

DOI: 10.19666/j.rlfed.202210253

# CaO 掺杂对熔盐储能耦合污泥热解焦油产物生成特性影响研究

刘 帅<sup>1</sup>, 陈 卓<sup>1</sup>, 张文静<sup>1</sup>, 龙彦伯<sup>1</sup>, 左沅君<sup>1</sup>, 曹承阳<sup>2</sup>, 胡红云<sup>2</sup>

(1. 高效清洁火力发电技术湖南省重点实验室

(国网湖南省电力有限公司电力科学研究院), 湖南 长沙 410007;

2. 华中科技大学煤燃烧国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**[摘 要]** 熔盐储能耦合污泥热解是一种污泥新型热处理方法, 通过构建快速、均匀的热解环境有望同步实现污泥减量处置和热解焦油回收。通过高精度宽升温速率热解实验台架模拟了熔盐储能耦合污泥热解过程高升温速率热解环境, 解析了升温速率、CaO 掺杂比对污泥快速热解焦油产物生成特性的影响。结果表明: 升温速率在低热解温度下对污泥热解焦油产率影响较大, 热解温度为 350 °C 时, 升温速率从 60 °C/min 提升到 6 000 °C/min, 焦油产率相对增加了约 14%; 同时, CaO 的掺杂会使焦油产率大幅下降, 掺杂质量分数 10% 的 CaO 会导致焦油产率下降约 39%~43%; CaO 掺杂比对焦油内多组分相对质量分数影响显著, 这主要是由于 CaO 可以在热解过程中充当催化剂和传热阻滞剂。研究成果有助于熔盐储能耦合污泥热解技术热解工况调控, 获取高附加值污泥热解焦油产品。

**[关 键 词]** 污泥; 熔盐储能; 热解; 焦油; CaO

**[引用本文格式]** 刘帅, 陈卓, 张文静, 等. CaO 掺杂对熔盐储能耦合污泥热解焦油产物生成特性影响研究[J]. 热力发电, 2023, 52(2): 119-125. LIU Shuai, CHEN Zhuo, ZHANG Wenjing, et al. Study on the effect of calcium oxide addition on generation characteristics of tar in sludge pyrolysis system coupled with molten salt energy storage[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(2): 119-125.

## Study on the effect of calcium oxide addition on generation characteristics of tar in sludge pyrolysis system coupled with molten salt energy storage

LIU Shuai<sup>1</sup>, CHEN Zhuo<sup>1</sup>, ZHANG Wenjing<sup>1</sup>, LONG Yanbo<sup>1</sup>, ZUO Yuanjun<sup>1</sup>,  
CAO Chengyang<sup>2</sup>, HU Hongyun<sup>2</sup>

(1. Hunan Province Key Laboratory of Efficient & Clean Thermal Power Generation Technologies, State Grid Hunan Electric Power Corporation Research Institute, Changsha 410007, China;

2. State Key Laboratory of Coal Combustion, School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** A sludge pyrolysis system coupled with molten salt storage is an emerging novel thermal treatment technique for sludge disposal, which can simultaneously realize reduction and tar recovery by constructing rapid and homogeneous pyrolysis conditions. The effects of heating rate and calcium oxide (CaO) addition on the production characteristics of tar during sludge pyrolysis coupled with molten salt storage system were investigated via a high-precision optical wide heating rate pyrolysis apparatus. The results show that, the heating rate affected the tar yield at low pyrolysis temperatures. The tar yield increased by 14% at 350 °C when the heating rate increased from 60 °C/min to 6 000 °C/min. Meanwhile, the CaO addition could result in a sharp decrease in tar yield, an 39%~43% decrease could be observed with 10% CaO addition. Also, the CaO addition significantly affected the relative content of the compounds in tar, which was attributed to the fact that CaO could act as a catalyst and heat transfer retardant. The results are helpful to the pyrolysis condition regulation and high value-added tar obtain for the sludge pyrolysis system coupled with molten salt storage.

收稿日期: 2022-10-14 网络首发日期: 2022-12-05

基金项目: 湖南省自然科学基金青年基金项目 (2021JJ40008)

Supported by: Youth Fund of Hunan Natural Science Foundation (2021JJ40008)

第一作者简介: 刘帅 (1986), 男, 高级工程师, 主要研究方向为火力发电厂高效清洁燃烧与智能控制技术, 76342904@qq.com。

**Key words:** sludge; molten salt energy storage; pyrolysis; tar; calcium oxide

随着我国生态文明建设持续推进,城镇生活污水收集处理已取得显著成效。截至 2021 年底,我国年污水处理量已高达 700 亿  $\text{m}^3$ ; 其中,污泥作为污水处理副产物,年产生量也已逾 7 000 万  $\text{t}^{[1-2]}$ 。然而,污泥富含大量病原体、重金属和有机污染物等高环境污染风险组分,其无害化处理已成为我国污染防治攻坚战的关键阻碍。考虑到污泥内主要的有机污染物热稳定较差,以焚烧和热解为主的热处置技术已成为广泛应用的污泥无害化处置技术之一。相较于焚烧,热解可以将物料转化为热解焦、焦油和热解气,从而获得更高的能量回收率。然而,污泥热解反应是吸热过程,使物料维持稳定的热解温度需要外部持续热能输入,这也致使高昂的热解能耗成本成为阻碍污泥热解技术推广应用的技术瓶颈之一<sup>[3]</sup>。同时,常规热解设备反应器内温度难均匀分布,进而导致污泥热解产物组分波动大,后续资源化利用难,也成为阻碍污泥热解技术推广应用的另一技术瓶颈。因此,如何改进常规热解技术突破以上技术瓶颈成为污泥热解处置工业化应用的关键。

熔盐储能耦合污泥热解处置技术针对常规热解技术以上 2 点技术瓶颈,首先引入熔盐储能系统,实现新能源和波谷电等低价能源为热解供能;其次利用熔盐优异传热换热性能,构建均匀稳定的热解环境,确保反应器内热解温度均匀分布。前人研究发现<sup>[4-5]</sup>,物料在熔盐储能耦合热解系统内热解效率明显提升,且物料升温速率高达 100  $\text{K/s}$ 。但是,污泥在该系统内的热解行为尚不明晰,后续热解产物生成调控缺乏理论指导。

近年,我国污泥资源属性逐步提升。调查研究显示,目前大中型城市污泥干基热值均值已达 11.85  $\text{MJ/kg}$ ,通过污泥热解制备高品质热解焦油成为可能<sup>[6-7]</sup>。Lutz 等人<sup>[8]</sup>研究发现污泥热解焦油产率高达 31%且 2/3 的能量转移至热解油中。李海英等<sup>[9]</sup>分析了污泥热解焦油主要成分,发现污泥热解焦油有机组分与石油馏分存在重合,具备燃料化利用的基本条件。同时,Fonts 等人<sup>[10]</sup>综述了污泥热解过程升温速率对热解焦油产率的影响,结果表明高升温速率、低停留时间有助于获得更高的焦油产率。然而,当前针对热解温度和升温速率对污泥热解焦油

生成特性的研究多依托管式炉开展,物料受热均匀性较差,归纳总结的规律与熔盐储能耦合热解系统存在一定差异,且对高升温速率的量化分析缺乏,有待进一步探索。

此外,考虑到污泥含硫量较大,热解处置过程中易生成污染性含硫气体,将硫元素固化在热解焦内是提升污泥热解经济性的有效手段。Cao 等人<sup>[11]</sup>探究了宽升温速率下(60~6 000  $\text{K/min}$ )  $\text{CaO}$  掺杂对污泥热解过程硫元素迁移转化行为的影响,结果表明  $\text{CaO}$  对  $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{CH}_3\text{SH}$  和  $\text{SO}_2$  在热解焦内原位固化有不同的促进效果,但高温高升温速率下存在  $\text{SO}_2$  逃逸的问题。同时,刘欢等<sup>[12]</sup>对  $\text{CaO}$  掺杂后污泥热解产物生成特性变化展开了研究,发现不同条件下  $\text{CaO}$  可充当传热导体、吸附剂、催化剂等角色,对污泥热解三相产物产率有着较为显著的影响。可见,有必要围绕宽升温速率下  $\text{CaO}$  掺杂后污泥热解焦油生成特性展开研究,指导熔盐储能耦合污泥热解技术热工参数优化。

本文围绕熔盐储能耦合污泥热解处置技术,聚焦处置过程中均匀热解环境、高升温速率下的污泥热解行为,以广东省深圳市污水处理厂污泥为原料,通过高精度宽升温速率热解实验台架模拟了熔盐储能耦合污泥热解处置过程,对该条件下污泥热解焦油产物生成特性进行量化表征,揭示了升温速率对焦油生成特性的影响;在此基础上,探讨了  $\text{CaO}$  掺杂对宽升温速率热解下污泥焦油产物生成的影响机制。

## 1 实验部分

### 1.1 样品准备

实验采用的污泥样品已在厂内经板框压滤处理。实验室测试前,样品在 105  $^{\circ}\text{C}$  烘箱干燥 24 h 以上,采用球磨机进行研磨,并通过孔径 75  $\mu\text{m}$  (200 目)金属筛完成分筛确保污泥样品颗粒粒径统一。对于掺杂  $\text{CaO}$  的污泥样品,选取污泥样品与特定比例  $\text{CaO}$  (污泥质量的 2.5%、5.0%和 10.0%)混合后经研磨、分筛制备。获取的样品均存放于样品瓶中密封并保存于 105  $^{\circ}\text{C}$  烘箱内。污泥样品的元素分析和工业分析结果分别由德国 elementarvario micro cube 元素分析仪和 Eltrathermostep 工业分析仪测得,结果见表 1。

表 1 污泥原料工业分析与元素分析 w/%  
Tab.1 Proximate and ultimate analysis of the sludge materials

工业分析				元素分析			
M <sub>ad</sub>	A <sub>ad</sub>	V <sub>ad</sub>	FC <sub>ad</sub>	C	H	N	S
6.22	67.60	22.75	3.43	38.03	5.64	3.71	2.02

## 1.2 实验台架及产物收集

针对熔盐储能耦合污泥热解处置过程中温度分布均匀、高升温速率的污泥热解行为, 依托自制

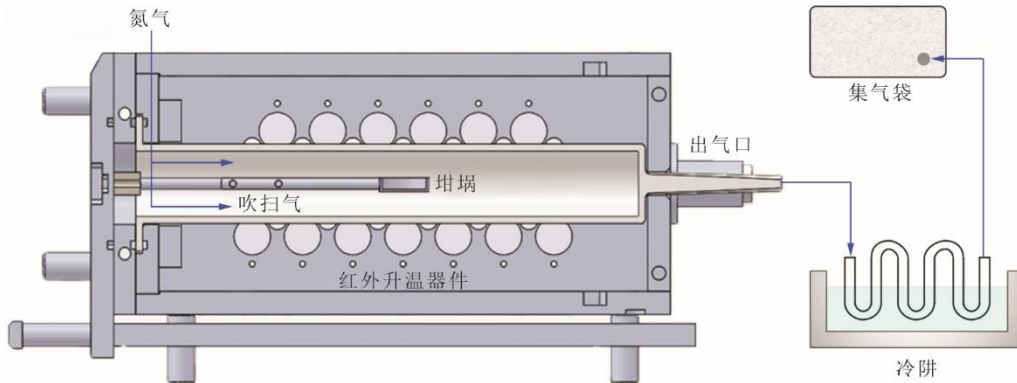


图 1 自制高精度宽升温速率热解实验台架  
Fig.1 Schematic diagram of the self-designed high-precision wide heating rates pyrolysis apparatus

## 1.3 产物表征

实验收集的焦油先通过溶解定容, 随后注入 Agilent 8860 型气相色谱-质谱联用仪 (GC-MS) 中进行分析与识别。色谱柱选用 HP-5 毛细管柱 (30 m × 320 μm × 0.25 μm)。实验开始时, 设备在 40 °C 保温 5 min 后以 5 °C/min 升温至 210 °C, 随后以 10 °C/min 升温至 300 °C。实验过程中吹扫气为氮气。数据处理时对比谱库选用 NIST 数据库。

## 2 结果与讨论

### 2.1 升温速率对污泥热解焦油生成特性的影响

不同热解温度和升温速率条件下, 污泥热解焦油产率如图 2 所示。由图 2 可以发现: 当热解温度低于 500 °C 时, 热解焦油产率随升温速率增加而增大; 且在热解温度为 350 °C 时现象更为显著, 伴随着升温速率从 60 °C/min 提升到 6 000 °C/min, 焦油产率同比增加 14%; 然而, 随着热解温度逐渐提升, 升温速率对焦油产率的影响逐渐降低, 直到热解温度达到 575 °C 时, 升温速率对污泥热解焦油产率的影响已基本可以忽略。前人研究<sup>[13-14]</sup>表明, 当热解温度为 350 °C 时, 污泥热解过程主要发生的反应为大分子有机物 C—C 键的断裂, 其中含碳量小于 20 的组分作为挥发分 (焦油和热解气) 逸出。因

高精度宽温升温速率热解实验台架展开了不同热工参数下的污泥热解实验, 热解实验台架如图 1 所示。实验开始前, 将装有约 5 g 样品的石英舟放置于样品架上, 随后启动氮气吹扫 1 min 进行排空。实验开始时, 设备启动并将样品以设定升温速率 (60、600、6 000 °C/min) 加热至指定温度 (350、425、500、575 °C)。实验进行过程中, 氮气携带着的热解焦油在冷阱处冷凝, 在实验结束后通过丙酮冲洗并收集。

此, 可以断定此时升温速率主要对有机物 C—C 键断裂位置产生影响, 从而改变焦油产率。而随着温度进一步上升, 污泥热解过程主要发生的反应为环化、芳香化的高热稳定性有机物分解, 同时伴随着焦油组分的二次分解<sup>[15-16]</sup>; 此时, 2 类同步进行的分解反应之间的平衡成为影响焦油产率的关键, 该条件下高升温速率没有表现出对 2 类热解反应中某一类反应的侧重, 因而其对焦油产率的影响减弱, 焦油产率趋于稳定。

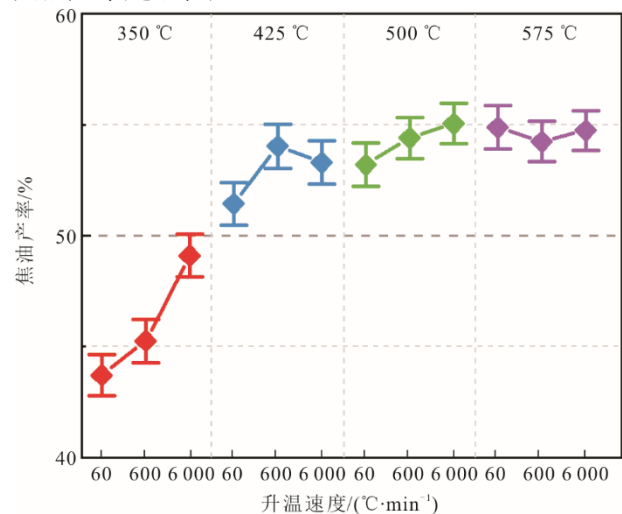


图 2 不同温度和升温速率下污泥热解焦油产率  
Fig.2 The tar yield during sludge pyrolysis at different temperatures and heating rates

进一步对不同条件下收集的污泥热解焦油成分进行了表征,结果见表2。表2中,升温条件350 °C-60 °C/min指的是热解温度350 °C、升温速率60 °C/min,其他同理。由表2可以发现,焦油中的主要成分包含烃类、酮类、酸类、酯类、酚类、胺类和其他化合物。当升温速率为60 °C/min时,焦油内烃类化合物的相对质量分数随着温度从350 °C上升到500 °C而明显增加,然后在温度达到575 °C时下降。这表明当热解温度在350~500 °C时,具有高热稳定性的碳氢化合物的形成过程得到促进,可能是环化或芳构化的烃类化合物,而这些组分在500~575 °C时裂解为小分子挥发分。相比之下,胺类化合物的相对质量分数在此条件下呈现出相反的趋势,这可能是由于在350~500 °C时C—N键的裂解,导致焦油中胺类化合物的裂解<sup>[17-18]</sup>。此外,酸类和酯类化合物相对质量分数的拐点温度为425 °C,这与脱碳和脱羧反应温度有关<sup>[19-20]</sup>。

同样值得注意的是,升温速率对污泥焦油成分的影响不容忽视,特别是在低温热解过程。与350 °C-60 °C/min条件下结果相比,烃类、酸类和醇类化合物的相对质量分数在350 °C-600 °C/min时大幅增加,伴随着酚类和胺类化合物相对质量分数显著降低。这可能是由于焦油中的化合物之间发生了二次反应。而随着升温速率进一步提升至6 000 °C/min,该温度下仅酮类和酚类化合物变化较为明显。同时,可以发现当热解温度为425 °C时,升温速率在6 000 °C/min下烃类化合物的相对质量分数较低升温速率明显激增,而主要含氧化合物(酸类和酯类)的相对质量分数则急剧下降。这种趋势在热解温度为500 °C时也可以观察到。与之相对的,当热解温度为575 °C,升温速率对焦油组分的影响体现在胺类化合物相对质量分数上。因此,可以看出不同热解温度下,升温速率的变化对焦油产物生成呈现出不同的影响,这与不同热解温度下的主导反应有关。

表2 不同热解温度和升温速率下焦油组分相对质量分数  
Tab.2 The relative contents of compounds in tar at different temperatures and heating rates

升温条件/ (°C·°C/min)	相对质量分数/%							
	烃类	酸类	醇类	酮类	酯类	酚类	胺类	其他
350-60	11.30	10.57	3.90	22.11	5.30	12.85	28.45	5.52
350-600	15.68	18.14	11.87	21.84	5.94	2.20	16.78	7.55
350-6 000	11.64	14.59	8.74	27.40	6.21	6.40	19.77	5.26
425-60	13.81	20.57	0.60	18.44	12.29	1.77	22.74	9.77
425-600	12.18	12.75	5.35	30.12	3.69	4.60	26.80	4.51
425-6 000	33.23	10.71	2.36	16.68	4.11	4.18	21.01	7.72
500-60	22.11	18.50	6.97	23.23	1.96	6.12	13.75	7.38
500-600	23.62	9.69	11.07	19.03	1.50	5.69	21.58	7.82
500-6 000	32.27	10.92	5.29	12.36	0.00	4.97	23.69	10.50
575-60	16.97	9.63	2.85	15.45	2.58	5.94	41.41	5.17
575-600	19.39	14.61	4.92	23.44	2.52	8.50	21.08	5.54
575-6 000	21.08	18.88	8.35	13.88	1.07	10.79	17.75	8.21

此外,焦油内烃类组分的组成特性也是评估热解焦油品质的关键。依据GC-MS分析结果:350 °C-60 °C/min条件下烃类组分主要为二十烯、苯等不饱和烯烃类成分为主;随着升温速率的提升,350 °C-6 000 °C/min条件下十四烷等饱和烷烃占比大幅增加,体现了高升温速率下热解焦油品质的有效提升。同样的,随着热解温度的升高,热解焦油烃类组分内十九烷、十六烷相对质量分数明显增加,直至热解温度上升至575 °C,热解焦油内烃类组分主要为萘、甲苯等芳香烃化合物。可见,热

解温度425~500 °C时选用高升温速率可以有效提升污泥热解焦油品质。

## 2.2 CaO 掺杂的影响

考虑到污泥热解过程中含硫污染物的生成,目前工业上污泥的热解处置更关注焦油中硫的质量分数。因此,CaO作为一种常规低成本脱硫剂往往用作污泥热解添加剂。围绕CaO掺杂下典型工程尺度污泥热解厂运行温度(350 °C和650 °C)<sup>[21-24]</sup>,探究了CaO对不同升温速率下(60 °C/min和6 000 °C/min)焦油组分生成的影响。

图 3 显示了 CaO 掺杂下不同条件污泥热解焦油产率。可以看到，当热解温度为 350 °C 时，CaO 掺杂比例与焦油产率呈负相关关系；升温速率为 60 °C/min 时，质量分数 10.0% 的 CaO 掺杂后焦油产率较无添加样品下降了约 39%。同时，在高升温速率下，CaO 对焦油生成的抑制作用更为明显，当升温速率从 60 °C/min 提升至 6 000 °C/min 时，质量分数 10.0% 的 CaO 掺杂会使焦油产率下降约 43%。相较之下，当热解温度为 650 °C 时，仍可观察到 CaO 掺杂对焦油产率一致的影响。由此可以推测，CaO 掺杂后主要通过改变污泥的导热特性，抑制大分子有机物断键分解转化为焦油和热解气的过程，从而减少焦油的生成。

表 3 显示了 CaO 掺杂后污泥在典型热解工况下的焦油生成特性。可以看到：当热解条件为 350 °C-60 °C/min 时，质量分数 2.5% 的 CaO 掺杂使得焦油内烃类、酸类酚类化合物相对质量分数显著下降，而醇类、酮类和胺类化合物相对质量分数增加较为明显；随着 CaO 相对质量分数的进一步增加，烃类化合物相对质量分数占比增大。这主要是由于 CaO 在低温低升温速率下的传热阻滞作用导致<sup>[25]</sup>。当升温速率提升至 6 000 °C/min 时，CaO 相对质量分数增加会促进胺类化合物相对质量分数的降低和酮类化合物的增加，表明高升温速率下 CaO 能提供活性氧促进胺类化合物向酮类化合物

转化。与之相对的，当热解温度提升至 650 °C 时，焦油内烃类组分相对质量分数在 CaO 掺比为 5.0% 时增加显著，在热解工况 650 °C-6 000 °C/min 达到 50.30%，意味着高热解温度高升温速率下 CaO 可以促进焦油内芳香烃、环烷烃等高热稳定性的烃类组分的生成。同时，当升温速率从 60 °C/min 提升至 6 000 °C/min，烃类化合物的增加对应着酚类化合物相对质量分数的大幅降低，可以推测高升温速率下 CaO 可能促进了酚羟基的脱除<sup>[26]</sup>。

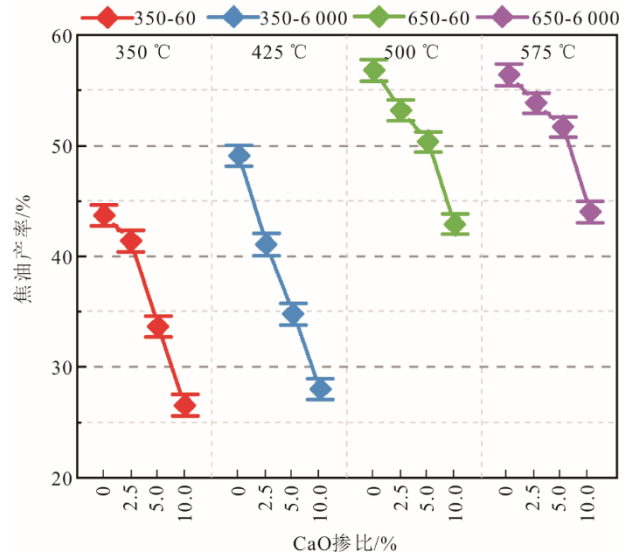


图 3 不同 CaO 掺比下污泥热解焦油产率  
Fig.3 The tar yield during sludge pyrolysis with different CaO proportions

表 3 CaO 掺杂后焦油组分相对质量分数  
Tab.3 The relative contents of compounds in tar with different CaO proportions

升温条件/ (°C-°C/min)	相对质量分数/%								
	CaO	烃类	酸类	醇类	酮类	酯类	酚类	胺类	其他
350-60	2.5	2.98	0.31	9.52	32.23	7.97	2.68	35.85	8.46
	5.0	8.68	1.56	0.00	40.15	0.00	11.88	21.19	16.55
	10.0	13.48	2.85	2.34	34.36	4.01	0.00	30.94	12.03
350-6 000	2.5	2.70	3.29	10.76	29.83	2.47	1.63	31.61	17.71
	5.0	5.90	4.49	1.94	37.08	12.53	6.23	21.71	10.10
	10.0	4.38	0.57	21.92	36.20	0.00	0.00	23.79	13.15
650-60	2.5	19.44	1.36	2.02	27.78	0.00	29.93	13.70	5.77
	5.0	23.70	2.24	0.32	16.97	0.87	39.48	10.78	5.63
	10.0	21.69	0.56	2.04	16.47	6.81	20.24	19.42	12.77
650-6 000	2.5	32.99	1.67	0.51	13.88	0.58	6.03	29.96	14.38
	5.0	50.30	0.00	1.38	10.65	0.00	5.62	18.73	13.32
	10.0	42.21	1.93	3.58	18.69	5.91	2.05	8.19	17.44

同时，从热解焦油的 GC-MS 结果可以发现，热解条件为 350 °C-60 °C/min，随着 CaO 掺比从 2.5% 增加至 10.0% 时，热解焦油内烃类组分主要成分烯烃相对质量分数逐渐降低，十六烷等饱和烷烃

和苯等芳香烃占主导，表明 CaO 一定程度上促进了烯烃类成分的转化。相对的，热解条件为 350 °C-60 °C/min，CaO 掺比的增加还会进一步促进烷烃的断裂，使庚烷成为热解焦油内主要烃类组分。与之

不同,热解温度提升至 650 °C 时,CaO 掺比的增加进一步促进了萘、甲苯等芳香烃组分的形成。考虑到焦油产率在 CaO 掺比从 5.0% 增至 10.0% 时的大幅下降,升温条件 650 °C-6 000 °C/min、CaO 掺比为 5.0% 是熔盐储能耦合污泥热解系统较为理想的燃料油制备工况。

### 2.3 宽温升速率下 CaO 掺杂的影响机理

依托本文研究分析,结合前人研究对污泥热解反应过程解析,对 CaO 掺杂下宽升温速率下污泥热解焦油生成机理进行了探究。可以发现,CaO 掺杂对污泥热解焦油生成呈显著抑制作用,且 CaO 掺比对焦油组分相对占比有较为明显的影响。在低热解温度下,污泥热解过程主要为大分子有机物的解聚、断裂等反应;CaO 掺杂后升温速率提升促使 CaO 的活性氧参与热解反应,导致烃类化合物、酸类和酚类化合物向酮类、胺类化合物转化;此时 CaO 以化学催化作用为主。随着 CaO 相对质量分数的进一步增加,焦油产率大幅下降,酮类化合物相对质量分数进一步增加,而胺类化合物相对质量分数降低,表明此时 CaO 以物理传热阻滞作用为主。在高热解温度下,污泥热解过程主要为高热稳定性的环化或芳构化有机物的聚合或裂解;CaO 掺杂后升温速率提升促使烃类相对质量分数显著增加而酮类、酚类相对质量分数明显降低,这可能是 CaO 在该条件下可以充当反应载体,促进酮类、酚类等化合物脱氧反应。随着 CaO 相对质量分数的进一步增加,烃类化合物相对质量分数进一步提升,而胺类化合物相对质量分数在不同升温速率下呈现了不同的变化趋势,表明升温速率对热解反应的影响重归主导,此时 CaO 以物理传热阻滞作用为主。

## 3 结 论

1) 升温速率在低热解温度下对污泥热解焦油产率影响较大,这与大分子有机物热解过程中长链断裂顺序有关。同时,CaO 的掺杂会使焦油产率大幅下降,这主要是由于 CaO 会阻滞热解过程中的传热行为。

2) 进一步对焦油成分相对占比的分析表明,低热解温度、低升温速率下 CaO 在焦油生成过程中催化作用更为显著,这与 CaO 提供的活性氧有关,而在高热解温度低升温速率下 CaO 能促进酮类和酚类化合物的脱氧转化;相对地,在不同热解温度下,CaO 掺杂后在高升温速率污泥热解过程中均以传

热阻滞作用为主。

3) 综合考虑热解焦油产率及烃类组分分布特性,熔盐储能耦合污泥热解系统运行工况应选择高热解温度(高于 425 °C)、高升温速率(6 000 °C/min)和适量的 CaO 掺比(2.5%~5.0%)以实现高品质燃料油制备。

### [参 考 文 献]

- [1] 十部门联合印发《关于推进污水资源化利用的指导意见》[J]. 水处理技术, 2021, 47(2): 136.  
Ten departments jointly issued "guidance on promoting the resource utilization of sewage"[J]. Water Treatment Technology, 2021, 47(2): 136.
- [2] 安叶, 张义斌, 黎攀, 等. 我国市政生活污泥处置现状及经验总结[J]. 给水排水, 2021, 57(增刊 1): 94-98.  
AN Ye, ZHANG Yibin, LI Pan, et al. The current situation and experience of municipal domestic sludge disposal in China[J]. Water Supply and Drainage, 2021, 57(Suppl.1): 94-98.
- [3] 王周. 污水厂污泥常见处理处置工艺比选及炭化工艺设计[J]. 山东化工, 2022, 51(12): 178-181.  
WANG Zhou. Comparison of common treatment and disposal processes and charring process design for sewage plant sludge[J]. Shandong Chemical Industry, 2022, 51(12): 178-181.
- [4] ZENG K, LI J, XIE Y, et al. Molten salt pyrolysis of biomass: the mechanism of volatile reforming and pyrolysis[J]. Energy, 2020, 213: 118801.
- [5] CAO C Y, REN Y, WANG H, et al. Insights into the role of CaO addition on the products distribution and sulfur transformation during simulated solar-powered pyrolysis of waste tires[J]. Fuel, 2022, 314: 122795.
- [6] 何品晶, 顾国维, 邵立明, 等. 污水污泥低温热解处理技术研究[J]. 中国环境科学, 1996(4): 254-257.  
HE Pinjing, GU Guowei, SHAO Liming, et al. Research on low-temperature pyrolysis treatment technology for sewage sludge[J]. China Environmental Science, 1996(4): 254-257.
- [7] 逯朝锋. 污泥快速热解特性及技术经济性评价[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016: 1.  
LU Chaofeng. Rapid pyrolysis characteristics and techno-economic evaluation of sludge[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016: 1.
- [8] LUTZ H, ROMEIRO G, DAMASCENO R, et al. Low temperature conversion of some Brazilian municipal and industrial sludges[J]. Bioresource Technology, 2000, 74(2): 103-107.
- [9] 李海英. 生物污泥热解资源化技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2006: 1.  
LI Haiying. Biological sludge pyrolysis and resource recovery technology[D]. Tianjin: Tianjin University, 2006: 1.
- [10] FONTS I, GEA G, AZUARA M, et al. Sewage sludge pyrolysis for liquid production: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(5): 2781-2805.
- [11] CAO C, CHENG Y, HU H, et al. Products distribution and sulfur fixation during the pyrolysis of CaO conditioned textile dyeing sludge: effects of pyrolysis temperature and heating rate[J]. Waste Management, 2022, 153: 367-375.
- [12] LIU H, ZHANG Q, HU H, et al. Catalytic role of

- conditioner CaO in nitrogen transformation during sewage sludge pyrolysis[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35(3): 2759-2766.
- [13] ZHANG Q, LIU H, LIU P, et al. Pyrolysis characteristics and kinetic analysis of different dewatered sludge[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 170: 325-330.
- [14] LIU H, ZHANG Q, HU H, et al. Dual role of conditioner CaO in product distributions and sulfur transformation during sewage sludge pyrolysis[J]. *Fuel*, 2014, 134: 514-520.
- [15] CAO B, ZHANG T, ZHANG W, et al. Enhanced technology based for sewage sludge deep dewatering: a critical review[J]. *Water Research*, 2021, 189: 116650.
- [16] LIU H, XU G, LI G. Pyrolysis characteristic and kinetic analysis of sewage sludge using model-free and master plots methods[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, 149: 48-55.
- [17] GONZALEZ A C, LARSON C W, MCMILLEN D F, et al. Mechanism of decomposition of nitroaromatics. Laser-powered homogeneous pyrolysis of substituted nitrobenzenes[J]. *Journal of Physical Chemistry*, 1985, 89(22): 4809-4814.
- [18] ZHANG W, SUN C, LI T, et al. Zinc cation catalyzed carbonyl hydrazine C N bond cleavage in flash pyrolysis of energetic compound[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2021, 160: 105353.
- [19] ASIKIN-MIJAN N, LEE H V, TAUFIQ-YAP Y H, et al. Pyrolytic-deoxygenation of triglyceride via natural waste shell derived Ca(OH)<sub>2</sub> nanocatalyst[J]. *Journal of Analytical & Applied Pyrolysis*, 2016, 117: 46-55.
- [20] CAO C, REN Y, WANG H, et al. Insights into the role of CaO addition on the products distribution and sulfur transformation during simulated solar-powered pyrolysis of waste tires[J]. *Fuel: A Journal of Fuel Science*, 2022, 314: 122795.
- [21] DE AZEVEDO A R, ALEXANDRE J, PESSANHA L S P, et al. Characterizing the paper industry sludge for environmentally-safe disposal[J]. *Waste Management*, 2019, 95: 43-52.
- [22] CANEGHEM J V, BREMS A, LIEVENS P, et al. Fluidized bed waste incinerators: design, operational and environmental issues[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2012, 38(4): 551-582.
- [23] 闫志成. 污水污泥热解特性与工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014: 1.  
YAN Zhicheng. Study on the characteristics and process of sewage sludge pyrolysis[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014: 1.
- [24] 闫志成, 许国仁, 李建政. 污泥热解工艺的连续式生产性研究[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(13): 16-20.  
YAN Zhicheng, XU Guoren, LI Jianzheng. Study of continuous productivity of sludge pyrolysis process[J]. *China Water Supply and Drainage*, 2017, 33(13): 16-20.
- [25] 韩亨达. 钙铁氧化物对污泥热解痕量元素释放及热解油芳香化的影响研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018: 1.  
HAN Hengda. Study on the effect of calcium and iron oxides on the release of trace elements from sludge pyrolysis and aromatization of pyrolysis oil[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018: 1.
- [26] 王皓. 典型含硫有机固废热解产物生成及硫迁移转化特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021: 1.  
WANG Hao. Study on the generation of typical sulfur-containing organic solid waste pyrolysis products and sulfur migration conversion characteristics[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021: 1.

(责任编辑 刘永强)