

多段变径循环流化床热解反应器提升管内颗粒返混和掺混特性研究

靳留勇^{1,2}, 齐晓宾^{1,2,3}, 董建宏^{1,2}, 朱治平^{1,2,4}

(1. 中国科学院工程热物理研究所 煤炭高效低碳利用全国重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 煤灵活燃烧与热转化山西省重点实验室, 山西 大同 037305; 4. 山西省煤炭清洁高效燃烧与气化工程研究中心, 山西 大同 037305)

摘要: 热解是实现低阶煤高值化利用的关键途径, 其核心在于开发高效热解反应器。优化多段变径循环流化床热解反应器的提升管结构, 可强化反应器内颗粒的返混和掺混效果。采用冷态实验方法, 以粉煤和半焦为原料, 研究了扩径结构和给煤喷口布置方式(切向、斜切和斜插)对颗粒流动特性的影响。结果表明, 扩径结构可有效抑制颗粒浓度沿轴向的衰减。当扩径比为1.16和1.27时, 热解区颗粒体积分数可提升15%~40%(与等径结构相比), 进而促使该区域形成局部浓相区。当给煤喷口采用斜切布置时, 煤粉与半焦的掺混效果最佳, 固相中煤粉质量分数沿提升管轴向可维持在0.2左右, 离散系数小于0.05。

关键词: 变径结构提升管; 煤粉; 半焦; 返混; 掺混; 热解

中图分类号: TQ53 文献标志码: A 文章编号: 2097-2547(XXXX)XX-001-10

Study on backmixing and blending characteristics of particles in riser of multi-section variable-diameter circulating fluidized bed pyrolysis reactor

JIN Liuyong^{1,2}, QI Xiaobin^{1,2,3}, DONG Jianhong^{1,2}, ZHU Zhiping^{1,2,4}

(1. State Key Laboratory of Coal Conversion, Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Shanxi Key Laboratory of Coal Flexible Combustion and Thermal Conversion, Datong 037305, Shanxi, China; 4. Shanxi Engineering Research Center of Coal Clean, Efficient Combustion and Gasification, Datong 037305, Shanxi, China)

Abstract: Pyrolysis is a critical pathway for the high-value utilization of low-rank coal, the core of which lies in the development of high-efficiency pyrolysis reactors. Optimizing the riser structure of the multi-stage variable-diameter circulating fluidized bed reactor can significantly enhance the backmixing and blending performance of particles. Cold-state experiments were conducted to investigate the effects of expanding section structures and coal injection nozzle arrangements (tangential, oblique-tangential and oblique-inserted) on particle flow characteristics via using pulverized coal and semi-coke as the raw materials. The results indicate that the expanding structure can inhibit the axial decay of solids concentration effectively. When expanding diameter ratio is 1.16 and 1.27, the particle volume fraction in the pyrolysis section can be increased by 15% to 40% (compared with the constant-diameter structure), thereby promoting the formation of local dense-phase zones. When the oblique-tangential nozzle arrangement is employed, the optimal blending effect between pulverized coal and semi-coke is achieved, and the mass fraction of pulverized coal in the solid phase can remain stable at approximately 0.20 along the axial direction of riser, with coefficient of variation less than 0.05.

Keywords: variable-diameter riser; pulverized coal; semi-coke; backmixing; blending; pyrolysis

收稿日期: 2025-11-30; 修回日期: 2026-01-07。

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFB4103803); 中国科学院前瞻战略科技先导专项(A类)(XDA29020600); 北京“高创计划”-青年人才托举工程(20251032)。

第一作者: 靳留勇(1997—), 硕士研究生, 研究方向为煤炭热解, E-mail: jinliuyong@iet.cn。

通信作者: 齐晓宾(1990—), 博士, 副研究员, 研究方向为碳基原料分质分级利用, E-mail: qixiaobin@iet.cn;

朱治平(1979—), 博士, 正高级工程师, 研究方向为高碳资源低碳利用, E-mail: zhuzhiping@iet.cn。

煤热解是实现低阶煤分级分质、清洁高值转化的关键技术路径,对我国油气资源安全保障具有不可替代的战略意义^[1-2]。我国低阶煤储量丰富,其储量在煤炭总储量中占比超过55%^[3-4]。低阶煤作为一种特殊的煤炭资源,具有侧链多和挥发分含量高等特点^[5-7]。采用热解技术可以将低阶煤转化为煤焦油、煤气和半焦等产物^[8]。其中,煤焦油是制备高附加值芳烃^[9]、烯烃^[10]和煤焦油基材料^[11]的重要原料。煤热解技术主要以块煤为原料,鲁奇三段炉是典型工艺^[12]。在国内应用过程中,以鲁奇三段炉为基础相继开发了SJ、SH和ZNZL等一系列内热式炉型^[13],以及W-D、Koppers、JLW、JLK和JLH-D等外热式炉型。然而,传统块煤热解工艺普遍存在原料成本高、生产规模有限、焦油产率偏低和能耗较高等问题。随着机械化采煤技术的普及,井下开采的块煤产量在煤总产量中占比仅为20%左右,其他大部分为粉煤^[14]。这一变化促使煤热解研究由块煤向粉煤转变,LFC^[15]、Toscoal^[16]和DG^[17]等粉煤热解技术相继问世,但这些技术目前尚未实现大规模商业化运行。

通过调控热解过程中的传热传质^[18]和原料粒径可以有效控制颗粒加热速率并抑制焦油二次裂解^[19]。传热传质和原料粒径调控是影响煤热解过程的关键因素^[20]。目前,原料粉化已成为实现低温快速热解和提高焦油产率的重要技术途径^[21]。在具体热解过程中,粉煤的热解行为会受到温度、停留时间和加热速率等参数影响^[22-23],并与反应器内部加热方式密切相关^[24-25]。在各类快速热解反应器中,流化床反应器因其优异的传热传质性能、温度均匀性和操作灵活性而备受关注。现有流化床热解工艺系统通常由燃烧炉与热解炉两个核心单元构成^[26-27],前者用于生成高温热载体,后者用于驱动煤热解反应。通过构建燃烧炉与热解炉之间稳定的高温物料循环过程,可实现两者之间能量和物质的耦合。然而,该工艺系统相对复杂,其稳定运行高度依赖于燃烧炉与热解炉之间建立的稳定物料循环。这显著增大了系统操作和控制难度,也一定程度制约了技术的工程应用与推广。

在循环流化床部分气化过程中,通过优化运行参数,可提高粉煤热解效果^[28-29]。ZHANG等^[28]提出了一种单床式循环流化床热解反应器。该反应器的提升管采用了独特的“缩径-扩径”结构设计,实现了“一器两区”的物理分区,从而将煤部分气化过程解耦为煤热解和半焦部分气化两个反应阶段。具

体而言,缩径段下部区域为气化区,从返料器循环而来的半焦与气化剂在此发生部分气化反应生成高温煤气与半焦;高温煤气与半焦经缩径段加速,被单向输送至缩径段上部的热解区;热解区采用的扩径结构有助于形成并维持浓相环境,从而实现了煤粉的低温快速热解。该研究提出的设计思路不仅简化了系统结构,还通过物料的高倍循环有效解决了传统热解装置的传热难题。然而,该设计的实现依赖于3个关键前提:(1)气化区生成的物料可单向稳定输送至热解区;(2)热解区可形成稳定的浓相环境;(3)煤粉与半焦可均匀掺混。其中,董建宏等^[30]已经针对第一个前提进行了针对性研究。

煤粉在该创新结构热解反应器内的热解性能,很大程度上依赖于扩径结构内的气固流动,以及煤粉与半焦之间的掺混效果。相比于等径结构,扩径设计能够优化提升管内的气固流动状态,促进气固两相接触^[31-32],还可以通过调控提升管内部流型转变,有效提升局部区域的颗粒浓度^[33]。此外,优化煤粉或二次风的喷入方式已被证实是调控反应器内物料分布、混合特性和返混程度的重要操作^[34-35]。然而,现有研究多聚焦于单一因素的独立影响,对于多段变径结构中扩径比的系统优化及其与操作条件的协同作用机制尚缺乏明确结论。同时,针对不同给煤喷口布置方式对煤粉与热载体之间掺混均匀性的影响机制,亦缺少系统性对比与分析。为实现并优化“一器两区”设计,有必要围绕热解区浓相环境的形成与维持,以及煤粉与半焦的均匀掺混这两个核心前提开展深入研究。

本研究聚焦热解区内物料的返混与掺混行为,系统探究扩径结构对颗粒返混特性的影响,以及不同给煤喷口布置方式对煤粉与半焦掺混特性的影响,以期揭示该新型结构提升管内颗粒返混与掺混机制,进而为粉煤低温快速热解流化床反应器的设计优化与运行调控提供参考。

1 实验部分

1.1 实验材料

选用粒径为0~0.18 mm的煤粉和半焦作为实验原料,其中煤粉为陕北地区的富油煤,半焦为该煤经低温热解所得半焦。煤粉和半焦的粒径分布、工业分析结果和风速-压降曲线分别见图1、表1和图2。由图1可知,煤粉与半焦的中位粒径(d_{50})分别为72.1 μm 和71.1 μm ,堆积密度分别为664 kg/m^3 和720 kg/m^3 。固定床状态下,压降外推线与最大压降

外推线的交点对应的流化速度即为临界流化速度。由图2可知,煤粉的临界流化速度为0.017 m/s,半焦的临界流化速度为0.0074 m/s。

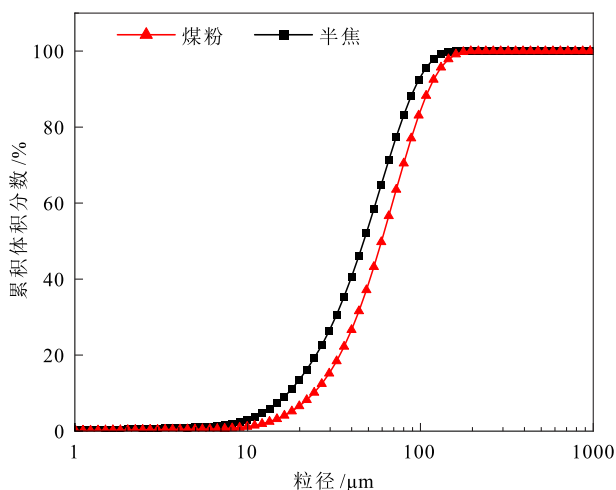


图1 煤粉和半焦的粒径分布

Fig. 1 Particle size distributions of pulverized coal and semi-coke

表1 煤粉和半焦的工业分析结果

Table 1 Proximate analysis results of pulverized coal and semi-coke

原料	质量分数 /%			
	M_{ad}	V_d	A_{ad}	FC_{daf}
煤粉	4.69	30.48	4.99	67.84
半焦	7.70	7.10	11.48	91.89

注： M_{ad} 为空气干燥基水分； V_d 为干燥基挥发分； A_{ad} 空气干燥基灰分； FC_{daf} 为干燥无灰基固定碳。

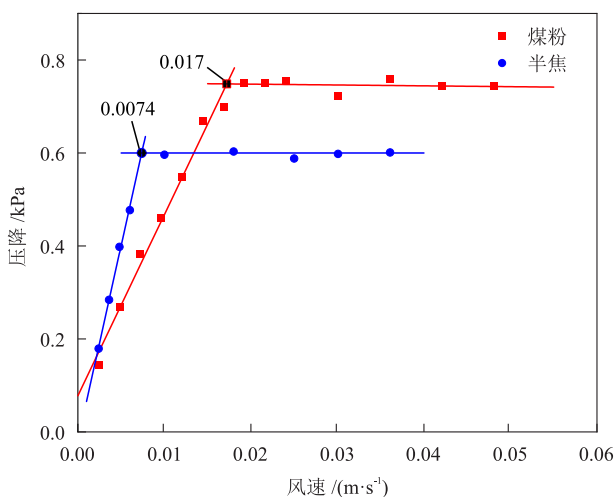
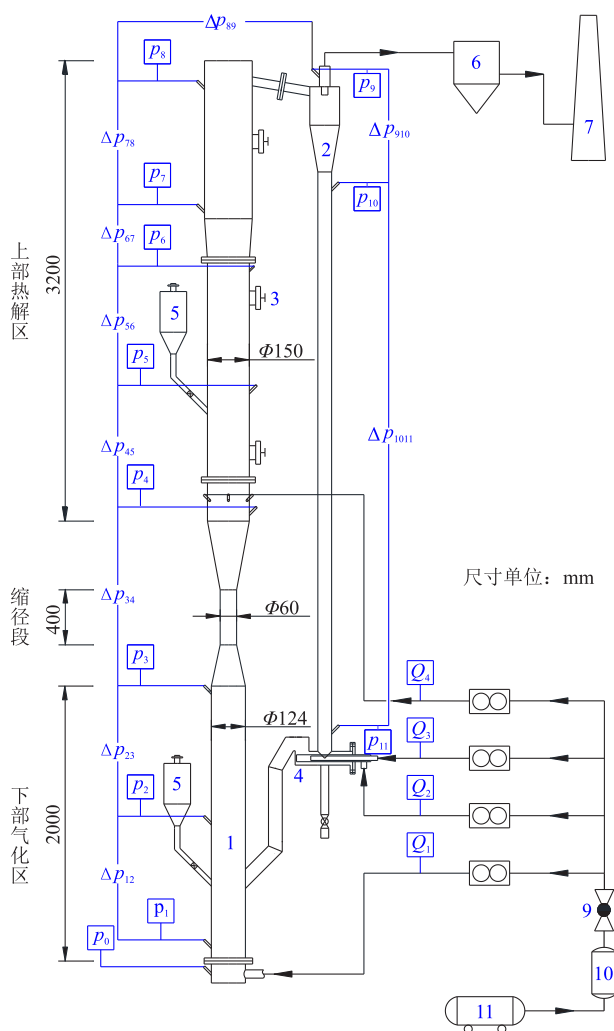


图2 煤粉和半焦的风速-压降曲线

Fig. 2 Airflow velocity-pressure drop curves of pulverized coal and semi-coke

1.2 实验系统

循环流化床冷态实验台示意图见图3。该系统主要由提升管、旋风分离器、返料器、给料系统、供风系统和测控系统等组成。



1—变径提升管；2—旋风分离器；3—取样器；4—返料器；5—螺旋给料机；6—布袋除尘器；7—烟囱；8—质量流量计；9—球阀；10—储气罐；11—空气压缩机； Δp_{ij} —压力测点*i*和*j*之间压差； Q_k —质量流量计*k*测得流量。

图3 循环流化床(CFB)冷态实验台示意图

Fig. 3 Schematic diagram of circulating fluidized bed (CFB) cold-state test rig

提升管作为实验系统的核心部件,采用了多段变径结构,即中部缩径结构将反应空间物理划分为下部气化区和上部热解区,缩径结构产生的局部高速气流将气化区生成的物料单向输送至热解区,并有效抑制热解区内的颗粒向气化区返混。热解区采用扩径结构,通过减缓流速促使颗粒沉降,提高固相浓度,强化气-固热载体与煤粉之间的掺混效果。提升管整体高度为6400 mm,其中下部等径段内径为124 mm,高度为2000 mm;中部缩径段内径为60 mm,高度为400 mm;顶部扩径段分为上下两部分,内径分别为150 mm、174 mm、190 mm和150 mm,高度分别为1000 mm和1900 mm。沿提升管高度方向,距离布风板100 mm、1000 mm、1950 mm、

3250 mm、4140 mm、4970 mm、5450 mm 和 6350 mm 处分别布置了 8 个压力测点, 记作 $p_1 \sim p_8$ 。实验用风由复盛实业(上海)有限公司 SA30A 型空气压缩机提供, 流量由北京七星华创流量计有限公司 D07 型质量流量计控制。实验过程流量和压力数据由可编程逻辑控制器(PLC)系统实时监测记录。

提升管照片见图 4。热解区和气化区各设置一套螺旋给料系统, 分别用于模拟粉煤和半焦的连续给料。鉴于冷态条件下物料不参与化学反应, 为确保提升管内物料状态与热态条件相一致, 通过向提升管气化区连续供应半焦, 并在实验过程中关闭返料器, 模拟了实际热解过程中半焦的生成和循环返料。

为获得提升管热解区内煤粉与半焦的空间分布, 在距布风板 3750 mm、4750 mm 和 5900 mm 高度处分别设置了侵入式颗粒瞬态取样器(图 5)。取样器采用双套管结构设计, 外管为对称 95° 圆弧, 内管为对称 90° 圆弧, 通过挡板将取样管内部空间分割为 5 个等距隔仓。取样时, 将取样器径向插入提升

管, 确保挡板平面与气固流动方向一致。在工况下, 迅速转动取样操作手柄, 将内管旋转 90°, 此时隔仓处于封闭状态, 从而截取瞬态颗粒样品。每种工况下重复取样 3 次。



图 4 提升管照片

Fig. 4 Riser photos

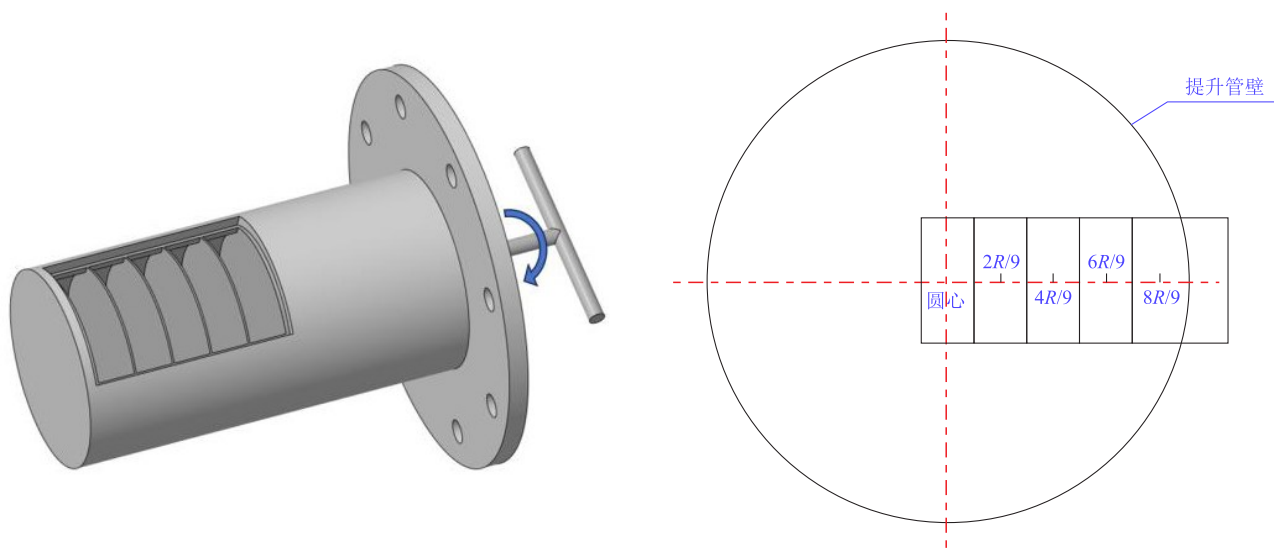


图 5 颗粒瞬态取样器示意图和布置方式

Fig. 5 Schematic diagram and arrangement of transient particle sampler

1.3 实验方法

1.3.1 返混特性实验

在实验过程, 仅开启气化区给料机向提升管添加半焦, 给料量为 93 kg/h。在此基础上, 通过改变表观流速, 考察热解区内轴向的颗粒体积分数(本文亦称“颗粒浓度”, 记作 ϵ_s)。为便于比较, 表观流速以气化区流化数(n_1)的形式呈现, 即 $n_1 = u_1/u_{mf}$, 其中 u_1 表示气化区对应的表观流速, m/s; u_{mf} 表示半焦

颗粒的临界流化速度, m/s。

根据提升管内轴向动量平衡方程^[36], 可采用压差法计算 ϵ_s , 计算方法见式(1)。

$$\frac{\Delta p}{\Delta H} = [\rho_g(1 - \epsilon_s) + \rho_p \epsilon_s]g + \left(\frac{\Delta p}{\Delta H}\right)_a + \left(\frac{\Delta p}{\Delta H}\right)_f \quad (1)$$

式中, $\frac{\Delta p}{\Delta H}$ 、 $\left(\frac{\Delta p}{\Delta H}\right)_a$ 和 $\left(\frac{\Delta p}{\Delta H}\right)_f$ 分别表示总压降、加速压降和摩擦压降, Pa/m; ρ_g 表示气体密度, kg/m³; ρ_p 表示颗粒密度, kg/m³; g 表示重力加速度, m/s²。

研究人员认为 $(\frac{\Delta p}{\Delta H})_a$ 和 $(\frac{\Delta p}{\Delta H})_f$ 在 $\frac{\Delta p}{\Delta H}$ 中占比较小,可以忽略^[37-38]。因此,式(1)可以简化为式(2)。

$$\frac{\Delta p}{\Delta H} = [\rho_g(1 - \varepsilon_s) + \rho_p \varepsilon_s]g \quad (2)$$

根据取样器各隔仓收集到的颗粒质量(m_i , kg)可计算径向颗粒浓度分布($\varepsilon_{r,i}$),计算方法见式(3)。

$$\varepsilon_{r,i} = \frac{m_i}{\rho_b V_i} \quad (3)$$

式中, ρ_b 表示颗粒堆积密度,kg/m³; V_i 表示第*i*取样单元的几何体积,m³。

为探究扩径结构对热解区域内部颗粒返混效果的影响,本研究分别考察了3种扩径结构(图6),扩径后直径与扩径前直径之比称为扩径比(R_d),其取值分别为1.00、1.16和1.27。3种扩径结构均采用小锥角设计($< 5^\circ$),以强化热解区内颗粒的返混效果,同时削弱该区域内颗粒的径向分布不均匀性。

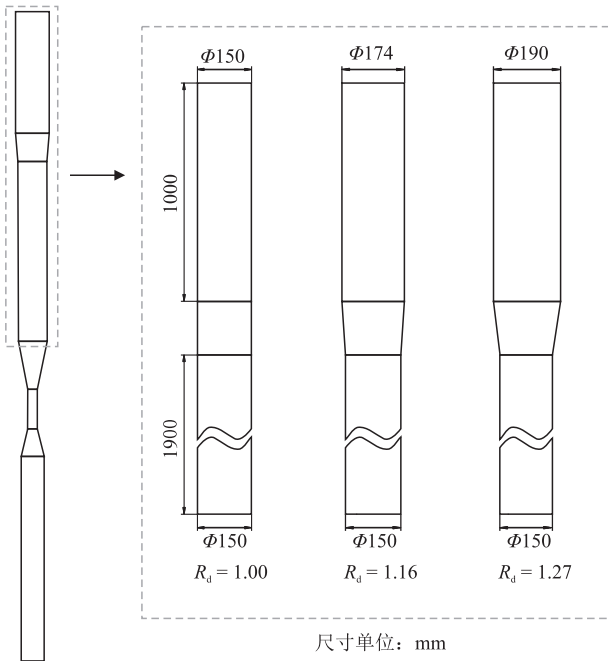


图6 扩径段结构示意图

Fig. 6 Schematic diagrams of expansion section structures

1.3.2 掺混特性实验

在热解区距离布风板3350 mm处设置进气喷口,以模拟实际工况中煤粉气力输送喷口(以下简称“喷口”),并考察喷口布置方式对颗粒掺混特性的影响。本研究考察了切向、斜插和斜切3种喷口布置方式,喷口布置方式见图6。切向模式下的喷口通过水平正切方式与提升管连接;斜插式喷口则水平向下倾斜45°垂直插入提升管;斜切式喷口则是在斜插基础上,进气喷口以斜切方式与提升管连

接。3种布置方式的进气喷口均由周向均匀布置的3路支管组成,喷口内径均为15 mm。

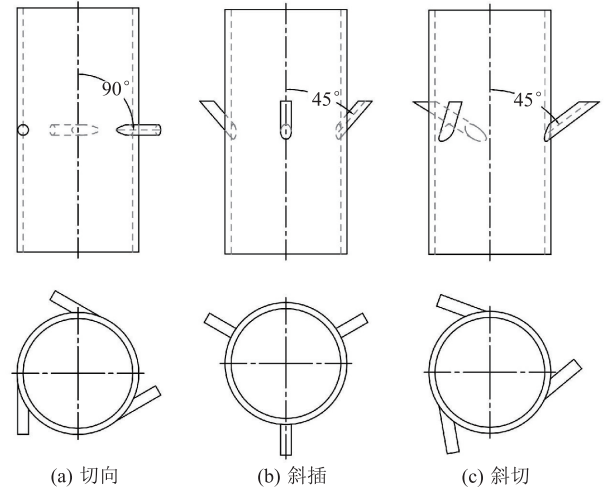


图7 喷口布置方式

Fig. 7 Schematic diagrams of nozzle arrangements

在实验过程中,同时开启气化区和热解区的给料系统。根据热解过程中能质匹配关系(为实现500~600 °C低温热解,煤粉与半焦热载体的质量比通常为1:3~1:5),本研究将煤粉与半焦的质量比设定为1:3。气化区的螺旋给料机以93 kg/h的给料速率持续加入半焦,热解区的螺旋给料机以31 kg/h的给料速率持续加入煤粉。基于前期研究^[30],为实现气化区的物料单向输送,选定 $n_1 = 56.8$ 作为流化风操作参数,所考察的喷口进气流速(u_2)分别为10.0 m/s、14.5 m/s和17.8 m/s。

待流场稳定后,利用取样器进行取样,并对样品进行工业分析。所取样品中煤粉质量分数(y_i)可由式(4)计算。

$$y_i = \frac{V_{ar,i} - V_{ar,char}}{V_{ar,coal} - V_{ar,char}} \quad (4)$$

式中, $V_{ar,i}$ 表示第*i*取样单元的混合组分挥发分质量分数,%; $V_{ar,coal}$ 表示煤粉挥发分质量分数,%; $V_{ar,char}$ 表示半焦挥发分质量分数,%。

为定量评估煤粉与半焦颗粒在热解区的掺混特性,选取质量分数离散系数(E)作为评价指标, E 的理论取值范围为[0, 1], E 越接近0,表明混合体系越趋于理想均匀的混合状态。 E 的计算方法见式(5)和式(6)。

$$E = M/\bar{y} \quad (5)$$

$$M = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_i (y_i - \bar{y})^2} \quad (6)$$

式中, M 表示煤粉质量分数标准差; \bar{y} 表示煤粉质量分数平均值; n 表示隔仓数量。

2 结果与讨论

2.1 扩径结构对颗粒返混特性的影响

不同扩径比下热解区内轴向颗粒浓度分布见图8。由图8可知,在 $n_1 = 40.6$ 的条件下,进入扩径段后,颗粒浓度在扩径段底部显著升高,随后沿高度(H)方向逐渐降低,浓度分布呈现出典型的“下高上低”特征。这一现象主要源于扩径结构导致反应器截面积增大,气体表观速度局部下降,颗粒停留

时间延长。同时,气流对颗粒的曳力作用减弱,颗粒返混加剧,促使颗粒在扩径段底部聚集。与等径结构相比,扩径段整体表现出明显的“增浓”效应,且随着扩径比增大,扩径段内颗粒浓度升高。在 $R_d = 1.16$ 和 1.27 时,热解区的颗粒浓度较等径结构可提高15%~40%。提高操作气速可提高气体对颗粒的夹带与输送性能,抑制颗粒返混与团聚,缩短颗粒在热解区内的停留时间,导致扩径段内颗粒浓度有所下降。

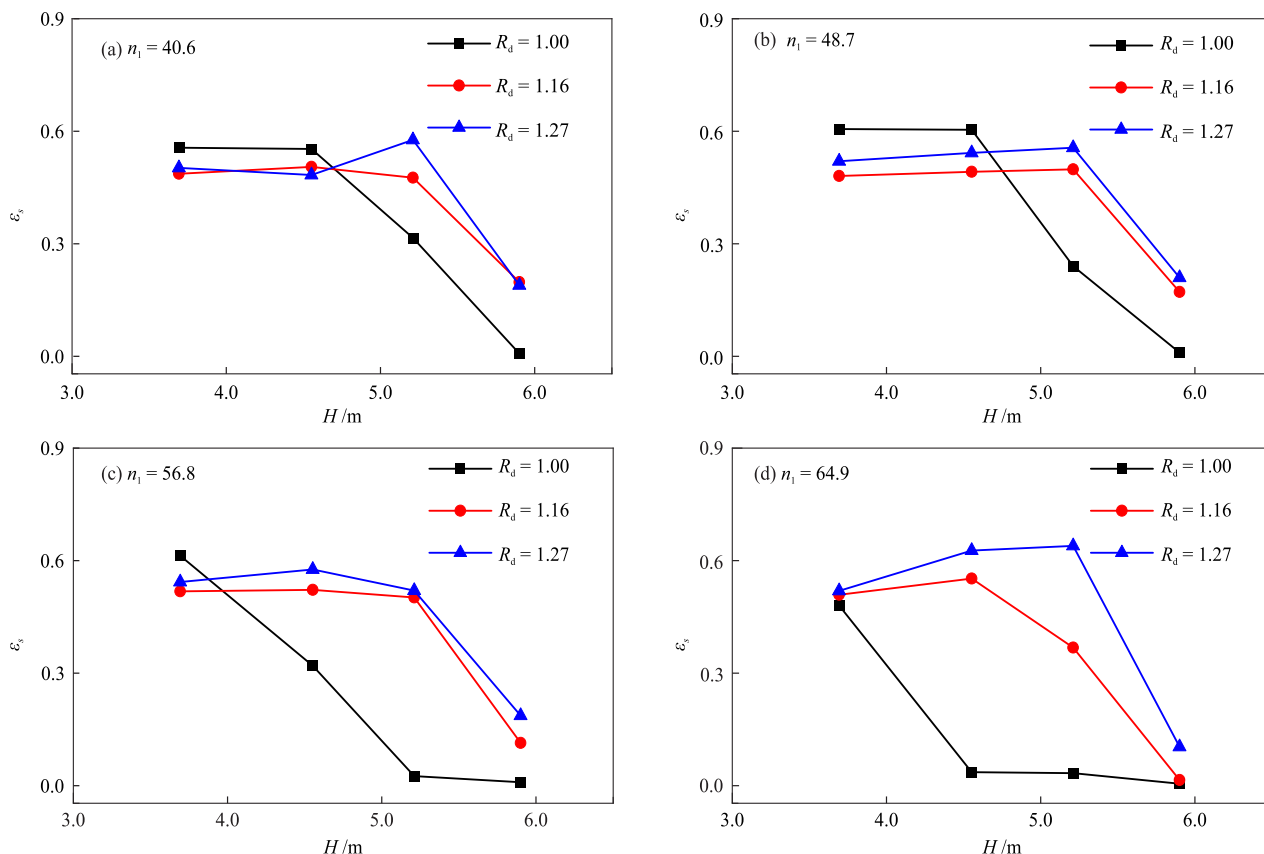


图8 不同扩径比下热解区内轴向颗粒浓度分布

Fig. 8 Axial distributions of particle concentrations in pyrolysis section under different expanding diameter ratios

不同扩径比下热解区内颗粒浓度的径向分布见图9。由图9可知,热解区中的颗粒浓度呈现典型的“中心低、边壁高”非均匀分布规律,即颗粒浓度随无量纲半径 r/R 增大而升高。该分布特征主要与边界层效应有关:在提升管内气固两相流向上运动过程中,气流流速整体呈现中心高、边壁低的特征。由于气流与颗粒之间滑移速度的存在,中心气流携带的颗粒逐渐向低流速的边壁区域转移,形成流速较低而颗粒浓度较高的边界层(贴壁流);在重力、颗粒间碰撞以及颗粒与壁面的摩擦阻力共同作用下,边界层内颗粒上升速度进一步降低,甚至出现向下滑移的趋势,最终在近壁面附近聚集,形成局部高浓度区。当 $R_d = 1.00$

时,颗粒浓度在 $H = 5900$ mm处出现明显降低,而采用扩径结构后,相同位置的颗粒浓度显著升高,表明扩径结构能够有效提高颗粒抗轴向衰减性能。

此外,径向颗粒浓度随气速增大呈现先升高后降低的趋势,该变化在扩径段内尤为明显。这表明,颗粒流动状态与扩径结构及气流速度密切相关。当气化区表观气速为 $0.36 \sim 0.48$ m/s时,存在可有效提高热解区颗粒浓度的操作条件;超出该范围,整个热解区的颗粒返混效果将减弱,不利于建立局部浓相区。随着扩径比增大,最佳颗粒返混所需的气速总体向更高范围偏移。这主要是因为扩径比增大时,扩径段局部通流面积增大,导致气速

下降,这降低了气流对颗粒的曳力作用,导致热解区上部颗粒浓度降低。为重构热解区内部较高的

颗粒浓度状态,需进一步提高表观气速以实现气固之间的动量传递平衡。

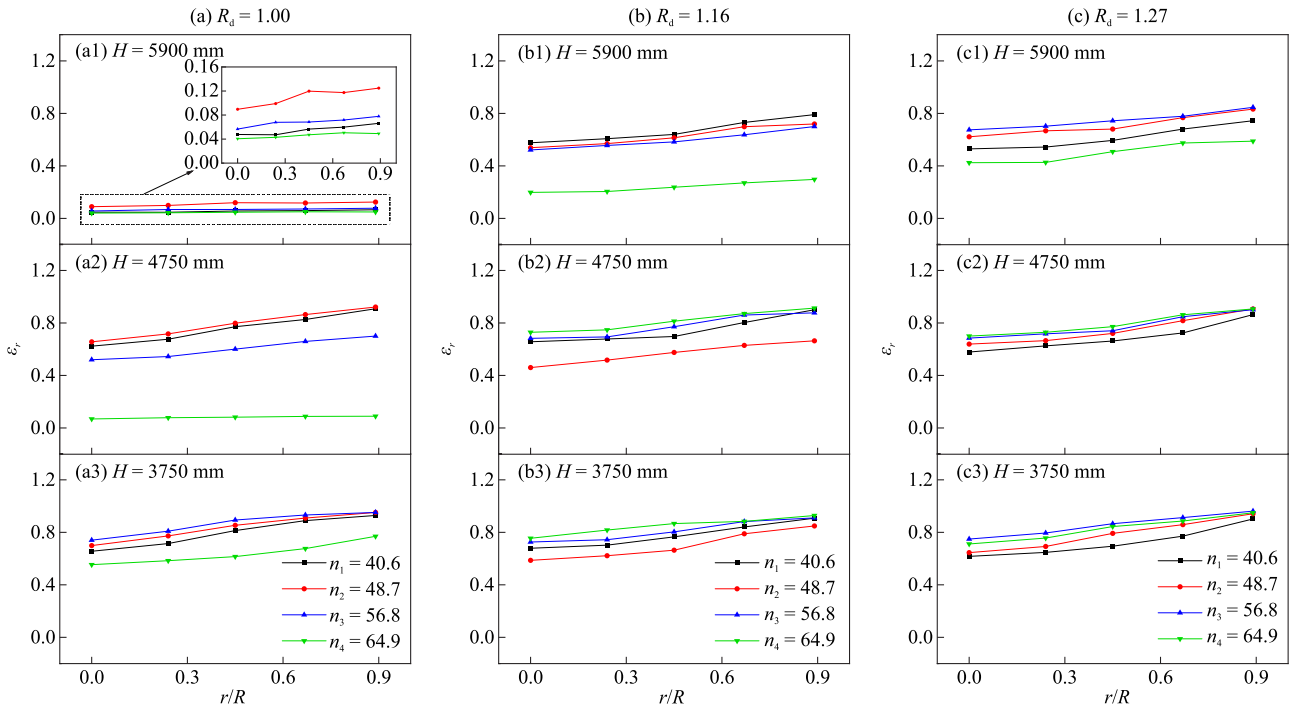


图9 不同扩径比下热解区内径向颗粒浓度分布

Fig. 9 Radial distributions of particle concentrations in pyrolysis section under different expanding diameter ratios

2.2 喷口布置方式对颗粒掺混特性的影响

不同喷口布置方式下提升管内轴向压力梯度变化见图10。由图10可知,轴向压力梯度呈现降低-升高-降低的三阶段变化特征。此外,轴向压力梯度的峰值随 u_2 升高而减小,并且峰值位置与喷口布置方式密切相关。在切向和斜切模式下,轴向压力梯度峰值随 u_2 升高逐渐向缩径段移动;在斜插模式下,轴向压力梯度峰值始终稳定在中部缩径段。上述峰值位置分布存在差异的根源在于不同布置方式的喷口产生的射流与主气流耦合后,形成了迥异的气固流动结构与颗粒输送机制。在切向模式下,气流沿壁面切入将产生显著的切向动量分量,在壁面附近诱导形成稳定的旋流。该旋流有效提高了壁面附近区域的湍流扩散强度,抑制了颗粒在壁面的沉积与滞留,将其卷吸到反应器内部主气流区域。随着喷口气速升高,热解区内颗粒输送性能提高,导致上部颗粒浓度降低,压降峰值随之减小。对于斜插与斜切模式,其入射方式使得射流正面冲击主气流,动量耗散集中且剧烈,导致大量颗粒滞留于喷口下游区域(即缩径段)。该区域湍动能虽高但宏观输运性能却较低,因此压力梯度峰值位置相对固定。

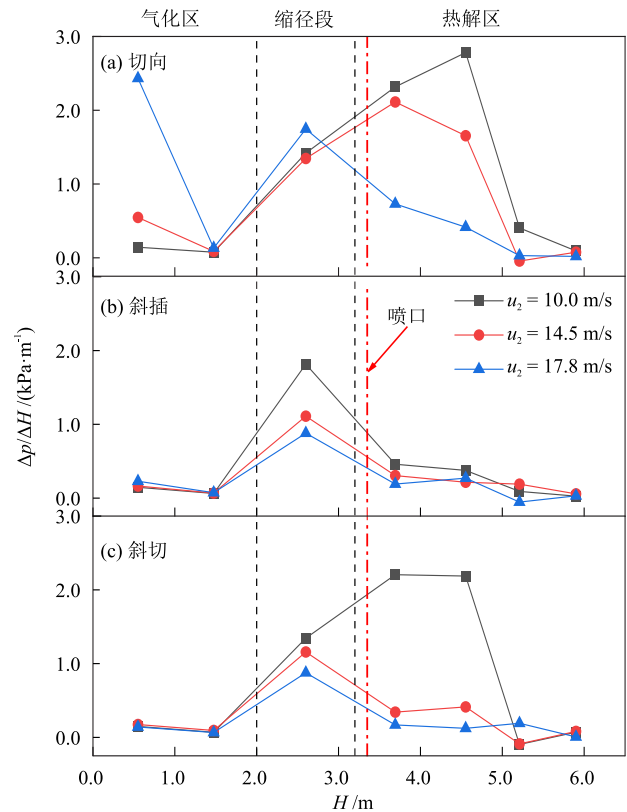


图10 不同喷口布置方式下提升管内轴向压力梯度变化
Fig. 10 Changes of axial pressure gradients in riser under different nozzle arrangements

不同喷口布置方式下径向煤粉质量分数见图 11。由图 11 可知,喷口气速和布置方式均可显著影响颗粒之间的掺混效果。在切向模式下,当 $u_2 > 10.0$ m/s 时,各截面的煤粉质量分数降低,说明该喷口布置方式抑制了从提升管底部输送上来的半焦的轴向运动,导致半焦在热解区域富集。在斜插模式下,热解区顶部出现较高的煤粉质量分数;相较于切向

模式,煤粉质量分数在高 u_2 条件 ($u_2 = 14.5$ m/s 和 17.8 m/s) 下提高了 2~3 倍,表现出显著的煤粉富集效应。在斜切模式下,当 $u_2 = 10.0$ m/s 时,煤粉质量分数沿高度方向基本一致,基本稳定在 0.2 左右,并且随着 u_2 升高,各截面径向煤粉质量分数分布趋于均匀,表明斜切喷口布置方式可以实现较优颗粒掺混效果。

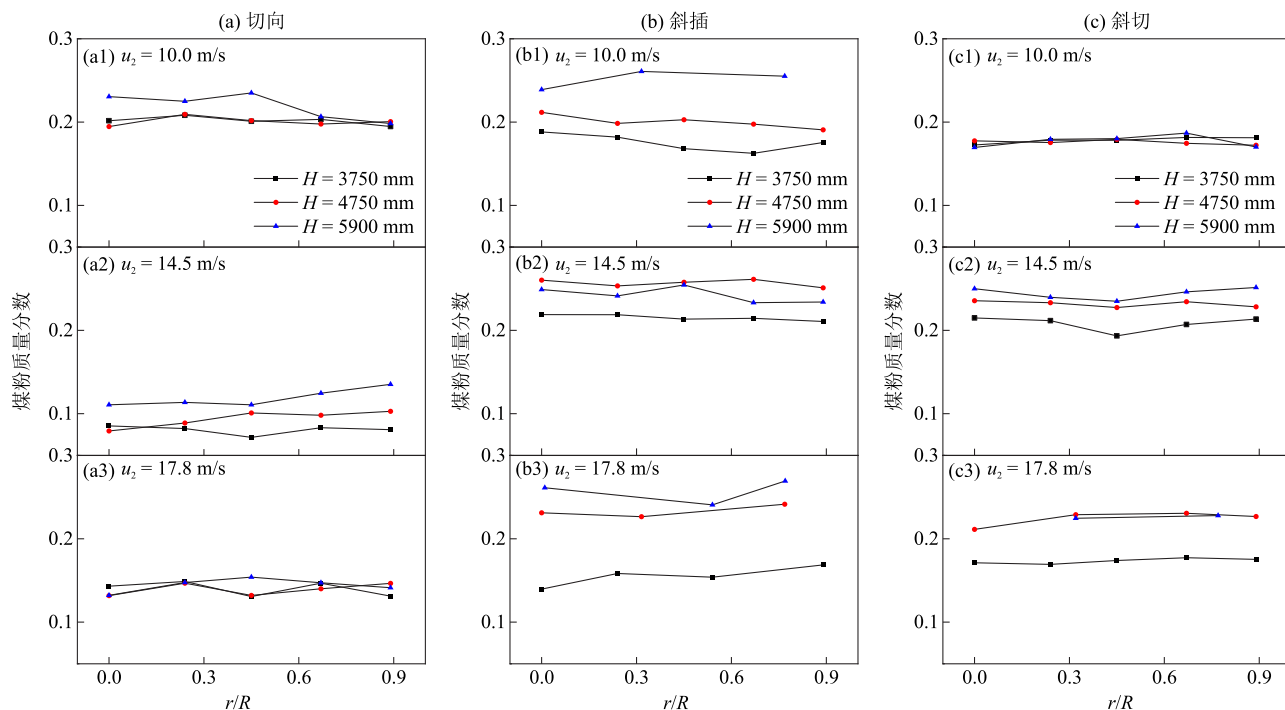


图 11 不同喷口布置方式下煤粉质量分数

Fig. 11 Pulverized coal mass fractions under different nozzle arrangements

不同喷口布置方式下径向煤粉质量分数的离散系数见图 12。由图 12 可知,整体上而言,斜切模式下煤粉质量分数离散系数小于 0.05,明显低于切向和斜插模式,表明斜切喷口布置方式表现出更优的颗粒掺

混效果。这是由于斜切模式能够产生适度强度的旋流,将贴壁流充分卷吸到反应器内部,同时非垂直喷射角度减轻了对主流核心区过度冲击,容易诱导反应器内形成尺度适宜、有利于颗粒混合的二次涡流。

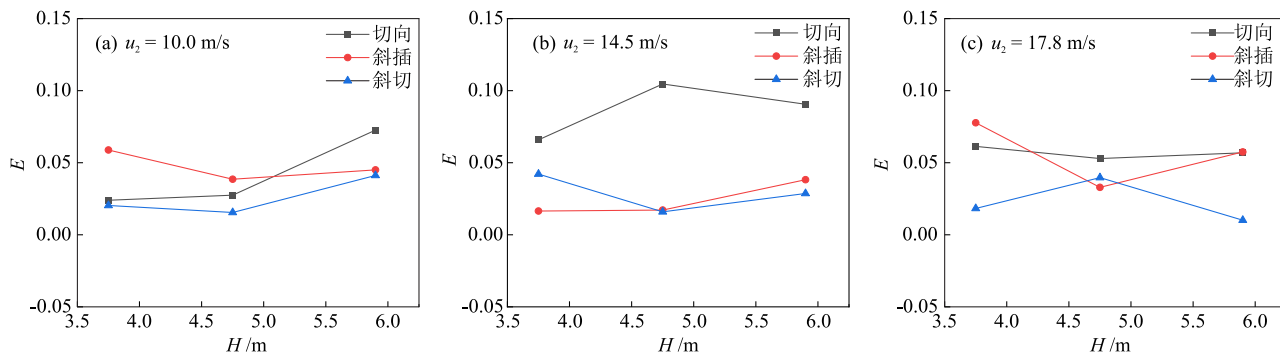


图 12 不同喷口布置方式下径向煤粉质量分数的离散系数

Fig. 12 Coefficients of variation of radial pulverized coal mass fractions under different nozzle arrangements

3 结论

本文采用冷态实验研究了多段变径循环流化

床热解反应器提升管内的颗粒流动特性,揭示了扩径结构与喷口布置方式对颗粒返混和掺混行为的影响规律,得出如下结论。

(1)扩径结构可以有效提升反应器内颗粒浓度,抵抗其沿轴向的衰减趋势。与等径结构相比,在扩径比1.16和1.27下,热解区颗粒浓度相较等径结构可以提高15%~40%,形成局部浓相区域,从而为煤粉热解创造更强的传热条件。

(2)采用斜切式喷口时,煤粉与半焦的掺混效果最佳,沿提升管轴向固相中煤粉质量分数稳定在0.20左右,离散系数小于0.05。切向布置可以使热解区整体保持较高颗粒浓度,但固相中煤粉质量分数最低;斜插布置可以在局部营造出煤粉富集区,其煤粉质量分数是其他布置方式的2~3倍。

参考文献

- [1] LIU Q X, HE L, HUANG Y, et al. Pyrolysis characteristics of low-rank coal in pressurized fluidized bed under different atmospheres [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2025, 191: 107218.
- [2] 戴航. 低阶煤热解工艺和应用进展[J]. *山东化工*, 2024, 53(24): 101-103.
DAI H. Progress in low rank coal pyrolysis technology and application [J]. *Shandong Chemical Industry*, 2024, 53(24): 101-103.
- [3] XUE F F, LI D, GUO Y T, et al. Technical progress and the prospect of low-rank coal pyrolysis in China [J]. *Energy Technology*, 2017, 5(11): 1897-1907.
- [4] GAO J M, ZHANG L. Environmental regulation, market power and low-carbon development of China's coal power industry chain—Based on both strategy and return perspectives [J]. *Energy Strategy Reviews*, 2025, 58: 101651.
- [5] WANG C A, GAO X Y, LIU C C, et al. Experimental investigation on physical and chemical properties of solid products from co-pyrolysis of bituminous coal and semi-coke [J]. *Journal of the Energy Institute*, 2021, 99: 59-72.
- [6] ZHANG Y, GAO N B, QUAN C, et al. Study on structural properties of semi-coke from pulverize coal pyrolysis and influencing factors during its thermal transportation process [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2023, 173: 106052.
- [7] LIU T, ZHANG X L, LIU Y Z, et al. Directional preparation of naphthalene oil-rich tar from Beisu low-rank coal by low-temperature catalytic pyrolysis [J]. *Carbon Resources Conversion*, 2020, 3: 67-75.
- [8] YANG D E, XU B, SUN J H, et al. CO₂-enhanced tar-rich coal pyrolysis to produce high-quality oil and CO-rich gas [J]. *Journal of Thermal Science*, 2025, 34(4): 1554-1568.
- [9] MA Z H, WEI X Y, LIU G H, et al. Value-added utilization of high-temperature coal tar: A review [J]. *Fuel*, 2021, 292: 119954.
- [10] CHE Y J, SHI K M, CUI Z H, et al. Conversion of low temperature coal tar into high value-added chemicals based on the coupling process of fast pyrolysis and catalytic cracking [J]. *Energy*, 2023, 264: 126169.
- [11] LIU Y Q, YAO Q X, SUN M, et al. Catalytic fast pyrolysis of coal tar asphaltene over zeolite catalysts to produce high-grade coal tar: An analytical Py-GC/MS study [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2021, 156: 105127.
- [12] WALID B, HASSIBA B, BOUMEDIENE H, et al. Improved design of the Lurgi reactor for methanol synthesis industry [J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2018, 41(10): 2043-2052.
- [13] 冉伟利, 张志刚, 樊英杰, 等. 块煤中低温热解技术开发应用及研究方向[J]. *煤化工*, 2014, 42(2): 10-14.
RAN W L, ZHANG Z G, FAN Y J, et al. Development status and trend of low temperature pyrolysis technology of lump coal [J]. *Coal Chemical Industry*, 2014, 42(2): 10-14.
- [14] 崔阳. 粉煤热解技术的研究现状及展望[J]. *能源化工*, 2018, 39(2): 33-38.
CUI Y. Research status and prospects on pyrolysis technologies of the pulverized coal [J]. *Energy Chemical Industry*, 2018, 39(2): 33-38.
- [15] LI Q S, LIN Y K. Exergy analysis of the LFC process [J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 108: 348-354.
- [16] ATWOOD M T, SCHULMAN B L. The toscoal process-pyrolysis of western coals and lignites for char and oil production [J]. *Chemical Society Division of Fuel Chemistry Preprints*, 2017, 22(2): 233.
- [17] 郭树才, 罗长齐, 张代佳. 褐煤固体热载体干馏新技术工业性试验[J]. *大连理工大学学报*, 1995, 35(1): 46-50.
GUO S C, LUO C Q, ZHANG D J. Experiment in pilot plant of new technology for lignite retorting using solid heat carrier [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 1995, 35(1): 46-50.
- [18] WANG Z A, WANG Z, WANG T. Research progress on heat effects of coal pyrolysis process [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2024, 183: 106827.
- [19] LIU C J, LU J Y, ZHENG F, et al. Molecular structure model construction and pyrolysis mechanism study on low-rank coal by experiments and ReaxFF simulations [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2024, 178: 106387.
- [20] GAO Y, SUN L Y, TIAN Y Y. Pyrolysis characteristics and product distribution of low-rank coal with heat-carrying particles adopting TG-FTIR and a novel self-mixing down tube reactor [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2024, 54: 104041.
- [21] JIANG Y, ZONG P J, MING X, et al. High-temperature fast pyrolysis of coal: An applied basic research using thermal gravimetric analyzer and the downer reactor [J]. *Energy*,

- 2021, 223: 119977.
- [22] TIAN B, QIAO Y Y, BAI L, et al. Pyrolysis behavior and kinetics of the trapped small molecular phase in a lignite [J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 140: 109-120.
- [23] 胡勋, 范梦娇. 热解温度和热解停留时间对半焦性质的影响[J]. *中国粉体技术*, 2025, 31(4): 151-159.
- HU X, FAN M J. Effects of pyrolysis temperature and residence time on char properties [J]. *China Powder Science and Technology*, 2025, 31(4): 151-159.
- [24] HU G X, FAN H J, LIU Y Q. Experimental studies on pyrolysis of Datong coal with solid heat carrier in a fixed bed [J]. *Fuel Processing Technology*, 2001, 69(3): 221-228.
- [25] QUAN S M, SHI L, ZHOU B, et al. Study of temperature variation of walnut shell and solid heat carrier and their effect on primary pyrolysis and volatiles reaction [J]. *Fuel*, 2021, 292: 120290.
- [26] 郭志航. 褐煤热解分级转化多联产工艺的关键问题研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- GUO Z H. Research on the key issues of lignite pyrolysis-based staged conversion polygeneration technology [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [27] 刘琦. 双流化床中煤热解-气化工艺试验研究[D]. 北京: 中国科学院工程热物理研究所, 2009.
- LIU Q. Experimental study on coal pyrolysis-gasification processing in dual fluidized beds [D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, 2009.
- [28] ZHANG X Y, QI X B, GAO S H, et al. An experimental investigation on gasification-pyrolysis coupling characteristics of pulverized coal in circulating fluidized bed [J]. *Journal of the Energy Institute*, 2024, 116: 101751.
- [29] LI X L, QI X B, ZHU Z P, et al. Experimental study on the pyrolysis characteristics during the coal partial gasification in a bench-scale circulating fluidized bed [J]. *Journal of Thermal Sciences*, 2025, 35: 203-214.
- [30] 董建宏, 齐晓宾, 朱治平, 等. 多段变径结构提升管的输送和沉降特性研究[J]. *洁净煤技术*, 2025, 31(S2): 884-890.
- DONG J H, QI X B, ZHU Z P. Study on conveyance and sedimentation characteristics in a multi-stage variable diameter riser [J]. *Clean Coal Technology*, 2025, 31(S2): 884-890.
- [31] 刘清华, 杨朝合, 赵辉, 等. 变径提升管内颗粒流动特性的研究[J]. *石油化工*, 2009, 38(1): 40-45.
- LIU Q H, YANG C H, ZHAO H, et al. Solid flow pattern in changing-diameter riser of a circulating fluidized bed [J]. *Petrochemical Technology*, 2009, 38(1): 40-45.
- [32] 祝晓琳, 李春义, 杨朝合, 等. 变径提升管反应器扩径段内固含率分布研究[J]. *石化技术与应用*, 2013, 31(3): 181-184+188.
- ZHU X L, LI C Y, YANG C H, et al. Study on solids concentration distribution in the diameter-enlarged section of a novel riser reactor [J]. *Petrochemical Technology & Application*, 2013, 31(3): 181-184+188.
- [33] 甘洁清, 赵辉, 李春义, 等. 多流型新型提升管冷模实验研究[J]. *石油学报(石油加工)*, 2012, 28(2): 188-194.
- GAN J Q, ZHAO H, LI C Y, et al. Cold model experimental study of a novel multi-regime riser [J]. *Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section)*, 2012, 28(2): 188-194.
- [34] 任福权. 循环流化床二次风射流的研究现状[J]. *节能技术*, 2011, 29(1): 68-72.
- REN F Q. Status research of the circulating fluidized bed secondary air jet [J]. *Energy Conservation Technology*, 2011, 29(1): 68-72.
- [35] 张曜, 林晨, 于娟, 等. 循环流化床二次风射流及床料粒径对流化特性的影响[J]. *洁净煤技术*, 2020, 26(3): 68-74.
- ZHANG Y, LIN C, YU J, et al. Influence of secondary air jet and bed materials size of circulating fluidized bed on the fluidization characteristic [J]. *Clean Coal Technology*, 2020, 26(3): 68-74.
- [36] 黄卫星, 石炎福, 祝京旭. 上行气固两相流充分发展段的颗粒浓度[J]. *化工学报*, 2001, 52(11): 963-968.
- HUANG W X, SHI Y F, ZHU J X. Solids holdups of gas solid two-phase upward flow in fully developed region of CFB riser [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*, 2001, 52(11): 963-968.
- [37] 漆小波, 曾涛, 黄卫星, 等. 上行气固两相流充分发展段的摩擦压降及颗粒浓度预测[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2006, 38(1): 49-53.
- QI X B, ZENG T, HUANG W X, et al. The predictions of pressure drop and solids holdup in fully developed region of CFB risers [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2006, 38(1): 49-53.
- [38] 林海波, 孔春林, 黄卫星. 气固循环流化床提升管颗粒速度和浓度的测量技术[J]. *四川轻化工学院学报*, 2002, 15(4): 28-33.
- LIN H B, KONG C L, HUANG W X. Measurement techniques of solids concentration and solids velocity in circulating fluid beds riser [J]. *Journal of Sichuan Institute of Light Industry and Chemical Technology*, 2002, 15(4): 28-33.