

退役晶硅光伏组件热解工艺的 HAZOP 分析与安全对策研究

宁宝育

克拉玛依区应急管理局 新疆克拉玛依

【摘要】针对退役晶硅光伏组件工业化热解过程中潜在的安全风险，基于退役光伏组件热解工艺流程、物料特性及危险有害因素分布，将工艺系统划分为原料接收与预处理、热解核心、尾气处理、资源分选与回收、危险物料储存、公用辅助六个评价单元，运用危险与可操作性分析（HAZOP）方法进行系统性风险识别。分析表明，风险主要集中在热解核心单元（温控、氧含量、负压与密封失效导致热解失控及可燃气体积聚）、危险物料储存单元（热解油按甲类易燃液体管理）以及尾气处理单元（HF、VOCs 及酸性气体泄漏造成环境污染与人员健康危害）。在落实温度联锁、氧含量联锁、负压控制、静电接地、泄漏收集、尾气净化、消防保障及应急切断等措施后，风险可控制在可接受范围内。研究为退役光伏组件热解工艺的工程设计及安全运行提供了系统化风险防控参考。

【关键词】退役光伏组件；热解；HAZOP；风险

【收稿日期】2026 年 6 月 12 日

【出刊日期】2026 年 7 月 15 日

【DOI】10.12208/j.jer.20260046

HAZOP analysis and safety countermeasure research on pyrolysis process of decommissioned crystalline-silicon photovoltaic modules

Baoyu Ning

Emergency Management Bureau of Karamay District, Karamay, Xinjiang

【Abstract】 Aiming at the potential safety risks during the industrial-scale pyrolysis of decommissioned crystalline-silicon photovoltaic modules, this study systematically identified risks by adopting the Hazard and Operability (HAZOP) method. Based on the pyrolysis process flow, material properties and distribution of hazardous factors, the process system was divided into six evaluation units: raw material receiving and pretreatment, core pyrolysis, tail-gas treatment, resource separation and recovery, hazardous material storage, and utility auxiliary system. The analysis results indicate that major risks are concentrated in the core pyrolysis unit (runaway pyrolysis and combustible gas accumulation caused by failures of temperature control, oxygen-content monitoring, negative-pressure maintenance and equipment sealing), hazardous-material storage unit (pyrolysis oil shall be managed as Category-A flammable liquid), and tail-gas treatment unit (environmental pollution and human health hazards resulting from leakage of HF, VOCs and acid gases). After implementing safety measures including temperature interlock, oxygen-content interlock, negative-pressure regulation, electrostatic earthing, leakage collection, tail-gas purification, fire-protection guarantee and emergency shut-off, relevant risks can be controlled within an acceptable range. This research provides a systematic risk-prevention reference for the engineering design and safe operation of the pyrolysis process for decommissioned photovoltaic modules.

【Keywords】 Decommissioned photovoltaic modules; Pyrolysis; HAZOP; Risk

随着光伏组件逐渐进入退役期，其处置成为行业焦点。热解法因能高效分离乙烯-醋酸乙烯酯共聚物（EVA）胶膜并一步资源回收，被视为极具潜力的处理方法。热解法是指在高温（通常 400-650℃）、绝氧或可控气氛环境条件下，使退役光伏中有机物气化并与

固体分离，热解过程中可能产生含氟废气、挥发性有机物（VOCs）及二噁英等有害物质。此外，设备投资与运营成本高，要求工艺稳定，因此，系统性的安全风险评估至关重要。危险与可操作性分析（HAZOP）是化工及连续生产系统中成熟的风险识别工具，通过引导

词与工艺参数结合,能系统化识别潜在偏差、后果及现有保护措施。将其应用于新兴的光伏热解工艺,有助于提升工程安全性。

1 退役光伏组件组分及热解特性

1.1 退役光伏组件的组成

目前仍以晶硅基光伏组件为主,主要包括前板,3.2mm 超白压花玻璃(占比约 68%);封装胶膜,EVA(乙烯-醋酸乙烯酯共聚物,占比约 10%),高温下易分解产生乙酸、醛类等^[1];电池片,单/多晶硅片+银栅线+铝背场(含微量铅、镉等重金属)^[2];背板:TPT/TPE 结构(含氟聚合物,热解可能释放 HF、二噁英前体);边框,铝合金(占比约 10%)。

退役光伏组件的功率年均衰减率 0.5-2%,25 年后效率可能降至初始值的 80-85%^[3,4],同时老化会导致电气特性变化^[5];在物理缺陷方面,封装材料劣化,降低透光率并增加反射损失;电池结构损伤及失效;而且,老化后退役光伏组件中的 EVA 与电池紧密粘合。

1.2 退役光伏组件热解特性

热解是一种在无氧或缺氧环境下,通过高温分解高分子聚合物的热化学过程。

①EVA 热解

目前有研究采用热重分析(TGA)和动力学模型(如弗里德曼微分等转化率法、Ozawa 法、DAEM)来研究 EVA 的热解动力学,并表明,EVA 分解通常分为两个阶段^[6,7]:

第一阶段(脱乙酰化):在较低温度下(如 304-404℃或 280-430℃),主要发生 C-O 和 C=O 键断裂,释放乙酸,该阶段活化能相对较低。在约 280-350℃,酯基主要转化为乙酸并释放小分子^[8];

第二阶段(主链断裂):在较高温度下(如 404-511℃或 430-530℃),主要发生主链 C-C 键断裂,生成烯烃和烷烃,此阶段活化能显著高于第一阶段^[8]。

②背板 PVDF 热解

除了 EVA,背板材料[如 TPT、聚氟乙烯(PVF)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)、聚偏氟乙烯(PVDF)]的热分解机制也至关重要。Wang J 等^[1]指出,TPT 背板在 500℃时有机组分完全降解,但仍有约 17%的残渣,主要为碳和无机填料(如 TiO₂ 和 CaCO₃)^[9]。PVF 和 PVDF 的热解则始于端基单元的脱离,随后链单元依次脱离。PVDF 热解还可能产生特定有毒气体^[10]。

当前工业化可能采用低温热解与机械剥离组合的方法,通过温度控制实现 EVA 热解不碳化,而后进行机械剥离和分选。如图 1 所示,其处理过程主要包括以下四个工段。

2 HAZOP 评价与安全对策研究

2.1 评价单元划分

根据《安全预评价导则》以及退役光伏组件热解工艺流程、物料特性和危险有害因素分布特点,结合相对独立性、完整覆盖、针对性等原则,划分为 6 个单元及子单元,见下表 1。

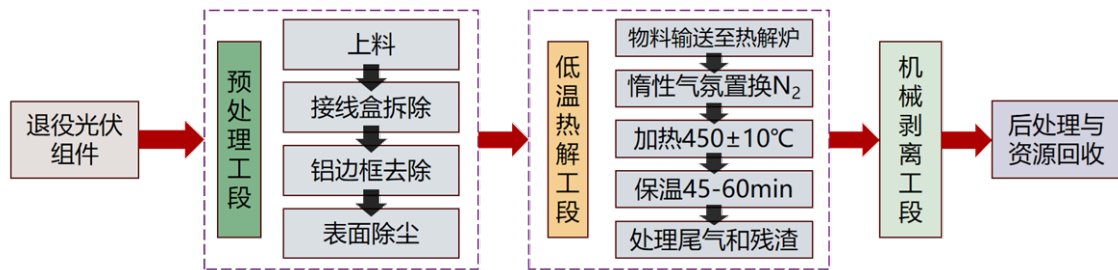


图 1 退役光伏组件热解工艺流程

表 1 评价单元划分

评价单元	子单元	划分依据
1.原料接收与预处理单元	拆框/拆接线盒区、除尘系统	涉及机械切割、粉尘爆炸风险
2.热解核心单元	网带式热解炉本体、氮气保护系统、尾气收集管道	高温、可燃气体、HF 释放风险集中区
3.尾气处理单元	冷凝器、碱喷淋塔、活性炭吸附装置	化学腐蚀、有毒气体泄漏风险
4.资源分选与回收单元	分选线、磁选/风选设备、硅片暂存区	破损硅片粉尘、金属短路风险
5.危险物料储存单元	热解油储罐区(10m ³)、危废暂存间	火灾爆炸、泄漏污染风险
6.公用辅助单元	氮气站、消防水池、控制室	系统失效导致连锁事故风险

2.2 主要危险、有害物质辨识

退役光伏组件热解过程中，主要涉及的主要危险有害物质氮气、天然气、热解油、热解尾气/冷凝液中含有的乙酸、轻烃、非甲烷总烃、少量含氟气体（以 HF 为代表）、喷淋吸收液（如氢氧化钠溶液）以及检维修、化验过程中可能使用的少量酸碱试剂等。

根据《危险化学品目录(2015 年版,2026 年调整)》，该项目涉及的天然气、氢氧化钠以及实际生产和检查维修过程中可能使用的氢氟酸、盐酸、硝酸等酸碱试剂属危险化学品。项目产生的热解油虽不一定以单一品名直接列入目录，但其具有明显的易燃性、挥发性和火灾爆炸危险性，应按易燃液体进行管理。其次，本项目天然气由厂区管网直接供给，不设置天然气储存设施。因此，天然气主要危险性体现在管道输送、调压、计量、

使用及阀门连接部位，其危险特性主要为泄漏后遇明火、高温表面或静电火花可能引发火灾、爆炸事故，而不构成储存型重大危险源。热解油及热解尾气为混合物，其理化性质应以实际检测结果为准，并按可燃、有毒、腐蚀性介质进行管理^[11]。

因此，主要危险、有害物质的理化性质如下表 2。

2.3 HAZOP 分析结果

HAZOP 分析主要针对热解系统及其附属单元进行，选取关键节点，分析工艺参数偏差、原因、后果及防护措施。结合本项目工艺特点，分析以下 6 个分析节点：原料接收与预处理单元、热解核心单元、尾气处理单元、资源分选与回收单元、危险物料储存单元、公用辅助单元，分析结论汇总表见表 3。

表 2 主要危险化学品理化及危险特性一览表

物料名称	化学式/主要成分	相态 (20℃)	闪点 (℃)	自燃点 (℃)	爆炸极限 (v%)	职业接触毒物 危害程度分级	危险性类别	是否重点 监管
天然气 (管网供给)	以 CH ₄ 为主，含少量 C ₂ H ₆ 、C ₃ H ₈ 等	气体	-	约 537	5.0~15.0	-	易燃气体	是
氮气	N ₂	气体	-	-	-	-	惰性气体、 窒息性气体	否
热解油	复杂混合物，主要含 乙酸衍生物、长链 烃、酯类、酰胺类等	液体	约 22~ 60	待测	待测	-	可燃液体、 刺激性混合物	是
热解尾气	以轻烃、CO ₂ 、乙酸 蒸气、少量含氟气体 等为主	气体	-	-	约 2.0~15.0 (按可燃组分计)	-	可燃、有毒、 腐蚀性混合气体	否
乙酸	CH ₃ COOH	液体	39	426	4.0~17.0	中度危害	易燃液体、 酸性腐蚀品	否
轻烃类气体	CH ₄ 、C ₂ H ₄ 、C ₂ H ₆ 、 C ₃ H ₆ 等	气体	-	约 430~ 540	2.0~15.0 (按混合气体)	-	易燃气体	否
氟化氢	HF	气体	-	-	-	高度危害	有毒、腐蚀性气体	是
氢氧化钠溶液	NaOH	液体	-	-	-	中度危害	强碱性腐蚀品	否
盐酸	HCl	液体	-	-	-	中度危害	酸性腐蚀品	否
硝酸	HNO ₃	液体	-	-	-	中度危害	强氧化性酸、腐蚀品	否

表 3 HAZOP 分析汇总表

单元	风险特征	风险等级判断	重点控制措施
原料接收与预处理单元	机械伤害、粉尘逸散、误操作	中等风险	来料验收、除尘、防护和培训
热解核心单元	高温失控、氧含量异常、负压不足、可燃气积聚	高风险	温控连锁、氧含量连锁、密封与负压控制
尾气处理单元	HF、VOCs、酸性气体逸散，净化失效	高风险	密闭收集、冷凝、喷淋、活性炭吸附、在线监测
资源分选与回收单元	分选不彻底、粉尘、混料、破损	中等风险	分级控制、除尘、标识和缓冲输送
危险物料储存单元	甲类热解油火灾爆炸、药剂泄漏、危废管理失控	极高风险	独立布置、围堰、防静电、连锁切断、禁火管理
公用辅助单元	供电、供气、供水、消防、自控失效放大主风险	中高风险	双回路、备用机组、定期联动试验、冗余控制

HAZOP 分析表明,风险主要集中在以下三个方面:

(1) 热解核心单元:温控、氧含量、负压与密封失效可能导致热解失控和可燃气体积聚;

(2) 危险物料储存单元:热解油按甲类管理,是本项目最重要的防火防爆控制区域;

(3) 尾气处理单元:HF、VOCs 及酸性气体若收集净化失效,将造成环境污染和人员健康危害。

2.4 安全对策

(1) 热解过程安全控制

热解炉应采用密闭式结构,运行过程中保持惰性气氛,氮气置换后方可升温;炉内氧含量应控制在设定范围内,建议设置氧含量超限联锁停加热;热解温度、压力、炉内负压、尾气温度等应在线监测并连锁控制。

(2) 防止可燃气体聚集

热解尾气应全程密闭收集,严防泄漏;引风系统应保持恒定负压,设置风机备用系统和压差报警。

(3) 尾气治理技术措施

尾气净化采用“冷凝—喷淋/碱洗—活性炭吸附”等组合工艺;对 HF、VOCs、酸性气体和颗粒物应进行有效去除;尾气处理设施应设置在线监测,确保达标排放。

(4) 热解油与可燃液体管理

热解油按甲类可燃液体管理,储罐独立布置;储罐应设置高高液位联锁、液位报警、呼吸阀、防静电接地和围堰;装卸过程应控制流速,严禁明火和非防爆设备进入。

(5) 机械分选与粉尘防控

拆解、切割、筛分、风选等环节应采取局部抽风除尘;粉尘易积聚部位应定期清扫,防止二次扬尘和积尘火灾。

(6) 危化品与危废管理

化验试剂、清洗剂、溶剂及危废应分类存放,严禁混放混存;危废暂存间应防渗、防雨、防扬散,并设置明显标识和台账管理。

(7) 事故切换与应急处置

应设置事故应急池,事故废水、泄漏液体和消防废水应能切换收集;重点危险设备应预设紧急切断措施,事故时可快速停料、停热、停气。

(8) 作业管理

动火、受限空间、临时用电、吊装等危险作业应执行审批制度,落实现场监护;新工艺、新设备、新材料投用前应进行专项安全确认和人员培训。

3 结论与建议

(1) 针对退役光伏组件热解工艺中原料接收与预处理、热解核心、尾气处理、资源分选与回收、危险物料储存、公用辅助六个评价单元,HAZOP 分析显示风险集中于热解核心、危险物料储存、尾气处理单元。

(2) 主要风险有包括温控、氧含量、负压与密封失效可能导致热解失控和可燃气体积聚,热解油易燃易爆,HF、VOCs 及酸性气体环境污染和人员健康危害。建议在工艺过程中,做好相应风险的防控工作。

(3) 在落实温度联锁、氧含量联锁、负压控制、静电接地、泄漏收集、尾气净化、消防保障及应急切断措施后,风险可控制在可接受范围内。

参考文献

- [1] Wang J, Feng Y, Huang Q, et al. Unraveling the pyrolysis behavior and Co-pyrolysis characteristics of EVA and back-sheet in spent crystalline silicon photovoltaic Modules [J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 506: 160164.
- [2] Li F, Shaw S, Libby C, et al. A review of toxicity assessment procedures of solar photovoltaic Modules [J]. Waste Management, 2024, 174: 646–665.
- [3] G.A. Heath, T.J. Silverman, M. Kempe, et al. Research and development priorities for silicon photovoltaic module recycling to support a circular economy[J]. Nat. Energy 7 (2020) 502–510.
- [4] De Oliveira M C C, Cassini D A, Diniz A S A C, et al. Comparison and analysis of performance and degradation differences of Crystalline-Si photovoltaic modules after 15-years of field Operation [J]. Solar Energy, 2019, 191: 235–250.
- [5] Huang C, Wang L. Simulation study on the degradation process of photovoltaic Modules [J]. Energy Conversion and Management, 2018, 165: 236–243.
- [6] Zhao Z, Pang Y, Zhang T, et al. Pyrolysis Kinetic Analysis of Decommissioned Photovoltaic Encapsulation Films [J]. Theoretical and Natural Science, 2025, 118(1): 85–93.
- [7] Feng Y, Wang J, He Y, et al. Unveiling the pyrolysis mechanism of organic compounds in waste CIGS photovoltaic Modules [J]. Polymer Degradation and Stability, 2026, 244: 111811.
- [8] Han J, Yuan H, Zhang X, et al. Evolution mechanism and pyrolysis strategy of ethylene–vinyl acetate copolymers for

- recycling of the end-of-life photovoltaic modules via PCMW2D and 2D-COS Analysis [J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 512: 162714.
- [9] Yan G, Liu S, Zhang J, et al. An efficient method for the recovery of waste crystalline silicon photovoltaic modules: Solvent steam and pyrolysis Techniques [J]. Separation and Purification Technology, 2026, 382: 135795.
- [10] Wang J, Feng Y, Shi M, et al. A comparative study of mechanical crushing and pyrolysis techniques for separation and recovery of discarded polycrystalline silicon photovoltaic Modules [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2024, 275: 113020.
- [11] 黄茜,张瑜.危险废物处置企业危险化学品使用风险评估 [J].当代化工研究,2026,(2):116-118.
- 版权声明:** ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

**OPEN ACCESS**