

# 退役Cu(InGa)Se<sub>2</sub>光伏层压件封装材料 热解物理场模拟及温度优化\*

黄智豪, 巫宇森, 秦保家, 朱洁, 阮菊俊

中山大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510006

**摘要:** 在氮气氛围下, 研究了不同热解温度时退役Cu(InGa)Se<sub>2</sub>光伏层压件封装材料的气态产物组成及各组分的生成行为。以节能降碳为控温依据, 选取467 °C为目标热解温度, 并以438 °C和497 °C为对照温度, 进行建模分析和模型验证。通过热-流复合物理场模拟, 优化调整后的实际目标、对照热解温度为490、465和525 °C。可以发现, 将目标热解温度467 °C调整至490 °C后可将平均温度误差由57.18 °C减小至5.76 °C, 下降约89.93%。在490、465和525 °C温度下, 当热解温度进入200 °C以上的高温区间时, 平均误差分别仅为3.62、4.72和3.29 °C。这表明所建立的模型在高温区间内具有良好的准确性和指示作用。

**关键词:** 退役Cu(InGa)Se<sub>2</sub>光伏层压件; 封装材料; 热解; 节能降碳

中图分类号: X705 文献标志码: A 文章编号: 2097-0137(2024)03-0154-09

## Simulation of pyrolysis physical field and temperature optimization of the encapsulating materials of decommissioned Cu(InGa)Se<sub>2</sub> photovoltaic laminated module

HUANG Zhihao, WU Yusen, QIN Baojia, ZHU Jie, RUAN Jujun

School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China

**Abstract:** The composition and formation behavior of each component of decommissioned Cu(InGa)Se<sub>2</sub> module encapsulating materials at different pyrolysis temperature under nitrogen atmosphere were studied. In order to save energy and reduce carbon emissions, 467 °C was selected as the target pyrolysis temperature, while 438 °C and 497 °C were chosen as the control temperature. Simulation of thermal-flow compound physical field and model verification were conducted. And the actual target pyrolysis temperature and control temperature were adjusted to 490, 465 and 525 °C. It was found that when temperature was adjusted from 467 to 490 °C, the average temperature error of pyrolysis can be reduced from 57.18 °C to 5.76 °C, which was reduced by 89.93%. At the temperature of 490, 465 and 525 °C, when the temperature is above 200 °C, the average errors were only 3.62, 4.72 and 3.29 °C. It shows that the model has good accuracy and indicating effect in high temperature range.

**Key words:** decommissioned Cu(InGa)Se<sub>2</sub> photovoltaic laminated module; encapsulating material; pyrolysis; save energy and reduce carbon emissions

\* 收稿日期: 2024-02-23

录用日期: 2024-03-04

网络首发日期: 2024-04-01

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFC3906100); 国家自然科学基金(52170146); 广州市重点研发计划(202206010037)

作者简介: 黄智豪(1999生), 男; 研究方向: 固体废弃物资源化; E-mail: huangzh56@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 阮菊俊(1982生), 男; 研究方向: 固体废弃物资源化; E-mail: ruanjujun@mail.sysu.edu.cn

Cu(InGa)Se<sub>2</sub>薄膜光伏组件因其光电性能优异、稳定性和可靠性强等优势而受到业界的关注(褚家宝, 2009)。2017年Cu(InGa)Se<sub>2</sub>光伏层压件的产量为1.9 GW, 约占光伏市场份额的1.9%, 预计在2030年其占比将攀升至16.70%(Elshkaki et al., 2013; Nassar et al., 2016; Zhou et al., 2020)。由于紫外照射等环境因素, 光伏组件往往在服役20~30年后退役。废弃Cu(InGa)Se<sub>2</sub>光伏组件作为一种高度集成的工业产品, 蕴含着丰富的有机材料和稀贵金属(Bomhard, 2020)。探索退役Cu(InGa)Se<sub>2</sub>薄膜层压件的高效、高值、绿色回收途径对促进光伏产业的闭环发展具有重要意义。

封装材料的高效解离是退役光伏层压件资源化回收利用的难点所在(Deng et al., 2019; Li et al., 2023)。以具有典型封装结构的Cu(InGa)Se<sub>2</sub>光伏层压件为例, 回收高值金属元素的前提是彻底去除层压件表面的封装材料乙烯-醋酸乙烯共聚物(EVA)和聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)。当前, 热处理法被认为是实现退役光伏层压件解封分离的有效技术(Wang et al., 2022)。热处理法的原理是在空气、氮气或真空等氛围下, 通过燃烧、射频加热、直接热解或多步热解等方式对光伏层压件进行处理(Doni et al., 2012; Dias et al., 2017; Fiarrell et al., 2019; Riech et al., 2021), 利用高温将其中的EVA和PET等有机高分子聚合物分解(Bohland et al., 1997; Berger et al., 2010; Pagnanelli et al., 2017)。热处理法可以将光伏层压件表面的封装材料彻底去除, 得到较为纯净的电池片, 简化后续高值金属资源纯化分离流程, 降低回收成本(Palitzsch et al., 2012; Marwede et al., 2013)。

然而, 对于退役Cu(InGa)Se<sub>2</sub>光伏层压件的封装材料而言, 热解温度确定的相关研究仍有不足。过高的热解温度会导致有机高分子过度分解并生成大量CO<sub>2</sub>, 在带来高能耗和碳排放的同时导致有机资源的浪费, 而过低的热解温度则可能导致封装材料去除的不完全(赵江英等, 2018)。因此, 本文利用热重-质谱联用及热重-红外联用分析了退役Cu(InGa)Se<sub>2</sub>层压件封装材料在N<sub>2</sub>氛围下的热解产物成分, 探究了CO<sub>2</sub>和其他小分子有机物在热解过程中的生成行为差异。并利用热-流复合物理场模拟, 通过对目标热解温度的优化以确定补偿后的热解温度, 并验证了模型的准确性, 以达到提高热解过程中温度控制精确性的目的。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

Cu(InGa)Se<sub>2</sub>光伏层压件的外观及结构如图1所示。表面防水层材料为PET, 封装剂为EVA, 背板为不锈钢材质。本实验中所采用的主要设备为单温区热解管式炉(型号:OTF-1200X), 配套使用的实验耗材为管式炉石英管和刚玉坩埚。

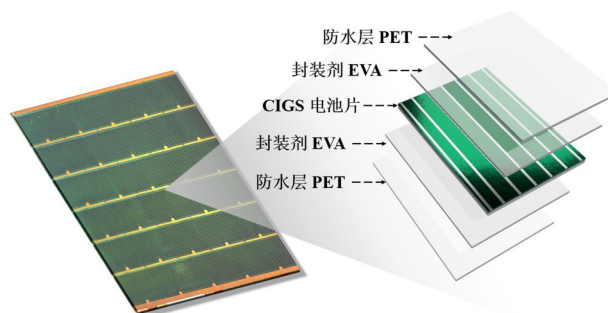


图1 Cu(InGa)Se<sub>2</sub>光伏层压件的外观及结构

Fig. 1 Appearance and structure of Cu(InGa)Se<sub>2</sub> photovoltaic laminated modules

### 1.2 实验方法

**1.2.1 热解产物分析** 利用热重-质谱联用(型号: 日本理学 Thermo plus EV2)和热重-红外联用仪(型号: NETZSCH STA 449F3)对层压件物料进行测试。测试温度为室温~800 °C, 升温速率为10 °C/min, 测试氛围为N<sub>2</sub>。

**1.2.2 热-流复合物理场模拟** 热-流复合物理场的仿真模拟通过COMSOL Multiphysics 6.0软件进行。对管式炉加热区、石英管、坩埚和Cu(InGa)Se<sub>2</sub>光伏层压件物料按照实物尺寸进行1:1等比例建模, 并在材料库中对模型中的固体、流体赋予相应材质。初始温度设置为303.15 K, 按照实际N<sub>2</sub>流速设置入口法向流入速度, 同时在N<sub>2</sub>开始流入的初始时刻设置阶跃函数以提高模型收敛性。为简化运算, N<sub>2</sub>流出口处边界条件设置为抑制回流, 对设置好的固体和流体传热物理场和层流物理场进行耦合。以min为时间单位, 对上述物理场进行瞬态研究。模拟计算以Cu(InGa)Se<sub>2</sub>光伏层压件物料的正中心点和坩埚近N<sub>2</sub>流出侧壁面中心点为对象, 创建三维截点数据集, 输出温度和时间关系。

**1.2.3 模拟温度验证** 实验中, 为保证实验中热解气态成分在生成后能被及时排出, 模拟验证实验中N<sub>2</sub>流速设置为0.2 L/min。热解程序终温分别

设置为 465、490 和 525 °C, 以 10 °C/min 的升温速率, 进行多次实验。在 N<sub>2</sub> 流出口侧使用红外测温枪对同侧坩埚侧壁面中心处进行测温并记录, 每两次测温时间间隔为 2 min。

**1.2.4 平均温差计算方法** 将对应时刻的实际温度与相同位置的模拟温度进行对比, 通过式(1)计算相应的温度误差, 来判断模型模拟温度的准确性:

$$\Delta T = \sum_{i=1}^n \frac{|T_{si} - T_{ai}|}{n}, \quad (1)$$

其中  $T_{si}$  为  $i$  时刻的模型模拟温度(°C);  $T_{ai}$  为  $i$  时刻的实际温度或程序温度(°C);  $n$  为热解温度达到稳定的时刻。当计算程序温度与模拟温度的平均温差时,  $n$  取后续 10 min 内物料温度变化不超过 1 °C 的时刻; 当计算坩埚侧壁面实际温度与模拟温度的平均温差时,  $n$  取坩埚内物料表面模拟温度进入有效的热解温度区间后的第 20 min。

## 2 结果与讨论

### 2.1 热解温度的分析及确定

利用 TG-MS 对层压件升温过程中产物的质荷比进行测定。如图 2 所示, 封装材料 EVA 和 PET 在热解过程中的主要分解产物为质荷比(M:Z)为 18、29、41 和 44 的小分子物质, 且 M:Z 为 44 的产物占比最大。当热解温度达到 439 °C 时, 这些产物的生成速率最大。通过检索比对, 推测 M:Z 为 44 的产物可能为乙醛、环氧乙烷、CO<sub>2</sub>、丙烷等。

为进一步明确热解产物的组分, 利用 TG-IR 对升温过程中热解气的组分进行官能团分析, 结果如图 3(a) 所示。对比选择在升温过程中吸收峰差异最大时所处温度的 IR 谱图进行分析, 结果如图 3(b) 所示。谱图中位于 2 344 cm<sup>-1</sup> 与 669 cm<sup>-1</sup> 的吸收峰分别为 CO<sub>2</sub> 的反对称性伸缩振动和变形振动的特征峰, 证明 M:Z 为 44 的产物中含有 CO<sub>2</sub> 组分(何睿, 2009; Felicia et al., 2017)。可以发现, 来自 CO<sub>2</sub> 的吸收峰强度随热解温度的升高呈现先增强后减弱的趋势, 并且在热解温度为 438 °C 时强度最大, 与 MS 测试结果中 M:Z=44 的最大产率温度接近。位于 2 931 cm<sup>-1</sup> 与 2 861 cm<sup>-1</sup> 的吸收峰来源于 CH<sub>2</sub> 的不对称和对称伸缩振动, 位于 1 344 cm<sup>-1</sup> 的吸收峰来源于 CH<sub>2</sub> 的摇摆振动, 位于 1 082 cm<sup>-1</sup> 的吸收峰来源于 C-O-C 的异相拉伸(Escalona et al., 1987; Štěpán et al., 2007; Lu et al., 2009)。这些官能团均来源于 EVA 和 PET 主链断裂分解生成的小分子化合物, 吸收峰的强度随温度升高也呈现先增强后

减弱的趋势, 强度在 467 °C 时最大。在热解温度逐渐升高的过程中, CO<sub>2</sub> 和其他有机小分子的生成规律存在一定差异: 1) 当热解温度较低时(约 410 °C), 封装材料的分解速率较低, 且 CO<sub>2</sub> 为主要热解产物。随着温度升高, CO<sub>2</sub> 的产率上升并于 438 °C 左右达到最大值; 2) 当热解温度较低时(约 410 °C), 有机小分子物质的产率很小, 随着温度升高至 467 °C, 其产率迅速增大并达到最高。

综上所述, 当热解温度为 410 °C 时, 热解产物主要成分为 CO<sub>2</sub>; 随着温度升高至 438 °C, CO<sub>2</sub> 和其他小分子有机物的产量均明显增加, 但 CO<sub>2</sub> 产率增速更为显著, 在产物中占比仍然较高; 随着温度升高, 产物中有机小分子产物含量持续增加, CO<sub>2</sub> 含量减少, 467 °C 时小分子有机物含量最高; 当热解温度持续升高至 497 °C, 产物中小分子有机物和 CO<sub>2</sub> 含量均下降; 但相比于 CO<sub>2</sub>, 小分子有机物产生速率下降幅度明显更快, 因此热解气体产物又将以 CO<sub>2</sub> 为主。

因此, 为了优化热解温度促进 Cu(InGa)Se<sub>2</sub> 封装材料向有机资源产物转化, 实验的目标热解温度确定为 467 °C, 并以热解产物组成变化的温度节点 438 °C 和 497 °C 作为对照温度。

### 2.2 热-流复合物理场模拟

利用 COMSOL Multiphysics 软件, 进行热-流复合物理场模拟, 以计算管式炉热解过程中的实际温度。当热解最终温度设置为 467 °C 时, 热解炉的程序温度与物料表面的模拟温度变化, 如图 4 所示。程序温度与模拟的物料表面温度始终存在较大差距, 且温差随着温度升高而增大; 当程序温度达到 467 °C 时温差最大, 为 86.27 °C。维持 467 °C 继续加热 30 min, 管式炉内物料的表面温度仅能达到 443.15 °C, 且该表面温度几乎不再随着时间的延长而升高。导致温度存在差异的原因可能是热解过程中的热量损失, 如持续输入的 N<sub>2</sub> 温度远低于热解温度, 气体的流动可能带走部分热量等。从开始升温至温度稳定的过程中, 模拟计算出的平均温差为 57.18 °C。因此, 通过模拟对热解温度进行优化调整是有必要的。

以 5 °C 为温度梯度, 探究热解温度从 475 °C 升温至 510 °C 时物料表面的温度情况。以物料表面的几何中心为温度采集点, 各热解终温下的物料表面温度如图 5 所示。可以发现, 在热解温度补偿至 475 °C 和 480 °C 的情况下, 物料的温度为 387.15 °C 和 392.94 °C; 即使经过 30 min 的保温, 物料表面

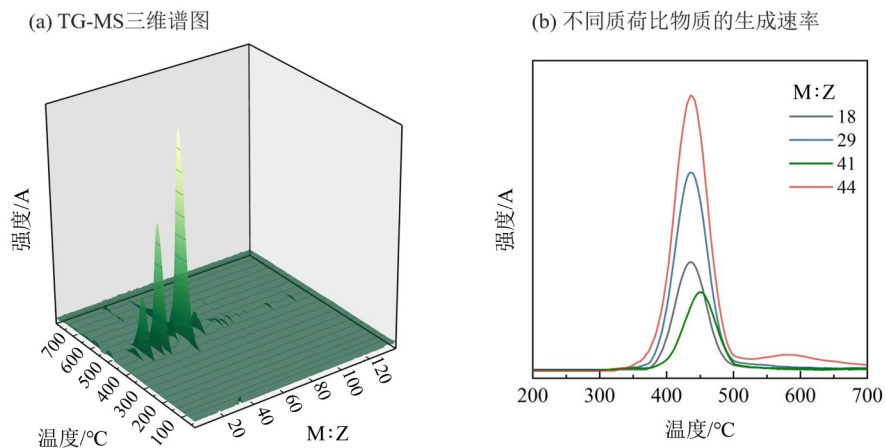


图2 TG-MS谱图和不同质荷比物质的生成速率

Fig. 2 The TG-MS spectrum and production rate of material with different mass-to-charge ratio

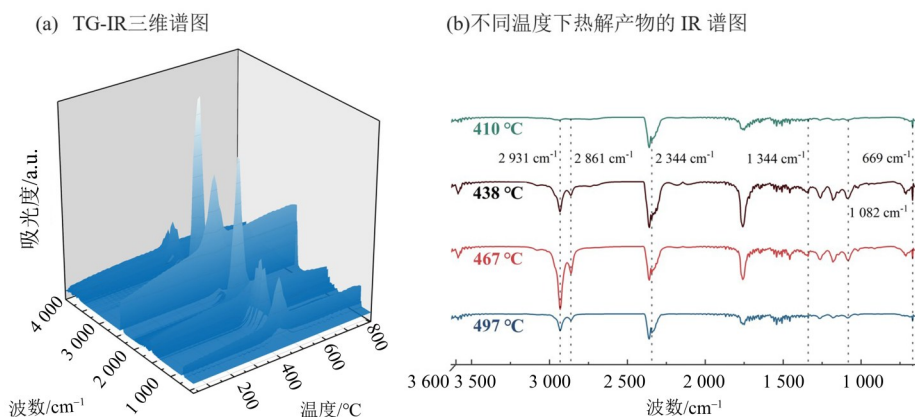


图3 TG-IR谱图和不同温度下热解产物的IR谱图

Fig. 3 The TG-IR spectrum and spectra of pyrolysis productions in different temperature

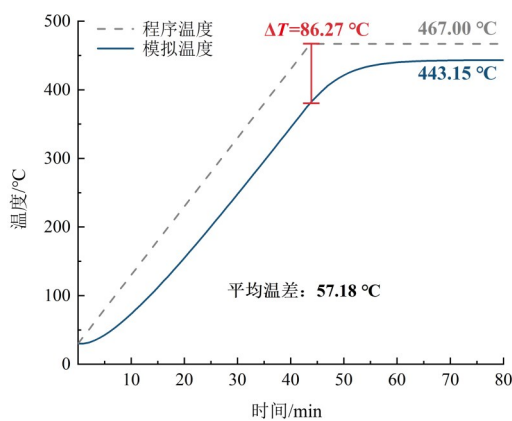


图4 程序温度和模拟的物料表面温度

Fig. 4 Program temperature and simulated temperature of material surface

温度也仅能达到 450.89 °C 和 455.81 °C, 距离 467 °C 的目标热解温度仍有一定距离。当热解温度升高至 485、490、495 和 500 °C 时, 物料表面温度分别为 397.26、402.64、406.76 和 412.25 °C。而经

过一段时间的保温后, 四个设定热解温度下的物料表面温度均能达到接近 467 °C。当温度热解升高至 505 °C 和 510 °C 时, 物料的表面温度能更快到达目标热解温度 467 °C, 但维持时间较短。因此, 选择 485、490、495 和 500 °C 四个热解终温进行进一步的对比分析。

485、490、495 和 500 °C 四个热解终温下, 物料表面温度的变化如图 6 所示。以 (467±5) °C 为有效区间, 可见热解温度为 500、495 和 490 °C 时, 物料表面温度先后依次到达有效温度区间; 而 485 °C 的热解温度则无法使物料表面温度达到 462 °C 的有效温度区间下限。500 °C 的热解温度虽然可以使物料表面温度率先到达有效温度区间, 但维持在有效区间内的时间较短, 仅为 8 min 左右。当热解终温设定为 495 °C 时, 58 min 时物料表面温度到达 462.40 °C 进入有效温度区间, 并在之后的 30 min 内均能维持在有效温度区间之内, 最高温度则接近 471 °C。当热解终温设定为 490 °C

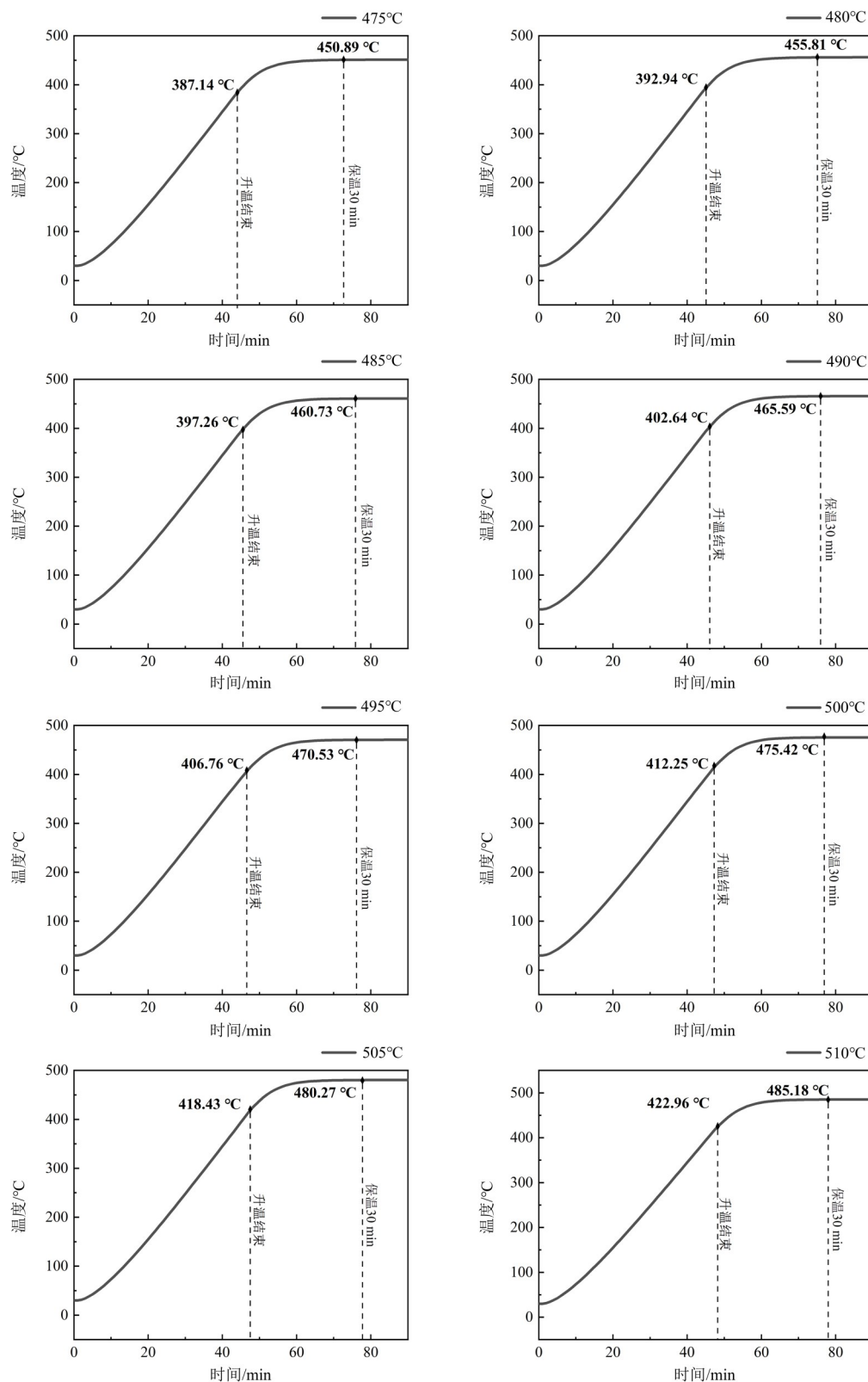


图5 475~510 °C时模拟的物料表面温度

Fig. 5 The simulated temperature of material surface at pyrolysis temperature from 475 °C to 510 °C

时, 61 min时物料表面温度到达462.45 °C, 然后温度升高并最终维持在466 °C附近, 与目标温度467 °C更为接近。与495 °C热解终温相比, 490 °C

的热解温度在规模化处理中能降低能源消耗。因此, 初步以490 °C作为优化补偿后的热解终温。

当热解终温为490 °C、升温速率为10 °C/min、

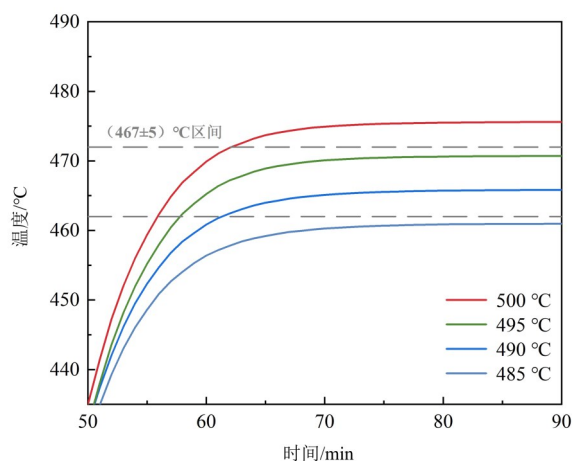
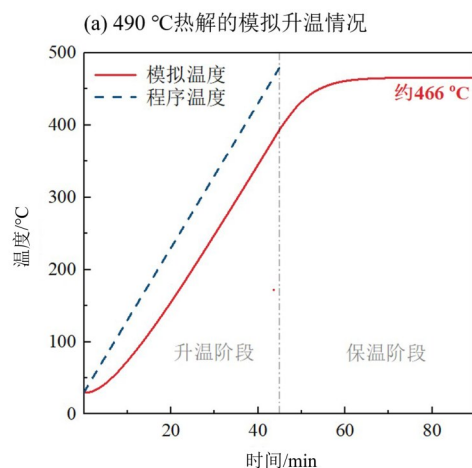


图6 四种热解终温下物料表面的升温过程

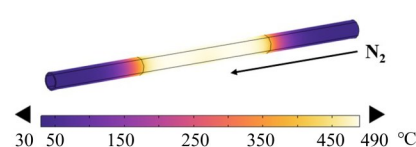
Fig. 6 The temperature curve of material surface when pyrolysis temperature is 485, 490, 495, and 500 °C

N<sub>2</sub> 流速为 0.2 L/min 并保温约 15 min 时, 物料表面温度的升温过程如图 7(a) 所示。图中, 物料表面的温度稳定在 (467±5) °C 附近并持续了 30 min 以上。物料表面温度为 466 °C 时, 坩埚、Cu(InGa)Se<sub>2</sub> 光伏层压件物料和石英管的温度分布如图 7(b) 所示。由图可知, 物料表面温度分布均匀, 温度差不超过 1 °C。据此确定 Cu(InGa)Se<sub>2</sub> 层



(a) 490 °C 热解的模拟升温情况

(b) 石英管温度分布情况



(c) 装有物料的坩埚温度分布

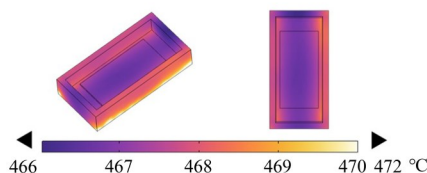


图7 490 °C 时物料表面模拟升温情况和石英管、坩埚的温度分布情况

Fig. 7 The simulation temperature distribution of quartz tubes, crucibles and temperature change of material surface of 490 °C pyrolysis temperature

综上所述, 对照实验温度 438 °C 和 497 °C 的优化补偿温度分别为 465 °C 和 525 °C。热解终温设置为 465 °C 时, 升温程序运行至 55 min 后停止加热并保温约 11 min, 可使物料表面温度稳定在 (438±5) °C 并持续 30 min 以上。物料表面温度达到 438 °C 时, 坩埚和石英管的温度分布如图 9(b) 所示。热解终温设置为 525 °C 时, 停止加热并保温

压件封装材料的热解转化参数 N<sub>2</sub> 流速为 0.2 L/min, 热解前通入 N<sub>2</sub> 约 30 min, 终温 490 °C, 升温速率 10 °C/min, 温度达到 490 °C 后停止加热并通过余热保温, 随后自然冷却至室温。

同理, 利用模拟计算寻找对照实验温度 438 °C 和 497 °C 的优化补偿温度。以 (438±5) °C 为有效区间, 455、460、465 和 470 °C 四个热解终温时的物料表面温度变化如图 8(a) 所示。当热解终温为 460 °C 和 465 °C 时, 物料表面温度维持在 (438±5) °C 有效区间内的时间较长, 但前者进入有效区间的时间比后者推迟了 10 min 以上。因此, 选择 465 °C 作为对照实验温度 438 °C 的优化补偿温度。以 (497±5) °C 为有效区间, 515、520、525 和 530 °C 四个热解终温时的物料表面温度变化如图 8(b) 所示。当热解终温设置为 520 °C 和 525 °C 时, 物料表面温度维持在 (497±5) °C 有效区间内的时间较长。而当热解终温为 525 °C 时, 物料温度能稳定在约 499 °C, 与对照实验温度 497 °C 接近, 且进入有效区间的时间比热解终温为 520 °C 时提前了接近 4 min。因封装材料的热解速率较快, 为确保热解过程的准确性应当尽量缩短升温时间, 确定 525 °C 为对照实验温度 497 °C 的优化补偿温度。

约 12 min 后物料表面温度可维持在 (497±5) °C 的温度范围。物料表面温度达到 497 °C 时, 坩埚和石英管的温度分布如图 10(b) 所示。

### 2.3 模型准确性验证

为验证模拟模型的准确性, 采用红外测温枪对坩埚近 N<sub>2</sub> 流出侧的外壁进行温度测定, 并与模拟的坩埚温度进行对比。490 °C 的优化补偿温度

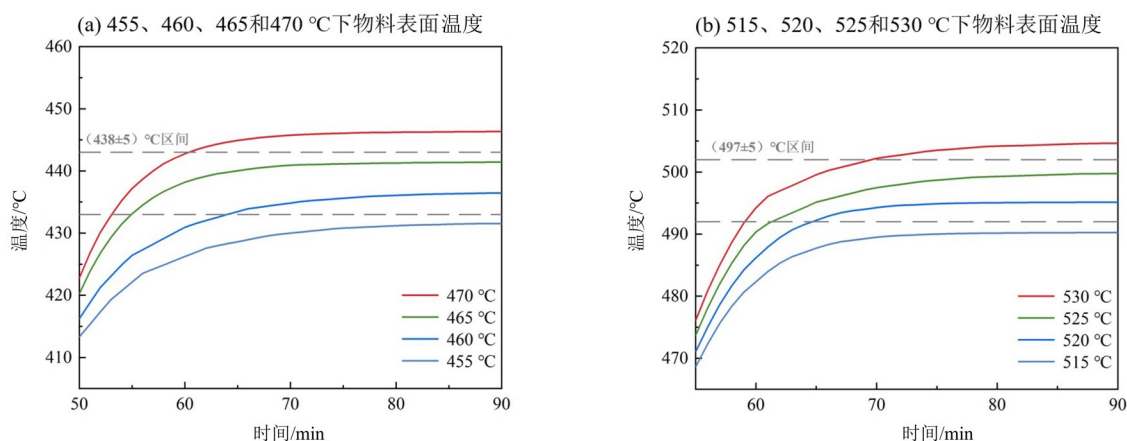


图8 四种热解终温下物料表面的升温过程

Fig. 8 The temperature of material surface when pyrolysis temperature is (a) 455, 460, 465, 470 °C and (b) 515, 520, 525, 530 °C

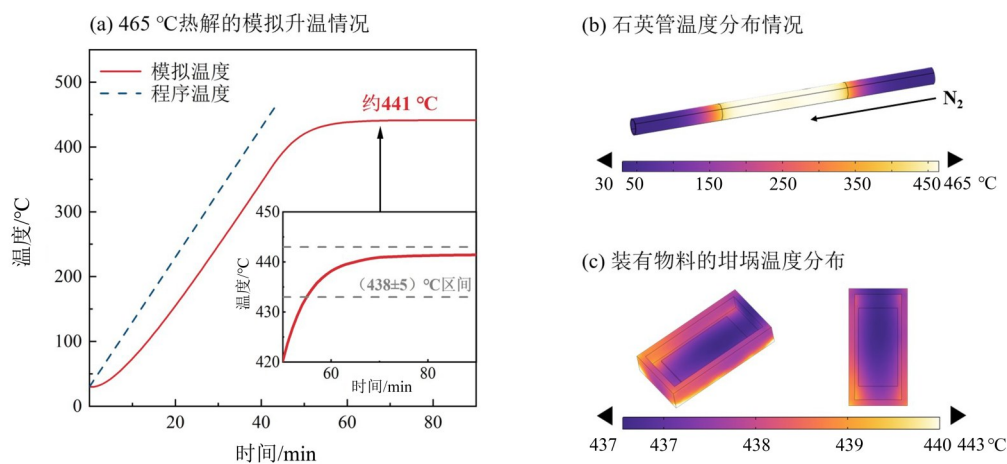


图9 465 °C时物料表面模拟升温情况和石英管、坩埚的温度分布

Fig. 9 The simulation temperature distribution of quartz tubes, crucibles and temperature change of material surface of 465 °C pyrolysis temperature

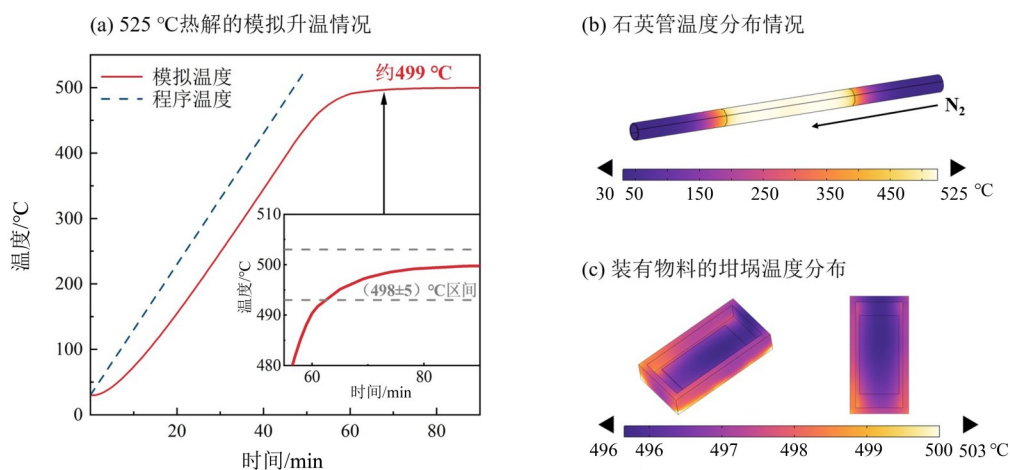


图10 525 °C时物料表面模拟升温 and 石英管、坩埚的温度分布情况

Fig. 10 The simulation temperature distribution of quartz tubes, crucibles and temperature change of material surface of 525 °C pyrolysis temperature

时, 红外测温 and 模型模拟结果的对比如图 11 所示。在 200 °C 以下的低温热解阶段中, 红外测温枪的实际温度与模拟温度之间的差值较大, 平均误差约为 11.19 °C; 实际温度与模拟温度的差值最大值为 19.67 °C, 但此阶段温度远远未达到封装材料的热解起点, 故对热解过程不产生影响。当温度到达 200 °C 以上时, 平均温差下降至 3.62 °C。当模拟过程中的物料表面温度进入有效温度区间后(从第 61 min 开始的 30 min 内), 所测得的实际温度与模拟温度的差值不超过 3.89 °C, 平均温度误差缩小至 2.83 °C。升温加热及保温过程中的模拟温度与实际温度的平均温差为 5.76 °C。相比优化补偿之前, 温度误差降低了 89.93%, 这说明基于热-流复合物理场模拟的温度优化补偿对热解过程的精准控温具有重要的参考意义。

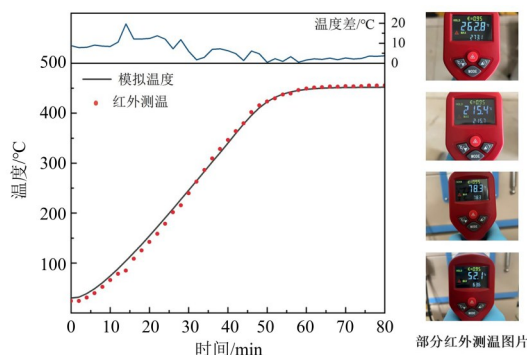


图 11 490 °C 热解过程的实际温度与模拟温度

Fig. 11 Actual temperature and simulated temperature during pyrolysis process at 490 °C

465 °C 和 525 °C 的优化补偿温度时, 红外测温 and 模型模拟结果的对比如图 12 所示。在图 12(a) 中, 当热解温度低于 200 °C 时, 模拟温度与红外测温枪的实际温度相差较大。但随着温度的升高, 温度误差逐渐缩小。当模拟的物料表面温度达到 200 °C 以上时, 其与实际温度的误差下降至 4.72 °C; 当模拟的物料表面温度进入 (438±5) °C 的有效温度区间时, 其与实际温度的误差进一步降低至 3.39 °C, 且全程温度误差为 6.18 °C。在图 12(b) 中, 当热解温度低于 200 °C 时, 模拟温度与红外测温枪的实际温度差值为 11.89 °C; 当热解温度进入高于 200 °C 的高温段时, 模拟的物料表面温度与实际温度的差值下降至 3.29 °C; 当模拟的物料表面温度进入 (497±5) °C 的有效区间后, 其与实际温度的误差进一步降低为 2.14 °C, 且全程的温度误差为 5.58 °C。这表明模拟模型在高温段能

表现出较高的准确性, 并且模拟温度和实际温度的误差随着热解温度的升高而降低。由于封装材料 EVA 和 PET 的热解起始温度远高于 200 °C, 因此该模型能够为其热解研究提供更为精确的控温参考。

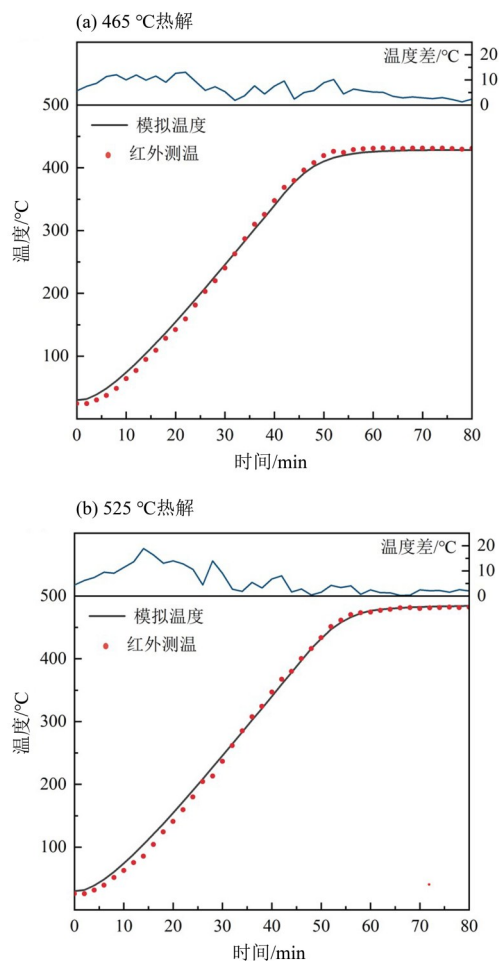


图 12 465 °C 和 525 °C 热解过程的实际温度与模拟温度

Fig. 12 Actual temperature and simulated temperature during pyrolysis process at 465 °C and 525 °C

### 3 结论

1) 通过 TG-MS 和 TG-IR 分析可知, CO<sub>2</sub> 的生成规律和其他有机小分子相比存在一定差异。当热解温度低于 438 °C 时封装材料的热解速率较小, 气态产物主要成分为 CO<sub>2</sub>, 且 CO<sub>2</sub> 产率在 438 °C 时达到最高。随着热解温度上升, 有机小分子产率迅速增加并于 467 °C 时达到最大, 此时有机小分子在热解产物中的占比最大。当温度持续增加时, 有机小分子产率大幅降低, 直至 497 °C 时热解气体产物再次以 CO<sub>2</sub> 为主要成分。故将 467 °C 选定为封装材料资源化转化和节能降碳的目标热解温度。

2) 利用 COMSOL Multiphysics 软件对热解实验环境进行模拟仿真。发现当温度优化补偿至 490 °C 时可使物料表面温度稳定在目标热解温度 467 °C 附近, 模型模拟结果与实际测温结果的平均误差为 5.76 °C, 相比优化前的模拟温度误差降低了 89.93%。经计算, 确定对照实验温度 438 °C 和 497 °C 的对应优化补偿温度分别为 465 °C 和

525 °C, 热解全过程的平均温度误差分别约为 6.17 °C 和 5.58 °C。

3) 经过验证和分析发现, 本研究中建立的模型在高温段(200 °C 以上)具有良好的准确性, 且涵盖了 EVA 和 PET 发生热解时的起始温度, 能对实际热解情况下物料表面的温度起到有效的指示作用。

### 参考文献:

- 褚家宝, 2009. 铜铟镓硒(CIGS)薄膜太阳能电池研究[D]. 上海: 华东师范大学.
- 何睿, 2009. 基于红外光谱吸收原理的二氧化碳气体检测系统的设计与实验研究[D]. 吉林: 吉林大学.
- 赵江英, 王刚, 2018. 废旧晶硅太阳能组件回收技术的发展现状[J]. 再生资源与循环经济, 11(6): 29-31.
- BERGER W, SIMON F, WEIMANN K, et al, 2010. A novel approach for the recycling of thin film photovoltaic modules[J]. Resour Conserv Recy, 54: 711-718.
- BOHLAND J, ANISIMOV I, 1997. POSSIBILITY of recycling silicon PV modules[C]//IEEE Photovolt Spec Conf. IEEE: 1173-1175.
- BOMHARD E M, 2020. The toxicology of gallium oxide in comparison with gallium arsenide and indium oxide[J]. Environ Toxicol Pharmacol, 80: 103437.
- DENG R, CHANG N L, OUYANG Z, et al, 2019. A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling[J]. Renew Sustain Energy Rev, 109:532-550.
- DIAS P, JAVIMCZIK S, BENEVIT M, et al, 2017. Recycling WEEE: Polymer characterization and pyrolysis study for waste of crystalline silicon photovoltaic modules [J]. Waste Manag, 60: 716-722.
- DONI A, DUGHIERO F, 2012. Electrothermal heating process applied to C-Si PV recycling[J].IEEE Photovolt Spec Conf. IEEE: 757-762.
- ELSHKAKI A, GRAEDEL T, 2013. Dynamic analysis of the global metals flows and stocks in electricity generation technologies[J]. J Clean Prod, 59: 260-273.
- ESCALONA P E, ZECCHINA A, 1987. IR-Spectroscopic investigation of ethylene oxide adsorption and polymerization on MgO[J]. J catal, 104: 299-306.
- FELICIA S, JOSEF V, PETER R, et al, 2017. Response-surface fits and calibration transfer for the correction of the oxygen effect in the quantification of carbon dioxide via FTIR spectroscopy [J]. Anal Chim Acta, 972: 16-27.
- FIARRELL C, OSMAN A I, ZHANG X, et al, 2019. End-of-life of silicon PV panels: A sustainable materials recovery process[J]. Waste Manag, 84: 91-101.
- LI X, MA B, WANG C, et al, 2023. Recycling and recovery of spent copper-indium-gallium-diselenide (CIGS) solar cells: A review[J]. Int J Miner Metall Mater, 30: 989-1002.
- LU M, RUNT J, PAINTER P, 2009. An infrared spectroscopic study of a polyester copolymer ionomer based on poly(ethylene oxide)[J]. Macromolecules, 42: 6581-6587.
- MARWEDE M, BERGER W, SCHLUMMER M, et al, 2013. Recycling paths for thin-film chalcogenide photovoltaic waste-current feasible processes [J]. Renew Energy, 55: 220 - 229.
- NASSAR N T, WILBURN D R, GOONAN T G, 2016. Byproduct metal requirements for U.S. wind and solar photovoltaic electricity generation up to the year 2040 under various clean power plan scenarios[J]. Appl Energy, 183: 1209-1226.
- PAGNANELLI F, MOSCARDINI E, GRANATA G, et al, 2017. Physical and chemical treatment of end of life panels: An integrated automatic approach viable for different photovoltaic technologies [J]. Waste Manag, 59: 422-431.
- PALITZSCH W, LOSER U, 2012. Economic PV waste recycling solutions -results from R&D and practice[R]. Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference: 628-631.
- RIECH I, CASTRO-MONTALVO C, WITTERSHEIM L, et al, 2021. Experimental methodology for the separation materials in the recycling process of silicon photovoltaic panels[J]. Materials, 14(3): 581.
- ŠTEPÁN P, LUDKA M, FRANTIŠEK R, 2007. Adsorption of poly(ethylene oxide)-block-poly lactide copolymers on polylactide as studied by ATR-FTIR spectroscopy[J]. J Colloid Interf Sci, 308: 291-299.
- WANG X, TIAN X, CHEN X, et al, 2022. A review of end-of-life crystalline silicon solar photovoltaic panel recycling technology [J]. Sol Energy Mater Sol Cells, 248: 111976.
- ZHOU Y, LI J, RECHBERGER H, et al, 2020. Dynamic criticality of by-products used in thin-film photovoltaic technologies by 2050[J]. J Clean Prod, 263:121599.