

细颗粒煤流化强化层燃燃烧机理分析与实验

朱 双^{1,2}, 郭强³, 范垂钢^{1,4*}, 丁广超¹, 李松庚^{1,2}

(1. 中国科学院过程工程研究所 多相复杂系统国家重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院大学 化学工程学院, 北京 100049; 3. 绿源能源环境科技集团有限公司, 辽宁营口 115000; 4. 中国科学院大学 中丹学院, 北京 100049)

摘要: 在双碳资源背景下,为实现煤炭的高效清洁利用,采用层燃复合细颗粒煤流化的燃烧方式可提升层燃炉上粗颗粒煤的燃烧效率。为了对这一现象给出理论解释,进行了相关机理实验研究。首先通过管式炉等温燃烧实验验证了复合燃烧方式的可行性:实验通过对比粗细煤混合燃烧与粗颗粒煤单独燃烧时的烟气组分变化、颗粒表面温度、着火时间和燃尽时间等参数,探究流化细煤存在下的燃烧效果;并结合气相和固相侧数据分析分别对照说明了流化细煤的促燃作用。其次,系统地研究了床层温度、细煤占比以及空气风量对粗细混煤燃烧的影响,重点考察了着火时间、燃尽时间、碳转化率、颗粒表面温度和反应指数,为复合燃烧方式在层燃炉上的实践提供理论指导。此外,为了深入了解煤燃烧难易程度,采用等转化率法对粗细混煤燃烧进行动力学分析。等温燃烧实验结果表明,在流化细煤存在的情况下,着火时间提前了59%,燃尽时间缩短了26%,燃烧6min后固体失重率高达98%,表现出良好的引燃和促燃效果。因素探究实验显示,燃烧的流化细煤在粗煤周围产生了高温区,粗细煤混合燃烧时在较低工作温度(550℃)下即可快速引燃,最佳细煤占比为33%。增大空气风量能提前着火,并且显著缩短燃尽时间,但较高风速会带来对流冷却。动力学计算给出平均表观活化能为26.37 kJ/mol。

关键词: 层燃; 流化; 复合燃烧; 燃烧特性; 表观活化能

中图分类号: TQ53; TK114

文献标志码: A

Mechanism analysis and Experiment for fluidized fine coals assisting stoker furnace combustion

ZHU Shuang^{1,2}, GUO Qiang³, FAN Chuigang^{1,4}, DING Guangchao¹, LI Songeng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Multi-phase Complex Systems, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. School of Chemical Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. Liaoning Lvyuan Energy Environmental Protection Technology, Yingkou 115000, China; 4. Sino-Danish College, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In the context of dual-carbon resources, in order to achieve efficient and clean utilization of coal, an improved layer combustion method coupled with fluidized fine coal particles is adopted to enhance the combustion efficiency of coarse coal in grate furnace. Experiments are conducted to provide theoretical explanations for this

收稿日期: XXXX-XX-XX 责任编辑:

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项课题“工业锅炉高效燃烧关键技术与示范”(XDA29020400)

作者简介: 朱双(1998-),女,四川成都人,硕士研究生,研究方向为煤炭高效清洁燃烧。E-mail: zhushuang212@mails.ucas.ac.cn

通讯作者: 范垂钢(1977-),男,辽宁省大连市人,副研究员,研究方向为固体燃料洁净转化及污染物控制。E-mail: cgfan@ipe.ac.cn

phenomenon. Firstly, the feasibility of the composite combustion method was confirmed by isothermal combustion experiments within the tube furnace. Combustion characteristics are compared between cases of mixed fine/coarse coal and single coarse coal particle, in terms of flue gas composition, particle surface temperature, ignition time, and burn-out time. Both gas phase and solid phase data were analyzed to verify the combustion-promoting effect of fluidized fine coal. In addition, the influence of bed temperature, proportion of fine coal, and air flow on the combustion of mixed fine and coarse coal was systematically studied, with a focus on ignition time, burnout time, carbon conversion rate, particle surface temperature, and reaction index. This provides theoretical guidance for the practical application of the composite combustion method in layer combustion furnaces. To gain a deeper insight, an isoconversion method was used to analyze the combustion of mixed fine and coarse coal. The data indicate that, in the presence of fluidized fine coal, the ignition time is advanced by 59%, the burnout time is shortened by 26%, and the solid weight loss ratio is up to 98% within 6 minutes, demonstrating excellent ignition and combustion promotion effects. Factorial experiments show that the burning fluidized fine coal creates a high-temperature zone around the coarse coal. When the coarse and fine coals are mixed and burned, they can be ignited quickly at lower temperature (550°C). The optimized fine coal proportion is 33%. Furthermore, increasing the air flowrate can lead to early ignition and significantly shorten the burn-out time, but higher wind speeds will bring about convective cooling. Finally, kinetic calculations give an average apparent activation energy of 26.37 kJ/mol.

Keywords: Stoker furnace combustion; fluidization; composite combustion; combustion characteristics; apparent activation energy.

0 引 言

煤炭作为世界上最丰富的化石燃料，是满足全球能源需求的主要来源之一。根据中国 2022 统计年鉴，我国 2021 年一次能源生产总量 43.3 亿吨标准煤，其中原煤占 67.0%，而原油和天然气分别占 6.6%和 6.1%^[1]。在我国能源格局中，煤炭资源不仅承担着保障国家能源战略的“储备”和“兜底”作用^[2]，而且在未来时间内，煤炭的资源化利用仍将持续占主体。

截至 2012 年底，我国在用燃煤锅炉达 46.7 万台，年消耗原煤约 7 亿吨，占全国煤炭消耗总量的 18%以上^[3]。其中，层燃炉在等容量工业锅炉中使用中相当广泛，约占工业锅炉总台数的 63~65%。然而在层燃炉实际运行过程中，炉渣和飞灰的可燃物含量较高，导致锅炉实际运行效率仅为 60~70%^[4]，低于设计值。主要原因在于炉排上的粗颗粒煤未能充分燃尽，一方面是层燃炉用煤粒径分布较宽，颗粒尺寸在 6~40 mm (<3 mm 的不超过 10%，>40 mm 的不超过 10%)^[5]，粒径分布不均时细煤早已燃尽而粗煤难燃，这样会造成横断面中煤颗粒燃烧不均匀，降低燃烧效率。另一方面是越来越厚的灰渣阻碍了可燃物内核与 O₂ 接触，而层燃炉的移动速度不变，使得在燃烧末期粒径越大则越难以燃尽，进而导致炉渣含碳量高 (30~50%^[4])。正因如此，研究层燃炉的高效燃烧变得尤为重要，这不仅具有巨

大的节能减排潜力，还能满足国家的环保和能源政策要求。

许多研究者将研究重点集中在层燃炉的强化燃烧手段上。例如通过多段配风来完成“各燃烧区域风量按需要供给”，但现场实验表明风门全开时过氧量低于 0.5%，而风门全关时过剩氧量高于 12%。后来熊宗尧等^[6]建议采用将后拱压低的“引射拱”配合分段送风，以增强高温烟气的湍流扰动。而上海交通大学黄祥新教授设计了一种双“人”字拱，在前拱下方组织高温烟气进行强烈旋转，从而增强气流间的混合效果^[7]。刘晓波在炉膛内部配备红外节能炉衬，可以维持炉内高温，增强煤层着火和颗粒燃烧^[8]。实际上，某些改良措施仍未能完全解决粗颗粒煤难以燃尽的问题，因此，有人采用分层燃烧的手段来提高燃烧效率。杨玉格等^[9]结合采用双“人”字拱来导流高温烟气流向前拱，同时采用分层燃烧技术改善燃煤着火条件和燃烧速度，改造后的炉渣含碳量降至 7~9%，并实现了 12%以上的节能率。可见，粗细颗粒分层排布，有利于煤层着火和燃烧。为了提高燃烧速率，刘晓波等^[10]设置可翻动的煤层强化燃烧器，可以促进煤颗粒的灰层剥落和破碎，但同时也增加了炉排结构的复杂性。党银宁等^[11]结合煤粉悬浮燃烧的特点，在层燃炉排的床层上喷煤粉，形成层燃与悬浮燃烧的复合，改造后热效率提高了 9.1%，但仍需考虑飞灰热损失的增加。而绿源能源环境科技集团有限公司提出一种微流化层燃方法^[12]。

^{13]}, 仅通过改善风力使部分燃料处于流化微悬浮状态, 在炉内原始脱硫脱硝效率达到 60~70%的同时, 提高了燃烧速率, 并缩短燃尽行程, 热效率得到显著提高。

综上所述, 层燃与细颗粒煤流化燃烧的结合有利于提高燃烧速率, 促进粗颗粒煤燃尽, 但相关技术原理与方法还需深入和系统探究。笔者借鉴前人工作, 提出层燃复合流化细煤的强化燃烧研究方法, 利用粗颗粒煤周围分布细煤实现快速传质传热来引燃煤层的同时, 依靠细煤流化时本身与周围煤颗粒剧烈碰撞的作用, 冲刷掉煤颗粒表面的灰层, 从而促进粗颗粒煤的充分燃烧。为此搭建了单颗粒煤流化燃烧实验平台, 用于系统研究层燃复合流化

细煤燃烧方式在不同的工作温度、细煤占比和风量等因素下的燃烧特性, 为在层燃炉排上研究及应用流化细煤复合燃烧方式提供基础依据。

1 实验部分

1.1 实验原料

本研究选用神木烟煤为原料, 分别加工成粒径 10~12 mm 的粗颗粒煤和粒径 0.95~1.25 mm 的细颗粒煤。样品的工业分析按照《GB212-2008 煤的工业分析方法》进行, 元素分析在 Elementar macro cube 上展开, 其中氧含量通过差减法得到, 每个分析重复三次, 数据见表 1。

表 1 神木原煤的工业分析及元素分析

Table.1 Proximate analysis and ultimate analysis of Shen Mu coal

工业分析/%				元素分析/%				
M _{ad}	A _{ad}	V _{ad}	FC _{ad}	C _{ar}	H _{ar}	N _{ar}	O _{ar}	S _{ar}
7.49	14.18	31.10	47.23	70.65	4.48	0.89	1.99	0.33

1.2 实验系统

流化床煤燃烧实验装置如图 1 所示。平台主要由供气系统、煤燃烧反应系统、过滤系统与烟气分析系统组成。供气系统由高纯 N₂ 和环境空气组成。煤燃烧反应系统主要由温控电炉、流化床反应器及其对应的温度监控系统构成。温控电炉尺寸 300×300×600 mm, 电炉最高工作温度 1273 K, 温控精度±2 K, 恒温段长度 350 mm。流化床反应器内径 20 mm, 总高 910 mm, 布风板距离上部出口 410 mm, 反应段位于恒温区, 可通过 K 型热电偶对管壁内外分别进行温度测量。过滤系统是由多个微纤维过滤器和 CKD 公司的空气过滤器串联而成, 空气过滤器型号为 F1000-8-W。烟气分析系统为湖北锐意自控系统有限公司生产的 Gasboard-3000Plus 在线红外烟气分析仪, 采样间隔 1s, 可在线监测烟气中的 O₂、CO、CO₂、NO、SO₂ 含量, 量程分别为: O₂ 0~25%、CO 0~2000ppm、CO₂ 0~20%、NO 0~2000ppm、SO₂ 0~2000ppm, 其中 O₂ 精度±2%FS, 其余组分精度±1%FS。

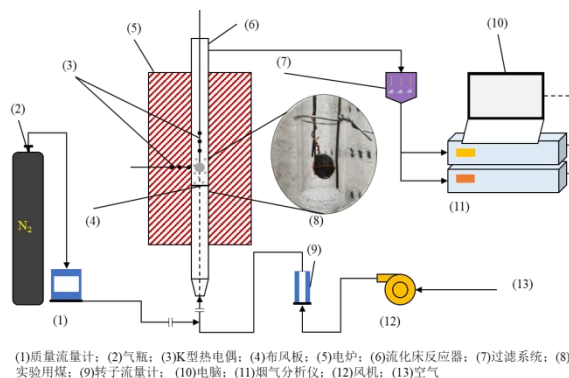


图 1 流化床煤燃烧实验流程

Fig.1 Experimental flowchart for fluidized bed coal combustion

1.3 研究方法

按照图 1 接通整个系统, 启动烟气分析仪进行实时记录。开启风机, 从管式炉底部引入空气, 流量由转子流量计确定。待工况条件稳定后, 迅速投入燃煤, 并将此时刻记为燃烧起始时间。燃烧反应过程净化后的烟气由烟气分析仪进行检测。根据前期预实验, 待烟气分析仪中 CO 浓度降到 100 ppmv 时, 可认为燃烧结束, 到燃烧结束时所经历时间为燃尽时间。当需要中途停止反应以获得特定条件下的固体样品时, 关闭电炉和风机, 然后通入冷 N₂。同时, 为了获得煤的燃烧过程中温度变化的关键数据, 使用热电偶来获取煤颗粒表面的温度, 使我们能够深入了解煤的燃烧行为, 以及各工况的传热情况, 从而更好地理解煤的燃烧特性和实

现高效能源利用的途径。在研究过程中, 本实验涵盖了以下四个工况。

1) 粗颗粒煤单独燃烧工况(简称: 粗煤工况): 在设定的温度和空气风量条件下, 将顶端固定粗颗粒煤的热电偶从管式炉上方快速放入, 使其固定在布风板上方 1~2 cm 处, 粗颗粒煤质量为 1g。记录烟气组分直至燃烧结束。

2) 细煤燃烧工况(简称: 细煤工况): 在相同条件下, 快速加入 0.5 g、粒径 0.95~1.25 mm 的细煤, 使其在布风板上方形形成流化状态。记录烟气组分直至燃烧结束。

3) 粗细混煤燃烧工况(简称: 混煤工况): 在相同条件下, 在放入粗颗粒煤(1g)的同时, 加入一定质量(0.1g、0.5g、1g)的细煤(0.95~1.25 mm), 使细煤在粗颗粒煤周围流化, 记录烟气组分直至燃烧结束。

4) 净粗煤工况: 为了更清楚地探究混煤燃烧工况下粗颗粒煤的特性变化, 通过数据处理排除了细煤燃烧数据带来的干扰, 借此可以了解混煤燃烧过程中粗颗粒煤的燃烧效果。将混煤工况下生成的 CO₂ 浓度值减去同工况下细煤独燃的 CO₂ 浓度值, 从而认为所得 CO₂ 数据仅由混煤工况中的粗颗粒煤生成(其余组分数据的处理方式与之相同), 此时称所得数据来自“净粗煤工况”。

1.4 数据处理

因煤燃烧的最终产物主要为 CO₂, 故将着火时间定义为烟气中 CO₂ 浓度达到最大值时所经历的时间^[14]。各组分的累积摩尔量由烟气流率和测得的各组分体积浓度计算, 如公式(1)所示:

式中, n_i 为各组分 i (CO、CO₂、O₂、NO、SO₂) 的累积摩尔量, mol; $n_i(t)$ 为组分 i 在 t 时刻的摩尔值, mol/s; $V_i(t)$ 为在组分 i 在 t 时刻的体积流量, L/s; V_0 为实验过程中的烟气体积流量, L/s; $C_i(t)$ 为组分 i 在 t 时刻的体积浓度, vol%。

在燃烧过程中, 碳转化率可以由 CO、CO₂ 的累积摩尔分数定义, 如公式(2)^[15]:

式中, X_B 为在 t 时刻的碳摩尔转化率, mol%; t_f 为燃尽时间, s。

煤燃烧过程十分复杂, 反应众多, 且固相涉及颗粒的浓度、尺寸和结构的变化, 气相则涉及到

内、外扩散, 是非稳态过程, 其本征反应速率难以确定, 因此, 本文用宏观反应速率体现燃烧快慢, 在工业上具有实用性。宏观反应速率用公式(3)^[16]计算:

式中, R 为煤燃烧反应的宏观反应速率, 1/s。

宏观反应速率仅反映一个工况随时间变化的反应快慢, 是一个瞬时量, 当改变因素条件, 需要对多个工况间的反应特性时, 需要用一个定量指标来评价反应性具体变化了多少, 因此引入反应指数^[17](见公式(4)), 反应指数越高表明反应性越高。

式中, $\tau_{0.5}$ 为到 50% 转化率时所经历的时间, s; $R_{0.5}$ 为反应指数, 1/s。

2 结果与讨论

2.1 等温燃烧特性分析

通过多工况的等温燃烧实验, 可以帮助了解不同条件下燃烧的差异及其对烟气成分的影响。此外, 结合相应的煤颗粒表面温度的变化情况, 有助于深入揭示粗颗粒煤受细煤传热的影响和不同实验条件下的热量传递规律, 为流化细煤复合燃烧方式促进粗颗粒煤燃烧的确提供实验依据。等温燃烧实验中, 电炉设定温度 550°C, 风量 0.56 Nm³/h, 细煤占比 33%, 每组实验重复 5 次。

表 2 为等温燃烧实验下三个工况的着火时间和燃尽时间。从表中可以看出, 粗煤工况的着火时间最长, 为 112 s, 细煤工况的着火时间最短, 为 45 s。混煤工况的着火时间则介于前两个工况之间, 着火时间为 46 s, 与粗煤工况相比, 混煤工况的着火时间缩短了 59%。三个工况的燃尽时间也有类似趋势, 粗煤工况的燃尽时间为 580 s, 混煤工况的燃尽时间为 431 s, 时间缩短 26%, 细煤工况的燃尽时间最短, 为 148 s。因此初步得出结论, 粗颗粒煤与流化细煤混合燃烧, 有利于促进粗颗粒煤的着火和燃尽。

表 2 各工况的着火时间和燃尽时间

Table 2 Ignition time and Burnout time of each conditions

项	混	粗	细
目	煤	煤	煤

	工 况	工 况	工 况
着火 时 间 /s	46	112	45
燃 尽 时 间 /s	431	580	148

间 /s

为了解三个工况的燃烧差异，标绘了各工况的烟气组分及颗粒表面温度曲线如图 2 所示（细煤工况用床层温度表示）。从图中可以看出，三个工况的燃烧表现有所差别。混煤工况升温速率快于粗煤工况，反应体系在 26 s 内由常温升至 600℃，远快于粗煤工况的 78 s。同时，混煤工况和细煤工况最高温度超过 1000℃，而粗煤工况表面温度最大值并未达到 1000℃。

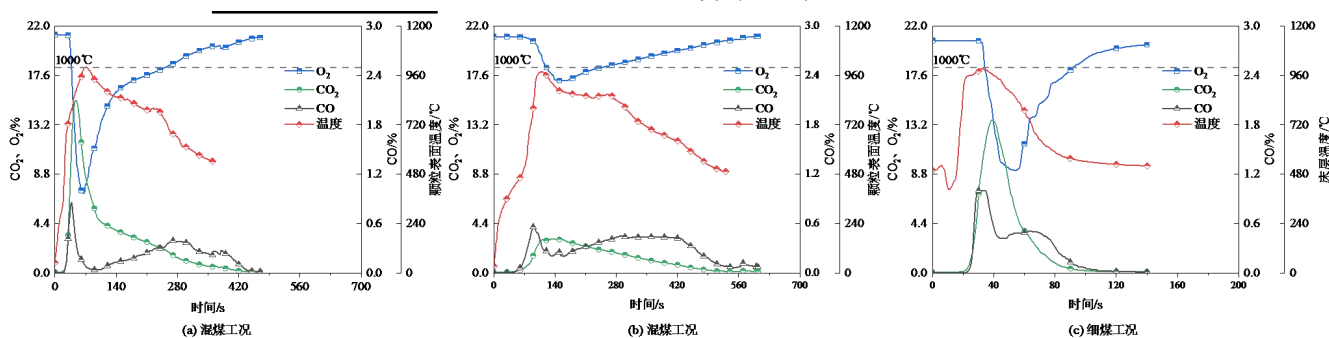


图 2 烟气组分及颗粒表面温度变化曲线

Fig.2 Variation curves of flue gas components and particle surface temperature

观察图 2 还可发现，O₂ 和 CO₂ 的浓度曲线为单峰，而 CO 则呈现双峰。推测造成这一差异的主要原因在于焦炭燃烧阶段可燃物氧化与焦炭还原存在竞争关系，当颗粒粒径较大时，生成的灰层较厚，导致焦炭还原反应占主要地位，因此 CO₂ 持续减少而 CO 再次生成。燃烧初期，挥发分迅速释放并燃烧，造成 O₂ 浓度迅速降低和 CO₂ 的快速生成，而随着挥发分释放的基本结束，燃烧的中后期主要消耗半焦或焦炭等芳香族结构，燃烧速度变慢，随着碳的燃尽，O₂ 浓度缓慢回升至正常水平，而 CO₂ 浓度亦同步降低至 0%，由此形成二者浓度曲线的单峰峰形。而此时的煤颗粒温度虽有下降，但由于燃烧释放的大量热量^[18]，颗粒温度仍高于炉温。CO 的双峰浓度曲线成因如下：首先在燃烧前期阶段，煤受热析出大量 CO，随后 CO 迅速燃烧，形成第一段细峰状曲线。同时 CO 燃烧放热的影响开始显现^[19]，导致粗颗粒煤的温度迅速上升。其次在焦炭燃烧阶段，焦炭还原成 CO，由此形成第二段宽峰状曲线。

混煤工况着火时间的缩短则可归因于流化细煤的引燃效果。从传热角度分析认为，由于粒径小，细煤更易着火，其燃烧产生的热量向粗颗粒煤表面传递，在粗颗粒煤周围形成高温燃烧区，使得粗颗粒煤更快升温。混煤工况中较快的升温曲线也证明

这一结论。混煤工况燃尽时间缩短是由于高温有利于燃烧。从燃烧角度分析，细煤充分燃烧具有较宽的高温区，促使粗颗粒煤快速升高到 1000℃ 以上，从而更有利于粗颗粒煤的燃烧。在以上初步分析与推断的基础上，本文接下来将通过实验进一步研究流化细煤对粗颗粒煤的促燃作用。

2.2 混煤工况的促燃作用

本节从气相产物角度对比粗煤工况和净粗煤工况的 CO₂ 浓度变化，解释流化细煤对促进粗颗粒煤充分燃烧的原因；此外，从固相产物角度考察粗煤工况和混煤工况在不同燃烧时间的失重率，说明流化细煤可能发挥的冲刷作用。

2.2.1 各工况下粗颗粒煤的 CO₂ 浓度变化

煤的充分燃烧必然导致产物中 CO₂ 占比增大，因此考察各工况下粗颗粒煤的 CO₂ 浓度变化，可以了解粗颗粒煤充分燃烧的程度。图 3 为粗煤工况和净粗煤工况的 CO₂ 浓度曲线，数据来自等温燃烧实验。由图中可以观察到，两个工况的 CO₂ 浓度曲线皆为先升高再降低，形成一个单峰曲线。但净粗煤工况在 50 s 内出现了一个小峰，通过对比细煤工况的 CO₂ 浓度曲线，发现两段曲线在此处高度重合，推测小峰是未排除净的细煤做出的贡献。

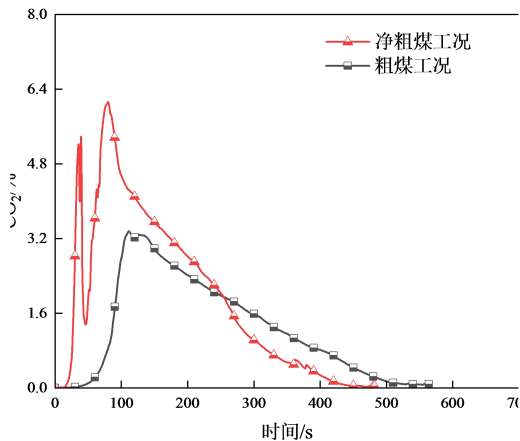


图3 各工况的 CO₂ 浓度曲线

Fig.3 CO₂ concentration curves of both conditions

由图3可见，净粗煤工况的CO₂浓度最高值为6%，粗煤工况最高值为3.4%。而积分计算结果表明，净粗煤工况累积生成了0.064 molCO₂，粗煤工况累积生成0.049 molCO₂。数据积分结果还对比了产物占比分布，净粗煤工况中CO₂、CO组分占比分别为93.66%和6.34%；粗煤工况则分别生成81.02%的CO₂和18.98%的CO。上述结果说明，净粗煤工况生成了更多的CO₂，由此可以证明在混煤工况中，粗颗粒煤得到了充分燃烧。

2.2.2 各工况的固体失重率

为了获得固体失重率随燃烧时间变化的数据，在不同燃烧时间内通入冷N₂停止反应，称取残余物质量。失重率实验中，电炉设定温度550℃，风量0.56 Nm³/h，细煤占比33%，每组实验重复2次。表3为粗煤工况和混煤工况在不同时刻的失重率。数据表明，燃烧时间分别为2 min、4 min、6 min，混煤工况的失重率为72%、81%和98%，对应粗煤工况则为53%、72%和93%。两个工况的失重率在2min时有较大的差异，在细煤燃尽（148s）后，随着燃烧时间从4 min增加到6 min，两个工况失重率的差距逐渐缩小。

表3 不同燃烧时间内各工况的质量失重率

Table 3 Mass loss of each conditions under different combustion time

项	2	4	6
目	min	min	min
粗煤	53%	72%	93%
混煤	72%	81%	98%

图4为三个燃烧时间内焦炭的外貌图。从图中可以发现，在燃烧时间2 min时，混煤工况的煤焦易破碎，粗煤工况的焦样则具有一定强度，拥有较完整的外形。推测这是由于流化细煤在粗颗粒煤周围不断冲刷、碰撞，导致粗颗粒煤表面灰层剥离、煤块发生破裂，暴露出更多可燃物，使得O₂与其充分接触。

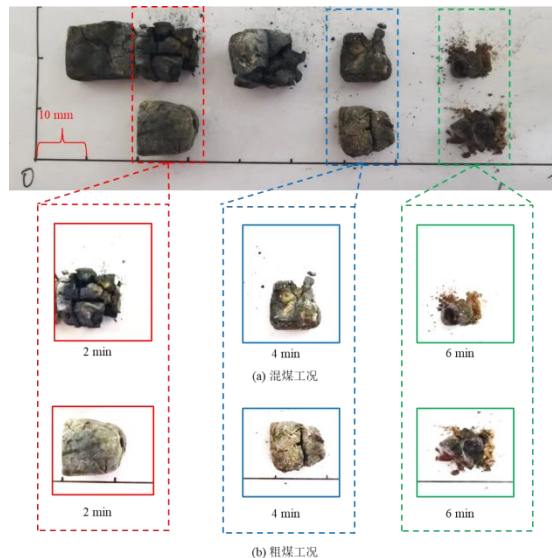


图4 不同燃烧时间内焦炭外貌图

Fig.4 Appearance diagram of coke at different burning times

从整体来看，相同燃烧时间内，混煤工况的失重率更大，说明有更多的固体可燃物参与反应。综合以上实验结果，对细煤的促燃作用做出解释：细煤的传质传热作用^[18]，会促使混煤工况中粗颗粒煤释放更多挥发分，同时具有流化特性的细煤不断冲刷，增加了粗颗粒煤暴露更多固体可燃物的可能性，因此混煤工况具有更高的失重率和更短的燃尽时间。

2.3 影响混煤工况的条件研究

在流化细煤引燃、促燃方面的效果得到了初步验证的基础上，为了满足在层燃炉上实现层燃与流化细煤复合燃烧方式的需要，本文系统考察了床层温度、细煤占比和空气风量等方面对混煤工况的影响。评价指标包括着火时间、燃尽时间、碳转化率、颗粒表面温度及反应指数，通过了解不同条件对燃烧过程的影响，有助于确定最佳操作参数，提供科学依据，这对层燃炉的高效燃烧具有重要意义。

2.3.1 温度的影响

层燃炉工作时，高温辐射源位于煤层上方，空气从炉排下方鼓入，火焰则从煤层表面向下传播，因此煤层温度自上而下逐渐降低。采用层燃复合流化细煤燃烧方式时，由于细煤与粗煤均匀分布，细煤距离高温辐射热源的位置有远有近，其引燃效果应该存在差异。因此，有必要在管式炉实验中通过设定一系列不同工作温度，来探究其对流化细煤复合方式燃烧效率的影响。温度影响实验中，设定实验温度 550℃、650℃、750℃、850℃，风量 0.56 Nm³/h，细煤占比 30%，每组实验重复 2~3 次。

首先，获得不同工作温度下粗煤工况和混煤工况的转化率曲线如图 5 所示。在这两个工况中，随床层温度升高，二者在相同时间下的转化率均呈增加趋势。另一方面，在温度从 650℃ 升高到 850℃

的过程中，粗煤工况达到 90% 转化率所需的时间分别为 629 s、510 s 和 201 s；而混煤工况达到相同转化率所需的相应的时间则分别缩短至 514 s、381 s 和 244 s。

其次，为了对比工作温度对各工况下粗颗粒煤的变化，考察了粗煤工况和净粗煤工况的着火时间，发现两者差异亦随工作温度而有所变化。如图 6 所示，相同温度下两个工况的着火时间变化如下：在 550℃ 时，粗煤工况的着火时间为 156 s，而净粗煤煤的着火时间缩短为 64 s。当工作温度升高到 850℃ 时，虽然各工况的着火时间均有所缩短，但粗煤工况的着火时间为 41 s，而净粗煤工况的着火时间为 44 s。

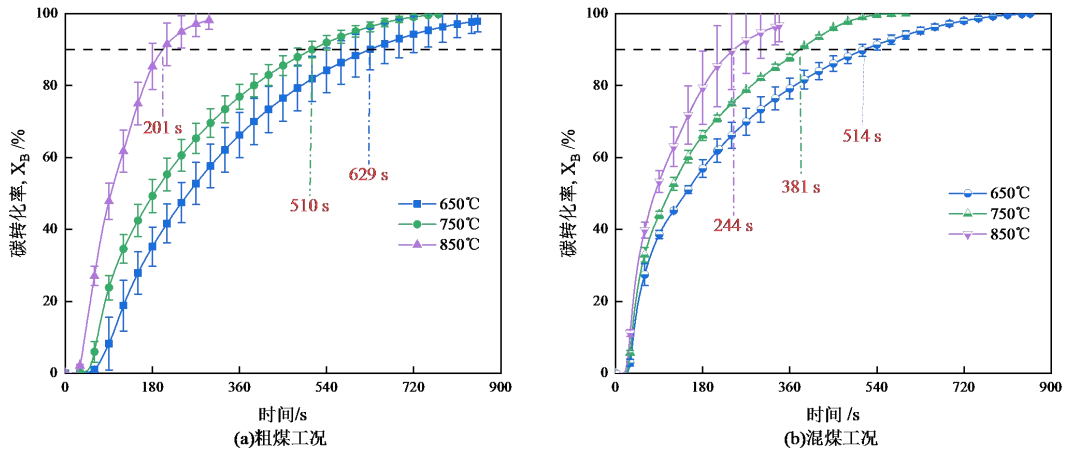


图 5 不同温度下两个工况的转化率曲线

Fig.5 Conversion curves of mixed particle coal combustion under different temperatures

从上述结果可以看出，随着温度的升高，各工况达到 90% 转化率所需时间均缩短，且着火时间均有所提前，这与 Mei 等^[18]的研究结果一致。值得注意的是，当温度达到 850℃ 时，混煤工况和粗煤工况的 90% 所需时间和着火时间都出现反转，或许这是因为在 850℃ 下，流化细煤的传热作用被管式炉内高温辐射抑制，导致其引燃作用不甚明显。

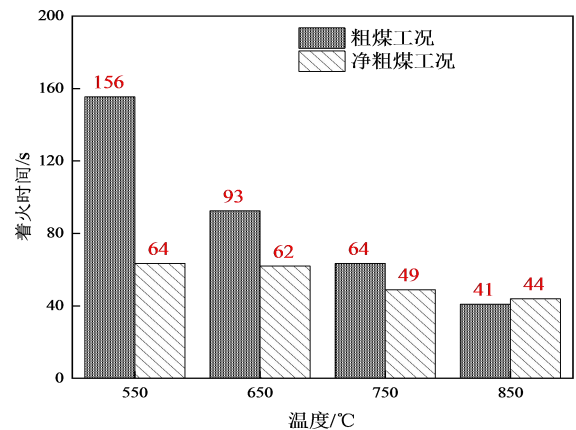


图 6 不同温度下各工况的着火时间

Fig.6 Ignition time of both conditions under different temperatures

为明确这一观点，图 7 对比了 550℃~850℃ 范围内粗煤工况和混煤工况的颗粒表面温度曲线。在 550℃ 时，混煤工况中的粗颗粒煤升温速度明显快于粗煤工况。然而随着工作温度从 550℃ 升高到

750℃，两者之间的差距逐渐减小。当温度达到850℃时，混煤工况和粗煤工况的颗粒表面升温速度趋于一致。

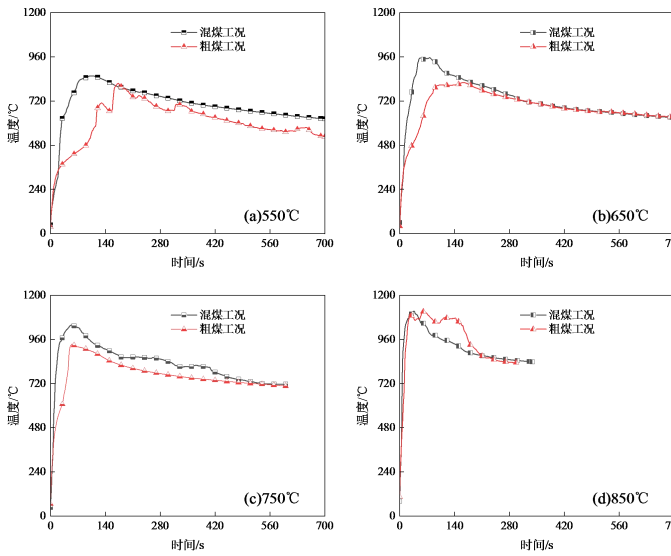


图7 不同温度下各工况的颗粒温度

Fig.6 Particle temperature of both conditions under different temperatures

综合以上实验结果，我们发现流化细煤可以在500~600℃时就快速引燃粗煤，从而有效改善粗颗粒煤的燃烧状况。由此得出结论，通过为煤层中的粗颗粒煤引入具有流化特性的细颗粒煤，可以在较低温度下实现粗颗粒煤的着火，为床层更早地带来高温，从而促进整体燃烧过程。这一研究结果将有力地支持层燃复合流化细煤燃烧方式在工程上的实际应用。

2.3.2 细煤占比的影响

为实现层燃复合流化细煤燃烧，细煤占比是另一个较为关键的影响因素。细煤占比过低不足以快速引燃新煤，细煤占比过高存在飞灰份额和飞灰可燃物含量增加的问题，如何控制细煤用量需要多方面指标的考察。细煤占比影响实验中，电炉设定温度550℃，风量0.56 Nm³/h，细煤占比0%、10%、33%、50%，每组实验重复2次。图8为不同细煤占比下混煤工况的燃烧结果，考察指标包括着火时间、燃烧时间和反应指数，其中高反应指数代表了高反应性。如图所示，随着细煤占比由0%增加到10%、33%和50%，各工况的着火时间分别为107 s、86 s、49 s和59 s，与粗煤工况相比，混煤工况的着火时间分别提前了20%、54%和45%。而各工况的燃尽时间分别为543 s、482 s、415 s和553 s，与粗煤工况相比，细煤占比为10%时，混煤工况的燃尽时间缩短了11%，细煤占比为33%

时，混煤工况的燃尽时间缩短了24%。此外，反应指数随细煤占比的增加而升高，当细煤占比从0%增加到10%时，反应指数增长幅度为17%，当细煤占比从10%增加到33%时，反应指数增长了75%，而当细煤占比从33%增加到50%时，反应指数提升了7%。

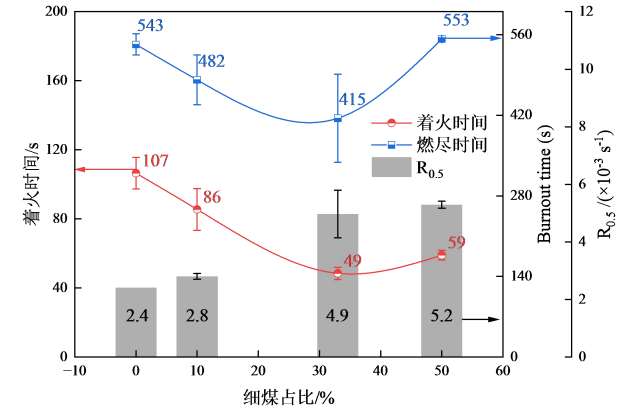


图8 不同细煤占比下混煤工况的燃烧结果

Fig.8 Combustion of mixed particle coal under different fine coal ratios

可见，流化细煤的加入可以提前着火时间，并有效提高燃烧反应性。然而在细煤占比50%时燃尽时间有所延迟，可能是大量的细煤燃烧与粗颗粒煤燃烧存在O₂竞争，这可以通过O₂变化进行解释。如图9所示，为不同细煤占比下混煤工况的O₂浓度曲线。在粗煤工况中，O₂浓度最低降至16.4%，而随着细煤占比从10%增加到33%，O₂消耗增加，最低点分别为14.48%和8.05%，但仍属于正常的煤燃烧反应。当细煤占比达50%时，大量O₂被消耗，最低点仅3.74%，这会造成O₂局部不均匀，不充足的O₂浓度显然不利于混煤工况的燃烧。

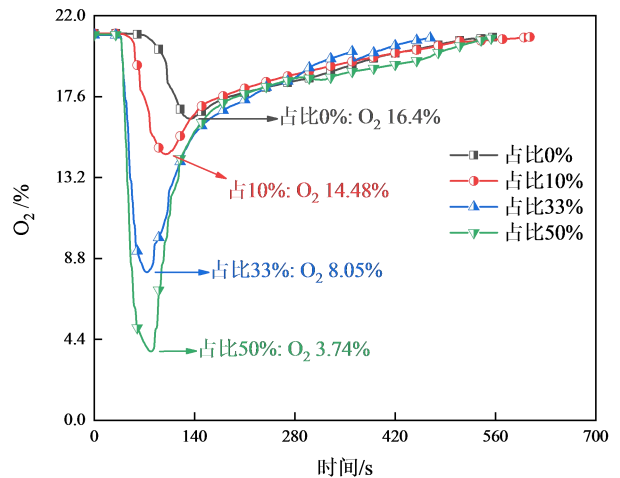


图9 不同细煤占比下混煤工况的O₂浓度曲线

Fig.9 O₂ curves of mixed particle coal combustion under different fine coal

ratios

综合上述结果，细煤占比 10%时燃烧效果提升幅度较小，而细煤占比 50%时会消耗大量 O₂，最终表现出不利于粗颗粒煤燃烧的结果，这与低 O₂ 浓度下燃尽时间延长的研究结果一致^[14]。因此得出结论，流化细煤并非越多越好，当前实验条件下其最佳占比为 33%。

2.3.2 空气风量的影响

预实验曾发现，送风量的大小也会影响混煤燃烧。风量大小直接影响细煤颗粒的运动状态和气固两相间的传质传热，进而影响燃烧效果。在不同风量条件下，可以观察混煤工况的着火时间、燃尽时间和反应指数等指标，评估混煤工况的燃烧效果。因此，研究在不同风量下混煤工况的燃烧情况具有重要意义。

空气风量影响实验中，实验温度 750℃，风量 0.4 Nm³/h、0.56 Nm³/h、0.72 Nm³/h，细煤占比 30%，每组实验重复 2 次，不同风速下的各项燃烧指标如表 4 所示。根据表中结果发现，随着空气风量的增加，着火时间分别为 43 s、35 s 和 29 s，燃尽时间分别为 736 s、600 s 和 413 s。同时，反应指数从 0.40 Nm³/h 时的 3.58×10⁻³ 1/s 升高到 0.56 Nm³/h 时的 4.51×10⁻³ 1/s，反应性提升了 26%，在 0.72 Nm³/h 时反应指数增加为 4.43×10⁻³ 1/s。由此可知，随空气风量的增加，混煤工况的着火时间和燃尽时间提前，反应性则呈不同程度增加。

表 4 不同风量下混煤工况的燃烧结果

Table 4 Combustion of mixed particle coal under different air volumes

空气风量/(Nm ³ /h)	0.40	0.56	0.72
---------------------------	------	------	------

表 5 不同转化率下混煤工况的表观活化能

Table 5 Apparent activation energy (E_{app}) of mixed particle coal combustion at different carbon conversions

碳转化率	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
表观活化能/(kJ/mol)	10.02	21.05	28.19	33.06	27.80	26.44	27.31	30.25	33.23

3 结 论

本文通过流化床实验平台，验证了层燃复合流化细煤燃烧方式的可行性，并通过气相和固相数据分析，揭示流化细煤引燃、促燃的作用机理。基于层燃复合流化细煤燃烧方式良好的促燃效果，系统考察了粗细混煤工况的工作温度、细煤占比和空气

流化数	2.43	3.37	4.29
着火时间/s	43	35	29
燃尽时间/s	736	600	413
R _{0.5} /(×10 ⁻³ s ⁻¹)	3.58	4.51	4.43

关于着火时间和燃尽时间的提前，可归因于燃烧过程中一直保持高风速，加强了气固间的混合，进而强化燃烧^[20]。而较大的空气风量会带来更多的冷空气，根据前人的研究发现^[21]，其对流冷却作用也会增强，因此混煤工况的反应指数在高风速下有所下降。在实际运用中，给层燃炉鼓入过高空气量也会使排烟量过大，导致排烟热损失增加。由此可知，在追求高风速以提升燃烧效率时不能忽视热损失以及能耗的增加，这之间存在制衡关系。因此进行层燃复合流化细煤燃烧操作时，需要综合考虑多方面因素，选择适宜的空气风量。

2.4 表观活化能

活化能可以定量描述燃烧反应的难易程度^[22]，因此本文采用等转化率法^[23, 24]处理混煤工况的表观动力学（转化率为 0.1~0.9^[29]）。在研究十分复杂的煤燃烧反应动力学时，使用等转化率法能有效规避在选择不同动力学机理模型时引起误差的问题^[25-28]。通过对表观活化能的分析，有助于理解混煤工况中的燃烧过程变化。

通过计算得到的表观活化能列于表 5。由表可知，在燃烧前期（转化率为 0.1~0.2）表观活化能较小，表明系统处于更易反应的挥发分燃烧阶段^[30]，这也从侧面印证了前面关于流化细煤加速燃烧的成因推理。在燃烧中后期（转化率为 0.5~0.9），表观活化能增加，推测是由于较大粒径和灰层的存在，造成燃烧反应变慢。以往的研究表明，表观活化能的变化也与反应机理的改变有一定关联^[31]。最后，测算得到混煤工况的平均表观活化能为 26.37 kJ/mol。

风量的影响，并得出混煤工况的表观活化能，最后得出结论如下：

1) 等温燃烧实验证明，混煤工况得到了充分燃烧，燃尽时间缩短 26%，并由于流化细煤不断冲刷灰层，燃烧 6min 后固体失重率 98%，；

2) 由于流化细煤的传质传热作用，粗颗粒煤可以在较低操作温度（500~600℃）下引燃，提前

燃烧过程;

3) 混煤工况中, 细煤最佳占比为 33%, 过高占比(50%)不利于混煤燃烧;

4) 对混煤工况进行动力学分析, 获得平均表观活化能为 26.37 kJ/mol。

参考文献(References):

[1] 国家统计局. 中国统计年鉴 [EB/OL].(2022-10-03)[2023-09-07].
<http://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2022/indexch.htm>.

National bureau of statistics of China.China statistical yearbook[EB/OL].(2022-10-03)[2023-09-07].

<http://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2022/indexch.htm>.

[2] 邹才能, 薛华庆, 熊波, 等. “碳中和”的内涵、创新与愿景[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 46-57.

ZOU Caineng, XUE Huaqing, XIONG Bo, et al. Connotation, innovation and vision of "carbon neutral"[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 46-57.

[3] 中华人民共和国工业和信息化部. 燃煤锅炉节能环保综合提升工程实施方案 [EB/OL].(2014-11-06)[2023-09-07].

https://wap.miit.gov.cn/ztzl/lstz/2015nqgyhxxhgzy/2014ztrd/zcwj/art/2020/art_ea7556f6768d4a5880e1df0f405b6270.html.

Ministry of industry and information technology of the People's Republic of China.Implementation plan of coal-fired boiler energy conservation and environmental protection comprehensive improvement project[EB/OL].(2014-11-06)[2023-09-07].

https://wap.miit.gov.cn/ztzl/lstz/2015nqgyhxxhgzy/2014ztrd/zcwj/art/2020/art_ea7556f6768d4a5880e1df0f405b6270.html.

[4] 董琨, 谭厚章, 许鑫玮, 等. 我国工业锅炉技术特点和发展方向 [J]. 洁净煤技术, 2019, (S2): 1-6.

DONG Kun, TAN Houzhang, XU Xinwei, et al. Technical characteristics and development direction of industrial boilers in China[J]. Clean Coal Technology, 2019, (S2): 1-6.

[5] 刘晓波. 提高链条锅炉煤炭燃烧效率的节能技术研究与应用[J]. 节能与环保, 2021, (6): 88-90.

LIU Xiaobo. Research and application of energy saving technology to improve coal combustion efficiency of chain Boiler[J]. Energy Conservation & Environmental Protection, 2021, (6): 88-90.

[6] 熊宗尧, 王大军. 提高层燃锅炉出力 and 效率[J]. 四川电力技术, 1995, (5): 21-25.

XIONG Zongyao, WANG Dajun. Increasing output and efficiency of travelling grate stoker fired boiler [J]. Sichuan Electric Power Technology, 1995, (5): 21-25.

[7] 顾海滨. 锅炉炉拱改双“人”字形拱的节能原理及其应用[J]. 能源技术, 1994, (1): 30-33.

GU Haibin, GU Guobin. Energy-saving principle and application of double

"herringbone" arch in boiler furnace arch[J]. Power & Energy, 1994, (1): 30-33.

[8] 刘晓波. 红外节能材料提高链条锅炉煤炭利用率研究与应用[J]. 能源与节能, 2021, (9): 65-67.

LIU Xiaobo. Research and application of infrared energy-saving materials to improve coal utilization rate of chain boilers[J]. Energy and Energy Conservation, 2021, (9): 65-67.

[9] 杨玉格. 燃煤工业锅炉节能改造技术在义煤集团的推广应用[J]. 煤炭技术, 2011, 30(3): 217-218.

YANG Yuge. Promotion and application of energy saving technology of coal-fired industrial boiler in Yima coal industry group[J]. Coal Technology, 2011, 30(3): 217-218.

[10] 刘晓波. 燃煤链条锅炉分区多重强化燃烧技术研究[J]. 中国煤炭地质, 2017, 29(12): 12-15.

LIU Xiaobo. Study on coal-fired chain-grate boiler zonal multiple intensification combustion technology[J]. Coal Geology of China, 2017, 29(12): 12-15.

[11] 党银宁. 复合燃烧技术锅炉能量损失实验研究[J]. 现代制造技术与装备, 2016, (8): 36-38.

DANG Yinning. Experimental study on energy loss of compound combustion boiler[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2016, (8): 36-38.

[12] 郭强. 一种微流化层燃锅炉燃烧方 [P]. 辽宁省: CN111878800A, 2020-11-03.

[13] 郭强, 徐雨贤. 一种层燃锅炉结构及锅炉脱硝脱碳方法 [P]. 辽宁省: CN110715287B, 2020-11-27.

[14] 齐永锋. 煤粉再燃中着火与脱硝相互作用的实验研究及其模化[D]. 上海: 上海交通大学, 2010: 54-55.

QI Yongfeng. Experimental investigation and modeling of the interaction between ignition and denitration during pulverized coal reburning[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010: 54-55.

[15] WANG J, HU S, LIU X. Kinetic modelling and experimental validation of single large particle combustion of coal char[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, (450): 138227.

[16] 韩振南. 高含水含氮生物质废弃物双流化床解耦燃烧基础及工业应用[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院过程工程研究所), 2017: 40-41.

HAN Zhennan. Fundamentals and industrial application of dual fluidized bed decoupling combustion of biomass waste with high water and nitrogen content[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences(Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences), 2017: 40-41.

[17] TAKAYUKI T, YASUKATSU T, AKIRA T. Reactivities of 34 coals under steam gasification[J]. Fuel, 1985, 64(10): 1438-1442.

[18] MEI W G, JIA T Y, ZHANG Y S, et al. Combustion and Fragmentation

Characteristics of Single Wet Coal Slime Particle[J]. *Combustion Science and Technology*, 2022, 1-24.

[19]庄震亚. 气固两相传热及燃烧的全尺度直接数值模拟[D]. 浙江: 浙江大学, 2015: 47-49.

ZHUANG Zhengya. Fully resolved direct numerical simulation of gas-solid heat transfer and combustion process[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2015: 47-49.

[20]HIGUERA F J. Combustion of a coal char particle in a stream of dry gas[J]. *Combustion and flame*, 2008, 152(1): 230-244.

[21]TRIPATHI P, RAO L. Single particle and packed bed combustion characteristics of high ash and high plastic content refuse derived fuel[J]. *Fuel*, 2022, (308):121983.

[22]WANG K, HAN T, DENG J, et al. Comparison of combustion characteristics and kinetics of Jurassic and Carboniferous-Permian coals in China[J]. *Energy*, 2022, (254):124315.

[23]FRIEDMAN H L. Kinetics of thermal degradation of char-forming plastics from thermogravimetry. Application to a phenolic plastic[J]. *Journal of Polymer Science Part C: Polymer Symposia*, 1964, 6(1): 183-195.

[24]CHENG S, ZHOU Y, WONG K H, et al. Combustion reactivity of chars pyrolyzed from low-rank coal using a fixed bed reactor installed with internals[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(1): 109105.

[25]KHAWAM A, FLANAGAN D R. Solid-State Kinetic Models: Basics and Mathematical Fundamentals[J]. *The journal of physical chemistry B*, 2006, 110(35): 17315-17328.

[26]GÓMEZ-BAREA A, LECKNER B, SANTANA D, et al. Gas-solid conversion in fluidised bed reactors[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2008, 141(1): 151-168.

[27] GÓMEZ-BAREA A, LECKNER B. Modeling of biomass gasification in fluidized bed[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2010, 36(4): 444-509.

[28]MENG D, WANG T, XU J, et al. Diffusion effect and evolution of kinetic parameters during coal char-CO₂ gasification[J]. *Fuel*, 2019, (255):115819.

[29]YU J, ZENG X, ZHANG J, et al. Isothermal differential characteristics of gas-solid reaction in micro-fluidized bed reactor[J]. *Fuel*, 2013, (103):29-36.

[30]周坤. 单颗粒煤泥燃烧特性的研究[D]. 安徽: 中国科学技术大学, 2018: 36-37.

ZHOU Kun. The study on the combustion characteristics of the single coal slime particle[D]. Anhui: University of Science and Technology of China, 2018: 36-37.

[31]YAN J, FANG M, LV T, et al. Thermal and kinetic analysis of pressurized oxy-fuel combustion of pulverized coal: An interpretation of

combustion mechanism[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2022, (120):103770.