

数值算法驱动太阳光热界面高效减量膜浓缩垃圾渗滤液

设计说明书

设计者：赵子敬 刘瑜哲 冉欣雨 林靖杰 文字祥

指导教师：路璐

（哈尔滨工业大学（深圳），理学院/环境工程与技术/计算机科学与技术学院，
深圳，518000）

作品内容简介

膜浓缩液的无害化处置是垃圾渗滤液全量化处置的关键，热蒸发可有效减量膜浓缩液，但其能量利用率低、过程可持续性差、环境二次影响大，需要设计更为可行、操作便捷、低成本投入、高能量效率、低环境影响的膜浓缩液高效减量处置方法。利用太阳能驱动，且能量转换效率更高的光热界面蒸发理论表现出更具潜力的水体蒸发性能，该技术通过将吸收体置于气-液多相界面，可只加热水体界面薄层水产生蒸汽，而非整体加热水体，以获得更高的蒸汽转化效率，但由于上述过程仍有部分能量不可避免地向水体传导耗散，或与周围环境通过对流及辐射传热损耗，使得系统并不能完全利用转换热能。因此，有必要探究该过程具体的能量损失机制，分析限制其系统能效进一步提升的关键因素，并指导系统优化。本作品结合机器学习算法，建立了一组评估光热界面红外测温图像序列的数据处理流程，以分析及评估这类光热界面蒸发系统的能量损失机制，并据此设计了非接触式构型的光热界面蒸发系统，通过构建光捕获及热转换层-热传导层-红外热辐射层耦合来构建一种非接触式热蒸发过程，以充分提高膜浓缩液蒸发减量效率，同步实现减污降碳协同增效，有望对城市生态资源可持续发展提供重要参考路线。

联系人：赵子敬 联系电话：17341639048 EMAIL：jaz030917@outlook.com

1 研制背景及意义

城市生活垃圾堆放存储及处理过程中，由于压实、自身分解、发酵等物理及

生化过程，易液化渗出，且在降雨及地下水渗流作用下易形成具有高污染、高毒害性的垃圾渗滤液，通常需要膜处理来使得这些渗滤液能够满足严苛的排放标准，但在这些过程中也同时产生了额外的膜浓缩液。膜浓缩液的无害化处置是垃圾渗滤液全量化处置的关键，热蒸发可有效减量膜浓缩液，利用外部热源加热废水，使其中水分气化并将其体积减少约 90%，而难挥发污染物如重金属、无机盐及绝大部分有机物则保留在蒸发槽结晶中，实现渗滤液全流程零废液排放处理。但如浸没燃烧、机械压缩、负压蒸发等蒸发处理工艺直接对蒸发槽内膜浓缩液加热，能量利用率低、过程可持续性差、环境二次影响大，且蒸发器中挥发性有机物、氯离子产生的高温腐蚀、容器结垢也会对蒸发器正常运行产生影响。因此，还需要设计更为可行、操作便捷、低成本投入、高能量效率、低环境影响的膜浓缩液高效减量处置方法。

近年来，利用太阳能驱动，且能量转换效率更高的光热界面蒸发理论表现出更具潜力的水体蒸发性能，该技术通过将吸收体置于气-液多相界面，可只加热水体界面薄层水产生蒸汽，而非整体加热水体，以获得更高的蒸汽转化效率。典型的多相界面蒸发系统主要包括：太阳能吸收层、热保温层、水输运及蒸汽逸散通道。入射太阳光首先被太阳能吸收层吸收并转换为热能。同时，在毛细作用力驱动下，水通过多孔材料输运管道浸润表层。转换热能加热表层水相界面，产生水蒸气。因此，基于光热界面蒸发理论，有望充分利用太阳能能源，实现清洁高效的水体蒸发处理。但由于上述过程仍有部分能量不可避免地向水体传导耗散，或与周围环境通过对流及辐射传热损耗，使得系统并不能完全利用转换热能。因此，有必要探究该过程具体的能量损失机制，分析限制其系统能效进一步提升的关键因素，并指导系统优化，从而为综合开发利用太阳能技术提供具有应用潜力的技术路线，有效降低膜浓缩液处置的能耗及成本，为城市废弃物资源循环利用及可持续低碳发展提出了有效措施。

2 设计方案

2.1 系统设计

本作品综合利用可再生太阳能，实现膜浓缩液减量处置。在太阳能蒸发系统中，光热转换材料可吸收转化太阳光为热能，加快水体蒸发并迅速产生蒸汽。膜浓缩液蒸发是一个相变吸热过程，利用太阳能作为蒸发热源，从能量输入角度是可持续的。当将具有高效光热转换性能的光热蒸发材料置于水相界面时，可显著提高太阳能利用率与光热转换效率（图 1），提高蒸发速率。这类界面蒸发系统一般在多孔基底上修饰不同类型的光热材料以实现高效的太阳能捕获转换，本作品中将具有一定氧化还原能力的还原黑钛作为光热材料修饰在天然木材基底上，以抑制膜浓缩液蒸发过程中挥发性有机污染物溢出，同时这些材料价廉易得可持续，能够保证系统本身较低的环境足迹。

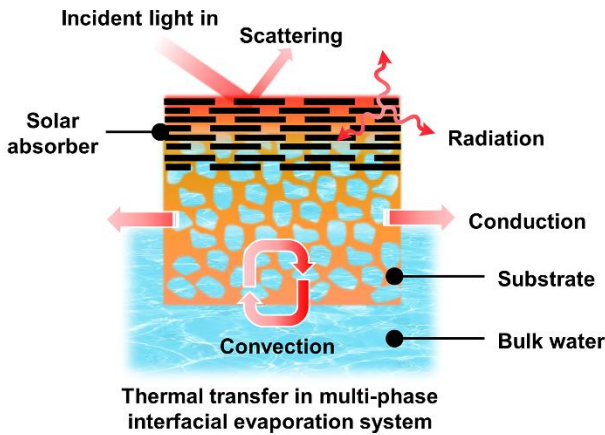


图 1 太阳能热驱动多相界面蒸发系统传质传热机制

2.2 实物部分

实物部分呈现如图 2 所示，

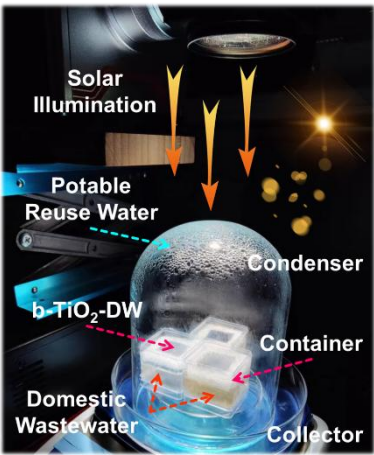


图 2 传统太阳能蒸发系统实物图

实物部分主要包括：膜浓缩液/生活污水等蒸发槽、模拟太阳光源、冷凝水收集槽、以及作为核心光热组件的还原黑钛（光热材料）修饰的脱木素木材；在

模拟太阳光激发下，太阳能蒸发系统表面形成集中热值加热薄层气-液界面处的膜浓缩液，形成的蒸汽在冷凝槽中放热转变为洁净液态水，从而满足严格的膜浓缩液排放标准。膜浓缩液蒸发减量过程性能如图 3 所示。

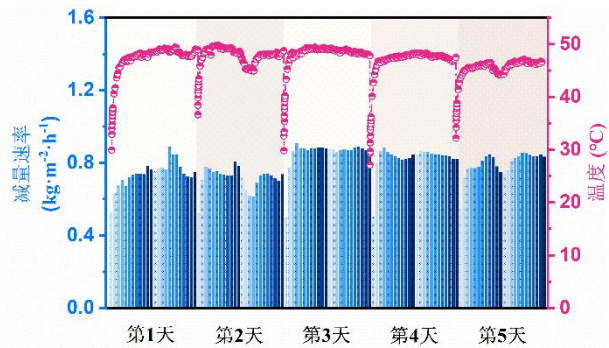


图 3 复合材料连续 5 天减量处理膜浓缩垃圾渗滤液减量速率及光热气液界面温度变化

对复合材料进行连续 5 天运行稳定性测试，记录复合材料自初始状态起测试运行 12 h 过程中，复合材料蒸发减量处理膜浓缩垃圾渗滤液气液界面温度变化，及膜浓缩垃圾渗滤液蒸发减量速率，结果如图 3 所示，尽管复合材料在连续 5 天测试时段内，表现出良好的性能稳定性，但其蒸发速率始终未能超过 $1.0 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ，膜浓缩液蒸发减量速率较低。

3 理论设计计算

本部分主要讨论如何利用机器学习算法，根据红外热成像图数据分析传统太阳能蒸发系统热损失机制，主要流程如图 4 所示。

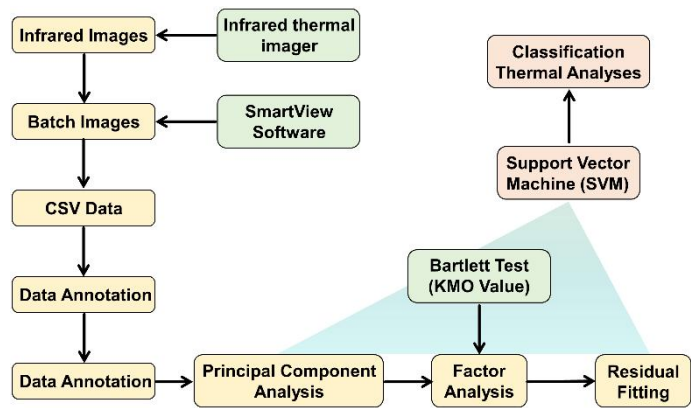
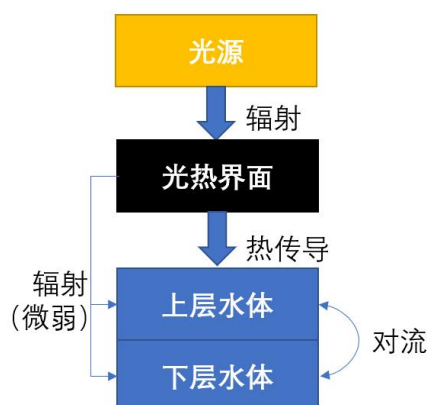


图 4 机器学习算法主要流程

本部分旨在研究光热界面工作过程中达到热稳态前升温模式的特征，进而根据特征给出优化方案，通过数据驱动方法分析实验数据。首先使用软件 SmartView 将数据导出为 csv 表格，实验中假设热量流动如示意图（图 5）所示。



主成分分析：通过将复杂的数据转化为少数主导成分的和，在尽可能保留数据信息的同时大幅度简化数据。算法输出若干主要成分及其重要性，并允许将每一个数据分拆为主要成分与误差/残差之和。由上图看出，在实验中水体的热量几乎完全来自光热界面，因此界面本身的升温模式应该是水体升温模式的主导成分，适合采用主成分分析。采用 KMO 检验与巴特利特检验判断数据是否适合主成分分析，MO 检验结果越接近 1 说明数据越能被少数几个成分代表；巴特利特球形度检验显著性低于 0.05 时可以认为数据的不同分量高度相关，因此可以被简化。通过人工在数据中标注实验区域（水体、界面、烧杯）与非实验区域（外界环境），分别对全体数据、实验区域数据使用 SPSS 进行 KMO 检验与巴特利特检验，结果见下表 1, KMO 结果 0.996，巴特利特显著性远小于 0.05，判断数据极其适合主成分分析。

表 1 KMO 和巴特利特检验值

KMO 取样适切性量数		.996
巴特利特球形度检验	近似卡方	44873412.578
	自由度	4950
	显著性	.000

碎石图（图 6）表征了前若干个最主要的成分能够在多大程度上解释数据，可解释性累加。一般选择单个成分提供可解释性的拐点（此处为 2 号）作为实际采纳的主成分。根据上图判断，仅选用一个主成分即可较好地总结数据特征。后续分析中，第二主成分也被列入数据，但仅作为参考。

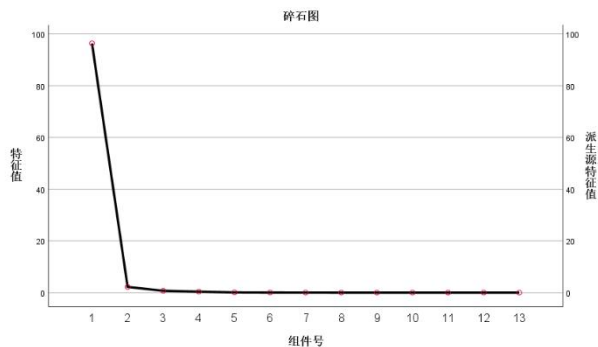


图 6 主成分分析碎石图结果

因子分析：使用 python 计算出主成分（具有代表性的升温模式）如下左图（图 7），其中红色为第一主成分，绿色为第二主成分，可得第一主成分是典型的有空气散热的辐射加热物体的温度曲线。尽管通过物理建模分析这一升温模式较困难，但使用常见函数族对曲线进行拟合，发现使用反比例函数拟合效果最好（对数函数次佳）。对该升温模式使用反比例函数拟合的结果如下右图（图 7），红色为升温模式，绿色为反比例函数拟合，蓝色为残差。这说明实验用材料的升温模式或许与时间近似成反比例关系，可为后续研究提供参考。

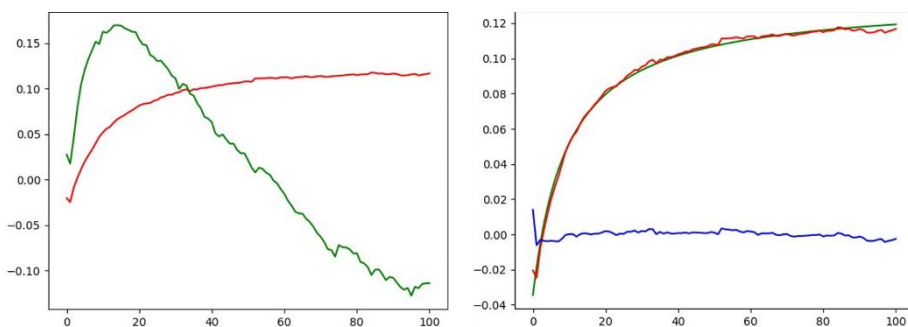


图 7 代表性升温模式主成分计算结果

对主成分系数，使用 excel 对数值染色如下左、中两图（图 8）所示，红色区系数大，蓝色区系数小，主成分系数的大小反映了数据在主成分方向的大小，在本实验中即体现了升温速率与最终温度，这也说明实验用材料的升温速率与最终温度几乎是成正比的。第一主成分系数分布与温度分布图像高度一致，第二主成分系数主要区分了因各种原因失去热量的部分。另外，由于两个主成分均经过标准化，即两个主成分在数学空间中“大小”一致，而第二主成分的系数普遍低接近一个数量级，可以看出第二主成分的影响远小于第一主成分。主成分拟合的残差（即误差）如上右图，绿色区残差小，拟合效果好，黄色区反之，易得主成分拟合在实验区域精度很高，在其他区域误差较大。

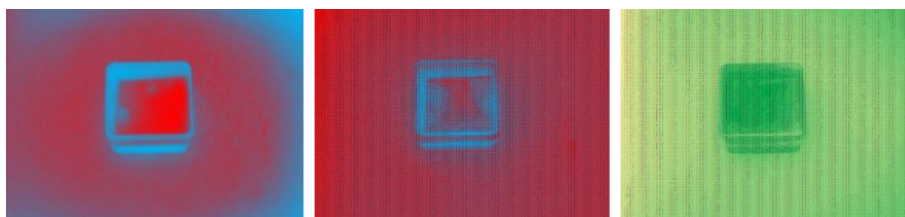


图 8 红外热成像图主成分渲染

基于第一、第二主成分系数以及主成分拟合残差，采用**支持向量机（SVM）**对实验数据点进行自动分类，自动识别任意数据点属于水体、界面或外界。支持向量机是基于多维度数据，根据标注类别的数据，尝试对新数据进行分类的算法。该算法需要输入若干人工标注类别数据点，随后可自动学习最可能的线性关系以区分不同类别的数据，将该方法应用于新分类数据时，后续输入新数据无需人工标注，可大幅度提高图片数据读取及处理效率。此外，为进行支持向量机的训练，也为提高流程可泛化性，本工作事先对输入数据（两个系数及残差）做标准化处理，通过线性变化消除数据量纲，使数据均值为 0、方差为 1。

在选取 X 个标注点进行训练后，支持向量机对数据进行分类的图像如下图 9 所示，可以看出，支持向量机对于不同机位、不同实验条件所得红外热成像图均有较好适应性，可基本准确对数据点进行分类。

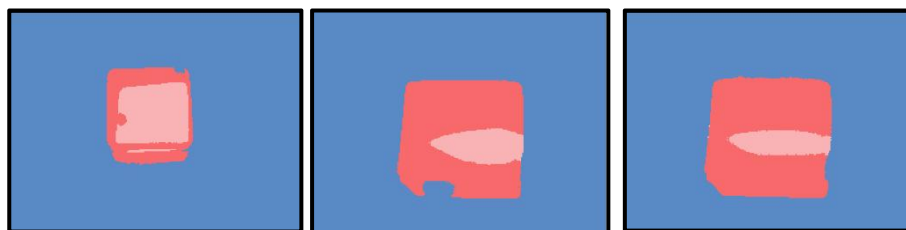


图 9 支持向量机对红外热成像图分类结果

基于对红外热成像图的分析可以得到结论，光热界面蒸发过程中各点的温度变化规律是高度同模式的，基本上可以用第一主成分系数这单一变量描述温度变化的剧烈程度。

4 工作原理及性能分析

基于上述分析可得，尽管光热界面蒸发系统能够在薄层气-液界面上形成相对集中的热值分布，但与其与水体直接接触的区域仍存在温度梯度，仍会在膜浓缩液水体微弱的自然对流作用下产生热传递损失。基于此，设计了非接触式构型的

光热界面蒸发系统（图 10），通过构建光捕获及热转换层-热传导层-红外热辐射层耦合来构建一种非接触式热蒸发过程，以充分提高膜浓缩液蒸发减量效率。

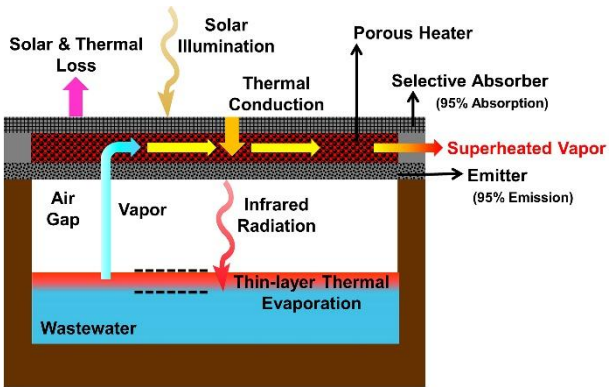


图 10 非接触式构型光热界面蒸发系统

本研究项目已可初步调控太阳能光热吸收-辐射涂层的选择性太阳光吸收响应特性，如图 11 所示，太阳能吸收涂层在可见光区可实现良好的光吸收，从而实现如图 12 所示 T1 光吸收层的快速光热转换响应及良好的光热温升，经由中间热传导层，光热转换热值传递给辐射层，使得中间热传导层温度 T2 辐射层表面温度 T3 均快速上升，辐射层在太阳能全光谱范围内吸光度维持在较低的水平，但在红外光区具有较高的辐射率（如图 11 所示），这使得其表面温度能够通过红外辐射的方式传递给膜浓缩液表面，使得表面液层温度 T4 快速上升（如图 12 所示），并驱动膜浓缩液蒸发减量，在实验室模拟自然光强（ $1000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ）下，有效蒸发面积约 60 cm^2 的蒸发器中的膜浓缩液在有效光照时长 4.5 h 内可减少 $2/3$ 的质量，在稳定蒸发阶段可保持约 $1.0\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 的蒸发速率及约 80 % 的总体光热转换能量利用率（图 13），相较于传统太阳能蒸发系统效率提升约 20 %，而在无光照条件下，几乎不再产生蒸发量，说明系统具有良好的光响应启动特性，同时也表现出良好的膜浓缩液蒸发减量潜力。

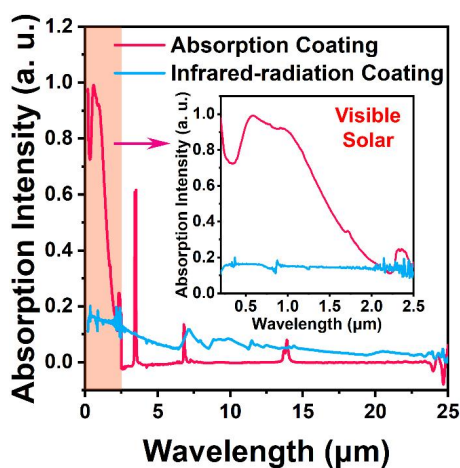


图 11 太阳能光吸收-辐射涂层全光谱（0.2-25 μm ）选择性太阳光吸收强度

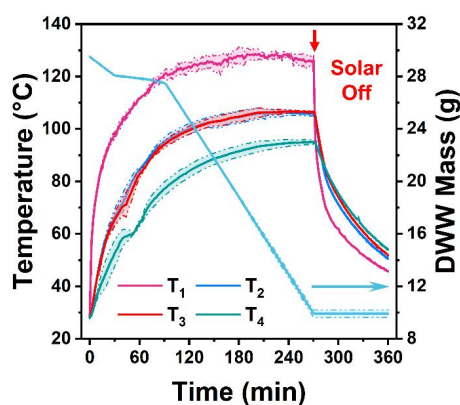


图 12 光吸收层温度（T1），热传导层温度（T2），辐射层表面温度（T3），膜浓缩液表面温度（T4）及膜浓缩液蒸发质量随模拟光照时长变化曲线

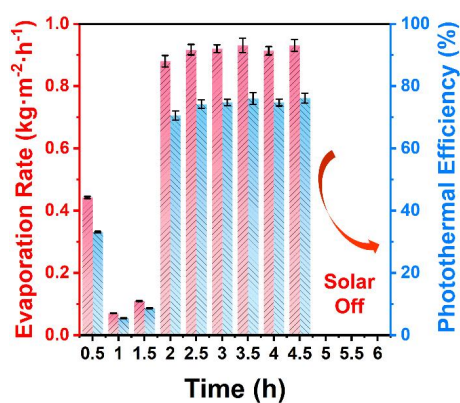


图 13 太阳能光热辐射调控系统蒸发膜浓缩液蒸发速率（左列）及光热能量转换效率（右列）

5 创新点及应用

本作品通过机器学习的手段，分析了当前抑制光热界面蒸发系统效能提升的瓶颈因素，并据此设计了改进的非接触式构型的光热界面蒸发系统，可对渗滤液

全量化处理工艺起到良好的技术路线补充，使得出水全量达标排放，并有望实现零废液排放处理，减少环境二次污染风险，改善生态平衡，实现绿色低碳、多效增益的城市废弃资源再利用。

成量堆积形成的垃圾在长期存放过程中受生理生化、雨水侵蚀、地下水渗透等因素协同作用影响而产生垃圾渗滤液这一高盐含量高毒害性组分废弃物，膜处理可以回收原生渗滤液中大部分水分，但由此产生的膜浓缩液更加难以处理，通过本项目所设计的基于太阳能辐射光热效应调控驱动膜浓缩液减量处置的策略，可以低能耗、低成本、低环境影响的方式对膜浓缩液进行高效减量，还可通过蒸发减量化处理等工艺消除污染物危害性，因垃圾本身即属于污染程度较高的废弃物，一旦产生流动性较强的渗滤液，深入地表后会对局部生态环境造成严重破坏，减量化处理一定程度上也能够阻止渗滤液土壤污染进程；同时本项目策略也能够以较低的成本和较高的效率运行处理过程，以便在较小的成本控制内快速完成整体处理任务；此外，对垃圾渗滤液减量化及资源化处理的重要现实意义还在于对二次污染的控制上，减量处理可以减少需要处置的固体废弃物量，同时也可以避免膜浓缩液这类高浓度毒害性污染物泄露至环境中所造成的潜在二次污染。

从市场角度出发，废弃物资源化具有广阔的应用前景，本作品基于“循环经济”，综合利用绿色可再生太阳能，实现膜浓缩液无害化高效减量处置；基于机器学习算法指导，能够快速优化系统效能；同时，采用太阳光热辐射调控对膜浓缩液减量化处理，可对渗滤液全量化处理工艺起到良好的技术路线补充，使得出水全量达标排放，并有望实现零废液排放处理，减少环境二次污染，改善生态平衡，实现绿色低碳、多效增益的城市废弃资源再利用。