

基于含油废水超临界水气化制氢热力学平衡模拟的创新实验设计

彭智勇*, 时玲玉, 伊磊, 王乐, 徐强, 陈斌

江西理工大学国际创新研究院, 江西 南昌

收稿日期: 2026年9月9日; 录用日期: 2026年10月10日; 发布日期: 2026年10月16日

摘要

大学生创新实验是提升学生创新意识与团队协作综合素养的重要教学载体。本文以油田废水超临界水气化制氢热力学平衡模拟为研究对象, 从气化反应机理、热力学平衡原理、物理模型建立、多参数影响因素分析等方面, 对能源动力及环境化工交叉专业大学生进行了创新实验设计。该创新实验通过Aspen Plus软件平台, 基于吉布斯自由能最小化原理, 采用PR-BM状态方程, 引导学生探究反应温度、压力、物料浓度等关键参数对产气组分及氢气产率的影响规律, 将科研成果反哺教学实践。在此基础上, 明确实验在课程体系中的定位, 构建知识、能力、素养三维教学目标, 设计任务单与思考题, 并制定过程性评价与总结性考核方案, 形成“原理学习-建模模拟-数据分析-研讨评价”的教学闭环。本实验设计旨在开发能源动力、化工环境等学科的创新实验课程, 有助于激发大学生的科研兴趣, 培养其创新思维能力与计算机仿真实践能力, 促进理论与实践教学的深度融合。

关键词

超临界水气化, 热力学模型, 创新性实验, 能源动力, 环境化工

Innovative Experimental Design of Thermodynamic Equilibrium Simulation for Hydrogen Production from Supercritical Water Gasification of Oily Wastewater

Zhiyong Peng*, Lingyu Shi, Lei Yi, Le Wang, Qiang Xu, Bin Chen

International Institute for Innovation, Jiangxi University of Science and Technology, Nanchang Jiangxi

*通讯作者。

文章引用: 彭智勇, 时玲玉, 伊磊, 王乐, 徐强, 陈斌. 基于含油废水超临界水气化制氢热力学平衡模拟的创新实验设计[J]. 教育进展, 2026, 16(10): 868-877. DOI: 10.12677/ae.2026.16102180

Abstract

As an important teaching vehicle, undergraduate innovative experiments play a crucial role in enhancing students' innovative awareness and comprehensive teamwork capabilities. This paper focuses on the thermodynamic equilibrium simulation of hydrogen production from oily wastewater via supercritical water gasification, and presents an innovative experimental design for undergraduates majoring in energy and power as well as environmental and chemical engineering. The design covers multiple aspects, including gasification reaction mechanisms, thermodynamic equilibrium principles, physical model establishment, and multi-parameter influence analysis. Utilizing the Aspen Plus software platform, this experiment employs the Gibbs free energy minimization principle coupled with the PR-BM equation of state, guiding students to investigate the effects of key parameters such as reaction temperature, pressure, and feedstock concentration on product gas composition and hydrogen yield, thereby integrating research findings into teaching practice. On this basis, the course positioning, three-dimensional teaching objectives (knowledge, ability, and literacy), task sheets and reflection questions, as well as formative assessment and summative evaluation schemes are designed, forming a teaching loop of "principle learning - modeling and simulation - data analysis - seminar evaluation". This experimental design aims to develop innovative laboratory courses in energy, power, chemical, and environmental disciplines, which is conducive to stimulating students' research interest, cultivating their innovative thinking and computer simulation skills, and promoting the deep integration of theoretical instruction with practical training.

Keywords

Supercritical Water Gasification, Thermodynamic Modeling, Innovative Experiment, Energy and Power, Environmental and Chemical Engineering

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. 绪论

油田废水主要来源于油气开采全过程中的钻井废水、压裂返排液以及占比高达 99% 以上的油气田采出水, 其组成是极为复杂的液态混合物。油田废水不仅含有原油、悬浮物、重金属离子及硫酸盐还原菌等各类细菌, 还富含 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Ba^{2+} 等易结垢离子以及采油过程中投加的驱油剂、破乳剂等各种化学药剂, 同时可能携带苯系物(BTEX)、多环芳烃(PAHs)等有毒有机物, 若未经妥善处理, 其危害极为严重[1]。废水直接排放会严重污染地表水体、土壤及地下水, 高盐度和油类物质会导致生态破坏、动植物死亡, 废水中的酸性气体和盐类会加速腐蚀管线设备, 而悬浮物和细菌则易堵塞地层孔隙影响原油采收率, 且其中所含的重金属及苯系致癌物还会通过食物链富集最终威胁人体健康[2]。这使得成分多变、处理难度极大的油田废水成为石油工业亟待解决的关键环保难题之一。

超临界水气化技术是一项清洁高效的有机废弃物热化学转化技术[3]。核心原理在于利用水在超过 374.3℃、22.1 MPa 的临界点后形成的超临界水作为特殊反应介质, 其兼具高扩散性与低粘度的类气体性质和强溶解能力的类液体性质, 能够将废水中的复杂有机物迅速分解并与其形成均相反应体系, 在高温环境下通过一系列热化学反应将其高效地转化为以氢气为主的可燃气体[4][5]。相较于传统方法, 该技术

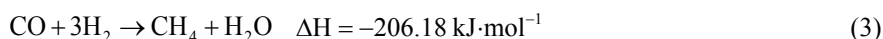
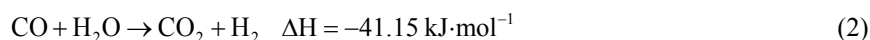
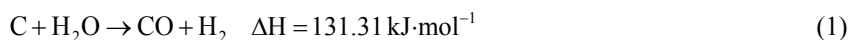
优势显著, 它不仅能实现有机物的高效降解, 还能将原本有害的废弃物资源化转化为高价值氢气, 且系统具有实现能量自给的潜力, 同时结合碳捕集与封存技术后可大幅降低温室气体排放[6]。因此超临界水气化技术被视为一种清洁、高效且有望实现油田废水无害化处理和资源化利用的前沿技术。

Aspen Plus 是化工热力学、数值计算和计算机科学相结合的产物, 它以计算机为工具, 应用各种热力学模型和数值求解方法, 对各种化工过程进行稳态和动态模拟, 用来解决工艺设计、优化及工程放大等实际问题[7]。Aspen Plus 是用来模拟化工过程的计算机程序, 其核心采用 Fortran 和 C++ 语言编写, 拥有庞大的物性数据库和高效的数值求解器。为了便于交互操作和灵活配置, Aspen Plus 采用图形用户界面与模块化结构, 支持用户拖拽式建模、自定义参数以及批处理运行, 它可在个人工作站或高性能计算集群上运行, 并支持与外部优化器或自定义程序集成。Aspen Plus 具有完备的单元操作模型、多种热力学方法、灵敏度分析、设计规定、优化算法以及数据回归和物性估算等丰富功能, 同时可处理电解质、固体和高压非理想体系, 从而为工艺条件筛选和能量自给评估提供有利支持。

本文结合实际科研经验, 探索利用 Aspen Plus 软件模拟油田废水超临界水气化过程的产物组成及分布规律。在模拟实验过程中, 选用 RGibbs 平衡反应器模块, 基于吉布斯自由能最小化原理, 在全局组分列表中定义 C、H、O、N 等元素及可能的产物组分(如 H_2 、 CH_4 、 CO 、 CO_2 等), 并选择 PR-BM 状态方程作为全局物性方法, 以准确描述高温高压下超临界水-有机物-气体的非理想热力学行为, 随后设置进料物流的流量、温度、压力及元素组成, 通过灵敏度分析工具研究反应温度、压力、物料浓度等关键参数对产气组分、碳气化效率和氢气产率的影响规律。使学生通过对不同操作条件下的模拟结果进行对比, 进一步深入理解超临界水的反应介质特性、有机物的气化特性及其热化学转化机制, 从而对能源动力及环境化工交叉领域的专业课程有更加深入的了解。

2. 热力学平衡原理

有机物在超临界水中的气化涉及复杂的反应网络, 现有研究将其核心步骤归结为三个关键反应[8]。具体而言, 式(1)表示蒸汽重整反应, 式(2)为水气变换反应, 式(3)则代表甲烷化反应。



热力学平衡是指系统的性质和状态不随时间而发生改变, 该方法从化学反应进行的方向和限度等角度来分析和研究有机物超临界水气化过程, 通过热力学平衡预测气化反应产物的分布和产量, 揭示有机物在超临界水中完全气化的可行性。

本研究以吉布斯自由能最小化作为热力学平衡判据, 热力学性质计算选用 PR-BM 状态方程, 该方程因在超临界区域具有较高的计算精度而被广泛应用[9]。

$$G = \sum_{i=1}^K \mu_i n_i \quad (4)$$

式中: K 为产物中的组分数, μ_i 为组分的化学势, n_i 组分 i 的摩尔数。

$$\sum_{j=1}^I \left(\sum_{i=1}^K \beta_{ij} n_i - \beta_j^0 \right) = 0 \quad (5)$$

式中: β_{ij} 为第 i 组分里 j 种元素的数量, β_j^0 为反应前中第 j 种元素的数量。

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V(V+b)+b(V-b)} \quad (6)$$

式中： a 为度量分子间引力参数， b 为每个分子平均占有空间的大小。

$$a = \frac{0.4572R^2T_c^2}{P_c}\alpha(T) \quad (7)$$

$$b = \frac{0.0778RT_c}{P_c} \quad (8)$$

$$\alpha(T) = \exp\left[c_e\left(1 - \left(T_r\right)^d\right)\right], T_r = \frac{T}{T_c} > 1 \quad (9)$$

$$c_e = \frac{m}{d} \quad (10)$$

$$d = 1 + \frac{m}{2} \quad (11)$$

$$m = 0.37464 + 1.54226\omega - 0.2699\omega^2 \quad (12)$$

式中： m 为偏心因子 ω 的函数。

3. 模拟实验介绍及操作步骤

Aspen Plus 是一款基于热力学和数值计算的流程模拟软件，主要用于化工过程的稳态与动态模拟、物性计算及工艺优化，其基本操作步骤包括新建案例、定义组分并选择物性方法(如 PR-BM)、通过拖拽模块搭建流程图、设置各单元操作参数与进料条件，然后运行模拟并对结果进行灵敏度和优化分析，具体步骤如下：

- 1) 打开 Aspen Plus 新建空白模拟，并进行命名；
- 2) 在物性模块中定义常规及非常规组分，常规组分可通过组分 ID、组分名称或者别名查找，非常规组分通过自定义完成命名；
- 3) 在方法中选择基本方法为 PR-BM，方法过滤器设置为 COMMON，自由水方法选择 IAPWS-95，水溶度选择 3；
- 4) 在 NC 物性中对命名的非常规物性模型进行设置，代码设置为 6111，组分属性要求中包括元素分析，工业分析等，同时在纯组分中输入非常规组分的热值，然后完成物性计算；
- 5) 在模拟模块中打开主工艺流程，并通过拖拽在主工艺流程中完成设备模型选型，包括泵、反应器、换热器、分离器等，通过物料流线等将各个设备连接；
- 6) 设定进入系统的物料参数，包括其流量、温度、压力；
- 7) 设定泵的效率和出口压力，换热器设置最小换热温差不少于 10℃，加热器、冷却器可设定流股出口温度和压力，气化反应器采用两个设备完成，包括化学计量反应器和吉布斯反应器，可通过设定反应器温度和压力进行稳态反应过程的模拟。化学计量反应器采用 Fortran 语言编程将物料(非常规组分)按照其元素分析和工业分析结果进行分解，吉布斯反应器将分解后的产品按照吉布斯自由能最小化原理计算产物的化学平衡分布。通过设置分离器的分离率可实现固-液、气-液、气-固组分的有效分离；
- 8) 在灵敏度分析列表中新建系列灵敏度分析模块，采用控制变量法调整温度、压力、物料浓度等参数输入，获得气体产量和气体摩尔分数等输出；
- 9) 在面板中点击运行，计算完成后，在流股结果和灵敏度分析设置结果中均可调用计算结果，并导入 Excel 中进行数据分析。

最后在 Aspen Plus 软件主工艺流程中构建的油田废水超临界水气化模型如图 1 所示。

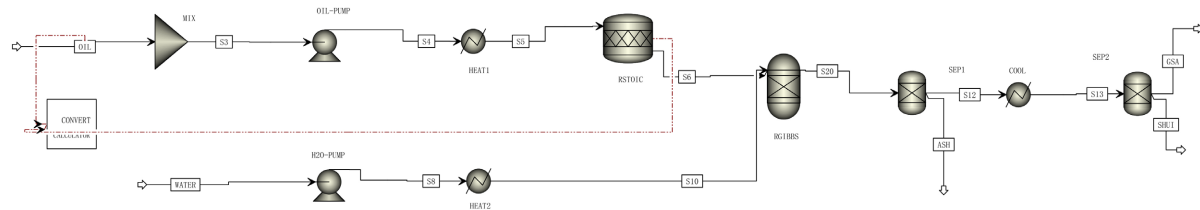


Figure 1. Development of a model for supercritical water gasification of oilfield wastewater
图 1. 油田废水超临界水气化模型构建

下面对图中关键单元操作单元进行详细描述。在经历多次油田开采过程后，采出废水和原油混合物中的含水量可以达到 70 wt%~90 wt%。这里以油田废水中的原油作为其有机组分的模型化合物，原油的相关物性如表 1 所示，包括其元素分析、工业分析和低位发热量。同时假设油田废水含水量为 75 wt%，即图 1 中 OIL 流股为 25 wt%的原油和 75 wt%的水组成。

Table 1. Relevant physical properties of crude oil (oilfield wastewater model compounds)
表 1. 原油(油田废水模型化合物)的相关物性

元素分析 ^a (wt%)					工业分析(wt%)				低位发热量 (MJ·kg ⁻¹)
C	H	N	S	O ^a	水分	灰分	挥发分	固定碳	
87.75	9.85	0.94	1.22	0.24	1.92	0	96.46	3.54	41.51

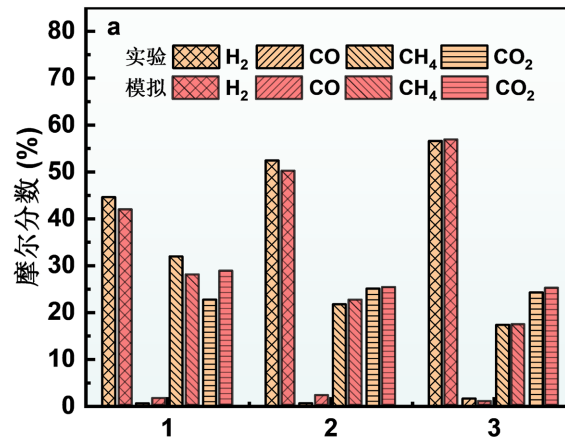


Figure 2. Comparison of simulation results with the experimental results (operating parameter 1: 25 MPa, 650℃, 8 wt%, operating parameter 2: 24 MPa, 600℃, 5 wt%, operating parameter 3: 23 MPa, 680℃, 5.7 wt%)

图 2. 模拟结果与实验结果的对比(工况 1: 25 MPa, 650℃, 8 wt%, 工况 2: 24 MPa, 600℃, 5 wt%, 工况 3: 23 MPa, 680℃, 5.7 wt%)

由于油田废水是一种没有特定化学式的常规物质，在软件中需要通过两个反应器来描述超临界水气化过程，包括 RSTOIC (化学计量反应器)和 RGIBBS (吉布斯反应器)。在 RSTOIC 中设定相应的反应方程式将油田废水分解为 C、H₂、N₂、S、O₂，随后这些物质进入 RGIBBS 并基于吉布斯自由能最小化原理达到化学反应平衡。这里 RSTOIC (化学计量反应器)和 RGIBBS (吉布斯反应器)可以将其温度设定为 660℃，

压力设定为 25 MPa。OIL-PUMP 和 H₂O-PUMP 两个水泵的出口压力设为 25 MPa，泵效率为 90%。HEAT1 和 HEAT2 加热器设定出口温度和压力分别为 660℃和 25 MPa。COOLER 冷却器出口温度和压力分别为 25℃和 25 MPa。SEP1 设定气固分离效率为 1，SEP1 设定气液分离效率为 1。所有进入系统物质的温度和压力都设定为环境状态(25℃、0.1 MPa)。

此外在获得详细的模拟数据前，有必要先对构建的模型进行可靠的实验验证。图 2 展示了各种油田废水模型化合物在超临界水气化过程的热力学平衡计算结果与实验结果的对比[10]。本文中模型验证部分的实验结果直接基于文献数据，未作任何修改。通过模拟计算得到的气体组分的摩尔分数与多个实验工况的数据点均吻合良好。这表明本文构建的模型能够很好地描述油田废水超临界水气化过程。

4. 教学实施方案

4.1. 实验在课程体系中的定位

本文内容面向能源与动力工程、化学工程与工艺、环境工程等能源动力及环境化工交叉专业高年级本科生，定位为专业综合创新实验或开放实验。建议安排在《工程热力学》《化工热力学》《化学反应工程》《能源转化与利用》《化工过程模拟》等课程之后，并与大学生创新创业训练计划、毕业设计、节能减排竞赛、化工设计竞赛等实践环节衔接。建议安排 16 学时左右，其中理论讲授与任务布置 2 学时、上机建模与模拟 8 学时、小组研讨 2 学时、汇报答辩 4 学时；也可采用“课内 8 学时 + 课外 8 学时”的混合式模式。实验以 3~5 人/组为宜，强调分工协作、数据共享与独立分析。

4.2. 教学目标

- 1) 理解超临界水的基本性质及超临界水气化制氢的基本原理；
- 2) 掌握蒸汽重整、水气变换和甲烷化三个核心反应及其热力学特征；
- 3) 掌握吉布斯自由能最小化原理、PR-BM 状态方程、RGibbs 与 RStoic 反应器模块的基本原理；
- 4) 理解反应温度、压力、物料浓度对产气组分、氢气产率和冷煤气效率的影响规律；
- 5) 熟悉 Aspen Plus 物性方法选择、非常规组分定义、灵敏度分析和数据导出方法；
- 6) 激发学生对新能源、氢能、超临界水气化及低碳环保技术的科研兴趣。

4.3. 教学思考

- 1) 为什么本实验采用 RGibbs 平衡反应器，而不是动力学反应器？热力学平衡模拟的适用边界是什么？
- 2) RStoic 与 RGibbs 在本实验中分别承担什么功能？如何通过元素守恒校核 RStoic 分解结果？
- 3) 为什么温度升高时 H₂ 摩尔分数增加、CH₄ 摩尔分数降低？请从蒸汽重整、水气变换和甲烷化反应角度解释。同时思考压力以及物料浓度的影响机制。
- 4) 模拟结果与实验结果存在偏差的可能原因有哪些？如何通过引入焦炭、动力学或传热限制改进模型？

4.4. 过程性评价方案

建议过程性评价占总成绩的 60%，重点评价学生在实验过程中的参与度、规范性、分析能力和协作能力，如表 2 所示。

过程性评价应制定明确评分标准。例如，优秀标准为：模型收敛且物性方法正确，灵敏度分析设计合理，能结合反应机理解释温度、压力、浓度影响，图表规范，数据可复现；合格标准为：能完成基本流程搭建和趋势分析，但机理解释和优化建议较浅；不合格标准为：无法完成流程收敛、数据记录混乱、存在抄袭或数据造假。

Table 2. Scheme for formative assessment
表 2. 过程性评价方案

评价环节	建议权重	评价内容	评价主体
课前预习与概念前测	10%	核心反应、临界参数、吉布斯自由能等概念掌握情况	教师评价
上机操作与流程规范	20%	物性方法、组分定义、流程搭建、参数设置、收敛性	教师评价 + 组间互评
任务单与数据记录	20%	灵敏度分析设置、数据完整性、可追溯性、图表规范	教师评价
模型验证与误差分析	15%	与文献实验数据对比、误差计算、偏差原因分析	教师评价
小组研讨与阶段汇报	20%	机理解释、优化建议、团队协作、表达逻辑	教师评价 + 组内互评
实验记录与反思	15%	问题记录、解决过程、反思深度、数据诚信	教师评价

4.5. 总结性考核方案

建议总结性考核占总成绩的 40%，采用“模拟源文件 + 研究报告 + 答辩”相结合的方式，如表 3 所示。

Table 3. Scheme for summary assessment
表 3. 总结性考核评价方案

考核项目	建议权重	考核要求
Aspen Plus 源文件与数据包	10%	流程完整、参数可复现、数据导出规范
研究报告或小论文	20%	包含模型建立、验证、灵敏度分析、机理解释、优化建议和反思
汇报答辩	10%	逻辑清晰、图表准确、能回答教师和同学提问

总评成绩可由“过程性评价 × 60% + 总结性考核 × 40%”构成。总结性考核重点考查学生是否真正掌握“建模 - 验证 - 分析 - 优化”的完整过程，而非仅得到某一组模拟数据。

4.6. 教学组织与实施建议

课前发布任务单和阅读材料，要求学生完成预习；课中采用“教师精讲 + 软件演示 + 分组建模 + 研讨汇报”的方式，教师重点讲解热力学原理、物性方法选择和反应器设置逻辑；课后组织数据分析、报告撰写和答辩。教学过程中应强调软件版权意识、数据真实性和引用规范，避免直接复制他人模拟文件或实验结果。通过该教学实施方案，可形成“原理学习 - 建模模拟 - 数据分析 - 研讨评价”的教学闭环，使科研成果真正转化为可操作、可评价的创新实验教学内容。

5. 计算结果分析

5.1. 温度的影响

图 3 呈现了在 25 MPa、7.58 wt%条件下，反应温度对气化平衡的影响规律。随温度升高，H₂ 摩尔分数由 400℃时的 4.41%升至 800℃时的 56.92%，对应产气量从 3.30 mol·kg⁻¹ 增至 94.67 mol·kg⁻¹；CH₄ 则呈相反趋势，摩尔分数从 62.62%降至 13.18%，产气量由 46.94 mol·kg⁻¹ 减至 21.93 mol·kg⁻¹。CO 与 CO₂ 的变化幅度相对有限。因 H₂ 热值较高，冷煤气效率由 103%提升至 118.17%。C₂ 烃类产物的摩尔分数极

微, 最高不足万分之一, 可忽略不计。温度的升高能够促进蒸汽重整反应, 并抑制甲烷化反应, 使得氢气产量增加, 甲烷产量降低。

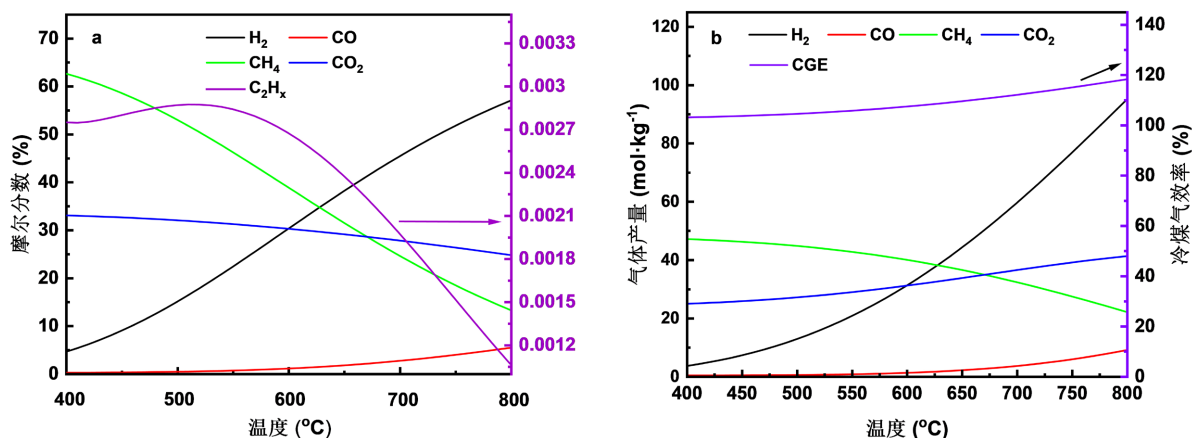


Figure 3. Effect of temperature on the gasification equilibrium of oilfield wastewater in supercritical water: (a) mole fraction, (b) gas yield

图 3. 温度对油田废水在超临界水中气化平衡的影响: (a) 摩尔分数, (b) 气体产量

5.2. 压力的影响

压力对气化平衡的影响如图 4 所示。当压力由 20 MPa 升至 30 MPa 时, H₂ 摩尔分数从 42.50% 降至 36.93%, 产气量由 52.96 mol·kg⁻¹ 降至 41.96 mol·kg⁻¹, 降幅较为有限; CH₄ 摩尔分数和产气量则呈现小幅上升。依据勒夏特列原理, 增压有利于气相体积减小的反应方向, 故甲烷化反应正向移动, 导致 H₂ 轻微损耗而 CH₄ 略有积累。CO 与 CO₂ 随压力变化的波动较为平缓, 冷煤气效率整体基本维持稳定。

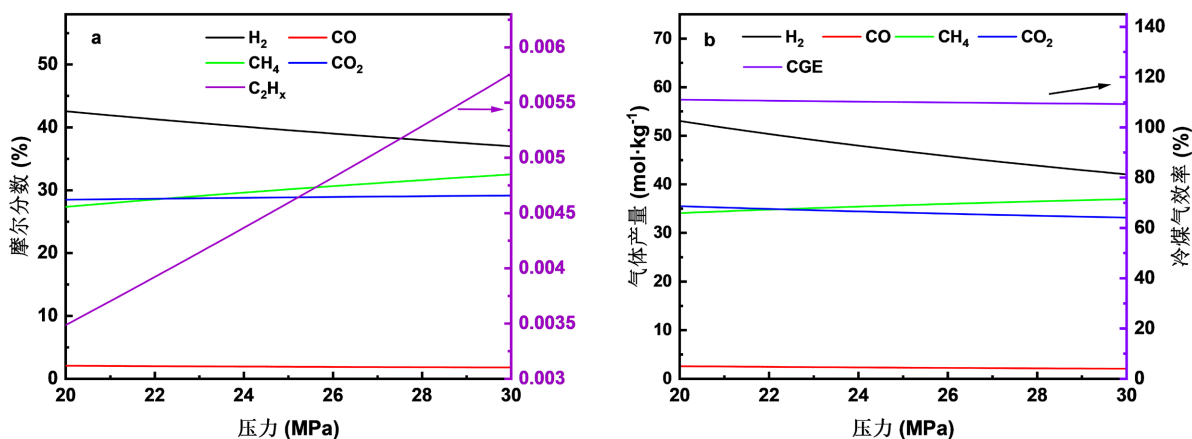


Figure 4. Effect of pressure on the gasification equilibrium of oilfield wastewater in supercritical water: (a) mole fraction, (b) gas yield

图 4. 压力对油田废水在超临界水中气化平衡的影响: (a) 摩尔分数, (b) 气体产量

5.3. 物料浓度的影响

图 5 反映了 660℃、25 MPa 条件下物料浓度对气化平衡的影响。随着浓度升高, H₂ 摩尔分数和产气量均明显下降, 而 CH₄ 则相应增加, 这归因于高浓度条件有利于甲烷化反应的正向推进。与此同时, CO 产气量略有上升, CO₂ 产气量有所下降, 表明较高的原油浓度对水气变换反应产生了一定的抑制作用。

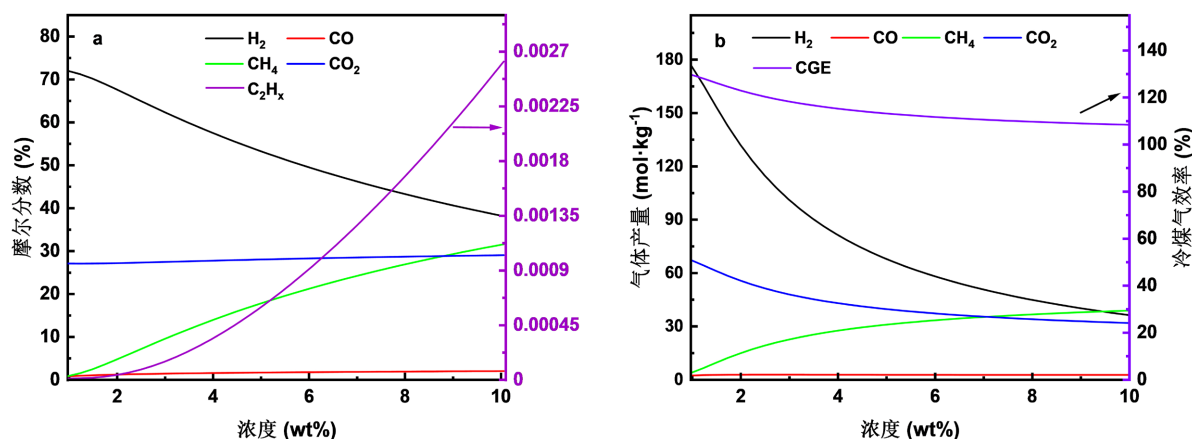


Figure 5. Effect of concentration on the gasification equilibrium of oilfield wastewater in supercritical water: (a) mole fraction, (b) gas yield

图 5. 浓度对油田废水在超临界水中气化平衡的影响: (a) 摩尔分数, (b) 气体产量

6. 模拟实验结论及意义

本创新实验设计利用 Aspen Plus 软件中的 RGibbs 平衡反应器模块, 对油田废水超临界水气化制氢过程进行了热力学平衡模拟分析。通过灵敏度分析工具研究不同操作参数对气化产物的影响, 获得以下结论:

1、反应温度是影响超临界水气化制氢效果的最显著因素。随着温度从 400℃ 升高至 800℃, H_2 摩尔分数由 4.41% 上升至 56.92%, 气体产量由 $3.30 \text{ mol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加至 $94.67 \text{ mol} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而 CH_4 摩尔分数则从 62.62% 降至 13.18%, 表明高温有利于蒸汽重整反应和水气变换反应的正向进行。

2、反应压力对气化平衡的影响相对较弱。压力从 20 MPa 升至 30 MPa 时, H_2 摩尔分数仅从 42.50% 小幅降至 36.93%, 冷煤气效率基本保持不变, 说明超临界水气化制氢工艺可在较宽的压力范围内稳定运行。

3、物料浓度是影响气化效率的另一重要参数。随着浓度提高, H_2 摩尔分数和气体产量明显下降, 而 CH_4 产量增加, 表明高浓度不利于水气变换反应的进行, 在实际工艺设计中应控制适宜的进料浓度。

4、在教学实施层面, 本实验定位为能源动力与环境化工交叉专业高年级综合创新实验, 设置知识、能力、素养三维教学目标, 并以任务单和思考题驱动课前预习、上机建模、灵敏度分析、小组研讨和报告答辩。过程性评价覆盖预习、操作规范、任务单、模型验证、研讨汇报和实验反思, 总结性考核采用模拟源文件、研究报告和答辩相结合的方式。该设计形成了“原理学习 - 建模模拟 - 数据分析 - 研讨评价”的教学闭环, 有助于提升学生的工程建模能力、热力学分析能力和团队协作能力。

该模拟实验将前沿科研成果转化为本科创新实验教学内容, 打破了传统实验教学中“只测不究”的局限, 使学生在计算机仿真环境中深入理解热力学平衡原理、气化反应特性及参数优化方法, 充分激发了大学生对新能源与低碳技术领域的科研热情, 有效培养了学生的工程建模能力和科学分析思维, 促进了理论教学与工程实践的有机融合, 对推动能源动力、环境化工类专业创新实验课程建设和复合人才培养具有重要的现实意义, 符合国家对创新型人才培养的战略要求。

基金项目

国家自然科学基金(No. 52606221), 江西省自然科学基金(No. 20252BAC200326)(No. 20262BAC240261)。

参考文献

- [1] Wang, J., Feng, L., Steve, M., Tang, X., Gail, T.E. and Mikael, H. (2015) China's Unconventional Oil: A Review of Its Resources and Outlook for Long-Term Production. *Energy*, **82**, 31-42. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.12.042>

-
- [2] Campos, J.C., Borges, R.M.H., Oliveira Filho, A.M., Nobrega, R. and Sant'Anna Jr., G.L. (2002) Oilfield Wastewater Treatment by Combined Microfiltration and Biological Processes. *Water Research*, **36**, 95-104. [https://doi.org/10.1016/s0043-1354\(01\)00203-2](https://doi.org/10.1016/s0043-1354(01)00203-2)
- [3] Peng, Z., Dong, R., Tian, J., Jia, H., Xu, J., Lu, L., *et al.* (2026) A Generalizable and Robust Kinetic Model for Predicting Sustainable Hydrogen Production by Supercritical Water Gasification of Food Waste. *Applied Thermal Engineering*, **302**, Article ID: 131934. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2026.131934>
- [4] Tian, J., Dong, R., Jia, H., Peng, Z., Liu, Z., Wang, L., *et al.* (2026) Interpretable Machine Learning for Predicting and Evaluating Hydrogen Production from Supercritical Water Gasification of Coal. *Fuel*, **404**, Article ID: 136173. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.136173>
- [5] Jia, H., Tan, J., Wang, S., Ao, Y., Nie, Q., Zhao, W., *et al.* (2026) Study on the Gasification Mechanism of Acrylonitrile-Butadiene-Styrene in Supercritical Water Using Experimental and ReaxFF Simulation: Products, Pathways, and Nitrogen Migration. *Journal of Hazardous Materials*, **508**, Article ID: 141968. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2026.141968>
- [6] Tan, J., Nie, Q., Zou, Y., Jia, H., Xu, J., Lu, L., *et al.* (2026) Thermodynamic Analysis and Environmental Impact Assessment of a Hydrogen and Power Cogeneration System: Achieving Negative Carbon Emissions with Plastic Waste Treatment via Supercritical Water Gasification Technology. *Applied Thermal Engineering*, **300**, Article ID: 131350. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2026.131350>
- [7] Dong, R., Jia, H., Tian, J., Wu, L., Liu, Z., Peng, Z., *et al.* (2025) Thermodynamic Analysis and Life Cycle Assessment of the Preferred Supercritical Water Gasification Coupled System for Energy Self-Sufficiency: From Food Waste to Hydrogen. *Energy*, **317**, Article ID: 134553. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134553>
- [8] Latiza, R.J.P., Rubi, R.V. and Quitain, A. (2025) Supercritical Water Gasification for Hospital Wastewater. *Journal of Hazardous Materials Advances*, **18**, Article ID: 100651. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100651>
- [9] Chen, J., Liang, J., Xu, Z. and E, J. (2020) Assessment of Supercritical Water Gasification Process for Combustible Gas Production from Thermodynamic, Environmental and Techno-Economic Perspectives: A Review. *Energy Conversion and Management*, **226**, Article ID: 113497. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113497>
- [10] Peng, Z., Wang, L., Yi, L., Xu, J., Liu, Z., Jin, H., *et al.* (2024) Performance Assessment of an Energetically Self-Sufficient System for Hydrogen Production from Oilfield Wastewater Treated by Supercritical Water Gasification. *International Journal of Hydrogen Energy*, **53**, 907-918. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.11.315>