# 氨煤混燃过程中单颗粒煤粉着火特性

吴梓秋,黄骞,马鹏,杨远平,司桐,李水清 (清华大学能源与动力工程系热科学与动力工程教育部重点实验室,北京 100084)

**摘 要:**开展绿氨与煤混燃有助于双碳目标下的火电降碳,在炉内掺烧技术逐步实现增大掺氨比过程 中,煤粉颗粒着火特性是影响氨煤混燃机组宽负荷灵活运行的关键因素。针对氨与煤粉混合给料的 掺烧技术路径,利用新型两级平焰燃烧器开展了氨煤混燃过程单颗粒煤粉着火特性研究。利用高速 摄影和背光法,通过图像分析获得了不同工况(载气掺氨比、环境氧浓度)下准东煤粉颗粒着火模式 和着火延迟时间。研究发现,非掺氨工况下颗粒着火过程由非均相着火模式主导,而掺氨可增大均相 颗粒着火模式的煤粉颗粒比例。同时,增大掺氨比,煤粉在脱挥发分阶段破碎的比例增大。同时,通 过构建含有氨总包燃烧反应的一维暂态煤粉着火模型,可较好复现氨对煤粉颗粒着火转性的影响:在 中心还原气氛下影响较小;而中心氧体积分数为0.1、0.2 时,掺氨显著降低单颗粒着火延迟时间,这 主要是由于氨火焰提高了煤粉颗粒的加热速率。

关键词:氨煤混燃;着火延迟时间;煤粉着火模式;两级多元扩散平焰燃烧器;高速摄影

中图分类号:TQ517;TK16 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2023)10-0108-08

# Characteristics of single-coal-particle ignition in ammonia-coal cofiring process

WU Ziqiu, HUANG Qian, MA Peng, YANG Yuanping, SI Tong, LI Shuiqing

(Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Department of Energy and Power

Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The development of mixed combustion of green ammonia and coal in coal-fired power plants is beneficial to the carbon reduction of thermal power towards the goal of carbon neutrality. The ignition characteristics of coal particle is the key factor affecting the flexible operation of the units in the process of gradually increasing the ammonia mixing ratio in the furnace with the technology of mixed combustion. Based on the path of blended combustion technology for ammonia and coal powder mixed feed, a new two-stage flat flame burner was used to study the ignition characteristics of single particle coal powder during ammonia coal mixed combustion process. The ignition mode and ignition delay time of the pulverized Zhundong coal particles under different operating conditions (ammonia volume fraction of the carrier gas and the ambient oxygen concentration) were obtained from the image analyses with the high-speed photography and the backlight method. It is found that the ignition process of particles is dominated by the heterogeneous ignition. Meanwhile, with an increase in the ammonia cofiring ration, the proportion of fragmented coal particles during the devolatilization stage increases. At the same time, by constructing a one-dimensional transient coal powder ignition model containing ammonia combustion reaction, the influence of ammonia on the ignition characteristics of coal powder particles can be well reproduced. The effect is relatively small under the central reducing atmosphere. When the central oxygen volume fraction is 0.1 or 0.2, the addition of ammonia significantly reduces the ignition delay time of a single particle, mainly due to the ammonia flame increasing the heating rate of coal powder particles.

Key words: ammonia-coal mixed combustion; ignition delay time; ignition mode; two-stage multiple diffusion flat flame burner; highspeed photography

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52006121);华能集团总部科技项目"基础能源科技研究专项(三)"资助项目(HNKJ22-H105)

通讯作者:李水清(1975—),男,山东菏泽人,教授,博士生导师,博士。E-mail:lishuiqing@tsinghua.edu.cn

引用格式:吴梓秋,黄骞,马鹏,等.氨煤混燃过程中单颗粒煤粉着火特性[J].洁净煤技术,2023,29(10):108-115.

WU Ziqiu, HUANG Qian, MA Peng, et al. Characteristics of single-coal-particle ignition in ammonia-coal cofiring process [J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(10): 108-115.



收稿日期:2023-03-28;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.F23032801

作者简介:吴梓秋(2000—),男,山东青岛人,硕士研究生。E-mail:wuzq22@mails.tsinghua.edu.cn

## 0 引 言

双碳目标下,火电将承担稳定电网的基础能源 功能,同时自身也面临降碳的重大需求。据 IEA 数 据,2022 年我国约 80%的碳排放源于煤炭消费,使 用可再生能源生产的零碳燃料与煤混燃是从源头减 煤降碳的可行技术路线之一<sup>[1-2]</sup>。氨是一种理想的 零碳燃料:其低位发热量与低阶煤相当,易液化储 运,市场成熟,基础设施完善,政策法律相对完 备<sup>[1-4]</sup>。近年来,氨在各类燃烧设备中替代化石能 源的应用场景备受关注<sup>[5-8]</sup>。

针对氨煤混燃,已有研究开展了 1.2 MW<sup>[9]</sup>和 760 kW<sup>[7]</sup>卧式炉试验,并进行了零维反应器<sup>[10]</sup>、三 维煤粉炉<sup>[11]</sup>数值模拟研究。结果表明,CO<sub>2</sub>减排量 与掺氨量呈较好线性关系;掺氨量低于 20%,NO<sub>x</sub>排 放量与煤粉燃烧相当;通过调节氨给料位置和空气 分级燃烧方式,可实现更低 NO<sub>x</sub>排放。掺氨量超过 20%时,NO<sub>x</sub>生成量随掺氨量呈先增加后下降趋势, 表明存在燃料型 NO<sub>x</sub>生成与氨还原 NO<sub>x</sub>的竞争机 制。日本 Chugoku 电力公司在 Mizushima 电厂开展 了 156 MW 锅炉掺烧 0.8%氨(热量比)试验,发现掺 烧后二次再热器入口烟温、锅炉出口 NO<sub>x</sub>及锅炉出 力无明显变化,初步验证了燃煤锅炉少量掺氨的可 行性<sup>[12]</sup>。

然而,混燃过程中氨与煤颗粒,尤其是与挥发分 的相互影响机理尚不清晰,使开发宽掺烧比、灵活运 行的氨煤混燃技术缺乏原理支撑。部分研究关注氨 煤混燃的球形火焰传播速度,发现对于高挥发分煤, 氨煤混燃火焰传播速度高于纯煤粉或纯氨火焰传播 速度,表明二者之间可能存在相互促进作用<sup>[13-14]</sup>。 近期研究采用 CH \* 化学自发光谱表征氨煤混燃的 煤粉颗粒群着火延迟时间,并用 OH-PLIF 光谱研究 挥发分燃烧特性,揭示了氨煤混燃早期反应的协同 强化效应[15]。煤粉燃烧研究中,单颗粒煤粉燃烧试 验可揭示微观层面上煤粉运动、着火特性及火焰形 态,有助于开发单颗粒燃烧模型<sup>[16]</sup>。然而,氨煤混 燃中尚无煤粉单颗粒行为研究。此外,在燃煤锅炉 内,煤粉颗粒经历了从还原气氛向氧化气氛的转 变[17];而氨煤混燃时,由于通氨位置、方式不同,煤 粉颗粒可能经历更复杂的气氛转变,要求单颗粒燃 烧研究中能有效模拟多变气氛场。

笔者采用两级平焰燃烧器,设计了一系列典型 工况模拟燃烧气氛及掺氨量对单颗粒煤粉着火行为 的影响。该两级平焰燃烧器可实现煤燃烧过程的 "还原-氧化"气氛转变<sup>[18]</sup>,能提供灵活多变的气氛 条件以研究氨煤混燃的着火特性。利用高速摄影辨 析了单颗粒煤粉着火模式,统计煤粉着火延迟时间, 研究了煤粉着火、挥发分燃烧和煤焦颗粒破碎特性, 进而初步建立了掺氨气氛下的单颗粒着火模型,为 发展实用的燃煤锅炉掺氨技术提供技术支撑。

## 1 试 验

## 1.1 试验装置与工况设计

两级平焰燃烧器和光学测量系统示意如图1 (a) 所示。该平焰燃烧器通过在毫米级六角形(蜂 窝状)网状物中插入毫米级不锈钢管制成蜂窝孔和 插管2类气路,分别通入燃料和氧化剂(或采用相 反的气体匹配方式);中心管(内径2mm)利用载气 通入煤粉。该燃烧器能以 10<sup>5</sup> K/s 加热速率加热煤 粉颗粒,使其具有近似炉膛中煤粉颗粒升温过程。 同时,可通过调配燃料、氧化剂流量,分别调控高温 焰后气氛和温度,逼近炉内真实场景。两级平焰燃 烧器采用内外双蜂窝设计,可独立调节气氛,形成内 部贫氧、外部富氧的焰后高温气氛,以模拟实际炉膛 环境。燃烧器详细结构和尺寸参数可参考文献 [19-20]。试验采用高速相机(Phantom v1840,帧 率设置为9100 fps,曝光时间为50 µs)观测煤粉着 火燃烧行为,通过参考物校准后计算得到分辨率为 95.9 μm/pixel。背光光源为亮度可调的白色条形 LED 灯,颜色、亮度基本均一。通过调节 LED 灯电 流以调整亮度,使高速相机既能通过拍摄颗粒背光 下的阴影捕捉到煤粉颗粒的沿程运动轨迹,又能观 察较明亮的挥发分燃烧过程和焦炭燃烧过程。煤粉 停留时间可由帧时间间隔直接读取。

试验工况见表 1。试验中,燃料采用 CO 及少量 助燃 CH<sub>4</sub>(体积分数<5%),氧化剂采用 O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>混合 气。载粉气采用 N<sub>2</sub>/NH<sub>3</sub>混合气,以模拟氨通入富 燃区降低 NO<sub>x</sub>的技术路线。

内外蜂窝氧浓度通过调节内外蜂窝  $CO_{,0}N_{,2}$ 进气量进行调控。即通过预设焰后温度  $T_{,}$ 氧浓度  $f(O_{2})$ 和烟气流速  $v_{gas}(表 1 设定值),在内、外蜂窝 区针对 CO 燃烧反应:$ 

 $aCO+bO_2+cN_2 \longrightarrow aCO_2+(b-a/2)O_2+cN_2$ ,(1) 分别联立如下3个方程求解CO、O<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>的体积流量 $a \ b \ c^{[21]}$ :

 $ah(\text{CO},298 \text{ K}) + bh(\text{O}_2,298 \text{ K}) + ch(\text{N}_2,298 \text{ K}) =$  $ah(\text{CO}_2,T) + \left(b - \frac{a}{2}\right)h(\text{O}_2,T) + ch(\text{N}_2,T), (2)$ 



Fig.1 Experiment setup and condition design

表1 试验工况							
Table 1   Experiment conditions							
位置	焰后氧体积分数/%	焰后速度/	CO 体积流量/	O2体积流量/	N2体积流量/	分组	
		$(\mathbf{m} \cdot \mathbf{s}^{-1})$	$(L \cdot min^{-1})$	$(L \cdot min^{-1})$	$(L \cdot min^{-1})$		
	20	0.5	0.11	0.19	0.42	С	
内蜂窝	10	0.5	0.11	0.12	0.48	В	
	0	0.5	0.11	0.06	0.55	А	
外蜂窝	20	0.5	3.32	5.48	15.52		

$$\frac{b - a/2}{a/2 + b + c} = f(0_2), \qquad (3)$$

$$\frac{a}{2} + b + c = v_{gas}A, \qquad (4)$$

式中, h(X,T) 为组分 X 在温度 T 下的绝对焓; A 为 燃烧器内蜂窝或外蜂窝的截面积。

用1、2、3、4分别表示载粉气中氨体积分数分别 为0、30%、60%、100%的试验组。保持外蜂窝焰后 氧体积分数为20%,调节内蜂窝焰后氧体积分数为 0、10%、20%,分别用A、B、C表示。因此共有12个 试验组,记作A1~C4。不同掺氨比下的纯气相火焰 形貌如图1(b)所示。试验设定的理论焰后温度为 1500K。利用热电偶和烟气分析仪测量工况参数,

如图 1(c) 所示。可见该燃烧器在 100 mm 内具有良好的恒温性,并存在预期的内外蜂窝氧气分区特性。

## 1.2 试验样品

试验采用准东煤,其工业分析和元素分析见表 2。试验前,首先使用振筛机筛选粒径 110~120 μm 煤粉,在烘箱中恒温 85 ℃干燥至少 1.5 h,以减少煤 粉颗粒之间的黏结,并利用马尔文粒径分析仪验证 样品粒径。利用准东煤热解半焦作为对比,煤粉通 过步进电机和高频振荡给粉器给出,高频振荡给粉 器可使煤粉颗粒分散给入,由载粉气(N<sub>2</sub>/NH<sub>3</sub>混合 气)送入中心给粉管。给粉流量设定为 0.01 g/min, 以降低煤粉颗粒间相互影响,实现单颗粒煤粉燃烧 观测。

表 2 准东煤煤粉性质 Table 2 Properties of Zhundong coal

工业分析/%			元素分析/%					$Q_{ m net,ad}$
V <sub>d</sub>	$A_{\rm d}$	$FC_{\rm d}$	C <sub>ar</sub>	H <sub>ar</sub>	N <sub>ar</sub>	$O_{ar}$	$S_{t,ar}$	$(MJ \cdot kg^{-1})$
30.58	5.88	63.54	71.60	3.16	0.78	23.85	0.52	28.83

#### 1.3 单颗粒煤粉燃烧模型

单颗粒燃烧试验为深入理解燃烧机理,开发相 应模型提供基础。前期研究中,开发了一个基于 CPD 的单颗粒煤粉一维暂态着火模型<sup>[21]</sup>,可在常 规、富氧等工况下辨识多煤种的着火模式,如图 2 所 示。模型包含一维球对称系统中的气相和颗粒相非 稳态守恒演化方程,包括气相质量、组分、能量和颗 粒相质量、密度及能量方程(煤颗粒单膜模型),通 过空间离散(一维网格长度 2  $\mu$ m)和时间推进,数 值求解获得颗粒相温度  $T_p(t)$ 及气相温度  $T_g(t,r)$ 时 空演化,并据此分别判断异相着火延迟时间(颗粒 温度出现拐点)和均相着火延迟时间(气相温度出 现局部极大)<sup>[21]</sup>。

质量守恒方程:

$$4\pi r^2 \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial m}{\partial r} = S_{\rm pm}, \qquad (5)$$

式中, $\rho$ 为气体密度,kg/m<sup>3</sup>; $\dot{m}$ 为质量流率,kg/s;  $S_{um}$ 为颗粒相和气相的质量交换源项;r为球坐标系



图 2 单颗粒煤粉一维暂态着火模型



组分守恒方程:

$$4\pi r^{2} \frac{\partial \rho Y_{i}}{\partial t} + \dot{m} \frac{\partial Y_{i}}{\partial r} - \frac{\partial}{\partial r} \left( 4\pi r^{2} \rho D_{i} \frac{\partial Y_{i}}{\partial r} \right) = 4\pi r^{2} \omega_{i} + S_{aY_{i}}, \qquad (6)$$

式中, $Y_i$ 、 $D_i$ 、 $\omega_i$ 分别为组分*i*的质量分数、二元扩散 系数(m<sup>2</sup>/s)和化学反应速率(kg/(m<sup>3</sup> · s)); $S_{pY_i}$ 为 颗粒相与气相组分交换的源项。

能量守恒方程:

$$4\pi r^2 \frac{\partial \rho}{\partial t} + \dot{m} \frac{\partial h}{\partial r} - \frac{\partial}{\partial r} \left( 4\pi r^2 \rho \alpha \frac{\partial h}{\partial r} \right) = 4\pi r^2 \omega_{\rm h}, \quad (7)$$

式中,h 为气相混合物焓值,J/kg; $\omega_h$  为气相化学反应能量变化速率, $J/(m^3 \cdot s)$ ; $\alpha$  为热扩散率, $m^2/s_o$ 

在此基础上,针对氨煤混燃情形进行初步拓展: 设定气相计算域为150 μm×2 μm,无穷远处为含氨 气氛,添加描述氨燃烧的简化总包反应<sup>[22]</sup>(表3)。 因此该模型可初步预测掺氨环境下的煤粉着火延迟 时间及着火模式,并可定量分析温度、氧体积分数、 反应等因素的影响。

#### 表 3 氨燃烧总包反应<sup>[22]</sup>

Table 3 Overall reactions of ammonia combustion	[22]
---	------

反应	反应速率
$NH_3 + O_2 \longrightarrow NO + H_2O + 0.5H_2$	$350T^{7.65} \mathrm{e}^{\frac{-5.24 \times 10^8}{T}} \varphi(\mathrm{NH}_3) \varphi(\mathrm{O}_2)$
$NH_3 + NO \longrightarrow N_2 + H_2O + 0.5H_2$	424 000 $T^{5.3} e^{\frac{-3.5 \times 10^8}{T}} \varphi(\text{NH}_3) \varphi(\text{NO})$
$NH_3 \longrightarrow 0.5N_2 + 1.5H_2$	$0.185 T^{1.25} \mathrm{e}^{\frac{-6.9 \times 10^7}{T}} \varphi(\mathrm{NH_3})$

## 2 试验结果及讨论

#### 2.1 煤粉单颗粒着火模式

试验观察到2种典型着火模式:非均相着火模 式(图3(a))和均相着火模式(图3(b))。图3(a) 中非均相着火的典型特征为煤粉颗粒从颗粒边缘逐 渐开始被点燃,直至整个颗粒燃烧。而典型的均相 点火模式则是两阶段着火过程:挥发分着火一焦炭 着火。图3(b)中在点火第1阶段,煤粉析出的挥发 分首先燃烧,形成了包裹着煤粉颗粒的挥发分火焰。 煤粉挥发分逐渐燃尽时,整个火焰逐渐减小至煤粉 颗粒表面,点燃了焦炭。焦炭燃烧时,火焰半径逐渐 增大。整个焦炭燃烧过程持续30 ms 以上。从点火 延迟时间来看,非均相点火的点火延迟时间为 24 ms,而均相点火的点火延迟时间为17 ms,表明均 相点火更易发生。



Fig.3 Two typical coal particle ignition modes

由于煤粉颗粒间的异质性,须对各工况下的煤 颗粒着火事件特性进行统计,才能消除单颗粒的偶 然性,获得具有统计意义的认识。内圈焰后氧气体 积分数 20% 工况下不同着火模式主导的颗粒比例 如图4所示。可知在氧化性气氛下,随载气中氨比 例上升,均相着火主导的颗粒占比均增大。这是由 于煤粉由 N<sub>2</sub>/NH<sub>3</sub>混合气送入焰后高温环境。氨先 于煤粉发生反应,消耗氧气并提高了煤粉颗粒周边 的局部温度。各气氛下通氨均提高了气相温度,特 别是焰后氧体积分数 20% 的组别(C) 最高可提高 500 K(图1(c))。因此,氨反应可提高煤粉颗粒表 面温度,促进挥发分析出。同时,氨与挥发分消耗 氧,阻隔了氧与焦炭的直接接触,进而使煤粉颗粒更 易发生均相点火。表明掺氨对均相着火的促进效应 比对非均相表面反应的影响更显著,煤粉着火模式 向均相转变。



图 4 焰后氧体积分数 20%组别中煤粉主导着火模式统计 Fig.4 Statistics of dominant ignition modes of pulverized coal in cases of 20% post-flame O<sub>2</sub> concentration

#### 2.2 煤粉着火延迟时间

不同工况的典型煤粉单颗粒着火行为如图 5 所 示(彩色部分为纯气相燃烧下单反相机拍摄图像, 其中淡黄色为氨气火焰;黑白部分为高速相机摄影 对单个颗粒的追踪图像)。需要指出的是,背光拍 摄时,大部分时间高速影像中不可见氨火焰。中心 管的氨进入高温环境后,形成稳定的射流火焰(图 1 (b)),各工况下的火焰面轮廓被画入图 5。氨火焰 长度随载气掺氨比增加而增大,随内区焰后氧浓度 升高而降低,火焰颜色也由橙色变为亮黄色(图 1 (b))。由图 1(c)可知,氨火焰降低了其所在区域 的氧体积分数,提高了当地气相温度(最高可造成 500 K 温度差别),并将沿程气相温度峰值提前,提高 了煤粉加热速率。同时,观察到气相火焰内部煤粉颗 粒始终是未燃黑影形态(仅在 C4 氨火焰端部存在挥 发分火焰),可认为煤粉着火普遍在氨火焰面之后。



#### 图5 不同气氛下煤粉着火过程

Fig.5 Ignition process of coal particle in different atmospheres

对各工况下可分辨的煤粉颗粒着火延迟时间进行统计,结果如图 6 所示(平均值及方差)。对图 6 中氧气体积分数 20% 的 4 组数据进行单侧的 Coehran & Cox 近似 t 检验。





Fig.6 Ignition time of coal particle in different atmospheres

H0为低掺氨量煤粉着火延迟时间≤高掺氨量 煤粉着火时间;H1为低掺氨量煤粉着火延迟时间> 高掺氨量煤粉着火时间。

在 α=0.05 水平下,0 与 30%、30% 与 60%、60% 与 100% 的 t 值分别为 3.459、2.310、5.649,均大于 t' (单侧 t 检验接受原假设的临界值) 0.05(1.666、 1.676、1.681),因此 P<0.05。按照 α=0.05 水准,拒 绝 H0,接受 H1,结论具有统计学意义,可认为低掺 氨量煤粉着火延迟时间大于高掺氨量煤粉着火 时间。

首先,若载气中不含氨,内区焰后氧浓度对煤粉 颗粒的平均着火延迟时间无显著影响(均约 23 ms),体现了单颗粒与浓颗粒群着火特性的差异: 单颗粒试验中氧扩散到颗粒表面的特征时间并非煤 颗粒着火制约因素,内区焰后氧浓度对沿程温度分 布影响不显著,煤颗粒仍主要以异相着火为主(图 4 为焰后氧气体积分数为20%的工况)。

若载气通氨,内区焰后还原气氛(氧体积分数 为0)工况下煤粉平均着火延迟时间变化很小。氨 火焰提高了煤粉加热速率,促进煤粉热解,但氨燃烧 也会与挥发分及焦炭燃烧竞争氧气,这在焰后还原 性气氛下影响最显著,与温度升高对着火的促进效 果抵消,因此煤粉平均着火延迟时间基本不变。但 内区氧体积分数为10%和20%时,掺氨使煤粉着火 时间显著提前,且掺氨比越大,煤粉着火时间越短, 说明升温对着火提前的促进作用占主导。考虑到掺 氨后均相着火的煤粉颗粒占比增加(图4),表明着 火提前主要由挥发分燃烧提前造成。

#### 2.3 煤粉颗粒破碎行为

煤粉燃烧过程中,观察到2种破碎方式:①第1 类焦炭燃烧阶段的破碎,该阶段破碎表现为剧烈的 烟花状爆裂,一般发生在停留时间大于 20 ms 的煤 粉颗粒上,可能是颗粒温度梯度引起的应力导 致[23]。② 第2 类挥发分燃烧阶段的破碎, 一般发 生在停留时间小于 20 ms 的煤粉颗粒上,可能是由 于表面反应对煤粉颗粒表面的破坏作用导致。准东 煤挥发分较高,不掺氨条件下燃烧,2种破碎方式均 会发生,这与文献[24]报道相符,但以第1种(图7 (a))为主;但在载气掺氨燃烧工况中,脱挥发分阶 段发生破碎(图7(b))的煤粉数目显著增多。主要 是由于氨-煤混燃过程中,煤粉经过氨的气相火焰 从而在热解阶段获得更高的加热速率,促进挥发分 析出,此外氨气相反应的自由基池也促进挥发分反 应,甚至促进了煤/焦表面反应,对煤/焦颗粒表面造 成破坏,增大了第2类破碎发生的概率。

#### 2.4 氨煤混燃下单颗粒着火模拟

多元扩散平焰燃烧器具有在轴向一定高度内组



图 7 2 种煤粉破碎类型 Fig.7 Two types of coal particle fragmentation

分、温度参数稳定的特性,因此可用一维单颗粒模型 简化燃烧过程。考虑煤粉与其周围气体的速度差异 不显著,假设煤粉及其表面3个粒径范围的气体与 煤粉无相对位移,进而可用一维模型简化传热、传 质、反应过程运算。

焰后氧体积分数分别为 0、10%、20%,载气中氨 体积分数分别为 0、30%、60%、100% 的气氛下煤粉 颗粒着火延迟时间的模拟结果与试验测量值比较如 图 8 所示。着火延迟时间由气相径向上出现极大值 的时刻确定。模型计算结果表明,试验工况下, 120 μm准东煤着火延迟时间约 30 ms,与实际统计 值相差约 6 ms。在载气中加入氨气可降低煤粉着 火延迟时间,且这一效应随氧气体积分数升高而增 强,在焰后氧气体积分数 20%,载气为纯氨的情况 下,降幅达 13 ms。初步模型可较好复现部分试验 观测到的关键定性特征:特别是着火延迟时间随掺 氨比增大而下降。但初步模型预测值均高于试验观 测值。这可能是模型高估了氨在热解阶段,氧气消 耗对煤颗粒表面氧化的阻碍效用,理由是氨气对氧 气的消耗导致煤粉颗粒表面的氧气浓度一直处于





低水平,同时未充分考虑实际中存在对流效应,体现 在氨气在煤粉表面的浓度较低。

## 3 结 论

1) 氨与一次风粉共同给入高温环境(1500 K) 下, 氨先着火并形成稳定的非预混火焰。载气掺氨 能缩短准东煤的着火延迟时间,并在一定程度上促 进煤粉着火向均相着火模式倾斜(主体仍是非均相 主导)。主要通过改变煤粉颗粒沿程温度过程实 现: 氨火焰使煤颗粒初始热解段升温速率更大, 促进 挥发分析出, 缩短煤粉均相着火时间。试验中观察 到掺氨使煤颗粒在脱挥发分阶段破碎更频繁。

2)载气通氨时,内区焰后还原气氛(氧体积分数为0)工况下煤粉平均着火延迟时间变化较小,这 是由于氨消耗氧气的效应与氨火焰提高煤粉加热速 率的效应相抵消;内区氧体积分数为10%~20%,掺 氨使煤粉着火时间显著提前,且掺氨比越大,煤粉着 火时间越短。

3)通过耦合氨燃烧单步总包反应,所建立的单颗粒一维暂态着火模型可定性复现掺氨对着火延迟时间的影响趋势。笔者提供了宽工况下高质量的着火特性试验数据,为开发高可用性的氨煤混燃反应机理提供基础验证数据,以期在后续研究中充分发挥三维模拟详细揭示流场特性的优势。

#### 参考文献(References):

- [1] IEA. Globalhydrogen review 2021 [R]. Chile: International Energy Agency, 2021.
- JERA. Towardszero CO<sub>2</sub> emissions in 2050[EB/OL].(2020-10-13)[2023-03-20]. https://www.jera.co.jp/english/corporate/zeroemission/.
- [3] KOBAYASHI H, HAYAKAWA A, SOMARATHNE K D A, et al. Science and technology of ammonia combustion [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37(1):109–133.
- [4] VALERA-MEDINA A, XIAO H, OWEN-JONES M, et al. Ammonia for power [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2018,69:63-102.
- [5] REITER A J, KONG S. Combustion and emissions characteristics of compression-ignition engine using dual ammonia-diesel fuel
   [J]. Fuel, 2011, 90(1):87-97.
- [6] KURATA O, IKI N, MATSUNUMA T, et al. Performances and emission characteristics of  $NH_3$  – air and  $NH_3$  –  $CH_4$  – air combustion gas-turbine power generations [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2017, 36(3):3351–3359.
- [8] ISHIHARA S, ZHANG J, ITO T. Numerical calculation with de-

tailed chemistry of effect of ammonia co-firing on NO emissions in a coal-fired boiler [J]. Fuel, 2020, 266:116924.

- [9] MASATO T, GOTOU T, ISHII H, et al. Experimental investigation of ammonia combustion in a bench scale 1.2 MW-thermal pulverised coal firing furnace[J]. Applied Energy, 2020, 277:115580.
- [10] ISHIHARA S,ZHANG J,ITO T. Numerical calculation with detailed chemistry on ammonia cofiring in a coal-fired boiler: Effect of ammonia co-firing ratio on NO emissions [J]. Fuel, 2020, 274:117742.
- [11] ZHANG Juwei, ITO Takamasa, ISHII Hiroki, et al. Numerical investigation on ammonia co-firing in a pulverized coal combustion facility: Effect of ammonia co-firing ratio [J]. Fuel, 2020, 267:117166.
- The Chugoku Electric Power Co. Inc., Energia Research. Test results of the ammonia mixed combustion at Mizushima Power Station Unit No. 2 and related patent applications [R]. Pittsburgh:2018 AICHe Annual Meeting, 2018.
- [13] KHALID H, ICHIMURA R, HASHIMOTO G, et al. Effect of fuel ratio of coal on the turbulent flame speed of ammonia/coal particle cloud co-combustion at atmospheric pressure [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2021, 38(3):4131-4139.
- TANIGUCHI M. Flamepropagation velocity for co-combustion of pulverized coals and gas fuels [J]. Energy & Fuels, 2021, 35 (7):6305-6314.
- [15] MA Peng, HUANG Qian, WU Ziqiu, et al. Optical diagnostics on coal ignition and gas-phase combustion in co-firing ammonia with pulverized coal on a two-stage flat flame burner[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2023, 39(3):3457-3466.
- [16] LEVENDIS Y, JOSHI K, KHATAMI R, et al. Combustion behav-

ior in air of single particles from three different coal ranks and from sugarcane bagasse [J]. Combustion and Flame, 2011, 158 (3):452-465.

- [17] MA Peng, HUANG Qian, GAO Qi, et al. Effects of Na and Fe on the formation of coal-derived soot in a two-stage flat-flame burner[J]. Fuel, 2020, 265:116914.
- MA Peng, HUANG Qian, YANG Yuanping, et al. Simultaneous investigation of coal ignition and soot formation in two-stage O<sub>2</sub>/ N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> atmospheres[J]. Fuel, 2022, 314:122808.
- [19] 马鹏,黄骞,闫恒,等. 煤粉燃烧初期钠元素与碳烟相互作用的光学诊断研究[J]. 煤炭转化,2022,45(3):11-17.
  MA Peng,HUANG Qian,YAN Heng, et al. Laser-induced Incandescence (LII) diagnostics on the sodium-soot interaction in the early stage of pulverized coal combustion[J]. Coal Conversion, 2022,45(3):11-17.
- [20] 袁野. 煤粉燃烧及碱金属析出行为的光学诊断研究[D]. 北京:清华大学,2016.
- [21] 许扬.复杂气氛条件下煤粉着火和焦炭燃烧特性研究[D]. 北京:清华大学,2020.
- [22] MONNERY W D, HAWBOLDT K A, POLLOCK A E, et al. Ammonia pyrolysis and oxidation in the Claus furnace[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2001, 40(1):144-151.
- [23] ZHANG Hongtao, CEN Kefa, YAN Jianhua, et al. The fragmentation of coal particles during the coal combustion in a fluidized bed
   [J]. Fuel, 2002, 81(14):1835–1840.
- [24] GAO Qi, LI Shuiqing, ZHAO Yingqi, et al. Mechanism on the contribution of coal/char fragmentation to fly ash formation during pulverized coal combustion [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37(3):2831-2839.