

# 颗粒间距对煤粉颗粒着火和燃烧行为影响的理论研究

许 扬<sup>1,2</sup>, 黄 骞<sup>2</sup>, 宋民航<sup>3</sup>, 李水清<sup>2</sup>

(1. 中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司, 北京 102209; 2. 清华大学 能源与动力工程系, 北京 100084; 3. 中国科学院 过程工程研究所, 北京 100190)

**摘 要:** 为了探究复杂燃烧组织形式下煤粉颗粒间距变化所带来的颗粒着火和燃烧行为的差异, 以典型烟煤为研究对象, 开展了不同颗粒间距下煤粉颗粒着火与燃烧特性的理论模拟研究, 主要考察着火延迟时间、着火模式及关键流场、组分场特性随颗粒间距  $D$  的演变规律。结果表明, 当颗粒间距较大, 煤粉颗粒群的燃烧行为与单颗粒燃烧行为相似; 对于粒径为  $70\ \mu\text{m}$  的烟煤颗粒, 在  $1\ 500\ \text{K}-0.2\text{O}_2$  的条件下, 均相着火滞后于非均相着火发生, 且该现象对于气相反应机理的选取不敏感。当颗粒间距缩小 ( $\leq 8d$ ), 煤粉颗粒的气相燃烧行为与单个煤粉颗粒有较大的差异。由于颗粒之间的相互作用, 挥发分在下游颗粒边界处发生富集, 气相着火点在下游颗粒边界产生, 并逐步发展至上游颗粒, 促使气相连续火焰的形成。由于上述颗粒间的相互作用, 上游和下游颗粒的挥发分着火均有所提前, 使得颗粒的着火模式向均相着火倾斜, 且下游颗粒着火模式倾斜程度较上游颗粒更为明显。当颗粒间距缩小, 多颗粒燃烧形成火焰包络面, 导致颗粒边界层富燃贫氧区域的扩大, 这对燃烧过程中氮氧化物等的生成具有重要影响。

**关键词:** 煤粉燃烧; 煤粉着火; 颗粒间距; 着火延迟时间; 着火模式

**中图分类号:** TQ534 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2022)04-1701-08

## Theoretical study on the effect of particle spacing on ignition and combustion behavior of pulverized coal particles

XU Yang<sup>1,2</sup>, HUANG Qian<sup>2</sup>, SONG Minhang<sup>3</sup>, LI Shuiqing<sup>2</sup>

(1. Huaneng Clean Energy Research Institute, Beijing 102209, China; 2. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** In order to explore coal combustion behaviors under complex combustion organization conditions, the influence of particle spacing on ignition and combustion behavior of typical bituminous coal is investigated. By using Computational Fluid Dynamics (CFD), the interaction of pulverized coal particles is simulated and analyzed. The evolution of ignition delay time, ignition mode, as well as the key flow/species field with the variation of particle spacing were intensively studied. The results show that, when the particle spacing is large, the combustion behavior of particle group is similar to that of single particle; for a  $70\ \mu\text{m}$  bituminous coal particle, homogeneous ignition occurs later than heterogeneous ignition in the ambience of  $1\ 500\ \text{K}-0.2\text{O}_2$ , and this phenomenon is not sensitive to the adoption of gas-phase reaction mechanism. However, when the particle spacing is small ( $\leq 8d$ ), the gas phase combustion behavior of pulverized coal particles is quite different from that of single coal particles. Due to the interactions

收稿日期: 2021-03-10 修回日期: 2021-05-19 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2021.0398

作者简介: 许 扬 (1993—), 女, 江苏如皋人, 博士。E-mail: xuyang\_thu@163.com

通讯作者: 李水清 (1979—), 男, 山东济宁人, 教授。E-mail: lishuiqing@tsinghua.edu.cn

引用格式: 许扬, 黄骞, 宋民航, 等. 颗粒间距对煤粉颗粒着火和燃烧行为影响的理论研究 [J]. 煤炭学报, 2022, 47(4): 1701-1708.

XU Yang, HUANG Qian, SONG Minhang, et al. Theoretical study on the effect of particle spacing on ignition and combustion behavior of pulverized coal particles [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(4): 1701-1708.



移动阅读

between particles, the volatiles accumulate around the boundary of downstream particle. Therefore, the gas-phase ignition occurs at the boundary of downstream particle, and then gradually develops to the upstream particle. This promotes the formation of gas-phase continuous flame. The change of the flame pattern leads to the decrease of homogeneous ignition time for both the upstream and downstream particles. It will further lead to the shift of ignition mode towards homogeneous ignition, which is much prominent for the downstream particle. Moreover, when the flame envelope is formed in multi-particle combustion, the fuel-rich region in the particle vicinity extends. It will bring significant impact on the subsequent formation of nitrogen oxides during combustion.

**Key words:** coal combustion; ignition; particle spacing; ignition delay time; ignition mode

根据国家统计局最新统计数据,2019年全国煤炭消费量占能源消费总量的57.7%,在我国能源供给中依然占有举足轻重的地位<sup>[1]</sup>。煤炭提供了我国65%的发电量,同时也是钢铁、建材、化工等产业重要的燃料和原料。煤炭的基础能源地位是由我国“多煤少油缺气”的能源结构所决定的,并且在短期内,这种情况不会发生根本转变。对燃煤锅炉来说,煤粉颗粒着火过程的快慢及其稳定性直接决定了燃煤锅炉运行的火焰稳定性,是机组宽负荷灵活调峰运行的关键因素。此外,煤粉燃烧初期(包括挥发分燃烧阶段)也产生大量污染物,特别是氮氧化物( $\text{NO}_x$ )生成量可达煤粉燃烧全过程 $\text{NO}_x$ 生成总量的70%以上<sup>[2]</sup>。因此,研究煤粉燃烧初期的着火行为对机组运行稳定性以及污染物生成控制具有重要意义。

煤粉颗粒的着火特性研究可追溯至20世纪六七十年代。JÜNTGEN和VANHEEK<sup>[3]</sup>最早提出了煤粉的不同着火模式:非均相着火、均相着火、及联合着火模式<sup>[3]</sup>。其中,非均相着火指在煤粉颗粒表面的直接着火行为,而均相着火指在煤粉气相边界层内挥发分的着火。着火模式反映了颗粒相和气相反应之间的竞争关系,因此可作为表征煤粉颗粒着火稳定性的重要参数。章明川和徐旭常<sup>[4]</sup>提出以气相可燃气体着火极限作为着火判据,为后期煤粉颗粒着火研究提供了理论基础。近年来,煤粉颗粒着火的机理研究取得了较大进展,根据研究对象的不同,可分为单颗粒着火和颗粒群着火行为研究<sup>[5-10]</sup>。RIAZA等<sup>[6]</sup>和LEVENDIS等<sup>[7]</sup>分别基于滴管炉实验台,利用高速摄影技术研究了单颗粒燃烧行为,系统地分析了煤种、周围气氛对颗粒着火延迟时间、颗粒燃烧温度、燃烧时间的影响。LEE等<sup>[8]</sup>观察研究了单个颗粒在高温气流中的燃烧特性。在煤粉颗粒群着火研究方面,YUAN等<sup>[9]</sup>利用可见光光谱法系统研究了多元扩散平焰燃烧器上煤粉颗粒流的着火行为。LIU等<sup>[10]</sup>研究了温度、粒径、氧气浓度及给粉量等参数对煤粉颗粒群着火的影响,并提出综合体现各参数影响的“Group number”。除了实验观测,数值模拟可通过耦

合煤粉热解模型与气相化学反应机理,探究煤粉颗粒燃烧初期着火和挥发分燃烧行为。VASCELLARI等<sup>[11]</sup>通过火焰面模型,研究了煤粉颗粒着火阶段的温度及气相组分分布,模拟所得着火延迟时间及时间平均OH分布与实验结果一致性较好。GOSHAYESHI等<sup>[12-13]</sup>通过模拟的CH基团信号来表征煤粉颗粒的着火情况,并比较了不同热解模型及不同气相模型对着火过程预测结果的影响。值得注意的是,上述工作较多关注煤粉颗粒的气相着火,而缺乏对煤粉颗粒着火模式的辨析。近期,YUAN等<sup>[9]</sup>和XU等<sup>[14]</sup>采用单颗粒瞬态着火模型对煤粉单颗粒的着火模式进行了预测,并选取特征参数实现了煤粉着火模式的定量表征,这也是对煤粉着火稳定性的量化表征。但该一维瞬态模型仅能解析一维(径向)的气相温度、组分分布,无法完整反映流场中颗粒周围空间分布的不均匀性。同时,该模型仅能预测单颗粒着火行为。当燃烧器出口煤粉质量浓度局部偏高,或对炉内燃烧进行优化调控时,需进一步研究煤粉颗粒附近的气相组分分布以及颗粒间距对煤粉颗粒着火延迟时间及着火模式的影响。

基于以上研究现状,笔者主要针对颗粒间距对煤粉颗粒着火行为的影响开展数值模拟研究,详细解析不同颗粒间距下煤粉颗粒之间的相互作用。通过改变煤粉颗粒间距,研究不同颗粒间距下煤粉颗粒群着火行为的演化,着重探讨煤粉颗粒着火延迟时间以及着火模式的变化规律。

## 1 数值计算方法

### 1.1 研究方法

图1为主要研究思路,主要基于ANSYS Fluent平台,开展煤粉单颗粒及多颗粒周围(包括边界层内)挥发分气相反应及颗粒间距对煤粉着火及燃烧特性的影响(详见1.2节设置)。在前期工作中<sup>[14]</sup>,采用自编程的一维瞬态单颗粒着火模型计算煤粉颗粒着火。通过耦合化学渗透热解模型、单步气相反应模型以及焦炭燃烧总包模型,对单颗粒的非均相和均

相着火分别进行了研究,初步得到了不同环境气氛下 2 者之间的竞争关系。为了更进一步对详细气相反应进行研究,同时,对不同颗粒间距下气相火焰的相互作用进行探索,采用 CFD 方法对气相火焰进行详细模拟。笔者对问题进行简化,重点关注气相火焰的相互作用,将颗粒相与气相部分解耦;仅考虑颗粒相脱挥发分对气相组分的贡献,不考虑气相挥发分燃烧对颗粒相的影响。而颗粒相的脱挥发分及非均相反应采用前期工作中开发的一维瞬态单颗粒着火模型求解<sup>[14]</sup>。相似的研究方法在文献[11]中也被应用。简要地说,该模型耦合煤粉化学渗透热解(CPD)模型、焦炭燃烧反应模型及单步气相反应动力学,可求解颗粒温度  $T_p$  以及挥发分释放速率  $\dot{m}_v$  随时间演化特性,详见文献[14]。本文将这些量以 UDF 的形式作为 CFD 计算的颗粒入口边界条件,进行气相(均相)反应的详细模拟。

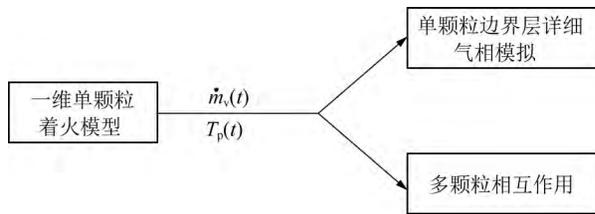


图 1 研究思路

Fig.1 Research mentality

1.2 计算设置

图 2 为探究煤粉颗粒着火的气相模拟计算域及设置。采用二维轴对称结构,计算域大小为  $33d \times 100d$ ,其中  $d$  为煤粉颗粒粒径(本文统一设  $d = 70 \mu\text{m}$ ), $\dot{m}_v$  为挥发分释放的质量流率, $T_v$  为挥发分温度, $Y_{v,i}$  为挥发分组分  $i$  的质量分数。空气自上游入口流入。对单颗粒 P1 工况,颗粒固定在距离气流入口  $33d$  处。对双颗粒工况,在颗粒 P1 下游距离为  $nd(n=1,2,3,\dots)$  处放置相同粒径的颗粒 P2,可调节  $n$  以研究颗粒间距对煤粉着火的影响。在实际过程中,下游颗粒 P2 晚于上游颗粒 P1 进入流场,因此其温度历史和挥发分释放历史均较上游颗粒 P1 有所滞后。本研究忽略上游颗粒对下游颗粒温度历史的影响,则相位滞后时间为  $nd/v$ (其中, $v$  为来流速度)。挥发分的组分选取为  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$  以及  $\text{N}_2$ ,各组分的质量分数如图 2 所示<sup>[15-16]</sup>。化学反应机理采用 GRI12 机理,该机理包含 32 种组分,177 步反应,涵盖了上述所有的挥发分组分。由于模拟计算的燃烧体系属于雷诺数较小的层流系统,因此选用层流反应模型。计算网格划分最大尺寸为  $20 \mu\text{m}$ ,同时对颗粒附近进行网格局部加密,确保足

以解析挥发分燃烧的气相反应面位置。每个工况设置计算时间步长为  $0.1 \text{ ms}$ 。

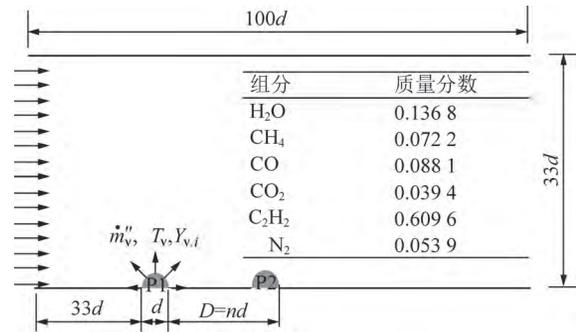
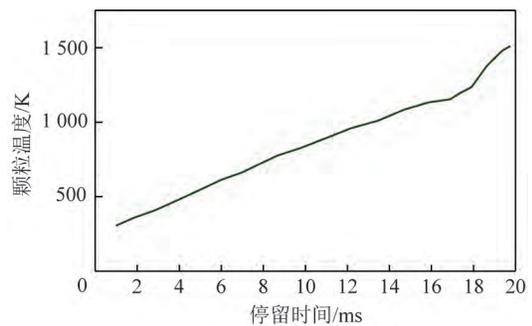


图 2 气相挥发分燃烧数值计算模型

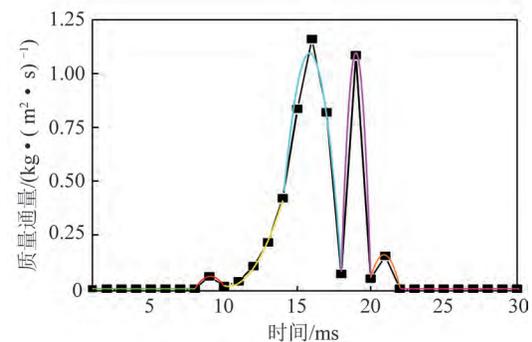
Fig.2 Numerical simulation model for volatile combustion in gas phase

1.3 单颗粒温升及挥发分释放特性

设定燃烧工况为  $1\ 500 \text{ K}-0.2\text{O}_2$ ,即来流温度为  $1\ 500 \text{ K}$ ,来流中氧气的摩尔分数为  $0.2$ ,氮气摩尔分数为  $0.8$ 。采用的煤种为一种典型烟煤,其固定碳、挥发分和灰分分别为  $55.52\%$ ,  $24.11\%$  和  $20.37\%$ ,高位发热量为  $25.26 \text{ MJ/kg}$ 。主要关注层流工况下煤粉颗粒的燃烧,故设置来流速度为  $0.5 \text{ m/s}$ 。图 3 为该工况下,采用前述一维瞬态单颗粒着火模型计算得到的煤颗粒温度及挥发分释放速度(质量通量)的演化。



(a) 颗粒温度



(b) 挥发分释放

图 3 基于单颗粒模型计算得到的  $1\ 500 \text{ K}-0.2\text{O}_2$  工况下颗粒温度和挥发分释放结果

Fig.3 Evolution of particle temperature and volatile release in  $1\ 500 \text{ K}-0.2\text{O}_2$  based on single particle model

由图 3 可以知,在煤粉实际燃烧过程中,挥发分的释放速率随时间会出现多个峰值,本工况下有 2 个峰值较为突出,分别在 16.0 ms 和 19.0 ms 附近。将各峰值分别进行拟合(图 3 中彩色曲线),并将挥发分释放速率曲线与该工况下对应的颗粒升温曲线作为 CFD 模拟中颗粒与气相交界面处的边界条件。

对于煤粉颗粒着火行为,经典着火理论分别定义了非均相着火和均相着火行为<sup>[17-19]</sup>。其中,非均相着火时间( $t_{hetero}$ )定义为颗粒温升曲线的拐点,即  $d^2T_p/dt^2=0$ ;均相着火时间( $t_{homo}$ )则基于气相温度分布定义:当某一时刻下的气相温度分布出现了较显著的局部极大值,即代表该处化学反应速率升高,则认为该时刻发生了均相着火。按照上述准则,利用单颗粒着火模型计算得到 1 500 K-0.2O<sub>2</sub> 工况下,70 μm 煤颗粒的非均相着火延迟时间为 12.2 ms,对应的均相着火时间为 15.0 ms。

## 2 结果及分析

### 2.1 单颗粒气相着火及燃烧特性

针对单颗粒燃烧,图 4 给出了 1 500 K-0.2O<sub>2</sub> 工况下采用详细反应机理模拟得到的气相挥发分均相燃烧特性。彩图为流体时间为 16.8 ms 和 21.0 ms 时温度(图 4(a)) 和 OH 信号的空间分布(图 4(b)), 曲线图为对应时刻颗粒径向(指向颗粒下游)的气相温度分布。计算结果显示,煤粉颗粒进入高温场 16.8 ms 后发生挥发分的气相着火,着火点最开始出现在颗粒下游。之后,火焰面由下游逐渐向上游发展,至 21.0 ms 时,火焰面达到相对稳定的状态,在颗粒周围形成完整的火焰包络面。此外,气相温升与 OH 信号增强基本同步,在 21.0 ms 时,气相温度最高可达 2 100 K。

注意到详细 CFD 模拟与前述单颗粒着火模型(基于一歩反应机理)均可求得气相着火延迟时间,2 者对比如图 5 所示。图 5 还给出单颗粒着火模型求得的非均相着火延迟时间。由图 5 可以看出,相比单颗粒着火模型(一步气相反应机理),采用 CFD 详细化学反应机理计算得到的气相挥发分着火延迟时间更大,但均高于非均相着火延迟时间。这表明,在设定工况下,煤粉颗粒的非均相着火先于均相着火发生。因此,可认为将颗粒相和气相单向解耦的计算方式能正确判别特定条件下煤粉颗粒的着火模式。

### 2.2 双颗粒气相着火及燃烧特性

在上述单颗粒研究的基础上,在上游颗粒 P1 的下游加入相同粒径的煤粉颗粒 P2,探究煤粉颗粒间距对气相挥发分着火和燃烧特性的影响。图 6 给出

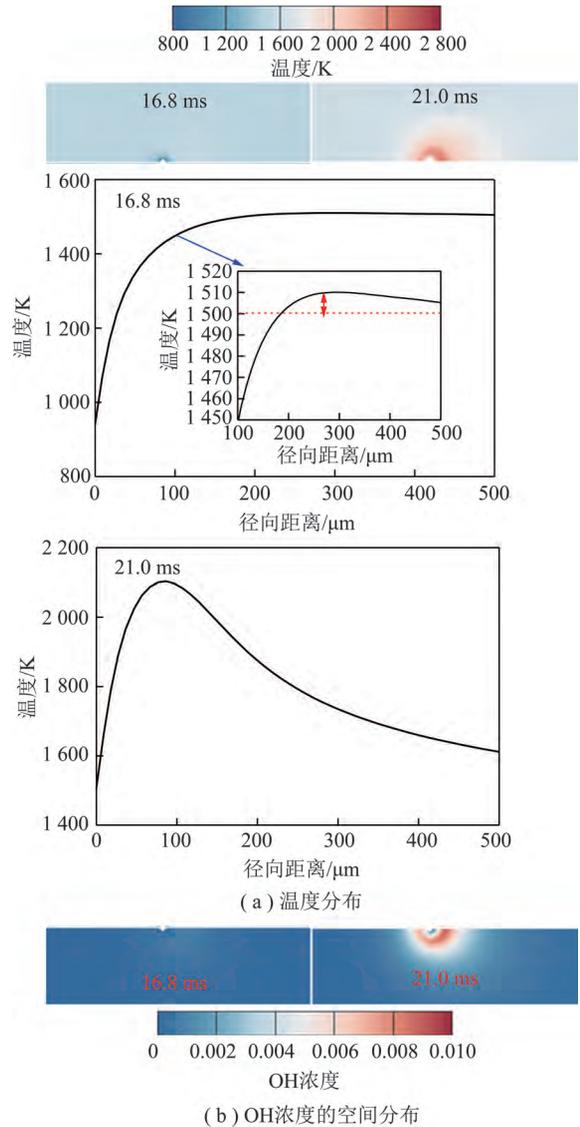


图 4 1 500 K-0.2O<sub>2</sub> 工况下单颗粒气相挥发分燃烧过程演化  
Fig.4 Evolution of volatile combustion for single particle in 1 500 K-0.2O<sub>2</sub>

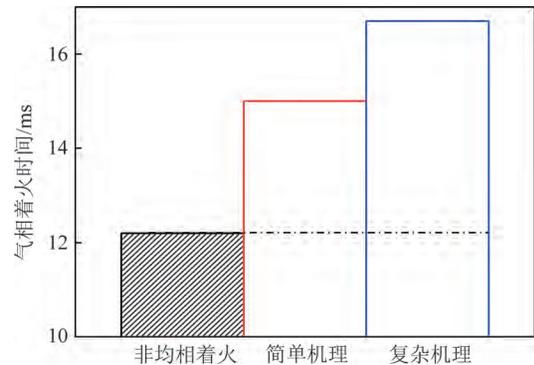
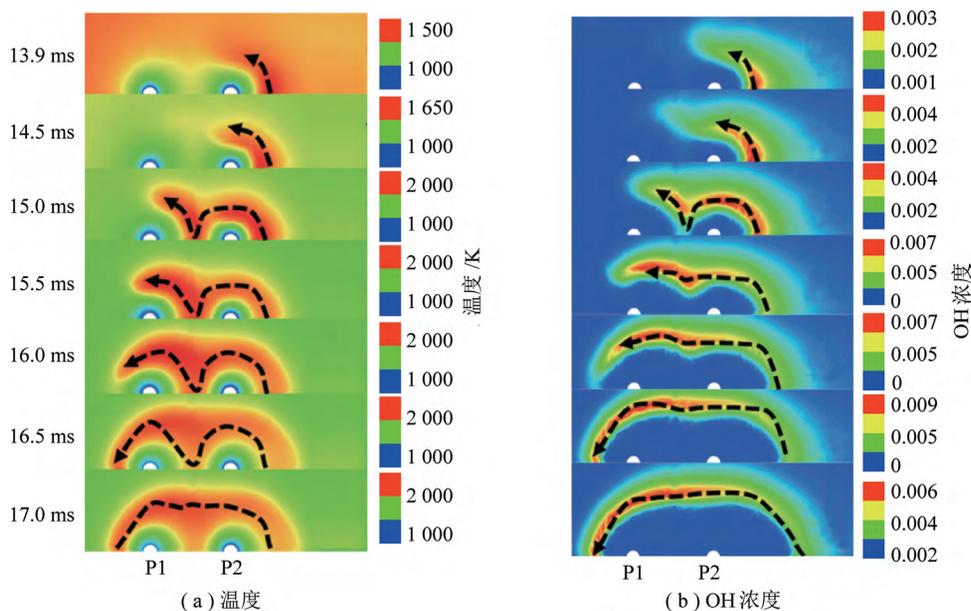


图 5 1 500 K-0.2O<sub>2</sub> 工况下不同气相反应机理计算着火延迟时间的比较  
Fig.5 Comparison of ignition delay time calculated by different gas phase kinetics in 1 500 K-0.2O<sub>2</sub>

了当颗粒间距为 6d(6 倍颗粒粒径)时,气相挥发分燃烧的温度和 OH 浓度分布随时间的演化。值得指

图 6 颗粒间距为  $6d$  的双颗粒工况下温度和 OH 信号分布演化Fig.6 Evolution of temperature and OH distribution under the condition with particle spacing of  $6d$ 

出的是,当颗粒间距为  $6d$  且其他条件不变时,P2 比上游颗粒 P1 晚  $0.84\text{ ms}$  进入高温场,即升温 and 挥发分释放均较上游颗粒滞后  $0.84\text{ ms}$ 。从计算结果可以看出,气相挥发分着火大约发生在流体时间  $13.9\text{ ms}$ ,初始着火点位于 P2 的下游,而在 P1 下游、P2 上游区域未独立发生气相着火。对比单颗粒工况,上游颗粒 P1 的着火延迟时间从  $16.8\text{ ms}$  提前至  $13.9\text{ ms}$ ,提前了  $2.9\text{ ms}$ ;下游颗粒 P2 的着火延迟时间相较于单颗粒工况下的  $16.8\text{ ms}$  提前了  $3.74\text{ ms}$ (需考虑 P2 本身进入流场时间滞后  $0.84\text{ ms}$ )。因此,相较单颗粒工况(颗粒间距无穷大),双颗粒工况时上、下游颗粒的均相着火均提前。随着时间进一步推移,挥发分火焰面逐渐向上游扩展,一直延伸到 P1 上游。值得注意的是,OH 浓度分布反映出间距  $6d$  的 2 个煤粉颗粒在燃烧中最终形成一个整体的包络面,而非 2 个单独的火焰包络面。

图 7 比较了 2 个工况下(单颗粒工况、颗粒间距为  $6d$ )流体时间  $13.9\text{ ms}$  时沿径向(指向下游)的颗粒温度和  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CH}$  和  $\text{OH}$  的空间分布。图 7(a) 为单颗粒工况,图 7(b) 为颗粒间距  $6d$  的双颗粒工况。可见该时刻,单颗粒工况下的气相温度沿径向未发生明显变化; $\text{CH}$  和  $\text{OH}$  基团分布也表明此刻气相中并未形成较强的化学反应区。因此,单颗粒工况在此时刻并未着火。而双颗粒工况下,流体时间  $13.9\text{ ms}$  时的气相温度分布明显不同。图 7(b) 的红色虚线表示下游颗粒的位置。由于下游颗粒 P2 的加入,使得 P2 下游挥发分气体的浓度升高。在该时刻,P2 颗粒下游  $175\text{ }\mu\text{m}$  处的 OH 及  $\text{CH}$  基团浓度出

现峰值,且局部气相温度升高,发生气相着火。因此,相较于单颗粒工况,双颗粒工况更易在下游颗粒附近达到气相着火极限而发生均相着火。

上述分析显示,在给定颗粒温度历史(即非均相着火延迟时间相同)情况下,颗粒间距为  $6d$  的双颗粒工况下煤粉颗粒的气相(均相)着火与单颗粒有较大差异,且上、下游颗粒间的着火行为也存在较大差异。选取均相着火与非均相着火延迟时间的差值,即  $\Delta t = t_{\text{homo}} - t_{\text{hetero}}$ ,作为表征着火模式的特征参数<sup>[14]</sup>。显然, $\Delta t$  越大,表示均相着火越滞后,煤粉颗粒的着火模式越倾向非均相着火主导;反之着火模式向均相着火倾斜。根据前述结果,对于研究工况,单颗粒着火模型所预测的非均相着火延迟时间(颗粒温升曲线拐点)为  $12.2\text{ ms}$ 。CFD 计算结果表明,单颗粒工况均相着火延迟时间为  $16.9\text{ ms}$ ,对应的着火模式特征参数  $\Delta t = 4.7\text{ ms}$ ;对于颗粒间距为  $6d$  的双颗粒工况,上游颗粒对应的着火模式特征参数为  $1.7\text{ ms}$ ,下游颗粒对应的  $\Delta t = 0.86\text{ ms}$ 。可见,颗粒间距为  $6d$  的双颗粒工况下,两颗粒的着火模式均较单颗粒向均相着火倾斜( $\Delta t$  减小),且下游颗粒的倾斜趋势较上游颗粒更显著。

### 2.3 颗粒间距对煤粉颗粒着火的影响

进一步改变 2 颗粒的间距,研究颗粒间距对煤粉颗粒着火延迟时间和着火模式的影响。图 8 给出了不同颗粒间距时上游颗粒 P1 和下游颗粒 P2 气相着火延迟时间和着火模式的变化情况。横坐标的无穷远代表单颗粒工况。可见,当两颗粒间距由无穷远逐

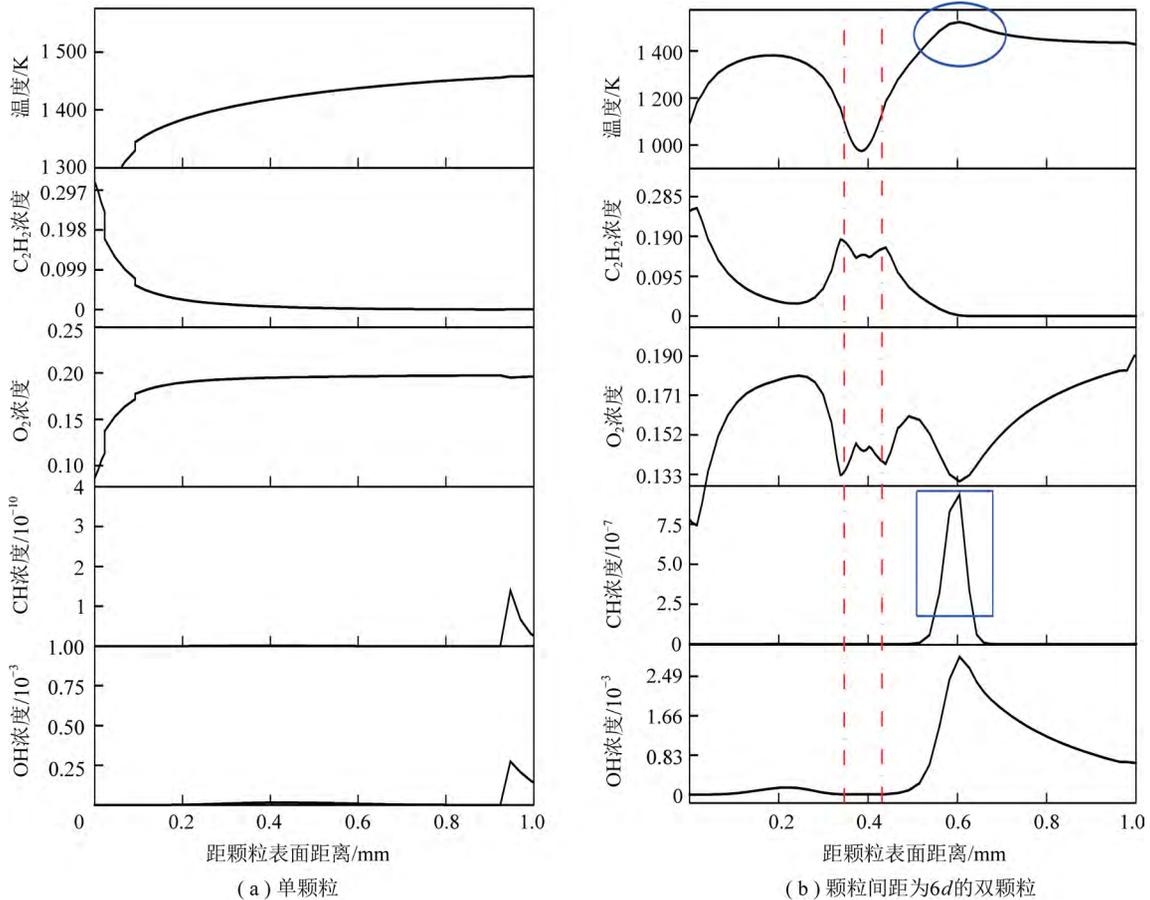


图 7 流体时间 13.9 ms 时单颗粒和颗粒间距为 6d 的双颗粒工况下温度和组分空间分布

Fig.7 Temperature and species distribution of single particle and two particles with particle spacing of 6d at 13.9 ms

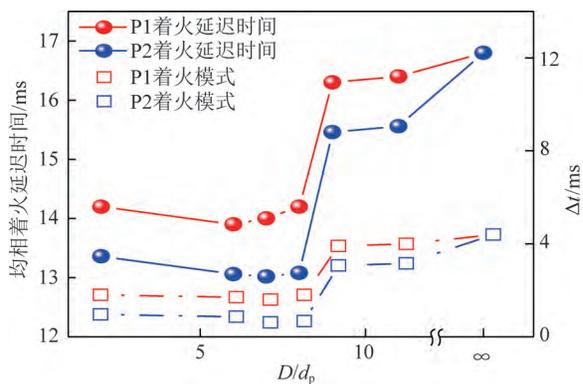


图 8 不同颗粒间距下的均相着火延迟时间和着火模式特征参数

Fig.8 Homogeneous ignition delay time and ignition mode parameter in conditions with different particle spacing

渐缩小时,上游颗粒 P1 和下游颗粒 P2 的气相着火延迟时间均逐渐降低,且下游 P2 颗粒的气相着火始终较 P1 有所提前。当颗粒间距缩小至 8d 时,两颗粒的气相着火延迟时间均大幅阶跃式降低。通过分析火焰结构可知,均相着火延迟时间的跃变主要与气相的火焰结构转换相关。当颗粒距离较远(9d~无穷远),每个颗粒被近球形气相火焰单独包围;而当颗粒间距减小至 8d 时,双颗粒工况下的挥发分火焰由

2 个单独的火焰面结构转变为一个完整的火焰包络面。颗粒间距为 6d 时的结果如图 6 所示。因此,所观察到的火焰面结构转变与着火延迟时间变化具有较好一致性,也表明挥发分火焰结构的变化是导致在颗粒间距为 8d 附近气相着火延迟时间大幅度降低的主要原因。进一步地,将研究结果与相关文献的研究进行对比。文献[16]研究了颗粒间距对煤粉颗粒挥发分燃烧情况及火焰结构的影响。在颗粒雷诺数  $Re_p=2$  的工况下,当颗粒间距大致为 20d 时,出现了单颗粒和颗粒群组的转换点。而本文所研究的工况下,颗粒雷诺数约为 0.65,较小的雷诺数降低了颗粒边界层由于对流导致的组分输运,在颗粒粒径为 8d 时即出现了挥发分火焰结构的转换。图 8 空心点连线进一步示出各间距下的着火模式特征参数,可见相较于单颗粒工况,随着颗粒间距的缩小,上、下游颗粒都向均相着火主导的区域倾斜。类似地,当颗粒间距  $\leq 8d$  时,挥发分火焰结构发生转变,  $\Delta t$  大幅降低,着火模式向均相着火主导区域发生大幅偏移。同时,相较于上游颗粒,下游 P2 颗粒向均相着火倾斜的程度更强。这表明,当保持其他环境条件一致,缩小颗粒间距会使煤粉颗粒的着火模式向均相着火偏移,且下游

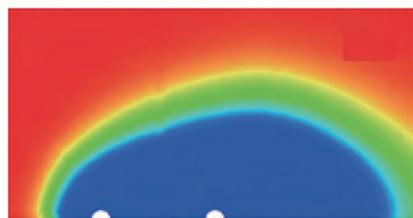
颗粒偏移程度显著高于上游颗粒。

## 2.4 颗粒间距对煤粉颗粒周围气氛影响

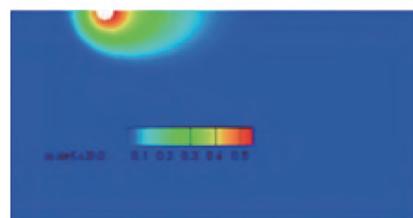
图 9 为流体时间 20.0 ms 时,单颗粒和颗粒间距 6d 时的氧气及挥发分( $C_2H_2$  为代表)浓度的空间分布云图。可见,对颗粒间距 6d 的双颗粒工况,由于形成完整的火焰包络面,颗粒周围出现较大的贫氧区域。贫氧区域的产生对煤粉燃烧中间产物(如  $NO_x$ ) 的生成有重要影响。追踪上游颗粒 P1 表面质点的迹线,并比较不同颗粒间距下质点所经历迹线上的氧气浓度历史,如图 10 所示。可以看出,当颗粒间距减小,流体在低氧浓度区域停留时间延长。同时,在相同颗粒间距(5d)时增加下游颗粒数目,也会导致流体在低氧浓度区域停留时间增加。这意味着挥发分中的含 N 组分在低氧区域的停留时间增加,对后期  $NO_x$  的生成有一定的抑制效果。因此,减小颗粒间距会扩大富燃贫氧区域,抑制燃烧过程中  $NO_x$  的生成<sup>[20]</sup>。



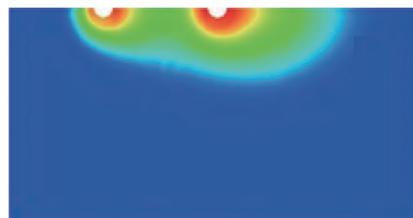
(a) 单颗粒边界层氧气浓度



(b) 双颗粒边界层氧气浓度



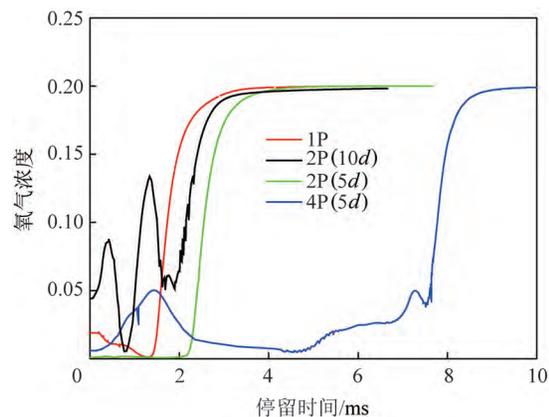
(c) 单颗粒边界层挥发分浓度



(d) 双颗粒边界层挥发分浓度

图 9 单颗粒和颗粒间距为 6d 时颗粒边界层氧气浓度和挥发分浓度分布

Fig.9 Distribution of oxygen and volatiles in particle vicinity for single particle and particle spacing of 6d



注:P 代表颗粒,1P 代表单颗粒

图 10 不同颗粒间距下质点所经历迹线上的氧气浓度  
Fig.10 Oxygen concentration history on the trace line for particles with different spacing

## 3 结 论

(1) 当两煤粉颗粒间距较大( $>8d$ ),颗粒群的着火与单颗粒着火类似。而当颗粒间距较小( $\leq 8d$ ),煤粉颗粒的气相燃烧行为与单个煤粉颗粒有较大的差异,气相挥发分火焰结构由多个独立的近球状火焰面转换为连续的颗粒团簇火焰。

(2) 当两煤粉颗粒间距较小( $\leq 8d$ ),时,颗粒间的相互作用导致上游和下游颗粒的挥发分着火均发生提前,煤粉颗粒的着火模式向均相着火主导倾斜,且下游颗粒着火模式倾斜更为明显。

(3) 煤粉颗粒间距缩小、多颗粒燃烧形成火焰包络面,会导致颗粒周边富燃贫氧区域扩大,这对燃烧过程中  $NO_x$  等对氧气浓度较敏感的污染物生成有一定的抑制作用。

## 参考文献 (References) :

- [1] 国家统计局. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/> [EB/OL]. 2019 中国统计年鉴,2019.
- [2] 周强泰. 锅炉原理[M]. 北京:中国电力出版社,2013:86-87.
- [3] JÜNTGEN H, VANHEEK K H. An update of German non-isothermal coal pyrolysis work [J]. Fuel Processing Technology, 1979, 2(4):261-293.
- [4] 章明川,徐旭常. 煤粉颗粒着火模式的研究[J]. 热力发电, 1992(1):5-11.  
ZHANG Mingchuan, XU Xuchang. Study on ignition mode of pulverized coal particles [J]. Thermal Power Generation, 1992(1):5-11.
- [5] SHADDIX C R, MOLINA A. Particle imaging of ignition and devolatilization of pulverized coal during oxy-fuel combustion[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 32(2):2091-2098.
- [6] RIAZA J, KHATAMI R, LEVENDIS Y A, et al. Single particle ignition and combustion of anthracite, semi-anthracite and bituminous coals in air and simulated oxy-fuel conditions[J]. Combustion

- and Flame, 2014, 161(4): 1096–1108.
- [ 7 ] LEVENDIS Y A, JOSHI K, KHATAMI R, et al. Combustion behavior in air of single particles from three different coal ranks and from sugarcane bagasse [ J ]. Combustion and Flame, 2011, 158 ( 3 ): 452–465.
- [ 8 ] LEE H, CHOI S. An observation of combustion behavior of a single coal particle entrained into hot gas flow [ J ]. Combustion and Flame, 2015, 162(6): 2610–2620.
- [ 9 ] YUAN Y, LI S, LI G, et al. The transition of heterogeneous-homogeneous ignitions of dispersed coal particle streams [ J ]. Combustion and Flame, 2014, 161(9): 2458–2468.
- [ 10 ] LIU Y, GEIER M, MOLINA A, et al. Pulverized coal stream ignition delay under conventional and oxy-fuel combustion conditions [ J ]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2011, 5: 36–46.
- [ 11 ] VASCELLARI M, XU H, HASSE C. Flamelet modeling of coal particle ignition [ J ]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013, 34(2): 2445–2452.
- [ 12 ] GOSHAYESHI B, SUTHERLAND J C. A comparative study of thermochemistry models for oxy-coal combustion simulation [ J ]. Combustion and Flame, 2015, 162(10): 4016–4024.
- [ 13 ] GOSHAYESHI B, SUTHERLAND J C. A comparison of various models in predicting ignition delay in single-particle coal combustion [ J ]. Combustion and Flame, 2014, 161 ( 7 ): 1900–1910.
- [ 14 ] XU Y, LI S, GAO Q, et al. Characterization on ignition and volatile combustion of dispersed coal particle streams: In situ diagnostics and transient modeling [ J ]. Energy & Fuels, 2018, 32(9): 9850–9858.
- [ 15 ] TUFANO G L, STEIN O T, KRONENBURG A, et al. Resolved flow simulation of pulverized coal particle devolatilization and ignition in air-and O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>-atmospheres [ J ]. Fuel, 2016, 186: 285–292.
- [ 16 ] 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.
- [ 17 ] ESSENHIGH R H, MISRA M K, SHAW D W. Ignition of coal particles: A review [ J ]. Combustion and Flame, 1989, 77(1): 3–30.
- [ 18 ] DU X, ANNAMALAI K. The transient ignition of isolated coal particle [ J ]. Combustion and Flame, 1994, 97(3–4): 339–354.
- [ 19 ] DU X, GOPALAKRISHNAN C, ANNAMALAI K. Ignition and combustion of coal particle streams [ J ]. Fuel, 1995, 74(4): 487–494.
- [ 20 ] 王道平, 尚庆雨, 牛芳. 两段式高温滴管炉内烟煤 NO<sub>x</sub>生成规律 [ J ]. 煤炭学报, 2017, 42(12): 3300–3304.  
WANG Daoping, SHANG Qingyu, NIU Fang. NO<sub>x</sub> formation of bituminous coal in two-stage high temperature drop tube furnace [ J ]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(12): 3300–3304.