

# 热解法强化污泥水解提取有机物的效能与机理

李璐凡

北京化工大学, 北京

收稿日期: 2025年12月12日; 录用日期: 2026年1月13日; 发布日期: 2026年1月23日

## 摘要

随着城市化进程加速, 污水处理生成的剩余污泥量不断增多, 对于污泥的高效处理和资源化利用成为环境领域重要课题。传统污泥厌氧消化工艺有水解速度慢、有机物提取效率低这类问题, 限制后续能源回收和物质利用潜力。为突破这一瓶颈, 本研究着重热解法预处理给污泥水解过程带来的强化效果, 探究不同热解条件(温度、时间)下污泥里有机物溶出效能的变化规律, 且深入剖析它内里作用机制。实验结果表明, 合适热解预处理可有效破坏污泥细胞结构与胞外聚合物, 明显提升污泥里蛋白质、多糖等有机物溶出率, 优化条件下, 溶解性化学需氧量(SCOD)释放率比未处理污泥提高超150%, 机理分析揭示, 热解过程借助热裂解跟水解的协同作用, 让大分子有机物分解成小分子易降解的东西, 同时改良了污泥脱水性能跟后续厌氧消化特性。研究为污泥预处理技术提供新思路 and 理论依据, 对推动污泥减量化、稳定化和资源化有实际应用用处, 还为相关工艺参数的优化跟工程化应用奠定了科学基础。

## 关键词

热解法, 污泥水解, 有机物提取, 水热预处理

# Enhancement and Mechanism of Pyrolysis for Strengthening Sludge Hydrolysis and Organic Matter Extraction

Lufan Li

Beijing University of Chemical Technology, Beijing

Received: December 12, 2025; accepted: January 13, 2026; published: January 23, 2026

## Abstract

With the acceleration of urbanization, the yield of excess sludge from wastewater treatment is continuously increasing, making the efficient treatment and resource utilization of sludge a critical

issue in the environmental field. Traditional anaerobic digestion of sludge suffers from slow hydrolysis rate and low organic matter extraction efficiency, which limits the potential of subsequent energy recovery and material utilization. To break through this bottleneck, this study focuses on the enhancement effect of pyrolysis pretreatment on sludge hydrolysis, investigates the variation law of organic matter dissolution efficiency in sludge under different pyrolysis conditions (temperature and time), and deeply analyzes its internal mechanism. The experimental results show that appropriate pyrolysis pretreatment can effectively destroy sludge cell structure and extracellular polymeric substances (EPS), significantly improving the dissolution rate of organic matters such as proteins and polysaccharides in sludge. Under optimal conditions, the release rate of soluble chemical oxygen demand (SCOD) is increased by more than 150% compared with untreated sludge. Mechanism analysis reveals that the pyrolysis process relies on the synergistic effect of thermal cracking and hydrolysis to decompose macromolecular organic matter into small-molecule and easily degradable substances, while simultaneously improving sludge dewaterability and subsequent anaerobic digestion performance. This study provides new ideas and theoretical basis for sludge pretreatment technologies, has practical application value for promoting sludge reduction, stabilization and resource utilization, and lays a scientific foundation for the optimization of relevant process parameters and engineering application.

## Keywords

Pyrolysis, Sludge Hydrolysis, Organic Matter Extraction, Hydrothermal Pretreatment

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 材料与方法

### 1.1. 污泥样品性质

实验所用污泥取自北京市某市政污水处理厂的剩余污泥。其基本性质如下：总固体含量(TS)为  $8.5 \pm 0.3\%$ ，挥发性固体含量(VS)为  $6.2 \pm 0.2\%$ ，pH 为  $6.8 \pm 0.1$ ，初始 SCOD 为  $850 \pm 50 \text{ mg/L}$ ，蛋白质含量为  $210 \pm 15 \text{ mg/g-VS}$ ，多糖含量为  $180 \pm 10 \text{ mg/g-VS}$ 。

### 1.2. 热解预处理实验装置与操作

实验采用高温高压反应釜进行热解预处理，反应釜容积为 2 L，具备温度与压力自动控制功能。污泥样品按含水率 90%配置后，置于反应釜中，在不同温度( $120^\circ\text{C}$ ,  $150^\circ\text{C}$ ,  $180^\circ\text{C}$ ,  $210^\circ\text{C}$ ,  $240^\circ\text{C}$ )和时间(30 min, 60 min, 90 min, 120 min)条件下进行热解。热解结束后，迅速冷却至室温，收集上清液进行分析。

### 1.3. 分析测定方法

SCOD、溶解性蛋白质(Lowry 法)、多糖(苯酚 - 硫酸法)和挥发性脂肪酸(气相色谱法)的测定参照《水和废水监测分析方法》(第四版)。

三维荧光光谱(EEM)采用荧光光谱仪测定，激发波长 200~500 nm，发射波长 250~600 nm。分子量分布采用凝胶渗透色谱(GPC)进行分析。污泥微观形貌采用扫描电镜(SEM)和透射电镜(TEM)观察。官能团分析采用傅里叶变换红外光谱(FTIR)和 X 射线光电子能谱(XPS)。

### 1.4. 数据处理

所有实验均重复三次，数据以均值  $\pm$  标准差表示。采用单因素方差分析(ANOVA)进行显著性检验，

$p < 0.05$  表示差异显著。本文中“热解”指在高温高压含水条件下进行的污泥预处理过程，实质上属于水热预处理，与传统的干化热解(如高温无氧裂解)有所区别。

## 2. 热解法强化污泥水解提取有机物的效能研究

### 2.1. 热解预处理对污泥有机物溶出效能的影响

热解预处理明显改变污泥中有机物溶出特性。如表 1 所示，随着热解温度升高，污泥溶解性化学需氧量呈先升后降态势。在一百五十摄氏度到二百摄氏度范围里，SCOD 溶出率快速增加，这主要是因为高温高压环境把污泥絮体结构以及微生物细胞给破坏了，温度超 220℃后，部分溶解性有机物会发生美拉德反应或者进一步热解生成难溶性物质，致使 SCOD 溶出率有点回落[1]。

**Table 1.** Trend of organic matter leaching under different pyrolysis conditions

**表 1.** 不同热解条件下有机物溶出趋势

温度(℃)	时间(min)	SCOD (mg/L)	溶解性蛋白质(mg/L)	多糖(mg/L)	VFA (mg/L)
120	60	1250	320	280	180
150	60	1850	450	390	260
180	60	2250	520	460	310
210	60	1950	480	400	240
240	60	1600	380	320	190

热解时间也是关键控制参数，在最佳温度下，适度延长热解时间有利于有机物不断溶出，过长处理时间不光增加能耗，也会引起有机物过度降解或者再聚合，蛋白质跟多糖作为污泥水解液里的关键成分，它溶出规律跟 SCOD 大致一样。热解过程有效断开细胞壁以及胞外聚合物里蛋白质和多糖大分子，让它变成可溶解的小分子片段，进而大幅提升了液相里有机物浓度[2]。

### 2.2. 热解条件优化与效能提升关键参数分析

确定热解温度和时间对有机物溶出基本影响规律后，再通过系统对比实验来优化热解条件，明确效能升高的关键参数。实验结果表明，热解温度是影响有机物提取效能的关键因素，热解时间、升温速率和污泥含水率等参数共同构成优化工艺窗口。在 180 摄氏度、60 分钟、含水率 90%的优化情形下，污泥水解液 SCOD 浓度达最大值，比起未经热解处理的原始污泥，它 SCOD 释放率提高超 150%，这明显的提升程度直接证实热解预处理对强化有机物提取的高效能[3]。

效能提高关键不光是有机物溶出总量增多，更在于溶出有机物可生化性获得改善。优化热解条件有效抑制高温下美拉德反应等不利副反应出现，让溶出的有机物更多以易生物利用的蛋白质、多糖等小分子形态存在，参数分析显示，太高温度过长处理时间或许能接着提升 SCOD 总量，但会致使挥发性脂肪酸等易降解成分的占比降低，反倒不利于后续资源化利用。因此，确定最优工艺参数要在最大化 SCOD 释放率跟维持产物质量间找到平衡。

### 2.3. 三维荧光光谱(EEM)与分子量分布分析

为量化大分子有机物的降解情况，对热解前后污泥上清液进行了 EEM 和 GPC 分析。结果显示，热解后类蛋白质峰和类腐殖酸峰强度明显减弱，表明蛋白质和腐殖质类大分子发生降解。GPC 结果也显示，大分子区域(>10 kDa)比例下降，小分子区域(<1 kDa)比例显著上升，进一步证实热解促进了大分子向小分子的转化。

3. 热解法强化污泥水解的内在机理解析

3.1. 热解对污泥细胞结构及胞外聚合物的破坏机制

热解预处理借高温热裂解作用，明显破坏了污泥里微生物的细胞结构还有包在外面的胞外聚合物网络。在热解过程中，加热能直接作用污泥固相，致使构成细胞壁的肽聚糖、脂多糖等大分子出现化学键断裂[4]。同时，高温让胞外聚合物里蛋白质变性、多糖链解聚，破坏了它原本的凝胶状三维网络架构，这种物理化学结构遭到破坏，有效解开了胞内有机物的包裹跟束缚，为后续水解阶段有机物高效溶出造就了先决条件。

热解给细胞结构造成的破坏不仅仅是单纯物理破碎，而是一个涉及复杂热化学转化的过程。热裂解作用可让细胞壁以及细胞膜脂质双分子层失去流动性跟完整性，形成微孔或裂缝，胞内物质像蛋白质、核酸、糖原等借由这些新增通道向外散开。胞外聚合物瓦解就降低了污泥体系黏度和空间位阻，释放出自身含有的有机物，还提升了水分及酶跟残留固体基质的接触效率，进而在后续水解里更全面地转变大分子有机物[5]。

3.2. 热解 - 水解协同作用与大分子有机物转化路径

热解预处理不光给有机物释放创造了条件，它产生热化学效应还跟后续水解过程构成深度协同，共同促使大分子有机物朝着小分子易降解物质转变。在热解阶段，高温作用让蛋白质有了部分变性及肽链的初步断裂，多糖类物质也出现糖苷键弱化情况。进入水解阶段后，这些经热解“预活化”的大分子物质对水解酶或化学水解试剂敏感性明显提升，热解时也许产生的部分小分子有机酸或者还原性物质，能进一步改良水解体系的反应微环境，促使水解反应开展。这种协同作用核心是，热解冲破污泥固有物理屏障且引发大分子初步解构，水解在这之上，通过更温和、定向的生物或化学作用，完成大分子有机物的最终解聚和转化，进而让可溶性小分子有机物产率最大化[6]。

如表 2 所示，热解跟水解协同作用时，蛋白质、多糖等典型大分子有机物转化遵照特定路径，蛋白质在热解阶段主要出现空间构象变化以及部分肽链断开，生成分子质量相对小些的多肽片段；在后续水解阶段，这些多肽片段在蛋白酶或者酸碱作用下进一步断成二肽、寡肽甚至游离氨基酸[7]。多糖转化路径相像，热解让它长链结构出现无规断裂，产出寡糖或者还原糖片段，接着水解会把这些片段快速变成单糖或者二糖，脂肪类东西在热解作用下出现酯键断裂，产出甘油跟长链脂肪酸，后者在水解环境里能进一步被转变或者直接当作易降解底物。

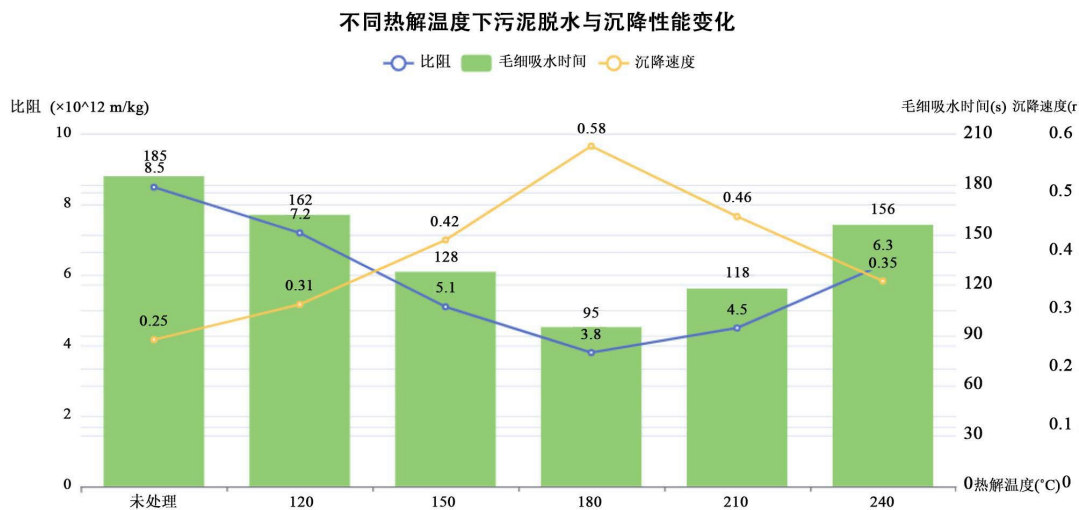
Table 2. Synergistic effect of pyrolysis-hydrolysis and conversion pathway of macromolecular organic matter  
表 2. 热解 - 水解协同作用与大分子有机物转化路径

大分子有机物类别	热解阶段主要作用与产物	水解阶段主要作用与产物	最终主要小分子产物
蛋白质	变性、肽链初步断裂，生成多肽片段	蛋白酶或化学水解，肽键断裂	游离氨基酸、短链肽
多糖(纤维素、淀粉等)	糖苷键弱化与断裂，生成寡糖和还原糖片段	糖苷酶或酸催化水解，进一步解聚	葡萄糖、木糖等单糖
脂类	酯键热裂解，生成甘油和游离长链脂肪酸	脂肪酶水解或直接利用	甘油、短中链脂肪酸
核酸	磷酸二酯键断裂，碱基释放	核酸酶或化学降解	核苷、磷酸、含氮碱基

## 4. 热解预处理对污泥后续处理特性的影响

### 4.1. 热解污泥的脱水性能与沉降特性变化

热解预处理明显改变了污泥脱水及沉降特性。如图 1 所示，随着热解温度升高，污泥比阻跟毛细吸水时间呈先降后升趋势，在合适的热解温度范围当中，污泥里结合水释放以及细胞结构破坏，使得水分与固体颗粒结合强度降低，进而改善脱水性能。然而，过高热解温度可能致使有机物过度碳化或者产生新的疏水性物质，反倒让脱水难度加大，沉降特性方面，热解后污泥沉降速度大多加快，这主要因颗粒表面性质变了和絮体结构密实了[8]。



**Figure 1.** Changes in dewaterability and settling performance of sludge at different pyrolysis temperatures (pyrolysis time was fixed at 30 minutes; sludge samples were collected from the same municipal wastewater treatment plant)

**图 1.** 不同热解温度下污泥脱水与沉降性能变化(热解时间固定为 30 分钟，污泥样品取自同一市政污水处理厂)

### 4.2. 热解污泥的厌氧消化性能强化效应

热解预处理对污泥厌氧消化性能强化效果明显。通过合适条件热解之后，污泥产甲烷潜力获有效提升，这主要是热解过程破坏污泥中微生物细胞结构造成的，促使部分难降解胞外聚合物和大分子有机物裂解，变成更便于厌氧微生物利用的小分子溶解性有机物。这些容易分解底物的增多，给产甲烷菌提供了更充足的营养基质，进而加快了水解酸化阶段，缩减了厌氧消化启动时间，且提升了整体的甲烷产率。

在系统稳定方面，热解预处理也呈现出积极作用。预处理减少了污泥里病原菌的活性，且或许改变了部分抑制性物质的样子，这利于维持厌氧消化系统里微生物群落，尤其是产甲烷菌群活性和平衡。因此，消化过程的抗冲击负荷能力增强，挥发性脂肪酸积累的风险降低，系统运行更平稳。这种效能提高让后续消化残留物减量更彻底，进一步显示出热解当作污泥预处理工艺在推动能源回收方面的综合优势。

## 5. 热解强化技术的应用前景与工程化启示

### 5.1. 热解预处理技术在污泥资源化工艺中的集成优势

热解预处理技术在污泥资源化工艺里呈现出明显的集成优势，比起超声、碱处理等别的方法，热解过程能耗较集中且易于控制，操作条件温和，不用大量添加化学药剂，减低二次污染风险和运行成本。它核心优势是和现有厌氧消化系统有良好的衔接性，热解后污泥物理结构破坏及有机物溶出给后续消化单元提供了很可生物利用的底物，可直接加强产甲烷效率。与超声、碱解、酶解等主流预处理技术相比，



热解预处理在 SCOD 释放率和甲烷产率提升方面表现更优,且无需添加化学药剂,副产物少,环境友好。

该技术通过热化学作用有效破开污泥细胞壁并改换胞外聚合物结构,释放出的溶解有机物更易被微生物直接利用,进而提高了整个资源化链条的效能。热解预处理单元模块化设计利于集成进传统污泥处理线里,不用对消化罐等关键设施开展大规模改建,有较高工程应用灵活性,给污泥处理厂升级提效给出了实用方案。

## 5.2. 技术挑战、参数优化方向与工程应用建议

热解过程能耗较高,尤其是对高含水率污泥。建议结合太阳能、沼气等可再生能源供热,优化反应器设计,降低运行成本。工程应用中宜采用模块化、间歇式反应器,便于与现有厌氧消化系统集成。

热解预处理技术展现出良好的集成潜力,不过其规模化工程运用仍面临一些技术难题,在这其中热解过程能耗成本是首要经济制约要素,特别是针对高含水量污泥,水分蒸发需用能量巨大,直接影响运行经济状况。热解温度、停留时间等关键操作参数精确控制跟优化是另一核心难题,参数波动不光影响有机物溶出效能,也会致使副产物产生或者能源效率降低。此外,热解时也许产生气态亦或冷凝液副产物,若处理不当,有一定二次污染风险存在,要配备对应的尾气跟液体处理单元。

推进这项技术工程化,参数优化要着重找到能耗和效能的最优平衡点,通过构建温度-时间-有机物溶出率的响应模型,能确定针对特定污泥性质的最低有效热解条件。探寻太阳能、厌氧消化沼气等可再生能源的耦合供热方式,是减少外部能耗依靠的关键方向。工程应用上,建议先在有厌氧消化设施的污水处理厂开展中试集成,用模块化、间歇式热解反应器设计来增强操作弹性,同时,要配备简易高效的热解气回用或者净化系统,还制定针对热解后污泥脱水、消化等后续单元的适应性运行指南,保障整个流程的稳定与高效。

## 6. 结语

本研究系统探究热解法预处理对强化污泥水解和有机物提取的效能跟机理,结果表明,合适热解条件可有效破坏污泥细胞结构和胞外聚合物,大幅提高有机物溶出比率,当中 SCOD 释放率能提升超 150%。机理上,热解借热裂解跟水解协同作用,让蛋白质、多糖等大分子变成易降解的小分子物质,一并改良了污泥脱水性跟后续厌氧消化性能。这技术有操作能控、环境友善、容易集成等长处,为污泥资源化提出了有效预处理办法。未来研究要进一步优化工艺参数、降低能耗,促使它工程化运用,帮污泥实现减量、稳定以及资源化。

## 参考文献

- [1] 朱梦瑶. 微波-水蒸气一步法制备赤泥改性污泥炭及其对硫化氢的吸附特性[D]: [硕士学位论文]. 上海: 东华大学, 2025.
- [2] 张媛媛. 污泥基富磷生物炭煅烧过程重金属挥发行为研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2024.
- [3] 贺丹丹. 市政污泥生物炭复合材料的制备及其吸附磷的性能研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 西北民族大学, 2024.
- [4] 严群, 靳涵宇, 宋忠贤, 等. 活性污泥生物炭的制备及吸附性能的研究进展[J]. 有色金属科学与工程, 2024, 15(4): 615-622.
- [5] 贺丹丹, 张泽宇, 刘娟丽, 等. 市政污泥生物炭在废水吸附处理中的应用[J]. 精细化工, 2024, 41(7): 1447-1457.
- [6] 欧阳昌, 于培志. 含油污泥热解法无害化处理技术[C]//中国科学技术协会, 交通运输部, 中国工程院, 湖北省人民政府. 2023 世界交通运输大会(WTC2023)论文集(上册). 2023: 174-177.
- [7] 王辉. 污泥基生物炭复合材料的改性及去除水中六价铬的研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆理工大学, 2023.
- [8] 江浩芝. 含油污泥典型处理技术及研究应用[J]. 环境保护与循环经济, 2022, 42(10): 24-26.