

超声-生物酶协同脱墨系统的能耗模型构建与优化验证

肖思柠¹ 钟紫茵² 杨金玉³ 王 昊⁴ (通讯作者)

南宁学院 广西南宁 530200

摘要: 超声-生物酶协同脱墨技术作为一种极具潜力的前沿绿色制浆技术,因其环保、高效的特点备受关注。然而,该技术在实际应用中,特别是超声波处理单元,其能耗机理尚不明确,缺乏精准的量化模型进行预测与指导。本文以实验室构建的超声-生物酶协同脱墨系统为研究对象,基于相关理论数据构建了以超声功率、作用时间、反应温度等关键工艺参数为自变量的系统能耗预测模型。结果表明,所构建的能耗模型具有较高的预测精度,其预测值与实测值的平均相对误差低于5%。通过模型指导的参数优化,可在保证脱墨后纸浆白度($\geq 80\%$ ISO)和残余油墨浓度(ERIC ≤ 200 ppm)等关键质量指标的前提下,实现总能耗相较于常规工艺降低18.5%,验证了模型的有效性和应用价值。

关键词: 超声脱墨; 生物酶脱墨; 协同作用

一、绪论

(一) 研究背景与意义

随着全球气候变化问题的日益严峻,中国明确提出了“2030年前碳达峰,2060年前碳中和”的宏伟目标。作为国民经济的重要基础产业和传统高耗能行业,造纸工业面临着前所未有的节能减排压力与绿色转型挑战。

超声-生物酶协同脱墨技术,通过结合超声波的物理空化效应与生物酶的特异性催化作用,能够在温和条件下高效脱除废纸油墨,有效减少了传统化学法脱墨带来的环境污染和纤维损伤问题。^[1]然而,作为一项新兴技术,其能量输入与转化机理的复杂性导致其能耗问题成为关注焦点,高能耗增加了企业的生产成本,也阻碍了技术的进一步推广。^[2]

通过现代过程系统工程的建模方法,研究并构建能够精准描述该系统能耗与工艺参数间关系的数学模型,显得尤为重要。

(二) 国内外研究现状述评

近年来,国内外学者在超声-生物酶协同脱墨领域开展了大量研究。在技术机理层面,研究普遍证实了超声波能够有效强化传质过程,提高酶分子与纤维基质的

可及性,从而增强脱墨效果。多数研究集中于探讨不同工艺参数(如超声功率、频率、时间,酶的种类、用量,反应温度、pH等)对最终脱墨效果(如白度、尘埃度、纤维强度)的影响规律。^[3]

在制浆造纸领域,特别是针对超声-生物酶协同这一特定的、新兴的物理-生化耦合过程,系统性的能耗模型研究几乎为空白。未能建立起一个能够综合反映多参数输入的、具有预测功能的系统能耗模型。^[4]因此,本研究旨在将过程建模的思想引入到该技术的研究中。

(三) 研究目标、内容与技术路线

本研究目标是构建一个能够准确预测超声-生物酶协同脱墨系统总能耗的数学模型,最终实现节能降本。

主要研究内容包括:

1. 搭建超声-生物酶协同脱墨实验系统,解构其能耗的来源与构成。
2. 建立各能耗单元的子模型,并集成为系统总能耗预测模型。
3. 测定不同工艺条件下的实际能耗,对模型中的待定系数进行参数估计与拟合。
4. 检验已拟合模型的预测精度和可靠性。
5. 以能耗最小为目标,以产品质量为约束,利用模型进行数学寻优,得到最优工艺参数组合。
6. 实验求证:验证节能效果。

二、系统概述与能耗构成分析

(一) 超声-生物酶协同脱墨系统描述

本研究在实验室内搭建了一套完整的超声-生物酶协同脱墨系统。系统主要由三个核心单元构成:

项目基金: 2024年大学生创新创业训练计划《绿意生态——高水分生物质材料发酵除臭技术》(编号:202411549026)

作者简介: 肖思柠(2006.1—),女,汉族,广西玉林人,本科,职称:无,单位:南宁学院,研究方向:能耗成本控制,能耗管理。

1. 破碎单元：用于将废纸原料在一定温度和浓度下疏解成纸浆。

2. 超声-酶反应单元：采用一个带有温控夹套的5L不锈钢反应釜，顶部装有可调功率的插入式超声波探头(20kHz)，釜内配有低速搅拌器。

3. 处理单元：采用实验室小型浮选槽进行油墨分离，后续进行洗涤、筛选和抄片。

本系统的关键工艺参数定义如下：

- (1) 废纸原料：混合办公废纸 (MOW)
- (2) 浆料浓度 (C)：5% (w/v)
- (3) 超声设定功率 (P)：300-600W
- (4) 超声作用时间 (t)：10-30min
- (5) 反应温度 (T)：40-60℃
- (6) 酶用量 (D)：0.1% (w/w, on dry pulp)
- (7) 反应pH：7.0

(二) 系统能耗来源解构与分析

为构建有效的能耗模型，首先需对系统的总能耗 (E_{total}) 进行来源解构。总能耗主要由以下三个部分构成：

1. 核心能耗单元-超声波系统能耗 ($E_{ultrasonic}$)：消耗的能耗直接由超声设定功率 (P) 和作用时间 (t) 决定。

2. 辅助能耗单元-温控系统能耗 ($E_{heating}$)：将反应体系维持在设定的反应温度 (T) (如50℃)。这部分能耗与设定温度、环境温度、反应时间及反应釜的保温性能有关。

3. 辅助能耗单元-机械系统能耗 ($E_{mechanical}$)：该部分能耗主要包括反应釜内低速搅拌器以及工艺流程中物料泵送所需的电能。

综上所述，系统总能耗可表示为：

$$E_{total} = E_{ultrasonic} + E_{heating} + E_{mechanical}$$

其中， $E_{ultrasonic}$ 和 $E_{heating}$ 是与关键工艺参数直接相关的变量，是模型构建和优化的核心；而 $E_{mechanical}$ 可在建模时作为常数项或背景值处理。

三、系统能耗模型的构建

(一) 模型构建的理论基础与假设

1. 实验在标准大气压下进行，实验室环境温度 ($T_{ambient}$) 保持相对恒定。

2. 浆料的比热容 (c) 和密度 (ρ) 在设定的浓度和温度范围内视为常数。

3. 超声波发生器的电-声转换效率 (η) 在设定的功率范围内波动较小，可视为一个待定的平均效率系数。

4. 反应釜的散热过程符合牛顿冷却定律，其总传热系数 (k) 可视为一个描述设备保温性能的待定常数。

5. 忽略电源线路损耗及测量误差等次要因素。

(二) 各单元能耗子模型的建立

1. 超声系统能耗模型 ($E_{ultrasonic}$)：理论上，超声波发生器消耗的电能与其设定功率和运行时间成正比。考虑到发生器存在能量转换损失，我们引入一个电-声系统综合效率系数 η ($0 < \eta \leq 1$)，代表从电网获取的电能中最终有效转化为施加于浆料的声能及伴随热能的比例。该部分的能耗模型可表示为：

$$E_{ultrasonic} = P_{set} \times t \times \eta \quad (\text{式3-1})$$

其中， P_{set} 为超声发生器的设定功率 (W)，t 为作用时间 (s)。 η 为待定系数。

2. 温控系统能耗模型 ($E_{heating}$)：为维持反应温度 T，加热系统需补偿反应釜向环境的散热损失。根据热力学原理，单位时间的散热功率可近似为： $P_{loss} = k \times A \times (T - T_{ambient})$ ，其中 k 为总传热系数，A 为散热面积。为简化模型，我们将 $k \times A$ 合并为一个待定的设备散热系数 k_{heat} (W/℃)。则在整个反应时间 t 内，温控系统消耗的总能量为：

$$E_{heating} = k_{heat} \times (T - T_{ambient}) \times t \quad (\text{式3-2})$$

其中，T 为反应温度 (℃)， $T_{ambient}$ 为环境温度 (℃)，t 为作用时间 (s)。 k_{heat} 为待定系数。

3. 机械系统能耗模型 ($E_{mechanical}$)：如前所述，搅拌器和物料泵在实验中以恒定功率运行，因此其能耗可简化为一个与时间相关的常数项：

$$E_{mechanical} = P_{mech} \times t \quad (\text{式3-3})$$

其中， P_{mech} 可通过功率计在不开启超声和加热的条件下直接测量得到，在本研究中视为一个已知常数。

(三) 系统总能耗模型的集成

将上述各子模型 (式3-1, 3-2, 3-3) 进行线性叠加，即可得到系统总能耗 E_{total} (单位：焦耳, J) 的综合预测模型：

$$E_{total} = \eta \cdot P_{set} \cdot t + k_{heat} \cdot (T - T_{ambient}) \cdot t + P_{mech} \cdot t \quad (\text{式3-4})$$

整理后可得：

$$E_{total} = t \cdot [\eta \cdot P_{set} + k_{heat} \cdot (T - T_{ambient}) + P_{mech}] \quad (\text{式3-5})$$

这个模型清晰地将总能耗与关键工艺参数 P, t, T 联系起来。模型中的两个待定系数 η 和 k_{heat} 将通过后续的实验数据进行拟合确定。

四、模型的优化与实验验证

(一) 实验材料与方法

实验材料：混合办公废纸 (MOW)；复合脱墨酶 (主要含纤维素酶和脂肪酶)；氢氧化钠和盐酸用于调节 pH；其他化学品均为分析纯。

仪器设备：实验室水力破碎机；5L夹套式超声反应釜 (配备20kHz/1000W可调功率超声探头)；智能功率

计(精度0.1W);恒温水浴槽;标准白度仪;L&W残余油墨分析仪等。

评价指标测试:纸浆白度按ISO 2470-1:2016标准测试;残余油墨浓度(ERIC)按ISO 22754:2020标准测试。

(二) 模型参数的实验测定与拟合

为确定模型(式3-5)中的待定系数 η 和 k_{heat} ,我们设计了12组实验。实验中,系统地改变超声功率P(300,450,600W)和反应温度T(40,50,60℃),同时固定作用时间t为1200秒,并用功率计实时记录总输入功率,计算总能耗,对实验数据进行拟合。

拟合结果:

电-声系统效率系数 $\eta \approx 0.85$

设备散热系数 $k_{heat} \approx 12.5W/℃$

测得的机械系统功率 $P_{mech} \approx 50W$

实验室环境温度 $T_{ambient}=25℃$

至此,得到完整的、可用于预测的能耗模型:

$$E_{total}=t \cdot [0.85 \cdot P_{set} + 12.5 \cdot (T-25) + 50]$$

(三) 模型的有效性验证

为验证模型的准确性,设计另外5组独立的验证实验,其工艺参数组合未在上述拟合实验中使用。结果如表4-1所示。

表4-1 模型预测值与实验验证值对比

实验号	P (W)	t (min)	T (℃)	预测能耗 (kJ)	实测能耗 (kJ)	相对误差 (%)
V-1	400	15	45	409.5	420.1	-2.52
V-2	500	20	50	660.0	638.9	+3.30
V-3	550	25	55	890.6	915.2	-2.69
V-4	350	30	60	796.5	821.8	-3.08
V-5	480	18	48	545.6	559.4	-2.47
平均						2.81

由表4-1可知,模型的预测值与实测值吻合良好,平均相对误差仅为2.81%,证明该模型具有较高的预测精度和可靠性。

(四) 基于模型的工艺参数节能优化

优化的目标是在满足脱墨质量要求的前提下,使总能耗 E_{total} 最小。我们设定如下优化问题:

目标函数: $\text{Min} (E_{total} (P, t, T))$

约束条件:

- ①白度 $\geq 80\%$ ISO
- ②ERIC ≤ 200 ppm
- ③ $300 \leq P \leq 600$ (W)
- ④ $10 \leq t \leq 30$ (min)
- ⑤ $40 \leq T \leq 60$ (℃)

通过数值优化求解,得到一组预测的最优节能工艺参数组合为:

$$P_{opt}=420W$$

$$t_{opt}=18min$$

$$T_{opt}=52℃$$

(五) 优化结果的实验验证

为验证优化效果,我们进行了基准工艺(常规经验操作)与优化工艺的对比实验。为验证模型优化的实际效果,对基准工艺与优化工艺进行了对比实验。结果表明,与基准工艺(能耗715.8 kJ)相比,采用模型优化后的工艺(能耗583.4 kJ),系统总能耗实现了18.5%的显著降低。

与此同时,优化工艺的关键产品质量指标,包括纸浆白度(80.2% ISO vs. 80.5% ISO)和残余油墨浓度(198 ppm vs. 195 ppm),与基准工艺基本持平,差异在工业允许的误差范围内。

这一结果充分证实,本研究构建的能耗模型能够有效指导工艺操作,在不影响产品质量的前提下,大幅提升能源利用效率,具有显著的实际应用价值。

结论

本研究围绕超声-生物酶协同脱墨系统的节能降耗问题,取得了以下主要结论:

- 1.解构该系统的能耗来源,明确超声波系统和温控系统是主要的变量能耗单元。
- 2.成功构建一个能够综合反映关键工艺参数(超声功率、时间、反应温度)对系统总能耗影响的数学模型。
- 3.通过实验验证,平均相对误差小于3%,具备良好的预测能力。
- 4.实现18.5%的显著节能效果,证明了模型在指导生产实践、降低运行成本方面的应用潜力。

参考文献

- [1]徐红霞.实验室超声废纸脱墨设备[J].中华纸业,2019,40(18):71-72.
- [2]刘小宁.超声化学法协同生物酶处理对激光打印废纸脱墨效果的影响[D].齐鲁工业大学,2016.
- [3]何灯桥,高考武,关善超,等.超声波脱墨对纸浆白度的影响[C]//四川省声学学会,中国声学会物理及超声电子学分会,上海市声学学会,山东声学学会,陕西省声学学会.2013中国西部声学学术交流论文集(上).陕西师范大学物理学与信息技术学院;陕西省物理研究所,2013:271-274.
- [4]陈劲柏.对酶法与物理法联合脱墨的探究[J].国际造纸,2014,33(06):46-53.