

回转窑低阶煤热解提质工艺及应用技术研究进展

杨远平¹, 黄云^{2*}, 宋民航², 李刚³, 施鹏宇³, 李水清⁴

(1. 北京石油化工学院机械工程学院, 北京市大兴区 102617; 2. 多相复杂系统国家重点实验室(中国科学院过程工程研究所), 北京市海淀区 100190; 3. 江苏鹏飞集团股份有限公司, 江苏省南通市 226623; 4. 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), 北京市海淀区 100084)

Research Progress on Upgrading Technologies and Applications of Low-rank Coal Pyrolysis in a Rotary Kiln

YANG Yuanping¹ HUANG Yun^{2*}, SONG Minhang², LI Gang³, SHI Pengyu³, LI Shuiqing⁴

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Daxing District, Beijing 102617, China; 2. State Key Laboratory of Multiphase Complex Systems (Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences), Haidian District, Beijing 100190, China; 3. Jiangsu Pengfei Group Co., Ltd., Nantong 226623, Jiangsu Province, China; 4. Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education (Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: The promotion of a carbon-neutral power system necessitates the development of efficient, innovative, intelligent, and low-carbon technologies. One crucial aspect in achieving this goal is the upgrading of the low-rank coal industry. The rotary kiln technology emerges as a highly promising solution for low-rank coal pyrolysis, owing to its remarkable adaptability to various raw materials, flexibility, and scalability. To shed light on the current state and future prospects of low-rank coal pyrolysis in rotary kilns, we first summarize the characteristics of existing technologies. And the main factors that influence the yield and quality of products during the pyrolysis process are identified. This paper further delves into the theoretical aspects by providing insights into material transport, crushing mechanisms, and heat transfer mechanisms within the rotary kiln. Additionally, the various techniques employed for upgrading low-rank coal in rotary kilns are analyzed. Then, main bottlenecks and challenges that hinder the development of low-rank coal pyrolysis in rotary kilns are concluded. Based on these analyses and summaries, we propose a forward-looking perspective on the research focus areas and development directions for low-rank coal pyrolysis. Our aim is to provide technological guidance for the large-scale development of low-rank coal pyrolysis technology.

KEY WORDS: rotary kiln; low-rank coal pyrolytic process; mechanism model; heat transfer mechanism; intelligent

基金项目: 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金项目(BA2022203)。

Scientific and Technological Innovation Special Fund Project of Carbon Peak and Carbon Neutrality of Jiangsu Province (BA2022203).

management and control

摘要:“双碳”战略的启动, 将加速推动煤炭行业, 尤其是低阶煤产业的转型升级, 促进低阶煤走向资源利用效率高、创新能力强、智能水平高、低碳可持续发展之路。在此背景下, 回转窑因其原料适应广、操作连续灵活、产品优质及工艺可大型化等优势广泛应用于煤热解。为阐明回转窑低阶煤热解技术发展现状及前景, 该文总结现有回转窑低阶煤热解技术和工艺特点, 归纳影响热解产物产率和质量的主要因素。随后, 从模型建立及理论分析方面, 总结回转窑内物料运输、破碎机制及传热机理。最后, 归纳对比现有回转窑低阶煤提质应用技术, 分析现阶段回转窑低阶煤热解技术面临的主要瓶颈与挑战, 对未来低阶煤热解研究热点和发展方向进行展望, 以为回转窑低阶煤热解工艺的优化及绿色高效规模化发展提供一定参考。

关键词: 回转窑; 低阶煤热解工艺; 机理模型; 传热机理; 智能管控

0 引言

推动煤炭清洁高效利用是实现“双碳”战略的现实有效途径之一。迄今为止, 我国能源结构中煤炭仍占主体地位, 其消费量约占能源消费总量的56.2%^[1], 碳排放占我国排放总量的70%~80%^[2]。煤炭由兜底保障能源向支撑性能源、应急与调峰能源转变是必然趋势, 但我国实现碳达峰之前, 煤炭作为兜底保障能源的作用难以改变^[3]。我国煤炭消费中, 低阶煤产量已占煤炭总产量的55%以上^[4-5], 随着煤炭主产区西移, “十四五”期间低阶煤产量

释, 热值较低, 难以符合工业和民用要求只能作为燃料自用, 煤气价值降低, 且烟气的量增大造成粉尘夹带严重, 增加后续净化工段成本^[25]。为解决气体热载体弊端, 固体热载体热解提质工艺被广泛研究。例如, 李初福等^[26]提出一种固体热载体回转窑煤热解工艺, 该工艺采用大粒度半焦作为热载体的直接加热方式, 系统传热效率得到显著提升; 并且通过建立传热模型, 可对固体热载体煤粉热解反应器和操作条件进行优化^[27]。然而, 半焦热载体微粉碎严重, 焦油粉尘含量大, 为后续分离和加工过程带来较大的挑战^[28]。以刚性高温陶瓷球为固体热载体的热解工艺较半焦热载体相比, 可将焦油粉尘含量降低一半以上, 但陶瓷球传热效率不高, 磨损严重, 不适合黏结性煤, 且系统复杂^[29], 其中, 以美国油页岩公司和 Rocky Flats 研究中心共同开发的 Toscoal 回转炉工艺为代表。此外, 采用热灰为热载体的煤热解多联产技术在循环流化床上也得到应用, 但存在热灰与煤混合均匀性差的问题^[28]。不同的热载体技术特点如表 1 所示^[27]。总体来说, 该技术已处于试验阶段, 技术仍待进一步完善: 一是大型设备中煤颗粒和热载体混合和传热均匀性问题, 二是设备磨损和装置放大问题。通过构建热载体球-煤粉热解过程的传热模型, 可为热解反应器和操作条件的进一步优化提供理论基础^[26,30]。

表 1 不同工业固体热载体对比

Table 1 Comparison of different solid heat carriers

热载体种类	系统热效率/%	焦油含量/%	缺点
高温半焦	80-83	40-50	热载体半焦磨损粉碎严重, 焦油粉尘含量大, 后续分离困难, 堵塞设备管道; 设备放大困难
高温瓷器	≥85	≤20	磨损严重, 系统设备复杂; 不适合黏结性煤
热灰	75-80	≤15	煤和热灰混合均匀性

外热式回转窑利用外热源(如高温烟气、电加热等)通过间接换热方式加热物料, 代表性工艺有煤炭科学研究总院开发的多段回转炉热解工艺。该工艺采用燃气在热解炉外燃烧加热的方式实现低阶煤热解, 间接换热煤气不被稀释, 纯度较高、品质较好; 但传热较慢、系统热效率低、焦油与粉尘易冷凝沉积堵塞管道, 且生产能力受限^[31]。反应器内结构优化设计及外部蓄热式余热回收技术的结合, 有望提升系统传热效率和能效。为突破上述技术瓶颈, 中国重型机械研究院提出一种新型多管回转热解技术, 该工艺采用多加热管热风循环式间接回转

加热原理, 传热效率明显提高, 热风循环利用效率高, 热解气热值高, 废气排放少, 显著降低热解过程的碳排放^[32]。

回转窑不同加热方式导致煤热解过程传热速率及热效率迥异, 且不同热载体对热解产物(尤其是煤气和焦油)质量影响显著, 不同工艺优缺点各不相同, 要实现煤热解工艺的大型工业化、低碳化发展, 需要解决各工艺具体存在的关键技术瓶颈。

1.2 回转窑低阶煤热解主要影响因素

回转窑低阶煤热解温度、停留时间(转速和倾角)、粒径等^[19,33-35]是回转窑传输过程的重要参数, 不仅直接决定窑内传质、传热及气固相间的化学反应过程, 也是回转窑优化设计和运行的关键。

其中热解温度起决定性作用, 强烈影响煤热解程度及产物组成。目前普遍认为煤的热解机理为自由基反应, 即主要发生煤中高分子有机物化合物弱共价键(如侧链、桥键、不稳定官能团等)断裂及分解, 产生大量自由基碎片, 自由基进一步重组、分解及缩聚, 最终形成挥发分和焦炭^[36]。热解温度升高, 可打破煤分子结构键能的壁垒更高, 产生更多自由基碎片, 进而增大焦油和煤气产率。另一方面, 热解温度升高又可加剧挥发分二次反应, 促使部分焦油分子进一步裂解, 降低焦油产率, 改变焦油成分, 增加重质焦油含量。现有研究发现当温度在 500~600℃ 范围内时, 焦油产率可达到最大^[37]。

回转窑内物料停留时间对工业生产过程同样至关重要, 影响热解产物组分及产率。停留时间可分为固相平均停留时间和气相停留时间, 对于固相来说回转窑转速和倾角对物料的平均停留时间和停留时间分布影响较大, 停留时间分布的影响随回转窑转速增加而降低, 而回转窑倾角显著影响停留时间的分布^[38]。为精确测量平均停留时间, 许多学者采用示踪的方式来确定回转窑中的停留时间分布。目前示踪技术可分为离线和在线 2 种检测方式。离线测试在以往的研究中被广泛使用。例如, Sai 等^[39]引入煤和沙子作为示踪剂来确定钛铁矿在回转窑内的平均停留时间; Chen 等^[40]用秒表记录一定时间间隔内所有示踪剂和收集到容器中的示踪剂相应进出时间。在线示踪方法通常通过直接记录光信号、热信号或电信号, 并基于这些信号数据来统计计算示踪剂浓度进而推导物料在回转窑内的停留时间分布。冷态实验研究发现, 随着倾角增加停留时间分布变窄, 而粒径对平均停留时间和停留

时间分布几乎没有影响^[19],因此煤粒径的变化不改变其停留时间。气相停留时间的延长则会促进挥发分的二次反应,不利于焦油的收集。对实际过程来说,需选取适当的停留时间,这是因为较短的停留时间导致反应不完全,而较长的停留时间可能会影响热解产物并导致额外的能源成本。

此外,煤粒径对热解反应的影响较为复杂。粒径越大,煤颗粒内外受热不均匀,热解挥发分逃逸困难,致使焦油收率减少、煤焦产量增多^[41];与增加压力的热解情况相似,大颗粒煤挥发分二次反应更易在颗粒孔道结构上发生,降低焦油产量,且经二次反应后的积炭堵塞孔道结构,进一步促进二次反应的进行^[42]。

通过实验研究可以得到回转窑低阶煤热解过程不同操作条件对停留时间、热解产物的经验关联式,但针对不同规模和尺寸、表面结构及操作参数的回转窑,实验结果很难被扩展应用。

2 回转窑热解机理研究进展

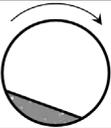
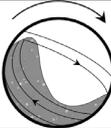
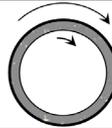
为深入揭示回转窑低阶煤热解过程的传质、传热特性,本节从回转窑内低阶煤运动、破碎和热量传输等方面的研究进行归纳分析,以期从机理研究和模型建立层面为回转窑低阶煤热解工艺的优化和开发提供参考。

2.1 回转窑内物料运动特性研究

在回转窑的圆周方向,物料的运动可分为滑移、塌落、滚落、泻落、抛落和离心6种状态^[43-44],其典型的运动状态如表2所示。在滑移模式下,回转窑内的物料颗粒在窑壁上滑动,床作为刚性体,只有料床与壁面间的相对运动,而床内颗粒间则几乎没有相对运动,物料在轴向和横向上的混合非常有限,极大影响低阶煤热解的均匀性,因此在工程实际中应尽量避免物料在滑移模式下运输。随着回转窑转速的增大,物料塌落和滚落的运动模式占主导,此时物料的运动呈现显著的散体运动模式,混合较充分。在滚落模式下,固体作为连续层流动,固体的倾角即为动态休止角。而在塌落模式下,固体沿着内壁向上移动并到达休止角上限,然后随着一段固体从床的上半部分分离到下半部分,通过周期性的“雪崩”向下坍塌。对于泻落和抛落状态下,物料颗粒自高处落下易造成颗粒的破碎;离心状态下物料贴壁运动,混合和传热效果不佳。不同颗粒的运动状态可通过Froude数($F_r = \omega^2 R/g$,其中: ω 为旋转角速度; g 为重力加速度)来刻画^[45](如表2所示)。上述6种物料运动模式中,由于滚落状态下物料混合效果好,是大多数窑炉操作所需的情况。目前,几乎所有关于回转窑固体输送和传热模型均基于物料滚落模式的假设开发的。

表2 颗粒流态、Froude数与床料运动模式关联关系

Table 2 Granular flow regimes and the Froude number associated with each bed movement

运行状态	滑移	塌落	滚落	泻落	抛落	离心
示意图						
物理过程	滑动		混合		破碎	离心
Froude数	$F_r < 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5} < F_r < 3 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4} < F_r < 2 \times 10^{-2}$	$4 \times 10^{-4} < F_r < 8 \times 10^{-2}$	$9 \times 10^{-2} < F_r < 1$	—
填充率	$f > 0.1$	$f > 0.1$	$f < 0.1$	$f > 0.1$	$f > 0.2$	—

在轴向运动方向,基于机理模型的平均停留时间分布也被广泛研究。20世纪90年代,Gupta等^[46]和Kohav等^[47]发展颗粒轨道模型(particle trajectory model, PTM)来预测物料的平均停留时间。Haeldermans等^[48]对不同的模型研究发现物料停留时间分布的预测结果均不佳,通过使用新边界条件校正的Saeman模型可将预测结果的平均绝对误差从54.5%降低到15.3%。李水清等^[43,49]采用粒子成像测速技术(particle image velocimetry, PIV)对回转窑断面内颗粒流场进行可视化研究,提取回转窑内

物料运动特征,并结合窑内物料运动特征,在Saeman研究基础上优化PTM模型,并首次引入物料分离特征指数将该模型成功地用于回转窑内固废停留时间分布的数值模拟,通过对随机PTM模型简化,得到回转窑内固废运输的平均停留时间 t_m 和粒子停留时间分布 $f(t)$ 的计算关联式:

$$t_m = \frac{L \sin \theta_d}{2\pi R n (\tan \alpha + \cos \theta_d \cdot \tan \beta) \cos^2 \beta} \quad (1)$$

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_r} \cdot t_m} \exp\left(-\frac{(t/t_m - 1)^2}{2\sigma_r^2}\right) \quad (2)$$

式中: R 为回转窑内径; n 为窑体转速; L 为窑体长度; α 为窑体倾角; β 为物料倾角; $\bar{\beta}$ 为平均料床倾角; θ_d 为物料在窑内的动休止角; σ_t 为停留时间离散方差。

为强化实际过程的传热和传质, 回转窑内常带有内构件, 颗粒的搅拌和扬析作用增强, 将显著改变颗粒运动的机理和滚落床态; 且当窑体转速较低时, 料床也常常表现为塌落床或滑移床。为得到具有普适性的公式, 李水清等^[49]引入修正系数 ε_t 完善模型对非均质颗粒和内构件工况的适用性, 模型计算值和试验结果具有较好的一致性。

$$t_m = \varepsilon_t \frac{L \sin \theta_d}{2\pi R n (\tan \alpha + \cos \theta_d \cdot \tan \bar{\beta}) \cos^2 \bar{\beta}} \quad (3)$$

基于实验尺度的研究, 开发建立具有普适性的回转窑内物料的运动状态及停留时间的数学模型, 有助于工艺技术的优化和设备的放大。

2.2 低阶煤回转窑热破碎机理研究

低阶煤回转窑热解过程高温热破碎及窑内机械破碎造成粉尘量大, 为探明低阶煤热解的破碎行为, 诸多学者开展细致的机理研究。根据煤颗粒破碎原因通常可分为一次破碎和二次破碎, 且普遍认为煤颗粒自发破碎行为一般发生在脱挥发分开始阶段。具体来说, 煤的一次破碎指颗粒快速受热过程因温度分布不均引起的内部热应力、水分和挥发分快速析出导致的颗粒破裂和解体; 而二次破碎指煤颗粒内部组分消耗和矿物质演变导致颗粒出现结构性破坏, 导致煤颗粒破碎, 通常煤热解自发破碎行为为一次破碎。

煤破碎行为的研究可通过单颗粒随机破碎和颗粒群破碎特征统计。单颗粒破碎模型构建上, 综合考虑煤颗粒的比热和热导率, 热解过程的热传递、水分和挥发分脱除过程, 基于有限体积法, 计算任何时刻在颗粒中每个点产生的不同气体的温度、成分和质量流量, 进而构建单颗粒破碎模型。此外, 吴正舜等^[50]借助一维应力场模型研究球形煤粒截面上作用的法向集聚压力和材料本身应力的作用, 利用 Simpson 公式计算煤粒内部压力随时间和位置的分布场, 发现挥发分在煤粒内部集聚产生的压力梯度是煤燃烧破碎的重要原因。Chen 等^[51]根据煤非各向同性的结构特点, 煤颗粒的一次破碎的分布概率情况可通过随机函数模型来计算。基于转化强度函数结合煤颗粒粒径分布的研究发现, 转化强度函数和入炉煤颗粒的粒径平方成反比, 通过计算煤颗粒

破碎的最大熵形式并对其求导, 可得出一次破碎任意时刻的最大连续可能尺寸分布函数关系式:

$$f(D) \approx \frac{\pi}{2} V_m^{-1} D^2 \exp\left(-\frac{\pi D^3}{6V_m}\right) \quad (4)$$

式中: $f(D)$ 为任意时刻最大连续可能尺寸分布函数; V_m 为颗粒平均体积; D 为颗粒粒径。

金光等^[52]以单颗粒煤粉燃烧破碎模型为基础, 以破碎比率概念来表征破碎程度, 研究发现煤颗粒粒径是影响破碎过程最重要因素, 粒径越小, 反应的比表面积越大, 相同膨胀应力产生的压强越大, 破碎效果越明显; 挥发分含量越高, 热解析出过程产生的膨胀应力越大, 产生的孔隙率越大, 进一步降低煤颗粒自身的屈服强度, 促进破碎产生。而 Zhong 等^[53]研究发现, 小颗粒的温度梯度较小, 产生的热应力小于大颗粒的, 故小颗粒煤破碎指数低。颗粒破碎行为直接观察可得到较直观的结果及煤颗粒的破碎过程, 利于分析颗粒破碎的机理, 但存在明显缺点, 即单颗粒的破碎具有随机性, 实验条件和颗粒性质对破碎结果的影响错综复杂, 导致实验可重复性差。

通过颗粒群热解过程的破碎特征统计发现, 褐煤破碎和粉化程度随温度、停留时间和粒度的增加而升高, 且对颗粒破碎程度的影响权重依次为温度、粒度和时间^[54]。在综合考虑热力和机械力的研究中发现, 半焦孔隙结构和粒度分布的改变主要与热力加载有关^[55]。对于低温阶段的热机械作用, 非硫组分比高硫组分更破碎; 而在高温阶段, 高硫组分的碎裂主导热碎裂^[56]。

为研究煤在真实运行场景下的热破碎特性, 北京低碳清洁能源研究院^[22]利用百公斤级回转窑对粒径 13~25 mm 的神华补连塔矿区神东煤热解破碎进行实验研究, 考察加热终温、停留时间、回转窑转速 3 种操作参数对碎裂粉化程度的影响。结果表明, 随温度升高(120~700℃), 神东煤产物总碎裂率由 20.48% 升至 68.74%; 停留时间从 20 增至 60 min, 碎裂率由 15.66% 升至 68.22%; 回转窑转速由 2 增至 10 r/min, 碎裂率由 17.54% 升至 71.43%。曲洋等^[57]在实验室尺度的回转窑实验平台上得到相似的结论。

2.3 回转窑热解物料传热机理

通常, 回转窑内气-固相传热速率非常低, 远小于煤热解过程化学反应动力学控制的速率, 随着回转窑内物料的热解和输运, 窑内壁表面周期性地与

高温气体和物料间歇接触,使得窑内物料传热过程十分复杂,因此,厘清气体-壁面-料床多相传热过程对建立窑内传热模型至关重要。

根据工艺类型回转窑可分为直接和间接加热,如图2所示。在直接加热方式中(见图2(a)),主要为高温烟气的对流和辐射传热,接触传热只占传到固体床料总热量的20%左右^[58]。而在间接加热回转窑中(见图2(b)和(c)),从物料所覆盖的高温壁面到覆盖固体床料间的接触传热占据主导。虽然不同工艺回转窑加热方式不同,但其内部气流、物料及内壁面间的传热途径相同,即所覆盖高温壁面与物料

间的传热(对流、交界面处的接触传热及辐射换热的综合传热过程)、裸露壁面和窑内气体间的传热(对流、辐射传热)、裸露物料表面和气体间的传热(对流、辐射传热)及裸露壁面和裸露料床表面间的传热(辐射传热)^[59],其中窑内温度高于1000℃时辐射传热的影响才逐渐突显;另外,2种加热方式不同之处在于:1)直接/间接内热式需考虑回转窑外壁面对环境的散热损失,而间接外热式则针对环境对窑外壁面的加热;2)直接加热方式加热介质与窑内物料或热解煤气存在混合现象,不利于煤气质量的提升。

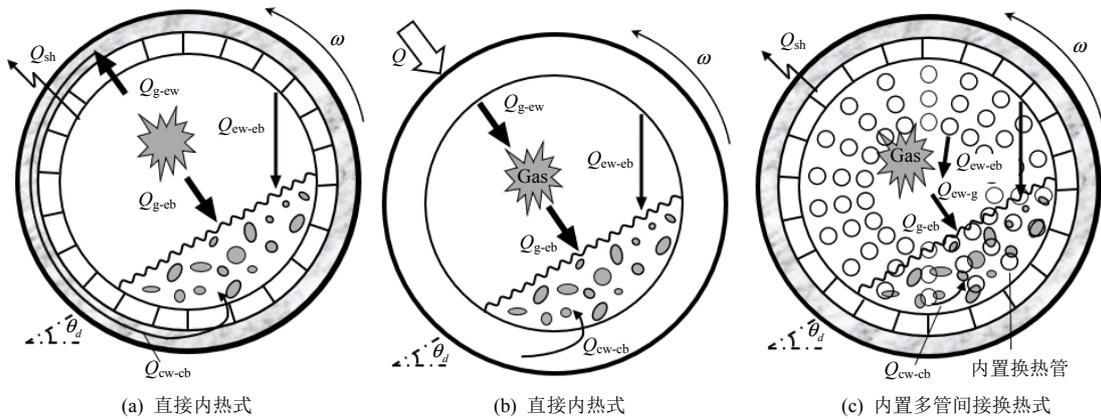


图2 回转窑传热模式示意图

Fig. 2 Rotary kiln heat transfer mode

为综合分析回转窑内温度及传热过程,国内外学者对窑内热传递过程进行建模分析。早期,Imber和Paschkis采用奇数分析方法求解轴向上的气-固一维平衡方程,得到内热式回转窑轴向温度分布^[60]。在此基础上,国内学者建立一维轴向换热模型,将回转窑分区并计算各区域控制体的角系数,通过求解能量平衡方程来计算轴向温度分布,但该模型未考虑物料反应过程的热转化^[61]。Martins等^[62]综合考虑传热过程和物化反应,建立基于化学反应的一维轴向传热模型,探明窑内物料与烟气、窑壁间的传热传质及动力学特性间的相互关系。马爱纯等^[63]则重点分析烟气、窑壁和物料间的热传导、对流和辐射间的联系,探究窑内轴向温度分布特征。Boateng等^[64]基于窑内物料传热传质及物化反应过程的大量研究,建立回转窑内轴向一维传热模型,在忽略物料反应基础上对回转窑内温度分布做出整体性描述;随后,着重分析任一径向截面处物料运动和传热过程,进而建立截面二维物料运动与传热模型,并将一维轴向模型与截面物料运动传热的二维模型结合,建立回转窑三维机理模型,这为回

转窑热解过程能量流预测及管控平台的开发提供基础。李水清等^[59]提出扩展的热渗透模型,建立内热式轴向一维传热模型,并将其拓展后应用到外热式热解炉的传热设计校核。

对回转窑传热模型的建立和优化,能够有效地指导回转窑的设计。以2种间接换热式回转窑(如图2(b)和(c)所示)的传热过程为例,采用上述传热模型,以窑壁上的热流平衡为基础,即高温加热介质散热量应等于气流和料床对窑壁的换热量和热损失的和,可得到加热介质传输到窑的热量 Q ^[59]:

$$Q = Q_{g-ew} + Q_{ew-eb} + Q_{cw-ch} + Q_{sh} \quad (5)$$

式中: Q_{g-ew} 为裸露壁面和气体之间的传热; Q_{ew-eb} 为裸露壁面和裸露料床表面之间的传热; Q_{cw-ch} 为覆盖壁面和料床之间的传热; Q_{sh} 为窑体外壁面的散热损失。

若不考虑低阶煤热解过程的反应,外热式回转窑窑内热平衡计算式^[43]为

$$Q = (h_{g-cw}^c + h_{g-cw}^r) A_{cw} (T_w - T_g) + h_{ew-eb}^r A_{eb} \cdot (T_w - T_b) + h_{cw-ch}^c A_{cw} (T_w - T_b) \quad (6)$$

对于内置多管间接换热式回转窑窑内热平衡计算式^[43]为

$$Q = (h_{g-cw}^c + h_{g-cw}^r)A_{cw}(T_w - T_g) + h_{ew-cb}^r A_{cb} \cdot (T_w - T_b) + h_{cw-cb}^c A_{cw}(T_w - T_b) + h_{w-0} A_0(T_w - T_0) \quad (7)$$

式中： h_{g-cw}^c 、 h_{cw-cb}^c 分别为裸露壁面和气体、覆盖壁面和料床之间的对流传热； h_{g-cw}^r 、 h_{ew-cb}^r 分别为裸露壁面和气体、裸露壁面和裸露料床表面之间的辐射传热； h_{w-0} 为窑外壁和环境间的传热系数； A_{cw} 、 A_{cb} 、 A_{cw} 、 A_0 分别为裸露壁面、裸露料床表面、覆盖壁面和窑外壁的面积； T_w 、 T_g 、 T_b 、 T_0 分别为回转窑壁面温度、气体温度、床料温度和环境温度。

通过对传热过程的分析，可以对外热式和内置多管间接换热式回转窑的换热效率进行对比。假设 2 种换热方式下高温加热介质和低阶煤热解的温度相同，且其他操作条件(如回转窑转速、倾角、物料填充率等)一致，通过估算内置多管间接换热式回转窑单位长度的换热量约为外热式回转窑的 2~3 倍。因此，热解或煅烧不希望与加热介质混合的物料时，采用内置多管间接换热式具有更高的换热效率和发展前景。

3 回转窑低阶煤热解提质技术应用、挑战及发展趋势

3.1 回转窑低阶煤热解提质技术应用

图 3 为不同热解工艺技术的对比评估，通过不同回转窑在原料适应性、设备大型化及操作灵活性等方面的优势，国内外科研机构和企业对回转窑应用于低阶煤热解进行广泛的研究和开发，并形成诸多工业应用及示范装置^[23]。

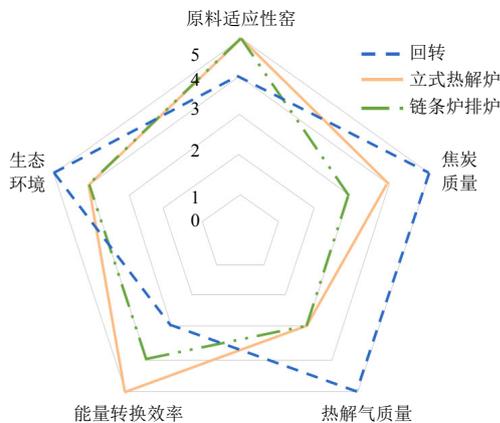


图 3 不同热解工艺流程技术评估

Fig. 3 Technical evaluation of different pyrolysis processes

例如，德国先进材料公司 IBU-Tec 开发一款间

接加热的回转窑，采用天然气燃烧器(大处理量)或电热元件(小处理量)组成的 5 个加热环在窑炉外壁对物料进行加热，物料热解量可达吨级每小时^[65]，其结构示意图如图 4(a)所示。由于燃烧气体被挡在反应室之外，这种结构更易于控制窑炉内热解气氛(如惰性或还原性)，且间接燃烧窑的气体体积流量通常比直接燃烧窑低，降低细粉尘的夹带量。类似地，美国 FEECO 公司也开发一款天然气燃烧间接加热的热解回转窑，其 3D 模型如图 4(b)所示。

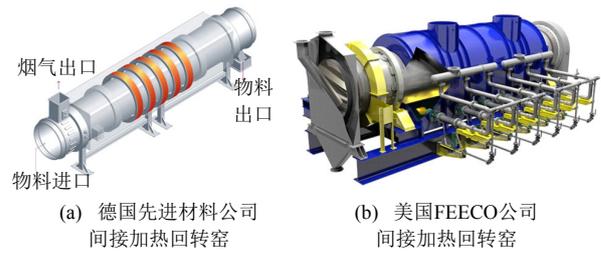


图 4 间接加热回转窑结构示意图

Fig. 4 Structure diagram of indirect heating rotary kiln

国内，农业农村部规划设计研究院在河北邢台开展 500 kg/h 热解气间接加热的回转窑热解装置小试试验(如图 5 所示)^[23]。国电锡林河能源公司采用瓷球热载体回转炉开展 1 万 t/年的褐煤热解工业试验。煤炭科学研究院有限公司煤化工分院开发的 3 台串联的卧式回转炉在内蒙古海拉尔建成 5.5 万 t/年的示范装置，该装置中煤颗粒先在干燥回转炉内被热烟气直接接触干燥，然后由热解炉外的高温烟气间接加热，在 550~750℃ 下热解，间接加热避免荒煤气被其他气体稀释^[66]。河南龙成煤高效技术应用有限公司完成第一代、第二代龙成旋转床(处理原煤 30 万 t/年)低温热解装置的工业化应用。2014 年，在河北曹妃甸建成并投产第三代龙成旋转床(处理原煤单炉 80 万 t/年)低温热解工业化项目，并实现长周期平稳运行^[67]。国内部分回转窑低阶煤热解技术工业试验及工业示范情况如表 3 所示^[68]，从目前



图 5 河北邢台间接加热式回转窑热解中试装置

Fig. 5 Pyrolysis pilot plant of indirect heating rotary kiln in Xingtai, Hebei Province

表3 国内外部分回转窑低阶煤热解工业试验/示范情况
Table 3 Industrial test/demonstration of rotary kilns low rank coal pyrolysis technology at home and abroad

名称	规模/ (万 t/年)	原料	工艺特点
国电锡林河能源公司回转炉	1	褐煤, 粒度: 6~8 mm	回转热解炉、瓷球加热器、瓷球热载体、内热式
北京煤化所 MRF 多段回转炉	5.5	褐煤, 粒度: 6~30 mm	回转热解炉、气固燃烧炉、间接换热、外热式
北京煤科院回转炉	5.5	神府煤, 粒度: 6~8 mm	回转热解炉、气固燃烧炉、气热载体、内热式
西安三瑞实业公司回转炉	20	神府煤, 粒度: 6~30 mm	回转热解炉、气固燃烧炉、间接换热、外热式
甘肃宏汇能源化工有限公司回转炉	30(单炉)	长烟煤	外热式
美国油页岩公司和 Rocky Flates 研究中心	1000 t/d	非黏结性和弱黏结性煤	固体热载体
陕西煤化工集团神木天元化工有限公司卧式回转窑	60	神木煤, 粒度: 0~30 mm	回转热解炉、气热载体、内热式
河南龙城卧式回转窑热解炉	80	长焰煤, 粒度: 6~8 mm	回转热解炉、燃烧室、气热载体、内热式

发展及示范情况来看,内热直接换热方式(固体或气体热载体)和外热间接加热方式是当前回转窑热解工艺主要采用的方式,而间接换热效率更高的内置多管式换热方式应用较少,有必要进一步研究和示范。

3.2 回转窑低阶煤热解提质技术关键挑战

综上,国内外诸多科研机构及企业在回转窑低阶煤热解技术方面的开发进行广泛的探索和研究,但不同热解技术仍存在一些较为突出问题。首先,回转窑内温度的控制对低阶煤热解过程产品质量与系统效率起决定性作用。目前不论何种加热方式的热解窑,温度控制大多仍依靠人工手动调节,导致温度波动大、热解产品质量和产率偏差显著,回转窑低阶煤热解过程温度和产品质量的精确调控严重不足。

其次,煤热解提质的根本目的是去污染、低碳化。然而,低阶煤热解过程能够产生大量碳质细颗粒物,同时煤气净化阶段产生高浓度有机废水以及含有苯类、酚类等多种成分的危险固体废弃物焦油渣,毒性大,严重影响环境。因此,低阶煤高效提质与污染物的协同控制至关重要。

同时,回转窑低阶煤热解过程伴随煤的流动、翻混和破碎,物料运动也比较剧烈,将不可避免地产生大量粉尘,而高温热解煤气与细粉尘颗粒的分离严重阻碍低阶煤热解技术的工程应用;加之低阶煤易破碎、热解挥发分中重质焦油组分(沸点 >

360℃)含量高,进一步增加焦油黏度和后续油尘分离难度,导致结焦、粉尘凝结严重,管路堵塞频发,成为影响回转窑低阶煤热解技术发展的关键技术瓶颈。目前,高温油气除尘的产业化装置主要采用湿法除尘工艺,并将旋风除尘作为预处理工艺。但前者节能环保效果差,无法适应粉煤热解工艺,而后者对小粒径粉尘的去除效果差,无法单独使用。静电除尘、陶瓷过滤、金属过滤、颗粒床过滤等技术在低阶煤热解领域中均处于试验阶段,尚无产业化应用。

此外,现有回转窑低阶煤热解工艺过程普遍存在能量流高质低用,高耗、低能效、高排碳及过程能量流无序化问题突出^[69-70]。低阶煤热解过程焦炭、煤气、热烟气3种余热能源约占焦炉输出热量的90%,其特点是能质高、排放集中。目前,除焦炭余热已实现较好利用外,其他能源尚未得到高效利用。相反为提高工作效率和工艺过程用能,反而需要输入外部能源介质,如蒸汽、煤气和电等。而使用蒸汽将产生含酚废水,大量使用水冷造成新水消耗高及能量流失。可见,流程用能均为一次性用能,介质品种多、能效低、无网络、无匹配、无梯度;余热余能回收不充分、能效低,焦化能量流处于无序、耗散、高质低用等状态,未形成闭环智能分布式用能模式,导致煤热解过程物质流基本有序,能量流和信息流远未有序^[71],回转窑热解过程系统效率仍待提升(如图3不同热解工艺能量转换效率对比)。发展传热效率更高的内置多管式回转窑热解技术,有望大幅提升回转窑系统热效率。另外,开展煤气余热余能高效回收、传输和用能有序的能量流网络智能运行模式的技术集成,例如,以“卡诺循环”的导热油循环式传热方式,根据能源流的质量序、价值序、时间序、空间序进行优化协同用能,可带来余热的高质量、高效率回收^[72]。

最后,我国低阶粉煤大型化热解技术尚未突破,离大规模产业化尚有距离。大型化回转窑低阶煤热解技术的阻碍和挑战主要体现在以下方面:1)技术成熟度,低阶煤回转窑热解技术相对较新,与传统炼焦、煤燃烧和气化技术相比,其技术成熟度较低,可能导致技术障碍和不稳定的工业化过程,且设计和建造大型煤热解反应器需要克服热力学和流体力学方面的复杂问题以及放大的尺度效应;2)经济性,低阶煤热解工业化需大规模投资,导致高成本和不确定经济回报;3)产物分离,低阶

煤回转窑热解过程机械破碎严重、粉尘含量高，分离和提取技术要求更高；4) 能效，回转窑热解，尤其是间接加热方式能效较低；5) 温度控制，在大型反应器中保持均匀温度分布是挑战之一，因大型设备可能存在温度梯度，导致不均匀产物生成；6) 环境和安全，大型化过程可能产生更多的废弃物和排放物，因此需要更强大的环保和安全措施，包括废弃物处理、污染控制和事故应对计划。正是由于示范装置长周期、稳定性、环保性、油气粉尘分离等原因造成没有更大规模的工业应用。

3.3 回转窑低阶煤热解技术发展趋势

针对回转窑低阶煤热解过程的关键技术挑战，并结合目前回转窑工艺的技术现状和工艺特点，未来回转窑低阶煤热解发展重点应着重于以下方面。

1) 源头抑制与技术匹配。针对回转窑低阶煤热解煤颗粒破碎严重及油粉分离困难。首先，新热解工艺的开发要重视粉尘的源头控制，基于粉尘产生机理，优化相应的热解反应器及运行工艺，尽可能减轻煤的机械破碎，抑制粉尘产生并实现反应器内高效控尘，减轻后续净化分离负荷。其次，在分离工艺阶段，强化细粉尘与煤焦油分离技术的研发，加强设备工艺的更新迭代，开展高温气固分离应加强颗粒床除尘、高温静电除尘、高温洗涤除尘等技术的研发，并尽可能避免长流程除尘工艺，提高系统的可靠性。另外，从专利布局来看，一些企业更加重视颗粒床除尘、催化除尘、组合除尘等技术的开发^[73]。同时，基于我国低阶煤“种类多”和“热解特性各异”的特点，研究不同种类低阶煤回转窑热解特性，建立低阶煤热解特性数据库，为低阶煤回转窑热解提质技术的优化开发及应用提供数据支持和理论依据。

此外，开发原煤干燥水、热解水分级回收系统、低阶煤热解过程储热与余热回收技术，强化可再生能源、聚光太阳能为基础的热能和热化学工艺与回转窑热解技术的耦合，提高回转窑低阶煤热解过程能效并降低污染物及碳排放。

2) 开发大型化先进回转窑低阶煤热解技术。首先，基于相似准则，研究不同规模回转窑热解技术放大规律及尺度效应，建立可规模化放大的回转窑热解技术方案。其次，强化热解过程换热效率，如开发内置多管式、内外烟室式回转窑导热形式；同时采用多段式干燥-热解提油气、热解提煤气分离式热解工艺，提高焦油和煤气质量。再者，产物分

离阶段，耦合能量流控制集成系统，提高产物分离过程能量综合利用率。最后，强化低阶煤热解与气化、燃烧的有机集成，开发热解-气化和热解-燃烧一体化先进技术，重点结合工业示范装置，解决工程实践中出现的问题，配套建设油、气回收系统，形成最佳产品方案，实现煤炭使用价值和经济价值最大化与低碳化。

3) 强化过程的智能化管控。开发在线监测与传感技术，加强设备运转过程参数、排放和设备健康状态的实时在线监测与智能分析，如基于图像处理在线测温技术、热解气组成的实时监测反馈以及粉尘浓度和压力的在线监测技术等^[74-77](如图6所示)。利用无线技术^[78]，基于机器学习和人工智能，对实时数据进行挖掘分析，建立回转窑热解过程温度场、组分场机理模型，基于大数据分析建立回转窑低阶煤热解的实时能效模型，开展能效、污染物与粉尘颗粒物协同的多目标运行寻优，并对全过程多参数进行敏感性分析，建立回转窑低阶煤热解系统优化云反馈机制，为低阶煤回转窑热解提质技术的开发和优化提供更全面的数据和理论。结合AI赋能的综合管控系统及平台，构建先进的过程控制及自动化取样和分析技术；基于数字孪生技术，构建有序高效低碳的能量流、信息流管控体系，通过各工段产能耗能实时数据采集分析及余热回收、循环的优化反馈，实现能质流的信息化和综合有序化。

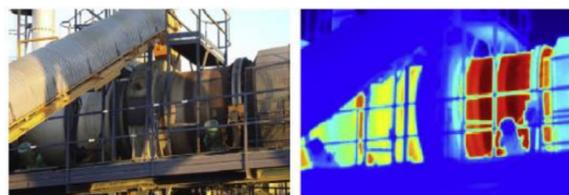


图6 热红外摄像机监测的回转窑外壳温度

Fig. 6 Temperatures of the external shell of the rotary kiln captured by a thermal Infra-Red Camera

4 结论

本文从回转窑低阶煤热解提质工艺及热解过程传热及破碎机理两方面，分析现阶段回转窑低阶煤热解工艺技术特点，探究低阶煤运动、破碎、传热及热解机制，并对回转窑低阶煤热解发展方向及技术趋势做进一步展望，总结如下：

1) 回转窑低阶煤不同加热方式导致煤热解过程传热速率及热效率迥异，且对热解产物(尤其是煤气和焦油)质量影响显著，本文对不同热解工艺的特点及面临的关键问题和挑战进行对比分析。

2) 针对回转窑低阶煤热解过程的物料输运、破碎和传热机制, 基于实验尺度的研究, 已建立具有普适性的回转窑内物料运动状态及传热特性的数学模型, 有助于工艺技术的优化和设备放大。

3) 从应用端分析来看, 回转窑低阶煤热解工艺过程普遍存在能量流高质低用, 高耗、低能效、高排碳及过程能量流无序化问题突出。同时, 回转窑低阶煤热解技术及装备的规模化放大过程的尺度效应同样面临着技术、经济和能效方面的挑战。

回转窑低阶煤热解技术将不断向清洁低碳、高效、大型化、智能化方向发展, 如何进一步强化低阶煤热解工艺的热传过程、产品质量及产物分离效率, 建立热解装备放大过程的模化准则, 并提升智能化与信息化技术水平, 实现对生产过程的实时监测与优化, 提升能效、降低能耗及减少污染, 有待进一步研究。

参考文献

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国 2022 年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL].(2023-02-28). http://www.scio.gov.cn/xwfb/gwyxwbgswxwfbh/wqfbh_2284/49421/49813/xgzc49819/202307/t20230704_725287.html
National Bureau of Statistics. Statistical Communiqué of the People's Republic of China on the 2022 National Economic and Social Development[EB/OL]. (2023-02-28) . http://www.scio.gov.cn/xwfb/gwyxwbgswxwfbh/wqfbh_2284/49421/49813/xgzc49819/202307/t20230704_725287.html(in Chinese).
- [2] 谢和平, 吴立新, 郑德志. 2025 年中国能源消费及煤炭需求预测[J]. 煤炭学报, 2019, 44(7): 1949-1960.
XIE Heping, WU Lixin, ZHENG Dezhi. Prediction on the energy consumption and coal demand of China in 2025 [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(7): 1949-1960(in Chinese).
- [3] 欧阳子区, 王宏帅, 吕清刚, 等. 煤粉锅炉发电机组深度调峰技术进展[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(22): 8772-8789.
OUYANG Ziqu, WANG Hongshuai, LYU Qinggang, et al. Research progress on deep peak shaving technology of pulverized coal-fired boiler power unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(22): 8772-8789(in Chinese).
- [4] MASUDI A, JUSOH N W C, MURAZA O. Recent progress on low rank coal conversion to dimethyl ether as clean fuel: a critical review[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 277: 124024.
- [5] SONG Huijuan, LIU Guangrui, WU Jinhui. Pyrolysis characteristics and kinetics of low rank coals by distributed activation energy model[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 126: 1037-1046.
- [6] YU Jianglong, TAHMASEBI A, HAN Yanna, et al. A review on water in low rank coals: the existence, interaction with coal structure and effects on coal utilization[J]. Fuel Processing Technology, 2013, 106: 9-20.
- [7] 潘生杰, 陈建玉, 范飞, 等. 低阶煤分质利用转化路线的现状分析及展望[J]. 洁净煤技术, 2017, 23(5): 7-12.
PAN Shengjie, CHEN Jianyu, FAN Fei, et al. Present situation analysis and prospect of low rank coal quality-based utilization conversion route[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(5): 7-12(in Chinese).
- [8] MA Zhangke, CHENG Leming, LI Liyao, et al. Pollutant emission and attrition performance of low calorific blended coals during co-combustion in fluidized bed[J]. Fuel, 2023, 331: 125782.
- [9] 赵春林, 马子然, 王磊, 等. 燃煤掺烧可再生燃料发电烟气多污染物协同控制研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(14): 5642-5658.
ZHAO Chunlin, MA Ziran, WANG Lei, et al. Study on multi-pollutant collaborative control technology of coal-fired mixed with renewable fuel for power generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(14): 5642-5658(in Chinese).
- [10] SONG Huijuan, LIU Guangrui, ZHANG Jinzhi, et al. Pyrolysis characteristics and kinetics of low rank coals by TG-FTIR method[J]. Fuel Processing Technology, 2017, 156: 454-460.
- [11] 王骞, 张学广, 朱玲, 等. 含整体煤气化燃料电池-碳捕集电厂的风火储系统分布鲁棒调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(9): 3573-3587.
WANG Qian, ZHANG Xueguang, ZHU Ling, et al. Distributionally robust dispatch for wind-thermal-energy storage system with integrated gasification fuel cell-carbon capture plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(9): 3573-3587(in Chinese).
- [12] XU Long, TANG Mingchen, DUAN Lin'e, et al. Pyrolysis characteristics and kinetics of residue from China Shenhua industrial direct coal liquefaction plant[J]. Thermochimica Acta, 2014, 589: 1-10.
- [13] 程晓磊, 张鑫. 现代煤气化技术现状及发展趋势综述[J]. 煤质技术, 2021, 36(1): 1-9.
CHENG Xiaolei, ZHANG Xin. Summary of present situation and development trend of modern coal gasification technology[J]. Coal Quality Technology, 2021, 36(1): 1-9(in Chinese).
- [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 Yang. Research status and prospects on pyrolysis technologies of the pulverized coal[J]. Energy Chemical Industry, 2018, 39(2): 33-38(in Chinese).
- [15] 莫海燕. 低阶煤高效清洁分质利用问题研究[J]. 化工设计通讯, 2022, 48(4): 175-177.
MO Haiyan. Study on the high-efficiency, clean and quality utilization of low-rank coal[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2022, 48(4): 175-177(in Chinese).
- [16] 吕波, 马明明, 苏小平, 等. 低阶煤催化热解研究进展[J]. 化工科技, 2022, 30(1): 50-56.

- LYU Bo, MA Mingming, SU Xiaoping, et al. Research progress on catalytic pyrolysis of low rank coal[J]. Science & Technology in Chemical Industry, 2022, 30(1): 50-56(in Chinese).
- [17] 王俊丽. 低阶煤热解动力学特性及与生物质共热解、热解产物深加工试验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017. WANG Junli. Kinetics of low rank coal pyrolysis and co-pyrolysis with biomass and deep processing of pyrolysis-derived products[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017(in Chinese).
- [18] PAN Xueer, LIAN Wenhao, YANG Jingxuan, et al. Downer reactor simulation and its application on coal pyrolysis: a review[J]. Carbon Resources Conversion, 2022, 5(1): 35-51.
- [19] 吴渊清. 回转窑设备特性及其在煤/生物质共热解中的应用[D]. 天津: 天津大学, 2018. WU Yuanqing. The characteristics of rotary kiln and the co-pyrolysis investigation of coal/biomass blends in rotary kiln[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018(in Chinese).
- [20] LI S Q, YAO Q, CHI Y, et al. Pilot-scale pyrolysis of scrap tires in a continuous rotary kiln reactor[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2004, 43(17): 5133-5145.
- [21] 史俊高, 安晓熙, 房有为. 我国低阶煤热解提质技术现状及研究进展[J]. 中外能源, 2019, 24(4): 15-23. SHI Jungao, AN Xiaoxi, FANG Youwei. Status and research progress of low rank coal pyrolysis upgrading technologies in China[J]. Sino-Global Energy, 2019, 24(4): 15-23(in Chinese).
- [22] 袁亮. 神东煤回转窑热解破碎特性[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(4): 110-118. CHANG Liang. Fragmentation characteristics of Shendong coal during pyrolysis in rotary kiln[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(4): 110-118(in Chinese).
- [23] CONG Hongbin, MENG Haibo, MAŠ EK O, et al. Comprehensive analysis of industrial-scale heating plants based on different biomass slow pyrolysis technologies: product property, energy balance, and ecological impact [J]. Cleaner Engineering and Technology, 2022, 6: 100391.
- [24] SOLOMON P R, SERIO M A, SUUBERG E M. Coal pyrolysis: experiments, kinetic rates and mechanisms[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1992, 18(2): 133-220.
- [25] 刘振虎, 牛鸿权, 田崑墙, 等. 低阶煤热解工艺技术发展现状[J]. 广东化工, 2022, 49(13): 98-101. LIU Zhenhu, NIU Hongquan, TIAN Yinqiang, et al. Development status of low-rank coal pyrolysis technology [J]. Guangdong Chemical Industry, 2022, 49(13): 98-101 (in Chinese).
- [26] 李初福, 门卓武, 翁力, 等. 固体热载体回转窑煤热解工艺模拟与分析[J]. 煤炭学报, 2015, 40(S1): 203-207. LI Chufu, MEN Zhuowu, WENG Li, et al. Process simulation and analysis for coal pyrolysis with rotary kiln using solid heat carrier[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(S1): 203-207(in Chinese).
- [27] 李文英, 邓靖, 喻长连. 褐煤固体热载体热解提质工艺进展[J]. 煤化工, 2012, 40(1): 1-5. LI Wenyong, DENG Jing, YU Changlian. Development of lignite pyrolysis with solid heat carrier[J]. Coal Chemical Industry, 2012, 40(1): 1-5(in Chinese).
- [28] 王洪亮, 蒙涛, 张华, 等. 球型固体热载体煤粉热解过程传热计算及分析[J]. 洁净煤技术, 2014, 20(3): 90-94. WANG Hongliang, MENG Tao, ZHANG Hua, et al. Heat transfer calculation and analysis of coal particle pyrolysis with solid ball heat carrier[J]. Clean Coal Technology, 2014, 20(3): 90-94(in Chinese).
- [29] 薛璧薇, 韩振南, 王超, 等. 固体热载体煤热解技术进展与突破[J]. 辽宁化工, 2020, 49(2): 199-203. XUE Biwei, HAN Zhennan, WANG Chao, et al. Progress and breakthrough in solid heat carrier coal pyrolysis technology[J]. Liaoning Chemical Industry, 2020, 49(2): 199-203(in Chinese).
- [30] 郭治, 杜铭华, 杜万斗. 固体热载体褐煤热解过程的数学模型与模拟计算[J]. 神华科技, 2010, 8(2): 69-72. GUO Zhi, DU Minghua, DU Wandou. The mathematical model and simulation of solid heat carrier pyrolysis of lignite[J]. Shenhua Science and Technology, 2010, 8(2): 69-72(in Chinese).
- [31] 李达. 煤热解技术进展及工业应用研究[J]. 化工管理, 2018(10): 75-76. LI Da. Research on coal pyrolysis technology and industrial application[J]. Chemical Enterprise Management, 2018(10): 75-76 (in Chinese).
- [32] 胡洪, 赵玉良. 低阶粉煤多管回转热解新技术[J]. 重型机械, 2016(3): 16-19. HU Hong, ZHAO Yuliang. A new multi-tube rotary pyrolytic technique for low rank pulverized coal[J]. Heavy Machinery, 2016(3): 16-19(in Chinese).
- [33] SHEKHAWAT D, KUKSHAL V, BANERJEE M K, et al. Study the kinetics involved in solid state reduction of mill scale with lean grade coal and optimization of process parameters involved in reduction through rotary kiln furnace[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 44: 5004-5011.
- [34] 李少华, 张立栋, 余侃胜, 等. 页岩颗粒在回转干馏炉内停留时间的正态性分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(14): 13-18. LI Shaohua, ZHANG Lidong, YU Kansheng, et al. Normality analysis on residence time of shale particle in rotary retorting[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(14): 13-18(in Chinese).
- [35] 叶胜林, 马晓波, 陈德珍, 等. 回转窑转速对废塑料热解产物特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(23): 3952-3958. YE Shenglin, MA Xiaobo, CHEN Dezhen, et al. Influence of rotating speed on pyrolysis products of waste plastics in rotary kiln[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(23): 3952-3958(in Chinese).
- [36] 刘壮, 田宜水, 胡二峰, 等. 低阶煤热解影响因素及其工艺技术研究进展[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(1): 50-59. LIU Zhuang, TIAN Yishui, HU Erfeng, et al. Research

- progress on influencing factors and technology of low-rank coal pyrolysis[J]. *Clean Coal Technology*, 2021, 27(1): 50-59(in Chinese).
- [37] ZHAO Haibin, JIN Lijun, WANG Mingyi, et al. Integrated process of coal pyrolysis with catalytic reforming of simulated coal gas for improving tar yield[J]. *Fuel*, 2019, 255: 115797.
- [38] ZHANG Zisheng, WU Yuanqing, LI Hong, et al. A simple step-change method to determine mean residence time in rotary kiln and a predictive model at low inclination[J]. *Powder Technology*, 2018, 333: 30-37.
- [39] SAI P S T, SURENDER G D, DAMODARAN A D, et al. Residence time distribution and material flow studies in a rotary kiln[J]. *Metallurgical Transactions B*, 1990, 21(6): 1005-1011.
- [40] CHEN Wenzhong, WANG Chunhua, LIU Tie, et al. Residence time and mass flow rate of particles in carbon rotary kilns[J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2009, 48(4): 955-960.
- [41] TIAN Bin, QIAO Yingyun, TIAN Yuanyu, et al. Investigation on the effect of particle size and heating rate on pyrolysis characteristics of a bituminous coal by TG-FTIR[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2016, 121: 376-386.
- [42] GOUWS S M, CARRIER M, BUNT J R, et al. Co-pyrolysis of torrefied biomass and coal: effect of pressure on synergistic reactions[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2022, 161: 105363.
- [43] 李水清. 固体废物热解制取洁净燃料和化学原料的基础研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
- LI Shuiqing. Pyrolysis of solid wastes for clean fuels and chemicals: lab- and pilot-scale studies[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002(in Chinese).
- [44] MUNGYEKO BISULANDU B J R, HUCHET F. Rotary kiln process: an overview of physical mechanisms, models and applications[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 221: 119637.
- [45] YIN Hongchao, ZHANG Ming, LIU Hong. Numerical simulation of three-dimensional unsteady granular flows in rotary kiln[J]. *Powder Technology*, 2014, 253: 138-145.
- [46] GUPTA S D, KHAKHAR D V, BHATIA S K. Axial transport of granular solids in horizontal rotating cylinders. Part 1: theory[J]. *Powder Technology*, 1991, 67(2): 145-151.
- [47] KOHAV T, RICHARDSON J T, LUSS D. Axial dispersion of solid particles in a continuous rotary kiln[J]. *AIChE Journal*, 1995, 41(11): 2465-2475.
- [48] HAELDERMANS T, LATAF M A, VANROELEN G, et al. Numerical prediction of the mean residence time of solid materials in a pilot-scale rotary kiln[J]. *Powder Technology*, 2019, 354: 392-401.
- [49] LI S Q, CHI Y, LI R D, et al. Axial transport and residence time of MSW in rotary kilns: Part II. Theoretical and optimal analyses[J]. *Powder Technology*, 2002, 126(3): 228-240.
- [50] 吴正舜, 刘欣, 吴创之, 等. 煤在燃烧过程中的破碎[J]. *电站系统工程*, 2003, 19(2): 4-6.
- WU Zhengshun, LIU Xin, WU Chuangzhi, et al. The fragment of coal during combustion[J]. *Power System Engineering*, 2003, 19(2): 4-6 (in Chinese).
- [51] CHEN Weiyin, NAGARAJAN G, ZHANG Zhaoping, et al. Stochastic modeling of devolatilization-induced coal fragmentation during fluidized-bed combustion[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1994, 33(1): 137-145.
- [52] 金光, 张昕悦, 王俊峰, 等. 单颗粒煤粉热解过程中的破碎模型[J]. *煤炭转化*, 2016, 39(2): 20-24.
- JIN Guang, ZHANG Xinyue, WANG Junfeng, et al. Fragmentation model of single particle pulverized coal in pyrolysis process[J]. *Coal Conversion*, 2016, 39(2): 20-24(in Chinese).
- [53] ZHONG Shan, BAITALOW F, MEYER B. Experimental investigation on fragmentation initiation of mm-sized coal particles in a drop-tube furnace[J]. *Fuel*, 2018, 234: 473-481.
- [54] 曲洋. 宝日褐煤提质过程热碎特性研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2016.
- QU Yang. Study on heat fragmentation characteristics of Baori lignite during upgrading[D]. Beijing: China University of Mining & Technology(Beijing), 2016(in Chinese).
- [55] 周琦. 内蒙古褐煤热解过程中的破碎/粉化特性[J]. *洁净煤技术*, 2021, 27(3): 166-173.
- ZHOU Qi. Fragmentation/pulverization characteristics of Inner Mongolia lignite during pyrolysis[J]. *Clean Coal Technology*, 2021, 27(3): 166-173(in Chinese).
- [56] YANG Yanbo, CHU Mo, GAO Min, et al. The effect of strengthening thermal fragmentation by rotary kiln on sulfur distribution of fragmentation char with low-rank coal[J]. *Fuel*, 2022, 323: 124444.
- [57] 曲洋, 初茉, 丁力, 等. 热提质过程中褐煤的碎裂特性[J]. *中国矿业大学学报*, 2014, 43(3): 508-513.
- QU Yang, CHU Mo, DING Li, et al. Fragmentation characteristic of lignite during heat upgrading[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2014, 43(3): 508-513(in Chinese).
- [58] NAFSUN A I, HERZ F, SPECHT E, et al. The contact heat transfer in rotary kilns and the effect of material properties[C]//10th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Orlando, 2014: 2112-2118. https://www.academia.edu/118896825/The_contact_heat_transfer_in_rotary_kilns_and_the_effect_of_material_properties.
- [59] LI S Q, MA L B, WAN W, et al. A mathematical model of heat transfer in a rotary kiln thermo-reactor[J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2005, 28(12): 1480-1489.
- [60] IMBER M, PASCHKIS V. A new theory for a rotary-kiln heat exchanger[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1962, 5(7): 623-638.
- [61] 邱夏陶, 韩小良. 回转窑传热数学模型及其优化[J]. *钢*

- 铁, 1994, 29(6): 66-70.
 QIU Xiatao, HAN Xiaoliang. Mathematical model of heat transfer and optimum for rotary kiln[J]. Iron and Steel, 1994, 29(6): 66-70(in Chinese).
- [62] MARTINS M A, OLIVEIRA L S, FRANCA A S. Modeling and simulation of petroleum coke calcination in rotary kilns[J]. Fuel, 2001, 80(11): 1611-1622.
- [63] 马爱纯, 周子民, 李旺兴. 回转窑内烟气温度分布的数值研究[J]. 金属材料与冶金工程, 2007, 35(3): 19-22, 31.
 MA Aichun, ZHOU Jiemin, LI Wangxing. Numerical study on the effects of various parameters on flame feature and temperature profile in alumina clinker rotary kiln[J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering, 2007, 35(3): 19-22, 31(in Chinese).
- [64] BOATENG A A. On flow-induced kinetic diffusion and rotary kiln bed burden heat transport[J]. Chemical Engineering Communications, 1998, 170(1): 51-66.
- [65] CAPITAINE S L, CARLSON C. Rotary kiln design: direct fired vs. indirect fired[EB/OL]. (2023-02-28). <https://feeco.com/rotary-kiln-design-direct-fired-vs-indirect-fired/>.
- [66] 兰玉顺, 陈文文. 煤热解技术研究与开发进展[J]. 煤化工, 2017, 45(2): 66-70, 18.
 LAN Yushun, CHEN Wenwen. Research and development progress of coal pyrolysis technology[J]. Coal Chemical Industry, 2017, 45(2): 66-70, 18(in Chinese).
- [67] 朱书成, 曹国超, 李明德, 等. 低阶煤旋转床热解技术开发及应用[Z]. 科技成果, 2015-09-16.
 ZHU Shucheng, CAO Guochao, LI Mingde, et al. Development and application of low rank coal rotary bed pyrolysis technology[J]. Scientific and Technological Achievements, 2016 (in Chinese).
- [68] 汪寿建. “十三五”中国低阶煤热解发展方向及路径分析 [EB/OL]. (2018-05-28). https://www.sohu.com/a/233202688_367891.
- [69] 温燕明, 李洪福. 从流程学视角构筑焦化工序发展新格局开启焦化行业低碳新模式[J]. 河北冶金, 2021(8): 1-8.
 WEN Yanming, LI Hongfu. Constructing coking process development from the perspective of process science new pattern opens a new low-carbon model in coking industry[J]. Hebei Metallurgy, 2021(8): 1-8(in Chinese).
- [70] 阮并玥. 焦化企业能耗数据分析及节能措施研究[J]. 山西化工, 2021, 41(4): 188-189, 207.
 RUAN Bingyue. Analysis of energy consumption data and research on energy saving measures in coking enterprises [J]. Shanxi Chemical Industry, 2021, 41(4): 188-189, 207(in Chinese).
- [71] 李淑英. 独立焦化企业能耗现状与节能潜力分析[J]. 冶金能源, 2020, 39(4): 42-45.
 LI Shuying. Energy consumption status and energy saving potential analysis of independent coking enterprises[J]. Energy for Metallurgical Industry, 2020, 39(4): 42-45(in Chinese).
- [72] 温燕明, 汤志刚, 王晴东, 等. 焦化能量流、能量流网络解析及重构[J]. 河北冶金, 2022(1): 8-13.
 WEN Yanming, TANG Zhigang, WANG Qingdong, et al. Analysis and reconstruction of coking energy flow and energy flow network[J]. Hebei Metallurgy, 2022(1): 8-13(in Chinese).
- [73] 张喻, 高宁博, 全翠, 等. 低阶煤热解高温油气除尘技术进展[J]. 化工进展, 2022, 41(4): 1814-1824.
 ZHANG Yu, GAO Ningbo, QUAN Cui, et al. Research progress on high temperature oil-gas dust removal technology during pyrolysis of low-rank coal[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(4): 1814-1824(in Chinese).
- [74] 曹琳, 王阿川. 回转式油页岩干馏炉测温技术研究进展[J]. 化工进展, 2013, 32(1): 27-32.
 CAO Lin, WANG Achuan. Progress of rotary oil shale retort temperature measurement[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2013, 32(1): 27-32(in Chinese).
- [75] 王印松, 雷玉. 基于 DCS 数据和燃烧图像的垃圾焚烧炉主蒸汽温度预测[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(22): 8790-8800.
 WANG Yinsong, LEI Yu. Prediction of main steam temperature of waste incinerator based on DCS data and combustion image[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(22): 8790-8800(in Chinese).
- [76] 张向宇, 汪华剑, 程强, 等. 宽动态 RAW 图像辐射测温试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(13): 3338-3344.
 ZHANG Xiangyu, WANG Huajian, CHENG Qiang, et al. Experimental research on temperature measurement by wide dynamic RAW image processing[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(13): 3338-3344(in Chinese).
- [77] HUCHET F, GUEN L L. Energy efficiency of flights rotary kiln[C]//14th Quantitative InfraRed Thermography Conference. Berlin, Germany, 2018. <http://qirt.gel.ulaval.ca/archives/qirt2018/papers/034.pdf>.
- [78] 王恭, 孙保民, 李少华, 等. 无线技术在回转式油页岩干馏反应器中的研究与应用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(5): 48-53.
 WANG Gong, SUN Baomin, LI Shaohua, et al. Research and application of wireless technology in rotary oil shale pyrolysis reactors[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(5): 48-53(in Chinese).



杨远平

在线出版日期: 2024-01-10。

收稿日期: 2023-07-20。

作者简介:

杨远平(1990), 男, 博士, 讲师, 主要从事煤炭清洁高效转化及燃料高效燃烧的研究工作, yangyuanping1@163.com;

*通信作者: 黄云(1979), 女, 博士, 研究员, 主要从事清洁能源和储能相关的研究工作, yunhuang@ipe.ac.cn。

(编辑 张文鑫, 张蕾)