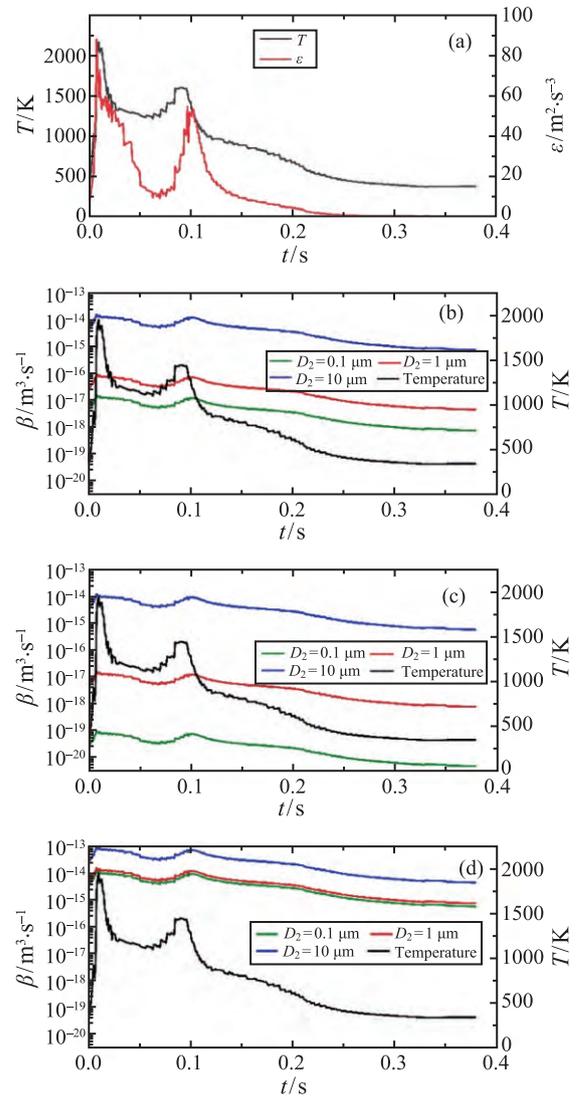


图 5 两次进入高温区颗粒的温度与湍流耗散率轨迹 (a); 沿煤粉颗粒轨迹, 粒径 D_1 分别为 $0.1 \mu\text{m}$ 、 $1 \mu\text{m}$ 、 $10 \mu\text{m}$ 的颗粒与不同粒径 (D_2) 颗粒发生湍流聚并的核函数演化 (b)~(d)

Fig. 5 Temperature and turbulent dissipation rate history of a typical particle (a); Turbulent collision kernel function trace of particle diameter D_1 in $0.1 \mu\text{m}$, $1 \mu\text{m}$, $10 \mu\text{m}$ colliding with particle in different diameter D_2 (b)~(d)

4 结 论

本文通过搭建一种旋流强度可调、可支撑固体燃料燃烧的 4.2 kW 标准旋流燃烧器, 研究了该燃

烧器在不同旋流强度下的火焰特性,并基于数值模拟,分析了流场特性及细颗粒物在大颗粒轨迹上的聚并核函数演化特性。具体结论如下:

1) 全旋流燃烧工况(旋流数约 0.9)下,流场具有显著的回流区,火焰呈“倒皇冠”状,轴向长度较短,径向展宽较大;径向温度峰值出现在距轴线约 50 mm 处,而二次风半旋流(旋流数约 0.5)、全直流(旋流数 0)的径向温度峰值均在轴线附近。

2) 基于 OpenFOAM 的数值模拟揭示了旋流场的中心回流结构,并与实验测得的流场速度、温度分布及火焰形貌符合较好。

3) 通过添加 40 μm 惰性颗粒的离散相模拟,发现部分颗粒被回流区卷吸重新进入高温火焰区。通过分析大颗粒轨迹上的流场及湍流特性参数,计算了真实煤燃烧中生成的 10 μm 以下细颗粒湍流聚并核函数的演化,发现其在高温回流区取值较大,在下游(焰后)随温度及湍流耗散率的降低而逐步减小,这对建立煤粉旋流燃烧细颗粒物生成模型具有参考意义。

参 考 文 献

- [1] Zhang Q, Yi H, Yu Z, et al. Energy-Exergy Analysis and Energy Efficiency Improvement of Coal-Fired Industrial Boilers Based on Thermal Test Data [J]. Applied Thermal Energy 2018, 144: 614–27
- [2] Smith P J, Fletcher T H. A Study of Two Chemical Reaction Models in Turbulent Coal Combustion [J]. Combustion Science and Technology, 1988, 58(1-3): 59–76
- [3] Tufano G L, Stein O T, Wang B, et al. Coal Particle Volatile Combustion and Flame Interaction. Part I: Characterization of Transient and Group Effects [J]. Fuel, 2018, 229: 262–269
- [4] Hu Liyuan, Zhou Lixing, Luo Yonghao, et al. Measurement and Simulation of Swirling Coal Combustion [J]. Particuology 2013, 11(2): 189–197
- [5] Haugen N E L, Krüger J, Mitra D, et al. The Effect of Turbulence on Mass Transfer Rates of Small Inertial Particles with Surface Reactions [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2018, 836: 932–951
- [6] 卓建坤. 煤粉燃烧过程亚微米颗粒形成机理的实验研究 [D]. 北京: 清华大学, 2018
ZHUO Jiankun. Experimental Study on Formation Mechanism of Submicron Particles in Coal Combustion Process [D]. Beijing: Tsinghua University, 2018
- [7] Senior, C L, Panagiotou T, Sarofim A F, Helble J J, Formation of Ultra-Fine Particulate Matter from Pulverized Coal [R]. Preprints of Symposia, Division of Fuel Chemistry, American Chemical Society, 2000
- [8] Gao Q, Li S, Yang M, Biswa, P, Yao Q, Measurement and Numerical Simulation of Ultrafine Particle Size Distribution in the Early Stage of High-Sodium Lignite Combustion [J]. Proceedings of the Combustion Institute 2016, 36(2): 2083–2090
- [9] Toporov D, Förster M, Knee, R, Burning Pulverized Coal in CO₂ Atmosphere at Low Oxygen Concentrations [J]. Clean Air 2007(8): 321–338
- [10] 李彦鹏,刁永发,张强,等. 切向燃烧炉内旋流数分布的试验研究 [J]. 工程热物理学报, 2001, 22(S1): 213–216
LI Yanpeng, DIAO Yongfa, ZHANG Qiang, et al. Experimental Study on Swirl Number Distribution in Tangential Combustion Furnace [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2001, 22(S1): 213–216
- [11] Song Minhang, Huang Qian, Niu Fang, Li Shuiqing. Recirculating Structures and Combustion Characteristics in a Reverse-Jet Swirl Pulverized Coal Burner [J]. Fuel, 2020, 270: 117456