

太阳能反应器内废盐有机杂质热解特性研究

董镇蛟¹, 陶于兵^{1,2}, 叶豪¹, 何源², 贾浩洋²

(1. 西安交通大学未来技术学院, 710049, 西安;

2. 西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了解决有机杂质阻碍废盐回收利用的问题,基于槽式太阳能聚光器和管式反应炉,建立有机物热解反应器模型,采用光热耦合方法研究了反射镜深度、焦距和反应器外部直径对系统能量分布及有机物热解特性的影响。研究表明:随着反射镜深度从100 mm增加到1 000 mm,聚光器平均聚光比增加7.34,但光学效率降低0.52%,反应器最高温度和最低温度均呈上升趋势,温差在100 K左右,热解反应时间缩短,系统热效率提高约10.71%;随着反射镜焦距从100 mm增加到1 000 mm,热流密度更加集中,最大聚光比增大21.03,光学效率降低0.53%,反应器最低温度变化不大,但最高温度和温差呈线性增长,温差从31.45 K增大到222.56 K,系统反应速率和热效率升高;随着反应器外部直径从14 mm增加到104 mm,热流密度降低,平均聚光比从34.75减小到4.71,光学效率提高0.53%,温差从52.13 K升高到114.32 K,反应速率和热效率均降低,单位体积废盐的热解时间从 $5.26 \text{ s} \cdot \text{cm}^{-3}$ 减小到 $1.29 \text{ s} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。研究结果对废盐热解反应器的参数设计和优化具有重要意义。

关键词: 太阳能反应器;能量分布;光热耦合;有机物热解

中图分类号: TK513 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202502012 **文章编号:** 0253-987X(2025)02-0115-12

Pyrolysis Characteristics of Waste Salt Organic Impurities in Solar Reactors

DONG Zhenjiao¹, TAO Yubing^{1,2}, YE Hao¹, HE Yuan², JIA Haoyang²

(1. School of Future Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering of the Ministry of Education,

Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To effectively remove organic impurities from waste salt for better waste salt recycling and environmental protection, a pyrolysis reactor model based on a parabolic trough concentrator and a tubular reactor was established in this paper. The effects of reflector depth, focal length, and reactor outer diameter on the energy distribution and the organics pyrolysis characteristics were investigated through photothermal coupling. The results show that as the reflector depth increased from 100 mm to 1000 mm, the average concentration ratio of the concentrator increased by 7.34 while the optical efficiency decreased by 0.52%; both the maximum temperature $T_{\max}$ and minimum temperature $T_{\min}$ of the reactor increased, with a temperature difference ΔT of the

收稿日期: 2024-06-24。 作者简介: 董镇蛟(2000—),男,博士生;陶于兵(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金

项目: 国家自然科学基金资助项目(U22A20212)。

网络出版时间: 2024-10-23

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20241022.1122.004>

reactor about 100 K; the pyrolysis reaction time was shortened, and the thermal efficiency of the system increased by about 10.71%. As the focal length increased from 100 mm to 1 000 mm, the heat flow density became more concentrated, resulting in a 21.03 increase in the maximum concentration ratio and a 0.53% decrease in optical efficiency; the $T_{\min}$ did not change significantly, but the $T_{\max}$ and ΔT exhibited a linear increase, with the ΔT increasing from 31.45 K to 222.56 K; the system reaction rate and thermal efficiency increased. As the reactor outer diameter increased from 14 mm to 104 mm, the heat flow density decreased, the R_{ave} decreased from 34.75 to 4.71, and the optical efficiency increased by 0.53%. The $T_{\max}$ and $T_{\min}$ exhibited a decreasing trend, while ΔT increased from 52.13 K to 114.32 K. The reaction rate and thermal efficiency decreased, but the pyrolysis time of per unit volume waste salt decreased from $5.26 \text{ s} \cdot \text{cm}^{-3}$ to $1.29 \text{ s} \cdot \text{cm}^{-3}$. The study results presented in this paper are significant for the parameter design and optimization of solar waste salt pyrolysis reactor.

Keywords: solar reactor; energy distribution; photothermal coupling; organics pyrolysis

化工行业会产生大量工业废弃氯化盐^[1],若这些废盐处理不当,不仅会造成环境污染,还会造成资源浪费^[2]。此外,由于第三代太阳能光热发电(CSP)技术对高温和高效率的要求, MgCl_2 、 NaCl 、 KCl 等氯化盐因其优异的热物理性质、高温热稳定性和低廉的成本,被认为是最具前景的传热储热介质之一^[3]。然而,截至目前,用于制备CSP传热和储热材料的氯盐大多洁净度为分析纯^[4],储热成本较高。因此,回收和再利用废弃氯化盐用作传热和储热材料,不仅可以减轻环境压力,还能够降低太阳能光热发电成本。

然而,由于化学有机原料的使用,大多废弃氯盐含有大量有机杂质,包括醛、苯及其衍生物等^[5],难以采用溶解-过滤-再结晶等普通手段将其去除。如何彻底去除有机杂质,实现废盐无害化、资源化处置是废盐再利用的主要障碍^[6]。高温热解法是去除废盐中有机杂质的一种关键技术^[7],其利用有机杂质的热不稳定性,通过加热促使废盐中的有机物发生分解,从而使有机物从工业废盐中脱除^[8]。邓雅清等^[9]提出一种蓄热式熔融炉,用来热解处理废盐。王希伟^[10]针对废盐热解工艺设计了热解回转窑炉。张森等^[11]采用高温热解-溶解净化-热蒸发结晶-冷却结晶联合方法,实现了农药行业废盐 NaCl-KCl 中有机物的脱除。现有研究表明:采用热解方式可以有效去除99%的有机杂质^[12-13]。然而,由于热解过程需要将废盐加热到300~500℃,能源消耗量大,且传统有机物热解法往往采用化石能源,导致废盐处理过程耗能高、污染物排放多^[14]。因此,寻找一种低能耗、低成本、环境友好的热解技术至关

重要。

太阳能因其储量大、使用方便、清洁等优点而受到广泛关注。太阳能聚光器将低热流密度、大面积的太阳光聚集到面积较小的太阳能反应器(SR)表面,使其获得较高温度^[15]。Paizullakhanov等^[16]提出利用聚光太阳能装置从采矿和冶金废料中提取金属。卫元珂等^[17]、门静婧等^[18]利用太阳能聚光器对甲醇进行重整制氢的研究。彭昌盛等^[19]利用太阳能聚光器热解生物质制备生物炭。上述研究表明,若利用聚集后的太阳能作为废盐有机杂质热解反应器的热源替代化石燃料,可实现废盐中有机杂质低能耗和清洁无污染的去除。

槽式太阳能聚光器(PTC)是聚光器中最成熟、最广泛的类型之一^[20]。为了探究槽式太阳能有机物热解反应器内的光热耦合和有机物热解特性,本文通过蒙特卡罗射线追踪(MCRT)^[21],建立了槽式聚光系统光学模型,分析了反射镜深度、焦距和反应器外部直径对光学性能和反应器表面能量分布的影响。在此基础上,通过将聚光器和热解反应器进行光热耦合,构建反应器内有机物热解模型,分析了聚光器及反应器结构参数对反应器内温度分布、有机物热解性能及系统热效率的影响规律。结果表明:利用太阳能进行热解废盐的技术可以极大降低热解成本,且在此过程中无化石燃料消耗,对于节能减排以及“双碳”目标实现具有重要的意义。与此同时,处理后的废盐可用于太阳能光热发电,资源得到了回收利用。因此,本文研究工作对废盐热解反应器的参数设计和优化具有重要意义。

1 聚光集热系统模型建立

1.1 物理模型

图1给出了PTC-SR太阳能反应器的示意图,可以看到,该反应器由一个槽式聚光器和一个热解反应器组成。图1(a)中,建立 $oxyz$ 直角坐标系, h 、 f 、 x_L 、 y_L 分别为反射镜的深度、焦距、长度和开口宽度。图1(b)展示了反应器的横截面,为玻璃-金属真空管结构, D_{co} 、 r 分别为反应器的外部直径(简称外径)和内半径, φ 为圆角。反应器与反射镜的长度均为300 mm,反应器外壳由不锈钢制成,厚度为2 mm。金属管内部填充KCl废盐颗粒。反射镜将垂直入射的太阳光反射到位于焦点线上的反应器金属管表面,反应器吸收太阳能并将其转化为热能。热能被传递到废盐中,作为废盐中有机杂质热解的热源。

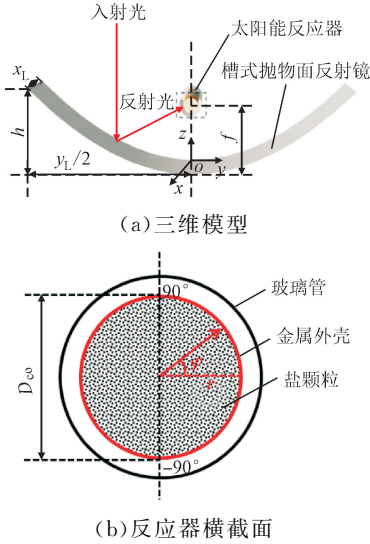


图1 PTC-SR反应器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the PTC-SR reactor

1.2 数学模型

1.2.1 聚光器数学模型

采用MCRT方法计算聚光系统中的光子传输过程。本文使用2个坐标系,其中直角坐标系用于MCRT法跟踪光子运动;圆柱坐标系用于在反应器吸收管圆周表面上统计光子和热通量分布。由于模型的对称性,光子和热通量分布是对称的。因此,圆角 φ 的取值范围为 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 。MCRT方法的相关方程^[22]如下

$$\begin{cases} x' = x_0 + \xi_1 x_L \\ y' = y_0 \pm \xi_2 y_L / 2 \\ z' = z_0 + y'^2 / 4f \end{cases} \quad (1)$$

式中: (x', y', z') 为光子击中抛物面的位置坐标;

(x_0, y_0, z_0) 为初始位置坐标,取为 $(0, 0, 0)$; ξ_1 和 ξ_2 均为 $0 \sim 1$ 之间均匀分布的随机数。

定义偏转角 $\theta (0 \leq \theta < \pi)$ 和方位角 $\psi (0 \leq \psi < 2\pi)$,用于确定方向余弦

$$\begin{cases} u_x = \sin \theta \cos \psi \\ u_y = \sin \theta \sin \psi \\ u_z = -\cos \theta \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\psi = 2\pi\xi_3$, ξ_3 为 $0 \sim 1$ 之间的随机数;角度 θ 表示如下

$$\theta = \arcsin \sqrt{\sin^2 \theta_{\text{sun}} \xi_4} \quad (3)$$

其中, $\theta_{\text{sun}} = 7.5 \times 10^{-3}$ rad为太阳不平行角, ξ_4 为 $0 \sim 1$ 之间的随机数。

当光子被反射时,会产生另一个随机数 ξ_5 。将其与反射镜的反射率 ϵ_r 进行比较,若 $\epsilon_r \geq \xi_5$,则表示反射成功,反射方向余弦 u'_x 、 u'_y 和 u'_z 可表示为

$$\begin{cases} u'_x = u_x \\ u'_y = u_y + \frac{y'((y'/2f)\sin\theta\sin\psi + \cos\theta)}{(f(1 + (y'^2/4f^2)))} \\ u'_z = u_z + \frac{2((y'/2f)\sin\theta\sin\psi + \cos\theta)}{(1 + (y'^2/4f^2))} \end{cases} \quad (4)$$

要确定光子是否在反射后击中玻璃管,可将随机数 ξ_6 和玻璃透射率 τ_e 进行比较,若 $\xi_6 \leq \tau_e$,则光子撞击玻璃,穿过玻璃后遵循Snell's定律。忽略玻璃厚度,光子撞击前后的方向余弦保持不变,穿过玻璃管的光子撞击吸收管并被吸收。采用列向量 $\mathbf{p}$ 计算光子在吸收管外表面的分布

$$\mathbf{p} \leftarrow \mathbf{p} + \omega \alpha_a \quad (5)$$

式中: ω 为每个光子携带的能量权重,这里取单位列向量; α_a 为金属管的吸收率。

光子分布 $\mathbf{p}$ 只显示光子的分布特征,定义热通量分布 $\mathbf{q}$ 的表达式为

$$\mathbf{q} = \mathbf{p} \frac{q_{\text{sun}} x_L y_L}{N_r S_i} \quad (6)$$

式中: q_{sun} 为太阳直接辐照度; N_r 为射线数量; S_i 为反应器面积。

以上描述的是理想情况,但在实际应用中,会出现各种光学损耗。为了使模型更符合实际情况,在模型中增加光学损失,表达如下

$$\eta_h = \epsilon_{\text{shade}} \epsilon_{\text{dust}} \epsilon_{\text{misc}} \quad (7)$$

$$\eta_i = \epsilon_{\text{cl}} \epsilon_{\text{geo}} \epsilon_{\text{track}} \quad (8)$$

式中: η_h 为接收装置损失; ϵ_{shade} 为接收器遮挡系数,取0.98; ϵ_{dust} 为灰尘系数,取0.99; ϵ_{misc} 为其他系数,取0.97; η_i 为反射器阵列损失; ϵ_{cl} 为反射镜清洁系数,取0.96; ϵ_{geo} 为反射系统几何误差系数,取0.99;

ϵ_{track} 为跟踪系统误差系数,取 0.99。考虑实际情况后,热通量密度 q 的分布更新为

$$q \leftarrow q\eta_{\text{h}}\eta_{\text{t}} \tag{9}$$

定义局部聚光比 R_{LCR} 为反应器局部辐照度 I_{i} 与太阳辐照 q_{sun} 的比值,写为

$$R_{\text{LCR}} = I_{\text{i}}/q_{\text{sun}} \tag{10}$$

定义聚光器光学效率 η_{PTC} 为到达反应器表面的能量与总入射能量的比值,写为

$$\eta_{\text{PTC}} = \frac{R_{\text{ave}}\pi D_{\text{co}}}{y_{\text{L}}} \times 100\% \tag{11}$$

式中: R_{ave} 为反应器表面平均聚光比。

本文采用 TracePro 软件模拟聚光器的聚光过程,获得反应器圆柱表面的光流分布。为更好地采集数据,将反应器圆柱面按角度平均划分为 N_{c} 个区域,用于统计光通量,从而计算出局部聚光比。经过相关验证计算,取 $N_{\text{c}}=72$ 。

1.2.2 反应器数学模型

采用多孔介质模型描述反应器中的传热和传质,采用达西定律处理多孔介质中的流体流动。根据局部热平衡假设,能量和质量守恒方程^[23]如下

$$\rho_{\text{eff}}c_{p,\text{eff}}\frac{\partial T}{\partial t} + \rho_{\text{gas}}c_{p,\text{gas}}\mathbf{u} \cdot \nabla T - \nabla \cdot (\lambda_{\text{eff}}\nabla T) = Q \tag{12}$$

$$Q = -k\rho\Delta H \tag{13}$$

式中:下标 eff 表示有效值、gas 表示气体; ρ 为表观密度; c_p 为比定压热容; λ 为热导率; Q 为能量源项; k 为温度 T 时的反应速率常数; ΔH 为反应焓。

考虑到玻璃罩和金属管之间为真空状态,因此仅考虑辐射热损失。热损失边界设置如下

$$Q_{\text{L}} = q_{\text{h}}\pi D_{\text{co}}x_{\text{L}}(T_{\text{co}} - T_{\text{si}}) \tag{14}$$

$$q_{\text{h}} = \frac{\sigma(T_{\text{co}}^2 + T_{\text{si}}^2)(T_{\text{co}} + T_{\text{si}})}{(1/\epsilon_{\text{co}}) + (D_{\text{co}}/D_{\text{si}})(1/\epsilon_{\text{si}} - 1)} \tag{15}$$

$$\eta_{\text{T}} = \left(1 - \frac{Q_{\text{L}}}{R_{\text{ave}}q_{\text{sun}}\pi D_{\text{co}}x_{\text{L}}}\right) \times 100\% \tag{16}$$

式中: Q_{L} 为热损失能量; q_{h} 为热损失系数; η_{T} 为热解反应器热效率; T_{co} 、 T_{si} 分别为金属管和玻璃外壳温度; σ 为 Stefan-Boltzmann 常数,取 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)^{-1}$; ϵ_{co} 为金属管发射率,取 0.1; ϵ_{si} 为玻璃罩发射率,取 0.9; D_{si} 为玻璃罩内径, $D_{\text{co}}/D_{\text{si}}=2/3$ 。

由于玻璃管的温度难以进行实时测量,根据文献^[24]的数据,对玻璃管的温度进行拟合,公式如下

$$T_{\text{si}} = 2.932\,67 \times 10^{-7} T_{\text{co}}^3 - 1.684\,19 \times 10^{-4} T_{\text{co}}^2 + 0.068\,25 T_{\text{co}} + 280.542\,77 \tag{17}$$

此外,为节省计算时间,当废盐中有机杂质质量

分数低于 1.0×10^{-6} 时,可认为有机杂质已完全去除,计算停止。有关反应器模型及其验证的详细信息请参阅文献^[25]。

1.2.3 边界及初始条件

考虑到管式反应器轴向的可延展性,上、下端面取为绝热边界。管式反应器的圆柱圆周表面为第三类边界条件,需要考虑辐射热损失。初始条件和模型的具体参数见表 1。

表 1 初始条件和模型参数

Table 1 Initial conditions and model parameters	
参数	数值
指前因子 A/s^{-1}	2.98×10^{11}
活化能 $E/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	177.59
反应焓 $\Delta H/(\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$	197.60
有机杂质初始质量含量 $w_0/\%$	0.68
床层孔隙率 ϵ	0.50
氯化钾初始密度 $\rho_{\text{KCl}}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 985.76
反应初始温度 T_{i}/K	641.15
直接法线辐照度 $q_{\text{sun}}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	1 000
玻璃罩透射率 τ_{e}	0.97
金属管吸收率 α_{s}	0.96
反射镜反射率 ϵ_{r}	0.94
初始压力 p_0/Pa	1.013×10^5
初始温度 T_0/K	293.15

1.3 模型验证

关于反应器的模型验证可参阅文献^[25],这里仅介绍聚光器的模型验证。在进行聚光器性能模拟时,初始光线数量越多,数据越稳定,模拟结果更准确,但光线数量增多则需要花费更多时间进行计算。因此,在计算合适的光线总数时,必须同时考虑计算时间和精确度。经过验证,将光线数设定为 1.35×10^6 。为进一步验证模型准确性,将模拟结果与文献^[22]的结果进行比较,如图 2 所示。文献假定光热系统的反射率、透射率和吸收率均为 1,太阳光的最大径向角为 7.5 mrad。反射镜的结构参数:开口宽度 y_{L} 为 4.4 m,焦距 f 为 1.1 m,反应器外径 D_{co} 为 70 mm。由图 2 可见, R_{LCR} 的大小和分布与文献中的结果几乎重合,验证了模型的准确性。从图 2 还可看出, R_{LCR} 在吸热管壁面上的周向分布可分为 4 个区域^[26]:遮蔽区(区域 I)、热流密度增长区(区域 II)、热流密度下降区(区域 III)以及太阳直射区(区域 IV)。

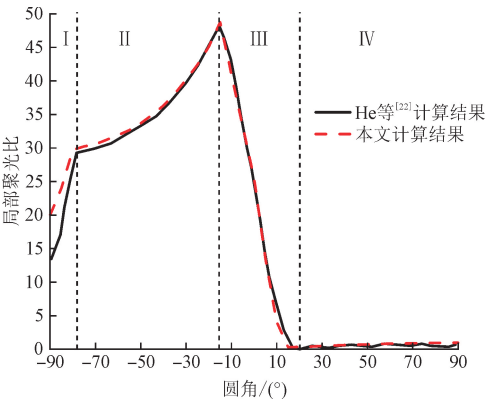


图 2 聚光器模型准确性验证

Fig. 2 Verification of concentrator model accuracy

2 结果与讨论

槽式抛物面聚光集热系统的聚光效果与反射镜和反应器的尺寸直接相关,会导致系统 R_{LCR} 的分布和数值发生改变。反射镜的尺寸主要受反射镜深度和焦距的影响,而反应器的尺寸则是由外径决定的。随着焦距和深度的增加,反射镜镜面体积增大,同时,加工的成本和难度也会增大。反应器外径越大,容积越大,可以同时处理更多的废盐,但也会导致系统体积的增大。因此,研究反射镜的深度、焦距和反应器外径对 R_{LCR} 分布及有机杂质热解的影响,对于热解系统的设计具有重要作用。

2.1 反射镜深度的影响

保持反射镜焦距为 500 mm、反应器外径为 64 mm 不变,探究反射镜的深度变化对其光学性能和热解性能的影响规律。

2.1.1 反射镜深度对光学性能的影响

不同反射镜深度下的 R_{LCR} 分布如图 3 所示。从图中可以看出,当深度由 100 mm 逐渐增加到 1 000 mm 时,遮蔽区的角度不随深度变化,始终维持在 10°左右,吸热管最底部的 R_{LCR} 稳定在 3.7 左右。这是因为深度增加,反射镜的数学函数并没有发生变化,只是在宽度方向朝两边进一步延伸,因此 R_{LCR} 曲线前半部分不变,但热流增长区的角度随着深度的增加不断增大。由于深度增加,反射镜面积增加,可以接收到更多入射光,且反射到反应器表面的角度变大,因此热流增长区角度变大。随着反射镜深度增加,最大聚光比 R_{max} 依次为 13.52、14.60、16.14、17.90、20.45、20.54、23.85、24.54、25.11 和 28.09,即 R_{max} 随深度的增加变大。这是由于反射镜深度增加,反射面积增大,但接收器面积保持不变,因此 R_{max} 逐渐增大。热流密度下降区的角度变化不

大,但初始角和结束角均随深度的增加不断增大。反射光线的有效角度范围(I、II、III)随着深度增加而增大,但太阳直射区范围不断缩小,这表明深度越大,反应器上有更大的面积可以接收到反射镜反射的光线。从图 3 还可以看出,随着深度的增加,曲线变化幅度减小,左侧曲线稀疏,而右侧曲线更为密集。这是反射镜抛物面曲线方程所致,随着深度的增大,二次抛物面曲线再次增大相同的深度时,开口宽度增加幅度变小,因此反射镜面积增大幅度减小。

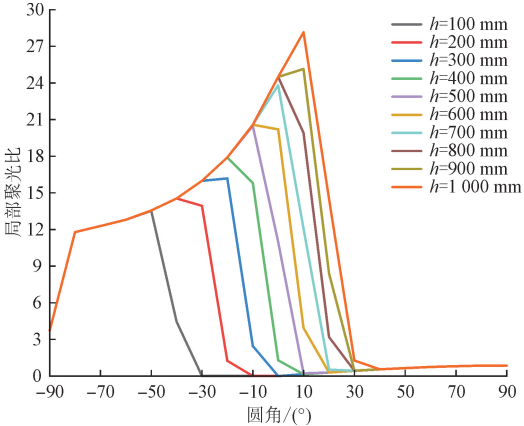


图 3 不同反射镜深度下的局部聚光比分布

Fig. 3 R_{LCR} distribution at different reflector depths

随着反射镜深度的改变, R_{ave} 和光效率的变化如图 4 所示。由图可见,随着反射镜深度增大, R_{ave} 从 3.43 逐渐增加到 10.77。这是由于抛物面深度增加,其开口宽度也随之增加,从而可以反射更多的太阳光,此时反应器的接收面积保持不变。此外,随着反射器深度增加, R_{ave} 的增长趋势逐渐减缓,这与之前观察到的 R_{LCR} 曲线左疏右密的现象相吻合,原理也相同。从图 4 还可以看出,深度为 100 mm 时,光效率最大,为 77.07%。随着深度增加,光效率逐渐

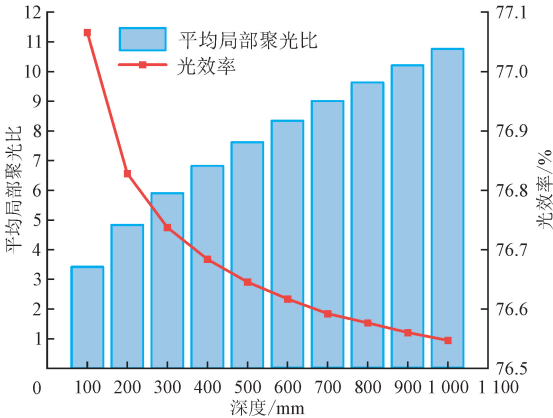


图 4 不同反射镜深度下的平均局部聚光比和光效率

Fig. 4 R_{ave} and optical efficiency at different reflector depths

降低,根据式(11),这是由于 R_{ave} 的增长率小于 y_L 的增长率所导致。探究光效率下降的根本原因,是由于反射镜深度增加,垂直入射的太阳光与反射镜夹角变小,同时因为太阳不平行角的存在,太阳反射光锥外侧的部分光线从吸热管周围逃逸比例增大,从而引起更多的光学损失,使得光效率降低。

2.1.2 反射镜深度对反应器热解性能的影响

不同反射镜深度下,热解反应结束时反应器内反应物最高温度、最低温度和温差的变化如图 5 所示。由图可见,随着深度的增加,最高温度和最低温度均呈上升趋势,最高温度曲线前期上升较快,且随着深度的增加趋于平缓,最低温度曲线的升高速率则一直较为平缓,因此温差呈现出先上升后下降趋势。温度的变化与热通量分布息息相关,出现这种现象是 R_{LCR} 逐渐增大但增长速率逐渐变缓的结果。从图 5 还可以看出,不管哪种反射器深度,反应器内温差均较大,10 种深度反应器的温差依次为 83.17、99.60、106.53、109.48、109.40、109.85、108.93、107.53、106.11、104.69 K。除 100 mm 和 200 mm 外,其他深度下的温差都在 100 K 以上。因此,在实际应用中,不管选择哪种深度的反射镜,都要对系统结构进行改进以强化传热减小温差,从而减小反应器的热应力,延长使用寿命。

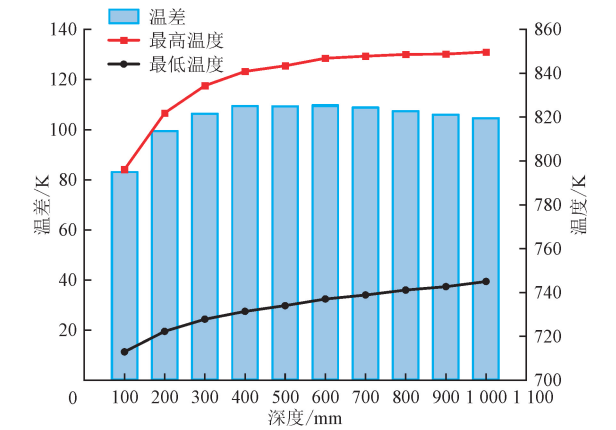


图 5 不同反射镜深度下最高温度、最低温度和温差的变化
Fig. 5 Variation of maximum temperature, minimum temperature and temperature difference at different reflector depths

不同反射镜深度下平均温度和热解反应进度随着时间的变化如图 6 所示。热解反应进度为 1 时反应开始,为 0 时反应结束。由图 6 可见,随着深度增加,温度曲线斜率增大,升温速率变快。但从线条的疏密程度可以看出,变快趋势逐渐减缓。 R_{LCR} 分布随反射镜深度的变化是产生该现象的直接原因,随

着深度增加,热通量输入增多。热解反应进度变化与温度随深度变化相似,反射镜深度增加,升温快,因此反应速率变快,反应进度曲线下降区的斜率增大。由于反应器初始温度相同,深度增加时,相同时间内输入的热量增多,因此反应开始的时间随深度的增加而变短。总的来说,反射镜深度越大,热解反应开始的时间越早,热解速率越快,导致反应持续时间大大减少。

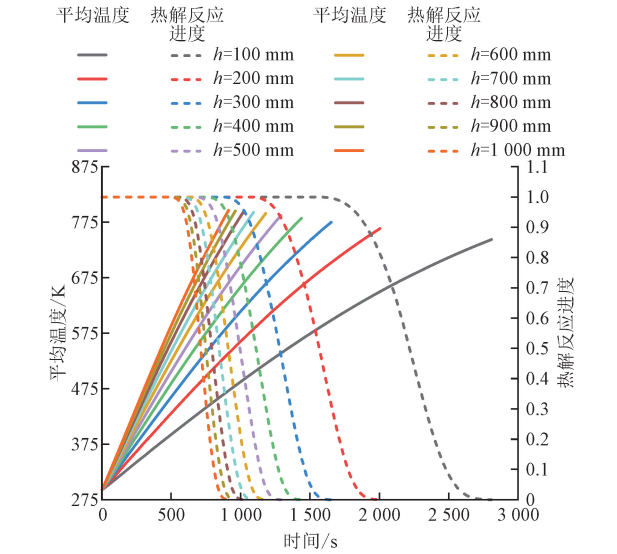


图 6 不同反射镜深度下的平均温度和热解反应进度
Fig. 6 Average temperature and progress of pyrolysis reaction at different reflector depths

不同反射镜深度下反应的持续时间和热效率如图 7 所示。由图可以看出,10 种深度的反应持续时间分别为 2 809.00、2 005.00、1 652.90、1 438.50、1 180.80、1 093.40、1 022.70、962.33、912.41 s。可见随着深度增加,热解持续时间减少,但幅度变小,这与 R_{LCR} 分布相对应。虽然反射镜深度增大会导

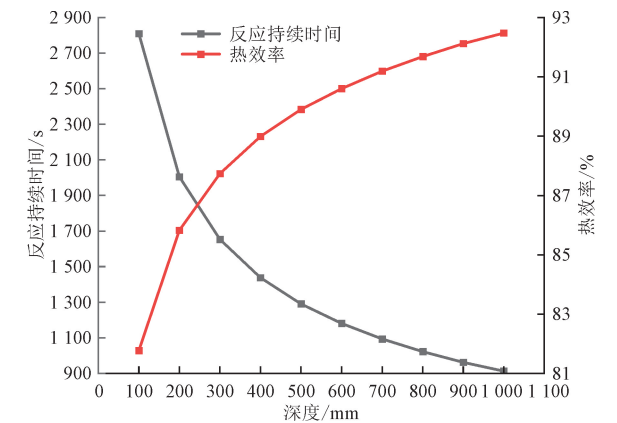


图 7 不同反射镜深度下的反应持续时间和热效率
Fig. 7 Reaction duration and thermal efficiency at different reflector depths

致单位时间内输入反应器能量增多,反应器温度更高,热损失更多,但反应持续时间的减少对于最终热效率起到决定性的作用,因此呈现出热效率与反应持续时间趋势相反,出现不断升高的现象。

综上所述,反射镜深度增加会增大反射镜反射光线的面积,从而使得更多的热通量汇聚在热解反应器表面,加速反应器的升温 and 有机杂质热解,导致反应结束时间变短,热效率提升。但从图 6 可以看出,当 h 超过 500 mm 后,其影响已经非常小,且随着深度增加,光效率降低,制造难度和成本也会随之增加,因此再增加深度性价比不高。值得注意的是,不管反射镜深度如何变化,反应器横截面均存在较大温差,因此需要对其进行强化传热或者均匀边界热流,使得温度分布均匀。

2.2 反射镜焦距的影响

保持反射镜深度为 500 mm、反应器外径为 64 mm 不变,探究反射镜的焦距变化对其光学性能和热解性能的影响规律。

2.2.1 反射镜焦距对光学性能的影响

不同反射镜焦距对聚光比分布的影响如图 8 所示。由图可见,随着焦距增大, R_{LCR} 曲线变得瘦高,辐射能分布更加集中。焦距增大,反射光线的有效角度范围减小,太阳直射区的角度范围增大。焦距变化导致反射镜的数学函数发生变化,增加焦距使得反射镜开口变大,此时反射镜可以接受更多的太阳光,但反射光线落在集热器上的范围减小,因此 R_{LCR} 分布曲线出现瘦高现象。当焦距从 100 mm 逐渐变为 1 000 mm 时, R_{max} 依次为 10.12、13.59、14.83、17.80、20.45、21.51、24.97、25.71、29.07、31.15,最大增幅为 207.81%。随着焦距减小,反应

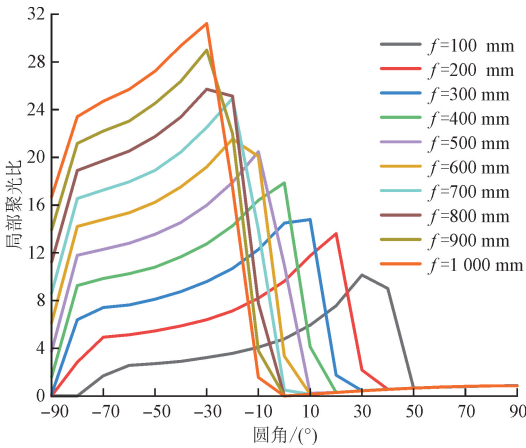


图 8 不同反射镜焦距下的局部聚光比分布

Fig. 8 Distribution of R_{LCR} at different reflector focal lengths

器最底部(即 -90° 位置附近)的 R_{LCR} 逐渐减小,甚至出现 R_{LCR} 为 0 现象,如图 8 中焦距为 100 mm 时所示。这是由于当焦距过小时,反应器底部存在一定的角度接收不到光线所导致。

10 种焦距下的 R_{ave} 和光效率如图 9 所示。由图可见, R_{ave} 随着焦距增加而增大,但增加速率逐渐变缓,这与深度增加时的变化趋势相同。当焦距从 100 mm 变为 1 000 mm 时,对应的 R_{ave} 依次为 3.43、4.84、5.92、6.82、7.62、8.35、9.02、9.64、10.22、10.77,增长率依次为 41.18%、22.15%、15.33%、11.74%、9.51%、7.98%、6.89%、6.05%、5.41%。随着焦距增加,反射器开口宽度增大,所反射的太阳能辐照能增加,导致聚光比增大。根据反射镜曲线方程 $4fz = y^2$, 当焦距 f 变化相同时,纵坐标 y 的变化与焦距 $f^{0.5}$ 成正相关,因此开口宽度增大,速率逐渐变缓, R_{ave} 增长率降低。随着焦距增大,系统光效率依次为 77.11%、76.98%、76.78%、76.69%、76.65%、76.62%、76.60%、76.59%、76.58%、76.58%,表现为逐渐降低直到最后趋于稳定。这是因为随着焦距增大,反应器上接受反射光的面积减小,光线逃逸增多,导致光学损失增加,光效率降低。

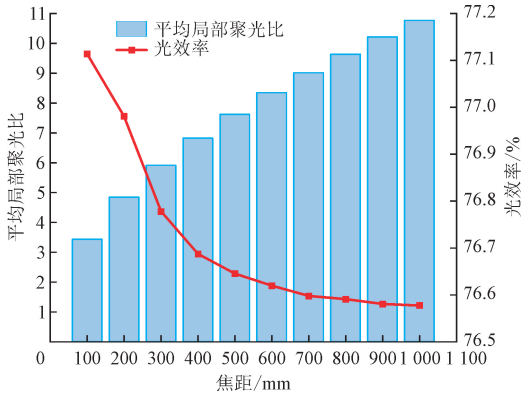


图 9 不同反射镜焦距下的平均局部聚光比和光效率
Fig. 9 R_{ave} and optical efficiency at different reflector focal lengths

2.2.2 反射镜焦距对反应器热解性能的影响

不同反射镜焦距下,热解反应结束时反应器内反应物最高温度、最低温度和温差的变化如图 10 所示。从图中可以看出,反应器的最低温度随焦距的增大略有增加,变化幅度较小,而最高温度和温差几乎呈线性增长。这是因为随着焦距增大,热通量更加集中, R_{max} 也逐渐增大。当焦距从 100 mm 增加到 1 000 mm 时,温差依次为 31.45、37.36、60.88、85.49、109.40、134.36、157.72、180.04、201.61、

222.56 K。

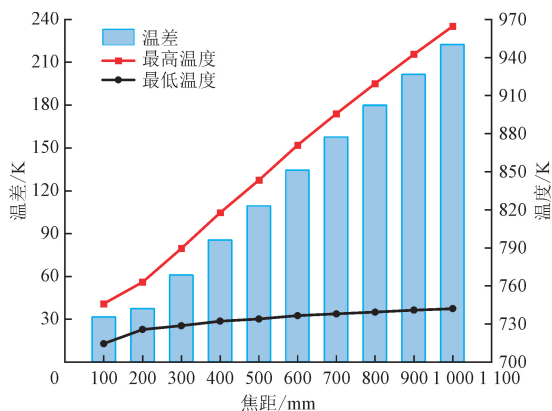


图 10 不同反射镜焦距下最高温度、最低温度和温差的变化

Fig. 10 Variation of maximum and minimum temperature and temperature difference at different reflector focal lengths

随着焦距变化,平均温度和热解反应进度的变化与深度改变时的曲线相似,原理也相同,这里便不再赘述。对不同反射镜焦距下反应持续时间和热效率的研究结果表明,随着焦距增加,反应持续时间依次为 2 741.80、1 909.10、1 600.00、1 418.70、1 290.70、1 198.90、1 126.10、1 067.60、1 020.00、978.96 s,热效率依次为 83.17%、87.5%、88.79%、89.46%、89.9%、90.14%、90.31%、90.42%、90.47%、90.49%。

由上可知,在进行焦距选择时,尽量避免焦距过小和过大。小焦距虽然热通量分布更加均匀,温差较小,但因热流密度低,会导致反应时间过长且热效率降低;大焦距虽然反应时间短,热效率高,但会带来较大的最高温度和温差。例如当焦距为 1 000 mm 时,反应结束时反应器最高温度为 964.70 K,温差高达 222.56 K,这会导致反应器和表面涂层的寿命减小。总的来看,500 mm 焦距的反射镜为最佳选择,再增大焦距,热效率和反应结束时间变化不是很大,反而造成反应器最高温度高于 850 K,温差远超 100 K。此外,反射器焦距的增加不仅会带来成本和建造难度的增加,还会导致聚光集热系统体积增大,因此再增大焦距性价比不高。

2.3 反应器外径的影响

2.3.1 反应器外径对光学性能的影响

反应器的中心轴处于反射镜焦线上,增大反应器的外径将导致其容积变大,接收光线的面积也增大。为了探究外径变化对 R_{LCR} 分布的影响,保持反应器外壳厚度为 2 mm,反射镜的焦距和深度均为

500 mm,研究了反应器外径分别为 14、24、34、44、54、64、74、84、94、104 mm 时其表面的聚光比分布,结果如图 11 所示。由图可见,随着反应器外径减小, R_{max} 不断增大。这是因为反射光线总量不变,但反应器表面的接收面积急剧减小。随着外径从小到大, R_{max} 依次为 80.05、49.77、35.64、28.93、24.05、20.45、17.74、15.63、13.95、12.60,表明 R_{LCR} 随着外径的减小明显增大,在图中表现为线条整体上移。这是因为虽然半径呈线性减小,但面积和半径的平方呈正相关,因此面积减小速率越快,热流密度增大速率也就越快。 R_{max} 的变化导致了热流下降区的角度范围随着外径的减小而增大,从而间接缩小了太阳直射区的角度范围。反应器底部即 $\varphi = -90^\circ$ 附近的 R_{LCR} 也随着外径的减小而增大,且从曲线疏密程度可以看出,外径越小增幅越大。外径小热流密度高,这在热解反应中可有效缩短反应时间,但反应器的容积也会相应减小。

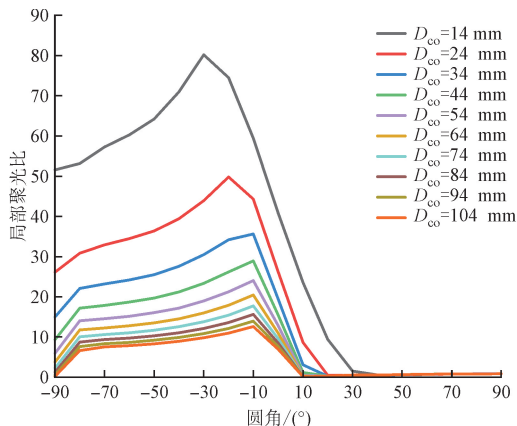


图 11 不同反应器外径下的局部聚光比分布

Fig. 11 Distribution of R_{LCR} for different reactor outer diameters

随着外径变化,系统 R_{ave} 的变化和光效率如图 12 所示。由图可见, R_{ave} 随着反应器外径的增加而减小,且减小的速率逐渐变缓。 R_{ave} 的减小是由于反应器外径增大,反射镜反射的太阳光分摊到更多面积上所导致,而减小速率变缓与面积增长速率变缓有关。外径从 14 mm 变为 104 mm,对应的 R_{ave} 依次为 34.75、20.28、14.32、11.07、9.03、7.62、6.60、5.82、5.20、4.71;光效率随着半径的增大逐渐增大,依次为 76.41%、76.46%、76.50%、76.54%、76.59%、76.65%、76.70%、76.76%、76.83%、76.94%。由于半径增大,反应器可以更早接收到反射光线,此时太阳不平行角发展较小,因此逃逸的光线减少,光效率提高。

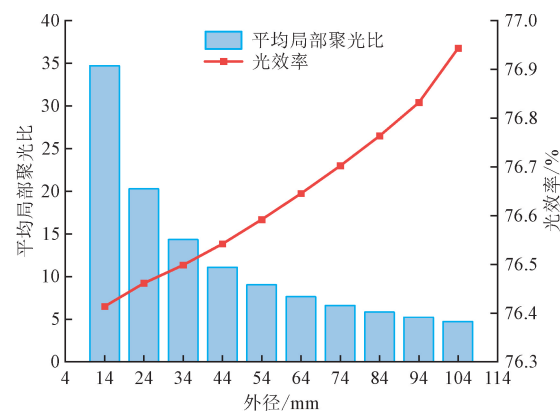


图 12 不同反应器外径下的平均局部聚光比和光效率
Fig. 12 R_{ave} and optical efficiencies at different reactor outer diameters

2.3.2 反应器外径对热解性能的影响

不同反应器外径下,热解反应结束时反应器内反应物的最高温度、最低温度和温差的变化如图 13 所示。从图中可以看出,随着外径增加,最高温度和最低温度都呈现下降趋势。最高温度下降是由于圆周表面热流密度降低所致;而最低温度下降是由于最高温度下降,反应器半径增加,传热更为困难所致。最低温度开始下降幅度较大,后面趋于平缓,这是因为随着半径增加,传热较差的影响变小。温差呈现先上升后平缓的趋势,当外径从 14 mm 变为 104 mm 时,温差依次为 52.13、76.37、91.34、100.56、106.61、109.40、112.57、113.64、114.15、114.32 K。

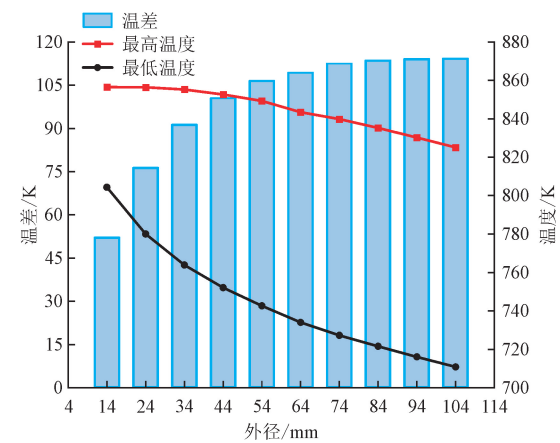


图 13 不同反应器外径下最高温度、最低温度和温差的变化
Fig. 13 Variation of maximum and minimum temperatures and temperature difference at different reactor outer diameters

反应进度的变化曲线。由图可见,随着外径增加,平均温度曲线斜率减小,升温速率变慢,热解反应进度曲线下降部分斜率减小,热解速率变慢。这是由于外径增大,反应器容积变大,传热需要更多时间,且热流密度减小所致。从图中还可以看出,随着外径增大,反应器开始热解反应的时间延后。这主要是因为受 R_{max} 影响,半径较大时, R_{max} 较小,反应器达到开始热解温度的时间延后。

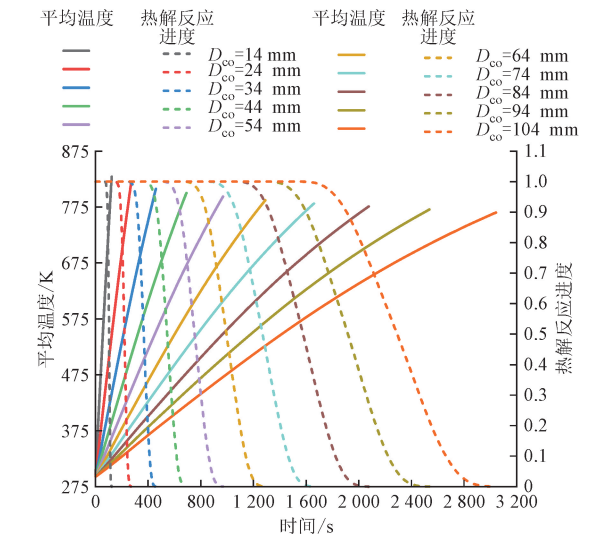


图 14 不同反应器外径下的平均温度和热解反应进度
Fig. 14 Average temperature and progress of pyrolysis reaction at different reactor outer diameters

不同外径下,反应持续时间和热效率如图 15 所示。由图可见,随着外径增加,反应持续时间逐渐延长。这是因为外径较大时热流密度低,传热更慢,温度均匀性差且容积增大,有机杂质更多所致。外径由小变大时,反应持续时间依次为 123.95、270.41、459.34、691.56、969.36、1 290.70、1 659.10、2 076.10、2 537.40、3 043.20 s。考虑到外径增加导致容积增大,引入单位体积热解时间,对上述提到的热解反应持续时间进行处理,得到外径由小到大对应的单位体积热解时间依次为 5.26、2.87、2.17、1.83、1.65、1.52、1.44、1.38、1.33、1.29 $s \cdot cm^{-3}$,表明随着外径增加,虽然整个反应器的热解时间延长,但单位体积的热解时间缩短。这主要是因为是在反应器长度不变的情况下,随着外径线性增加,容积与半径的平方正相关,容积变化更大。与此同时,光效率提高,反应器输入更多的热量,且热损失更小,因此单位体积的反应时间变快。由此可以看出,大外径热解反应器在处理大量废盐时具有明显优势。随着半径增

加,热效率几乎呈线性下降。从深度、焦距和外径的计算结果发现,热效率与反应持续时间的变化一直互为相反趋势,这表明热效率除了受温差影响外,受热解时间的影响也较大。在相同时间内,虽然小外径反应器的单位面积热损失更高,但由于输入热量的基数大,反应时间更少,因此热效率较高。随着半径增大,热效率依次为 97.74%、96.19%、94.61%、93.02%、91.43%、89.90%、88.38%、86.87%、85.43%、84.04%。

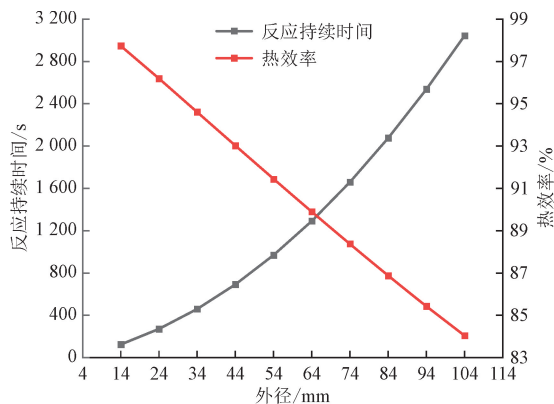


图 15 不同反应器外径下的反应持续时间和热效率

Fig. 15 Reaction duration and thermal efficiency for different reactor outer diameters

综上所述,选择小外径反应器,虽然温差小、热效率高,但容积太小导致换料频繁,浪费大量时间,且最高温度较高;大外径反应器虽然完成一次热解的时间较长,但其单位体积的热解时间更小,处理较大废盐更有优势。在实际应用中,我们可以根据不同的情况选择不同的反应器外径尺寸。

3 结论与展望

本文通过 MCRT 方法对槽式抛物面聚光集热系统进行光线追踪,探究了不同反射镜深度、焦距和反应器外径对系统 R_{LCR} 及其分布的影响。在此基础上,利用光线追踪的结果进行光热耦合,进一步探究了上述参数对有机杂质热解反应器的影响,为废盐热解系统的设计和改进了新思路。得出主要结论如下。

(1)反射镜深度增加,有效聚光角增大约 60° , R_{max} 从 13.52 增大到 28.09,但光效率降低了 0.52%。热解反应器最高温度和最低温度都呈现上升趋势,但温差变化不大,约为 100 K,反应持续时间减少

1 896.59 s,热效率升高 10.71%。虽然深度增加热解效果变好,但当深度超过 500 mm 后,变化相对较小,考虑到建造难度和成本问题,深度为 500 mm 的反射镜是最佳选择。

(2)反射镜焦距增加, R_{LCR} 曲线变得瘦高,热流密度更加集中, R_{max} 增大 21.03,但光效率降低 0.53%。反应器最低温度变化不大,而最高温度和温差呈现线性增长,温差从 31.45 K 增大到 222.56 K,反应结束时间减少 1 762.84 s,热效率提高 7.32%。焦距太小热解反应慢,热效率低;焦距太大则最高温度和温差过大,反应器寿命减少。通过比较后,选择最佳焦距为 500 mm。

(3)反应器外径增加, R_{LCR} 曲线明显降低,且有效聚光范围减小,但由于聚光面积增大, R_{ave} 从 34.75 减小到 4.71,光效率提高 0.53%;最高温度和最低温度呈下降趋势,温差从 52.13 K 升高到 114.32 K,热解时间从 123.95 s 延长到 3 043.20 s,但单位体积的热解时间从 $5.26 \text{ s} \cdot \text{cm}^{-3}$ 减小到 $1.29 \text{ s} \cdot \text{cm}^{-3}$,热效率降低 13.70%。因此,在进行外径选择时,需考虑实际工况。小外径反应器换料频繁,最高温度较大,但单次热解时间更短;大外径反应器温差较大、热效率低,但单位体积的热解时间更短,适合处理较大的废盐。

未来研究中,可以在本文基础上进行实验探索,建立废盐热解的一体化系统。除此之外,还可以对热解系统进行升级改进,通过添加翅片等强化传热结构,或添加二次反射镜来均匀反应器圆周表面的热通量分布,以进一步提升反应器内温度均匀性。此外,也可以通过流化床研究和改进吸收涂层来获得更好的传热和热解效果。

参考文献:

- [1] 周海云, 鲍业闯, 包健, 等. 工业废盐处理处置现状研究进展 [J]. 环境科技, 2020, 33(2): 70-75.
ZHOU Haiyun, BAO Yechuang, BAO Jian, et al. Research progress on status quo of industrial waste salt treatment and disposal [J]. Environmental Science and Technology, 2020, 33(2): 70-75.
- [2] JU Jinrong, FENG Yali, LI Haoran, et al. Recovery of valuable metals and NaCl from cobalt-rich crust and industrial waste salt via roasting coupling technology [J]. Journal of Sustainable Metallurgy, 2021, 7(4): 1862-

- 1875.
- [3] VIDAL J C, KLAMMER N. Molten chloride technology pathway to meet the U. S. DOE sunshot initiative with Gen3 CSP [J]. AIP Conference Proceedings, 2019, 2126(1): 080006.
- [4] MOHAN G, VENKATARAMAN M, GOMEZ-VIDAL J, et al. Assessment of a novel ternary eutectic chloride salt for next generation high-temperature sensible heat storage [J]. Energy Conversion and Management, 2018, 167: 156-164.
- [5] 吴骞, 袁文蛟, 王洁, 等. 工业废盐热处理技术研究进展 [J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(5): 1668-1680.
WU Qian, YUAN Wenjiao, WANG Jie, et al. Research progress of industrial waste salt thermal treatment technologies [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(5): 1668-1680.
- [6] 李强, 戴世金, 郑怡琳, 等. 工业废盐中有机物脱除和资源化技术进展 [J]. 环境工程, 2019, 37(12): 200-206.
LI Qiang, DAI Shijin, ZHENG Yilin, et al. Discussion on treatment technology and resource recovery of hazardous waste salt containing organics [J]. Environmental Engineering, 2019, 37(12): 200-206.
- [7] XI Shaobo, WEI Xiaolan, DING Jing, et al. The removal of organic contaminants from industrial waste salts by pyrolysis and potential use for energy storage [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 425: 138931.
- [8] 张以飞. 高温炭化法处理工业废盐工程方案研究 [J]. 环境与发展, 2020, 32(4): 48-49.
ZHANG Yifei. Study on the project scheme of high-temperature carbonization for industrial waste salt treatment [J]. Environment and Development, 2020, 32(4): 48-49.
- [9] 邓雅清, 曾宪坤, 张胜露. 工业废盐中有机物脱除工艺 [J]. 有色金属(冶炼部分), 2024(4): 147-152.
DENG Yaqing, ZENG Xiankun, ZHANG Shenglu. Removal process of organics from industrial waste salt [J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2024(4): 147-152.
- [10] 王希伟. 废盐热解回转窑的研发设计 [J]. 广东化工, 2022, 49(4): 181-184.
WANG Xiwei. Research and design of waste salt pyrolysis rotary kiln [J]. Guangdong Chemical Industry, 2022, 49(4): 181-184.
- [11] 张森, 王军, 陈天虎, 等. 农药行业 NaCl-KCl 型废盐热处理研究 [J]. 无机盐工业, 2023, 55(2): 106-112.
ZHANG Sen, WANG Jun, CHEN Tianhu, et al. Research on heat treatment of NaCl-KCl waste salt in pesticide industry [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2023, 55(2): 106-112.
- [12] FENG Ling, TIAN Binghui, ZHANG Lili, et al. Pyrolysis of hydrazine hydrate waste salt: thermal behaviors and transformation characteristics of organics under aerobic/anaerobic conditions [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 323: 116304.
- [13] 汤子怡, 汤亚飞, 王顺. 热处理有机化工废盐的工业盐制备 [J]. 武汉工程大学学报, 2023, 45(1): 71-75.
TANG Ziyi, TANG Yafei, WANG Shun. Production of industrial salt by heat treatment of organic chemical waste salt [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2023, 45(1): 71-75.
- [14] 赖敏明, 徐先宝, 李响. 工业废盐的处理及其资源化研究进展 [J]. 应用化工, 2023, 52(1): 215-218.
LAI Minming, XU Xianbao, LI Xiang. Research progress on the treatment and resource utilization of industrial waste salt [J]. Applied Chemical Industry, 2023, 52(1): 215-218.
- [15] ABED A A, EL-MARGHANY M R, EL-AWADY W M, et al. Recent advances in parabolic dish solar concentrators: receiver design, heat loss reduction, and nanofluid optimization for enhanced efficiency and applications [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2024, 273: 112930.
- [16] PAIZULLAKHANOV M S, PARPIEV O R, AKBAROV R Y, et al. Features of the extraction of metals from waste in a solar furnace [J]. Applied Solar Energy, 2022, 58(3): 433-437.
- [17] 卫元珂, 高哲, 程泽东, 等. 太阳能甲醇重整制氢过程催化剂颗粒床特性及综合性能数值分析 [J]. 工程热物理学报, 2023, 44(3): 795-802.
WEI Yuanke, GAO Zhe, CHENG Zedong, et al. Numerical analysis of catalyst particle bed characteristics and comprehensive performance for solar-driven hydrogen production via methanol-steam reforming reaction [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2023, 44(3): 795-802.
- [18] 门静婧, 高哲, 卫元珂, 等. 基于颗粒堆积床模型的线性菲涅尔式太阳能甲醇重整制氢系统综合性能研

- 究[J]. 工程热物理学报, 2023, 44(2): 497-504.
- MEN Jingjing, GAO Zhe, WEI Yuanke, et al. Study on comprehensive performance of linear Fresnel solar methanol reforming hydrogen production system based on packed bed model [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2023, 44(2): 497-504.
- [19] 彭昌盛, 魏茜茜, 赵婷婷, 等. 太阳能热解技术制备生物炭的研究进展 [J]. 现代化工, 2022, 42(2): 61-67.
- PENG Changsheng, WEI Xixi, ZHAO Tingting, et al. Advances in production of biochar by solar pyrolysis technology [J]. Modern Chemical Industry, 2022, 42(2): 61-67.
- [20] KUMARESAN G, SUDHAKAR P, SANTOSH R, et al. Experimental and numerical studies of thermal performance enhancement in the receiver part of solar parabolic trough collectors [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 77: 1363-1374.
- [21] 成珂, 张鹤飞. 蒙特卡洛法模拟集热器入射面太阳辐射的算法研究 [J]. 太阳能学报, 2006, 27(8): 743-747.
- CHENG Ke, ZHANG Hefei. Algorithm research of solar radiation on entrance plane of solar collector by Monte Carlo method [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2006, 27(8): 743-747.
- [22] HE Yaling, XIAO Jie, CHENG Zedong, et al. A MCRT and FVM coupled simulation method for energy conversion process in parabolic trough solar collector [J]. Renewable Energy, 2011, 36(3): 976-985.
- [23] LUO Xinyi, LI Wei, ZHANG Lianjie, et al. Effects evaluation of Fin layouts and configurations on discharging performance of double-pipe thermochemical energy storage reactor [J]. Energy, 2023, 282: 128821.
- [24] BURKHOLDER F, KUTSCHER C. Heat loss testing of Schott's 2008 PTR70 parabolic trough receiver [EB/OL]. (2009-05-01) [2024-04-22]. <https://doi.org/10.2172/1369635>.
- [25] DONG Z J, TAO Y B, YE H, et al. Experimental and numerical study on pyrolysis characteristics of organic impurities in waste salt [J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 444: 141223.
- [26] CHENG Zedong, HE Yaling, WANG Kun, et al. A detailed parameter study on the comprehensive characteristics and performance of a parabolic trough solar collector system [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 63(1): 278-289.

(编辑 李慧敏)

(上接第105页)

- LIN Lusheng, LIU Guiping, CHEN Yuan. Nonlinear dynamic behaviors analysis of complex rotor-bearing system [J]. Journal of Mechanical Strength, 2015, 37(3): 381-386.
- [26] 赵资恒, 谭雁清, 马廉洁, 等. 考虑流固耦合作用的超高速液体动静压轴承油膜特性研究 [J]. 润滑与密封, 2024, 49(7): 50-57.
- ZHAO Ziheng, TAN Yanqing, MA Lianjie, et al. Study of oil film characteristics of ultra-high speed liquid hybrid bearings considering fluid-solid coupling effect [J]. Lubrication Engineering, 2024, 49(7): 50-57.
- [27] 胡启龙, 何文强, 管文生, 等. 滑动轴承内轴颈涡动引发的热效应分析 [J]. 热能动力工程, 2020, 35(9): 22-28.
- HU Qilong, HE Wenqiang, GUAN Wensheng, et al. Analysis on thermal effect caused by journal whirl in sliding bearing [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(9): 22-28.

(编辑 陶晴)