

水泥科技

2
2025

SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CEMENT

善用资源 服务建设



主办单位：

合肥水泥研究设计院有限公司

Email: snkj@hcrdi.com

水泥科技

(季刊 1988年创刊)

2025年第2期

主办单位:

合肥水泥研究设计院有限公司

编委会

名誉主任: 朱 兵

主 任: 张永龙

副 主 任: 王虔虔 郑 青

主 编: 胡 光

委 员: (按姓氏笔划排序)

王仕群 王 庆 叶卫东 许 涛

李 宁 李运军 李林桃 沈玉祥

周巧林 单矩程 侯贵斌 徐松波

徐 睿 高 霖 崔洪坤 韩修铭

褚 彪 魏 铸

封面摄影: 连锋

责任编辑: 解姗姗

编辑出版: 《水泥科技》编辑部

地 址: 合肥市望江东路60号

邮 编: 230051

编辑部电话: (0551) 63439575

广告部电话: (0551) 63439575

传 真: (0551) 63439575

网 址: <http://snkj.hcrdi.com>

投稿邮箱: snkj@hcrdi.com

目 次

基于LSTM-AMSgrad的立磨差压预测研究	龙磊/1
重水拉曼技术表征嗜热微生物在污泥中生长活性的应用研究	陈磊/8
加大煤矸石在预分解窑系统中掺加量的技术改造措施	焦国徽等/21
低品位碳酸锰矿煅烧提纯制备电解锰原料工艺研究	时继明/29
市政污泥混合搅拌输送系统的设计开发	王上锋/36
基于污泥浸提液的嗜热菌培养基优化研究	黄婷/45
水泥工厂节水措施分析	王崇昊/54
某钢结构工程项目成本控制措施的总结及应用	阮厚国/61
煤立磨MVM2900H改造经验浅谈	刘运华/67
袋装水泥自动装车机研制	徐立娟/72

基于LSTM-AMSgrad的立磨差压预测研究

龙磊

(合肥水泥研究设计院有限公司, 安徽 合肥 230051)

0 引言

立磨是水泥、冶金、电力等行业广泛使用的一种设备,其性能直接影响到企业的生产效率和能源消耗。立磨差压是立磨运行过程中的一个重要参数^[1],其控制对于立磨的稳定运行至关重要,直接影响立磨的工作状态。因此,对立磨差压的准确预测具有重要意义,由于立磨系统具有时序性和非线性特征,传统的差压预测方法难以满足实际需求。近年来,深度学习技术在时序数据处理和非线性建模方面取得了显著进展,为立磨差压预测提供了新的思路。长短时记忆网络(LSTM)^[2]是一种特殊的循环神经网络(RNN),具有较强的时序数据处理能力,它可以学习长期依赖关系,避免了传统RNN的梯度消失和梯度爆炸问题。AMSgrad优化器是一种自适应学习率的优化器,可以有效避免梯度下降过程中的不稳定性问题。因此,本文提出了一种基于LSTM-AMSgrad的立磨差压预测方法,以为立磨的稳定运行提供有力支持。

1 LSTM 预测模型

LSTM是RNN的一种变体,在处理时序数据时具有较强的学习能力和泛化能力。LSTM模型由多个LSTM单元组成,每个LSTM单元都有自己的输入门、遗忘门和输出门。它不仅能够记住过去的信息,而且可以选择性地忘记或输出这些信息,这使得LSTM在处理长期依赖关系时比传统的RNN更为有效。LSTM模型结构如图1所示。

基金项目:安徽省科技重大专项(202203f07020009);中国建材集团揭榜挂帅项目(2021YCJS01)

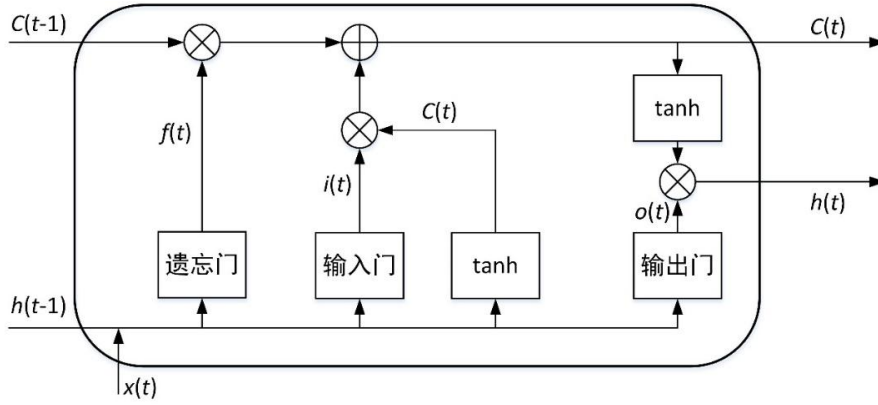


图 1 LSTM 模型结构

LSTM 模型计算过程如下:

(1) 遗忘门: 控制上一时刻的隐藏状态对当前时刻的贡献程度, 通过 *sigmoid* 函数生成一个 0 到 1 之间的值, 表示需要遗忘的比例, 记为 $f(t)$ 。

$$f(t) = \text{sigmoid}(W_f [h(t-1), x(t)] + b_f) \quad (1)$$

其中, W_f 和 b_f 分别是遗忘门的递归连接权重和偏置矩阵, $h(t-1)$ 是 $t-1$ 时刻的输出, $x(t)$ 是 t 时刻的输入。

(2) 输入门: 控制当前时刻网络的输入信息量, 通过 *sigmoid* 函数生成一个 0 到 1 之间的值, 表示允许通过的信息比例, 记为 $i(t)$ 。

$$i(t) = \text{sigmoid}(W_i [h(t-1), x(t)] + b_i) \quad (2)$$

$$\tilde{c}(t) = \text{tanh}(W_c [h(t-1), x(t)] + b_c) \quad (3)$$

$$C(t) = f(t) \cdot C(t-1) + i(t) \cdot \tilde{c}(t) \quad (4)$$

其中, i 为当前网络层, W_i 和 b_i 分别是 *sigmoid* 函数的权重和偏置, $\tilde{c}(t)$ 是 t 时刻的输入节点状态, $C(t)$ 和 $C(t-1)$ 分别是时刻 t 和 $t-1$ 的记忆单元, W_c 和 b_c 分别是 *tanh* 函数的权重和偏置。

(3) 输出门: 控制当前时刻网络的输出信息量, 通过 *sigmoid* 函数生成一个 0 到 1 之间的值, 表示允许通过的信息比例, 记为 $o(t)$ 。

$$o(t) = \text{sigmoid}(W_o [h(t-1), x(t)] + b_o) \quad (5)$$

$$h(t) = o(t) \cdot \text{tanh}(C(t)) \quad (6)$$

其中, W_o 和 b_o 分别是输出门的权重和偏置矩阵。

2 AMSgrad 优化算法

AMSgrad 优化算法由 Reddi 等人于 2018 年提出^[3]，在 Adam 算法的基础上进行了改进，引入了一个状态变量，通过维护一个历史梯度平方和的指数移动平均，来自适应地调整学习率，可以防止梯度下降过程中学习率过大导致的震荡或发散现象的发生，提高模型的收敛速度和稳定性。

AMSgrad 优化算法公式如下：

$$w_{t+1} = w_t - \frac{\alpha}{\sqrt{\hat{S}_t + \varepsilon}} \cdot V_t \quad (7)$$

其中：

$$\hat{S}_t = \max(\hat{S}_{t-1}, S_t) \quad (8)$$

$$V_t = \beta_1 V_{t-1} + (1 - \beta_1) \frac{\partial L}{\partial w_t} \quad (9)$$

$$S_t = \beta_2 S_{t-1} + (1 - \beta_2) \left[\frac{\partial L}{\partial w_t} \right]^2 \quad (10)$$

式中， w_{t+1} 和 w_t 分别是第 $t+1$ 和 t 次迭代的参数更新， α 是初始学习率， S_t 和 S_{t-1} 是第 t 和 $t-1$ 次迭代的梯度平方累计值， V_t 和 V_{t-1} 是第 t 和 $t-1$ 次迭代的累计梯度更新， β_1 、 β_2 是梯度衰减因子， ε 是一个比较小的数，避免分母为 0，对梯度平方累计值 S_t 作偏差纠正得到 \hat{S}_t 。

3 建立 LSTM-AMSgrad 立磨差压预测模型

基于深度学习框架建立 LSTM 立磨差压预测模型，它能够有效地处理时间序列数据，在其训练过程中，设定模型的均方误差 MSE 为损失函数，结合 AMSgrad 算法在优化过程中保持二阶动量的单调递增性，能有效捕捉时间序列数据中长期依赖关系，计算更新出模型的最佳网络参数，构建 LSTM-AMSgrad 的立磨差压预测模型，如图 2 所示，实现更精准的建模预测。

本文从某矿渣厂立磨控制系统数据库中选择稳定工况下运行的 932 组立磨差压历史数据，通过工艺机理及数据相关性分析，选取喂料量和出磨负压作为模型的输入量预测立磨差压。

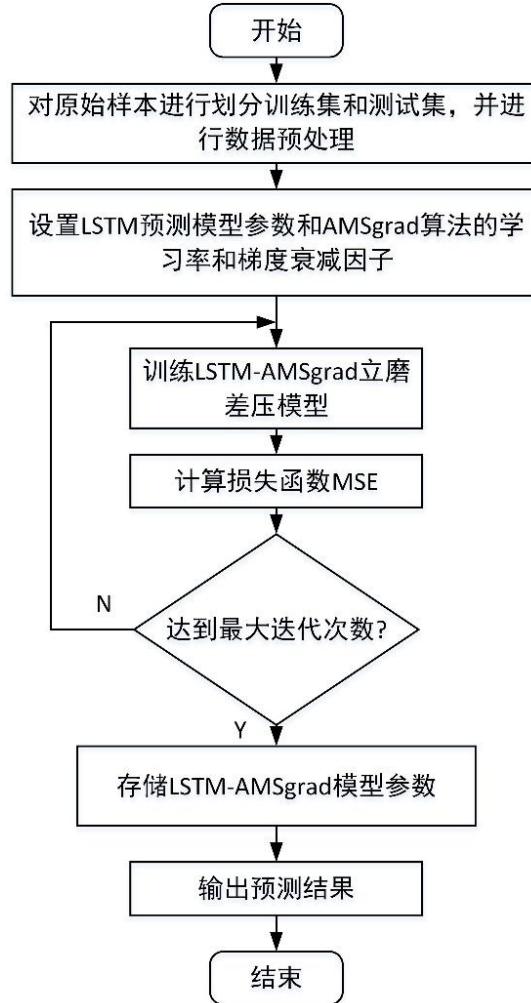


图 2 LSTM-AMSgrad 预测模型建立流程

首先，对原始样本数据进行 min-max 归一化处理，消除不同特征之间的量纲差异，然后选择 80% 的原始数据作为训练样本，用于模型训练，其余的作为测试样本，用于模型预测。

搭建深度学习环境，基于 TensorFlow 底层库，以 Keras 建立 LSTM-AMSgrad 模型，第一层 LSTM 层神经元数 50，第二层 LSTM 层神经元数 128，全连接层神经元为 1，激活函数使用 ReLU 函数，增加 Dropout 层（参数设为 0.1）防止过拟合，并基于 AMSgrad 算法进行优化，学习率设为 0.001，梯度衰减因子 β_1 、 β_2 分别设为 0.9 和 0.999，迭代次数设为 120，构建 LSTM-AMSgrad 立磨差压预测模型。立磨差压测试集预测数据曲线如图 3 所示，判断该模型的一个重要指标相对百分比误差

$\delta(y_i, \tilde{y}_i) = \frac{1}{y_i} \sum_{i=0}^{n_{samples}} |\tilde{y}_i - y_i|$ ，其测试集预测误差曲线如图 4 所示。

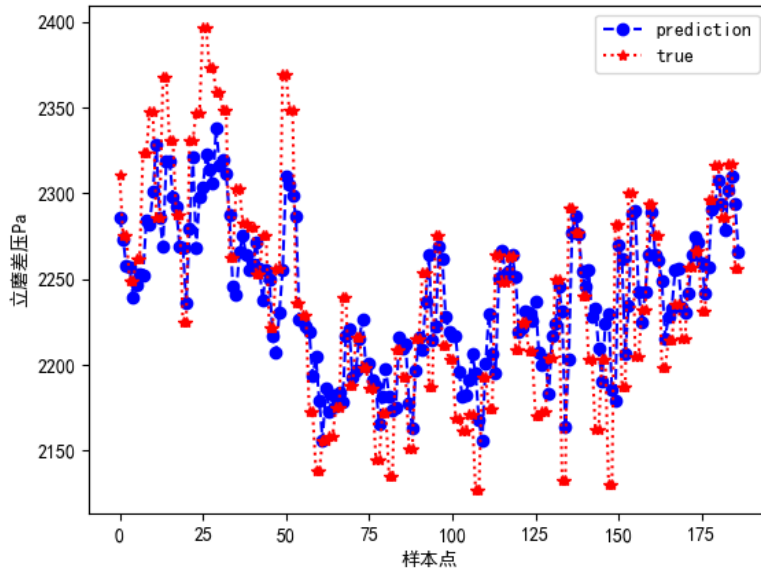


图 3 LSTM-AMSgrad 立磨差压预测

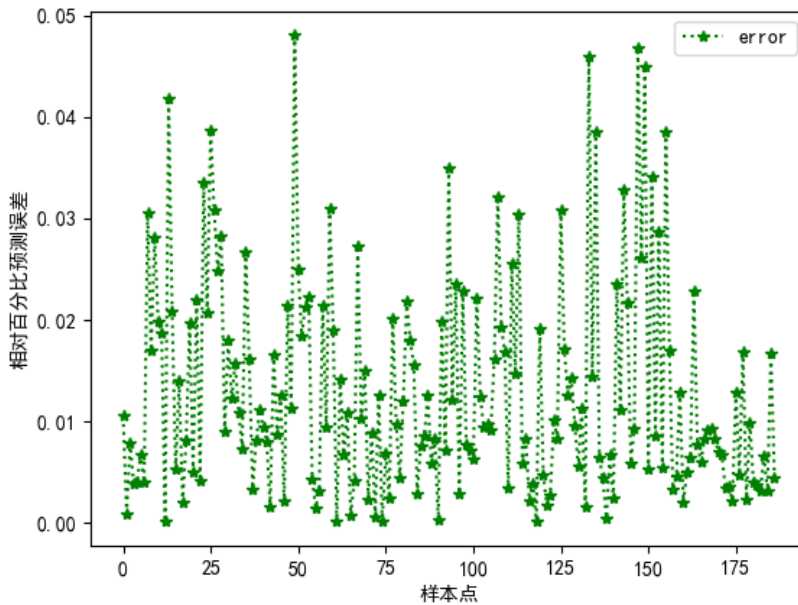


图 4 LSTM-AMSgrad 预测误差

另外, RMSprop 和 Nadam 两种优化方法在训练神经网络时都可有效加快收敛速度并提高训练稳定性。RMSprop 是一种基于梯度下降的优化器算法, 具有自适应学习率的特性, 能够加速收敛过程, 而 Nadam 是 Adam 算法的改进形式, 在梯度下降过程中考虑 Nesterov 动量和自适应学习率调整, 能有效处理不同参数的学习率。基于以上两种方法优化 LSTM 模型分别预测立磨差压, 结果如图 5 所示。

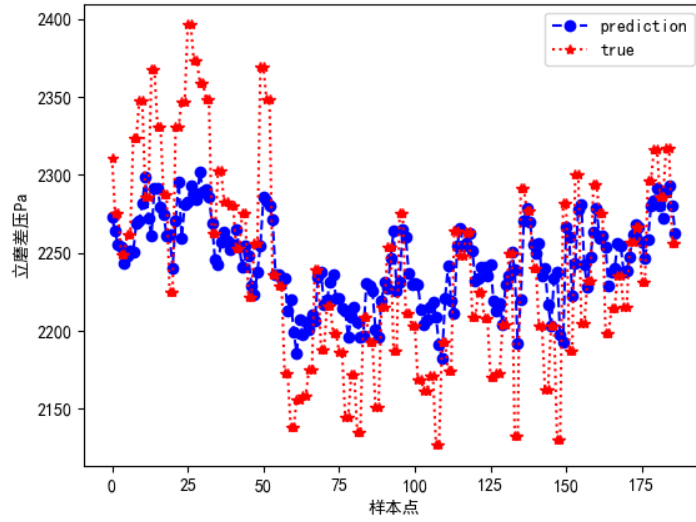


图 5 LSTM-RMSprop 模型立磨差压预测结果

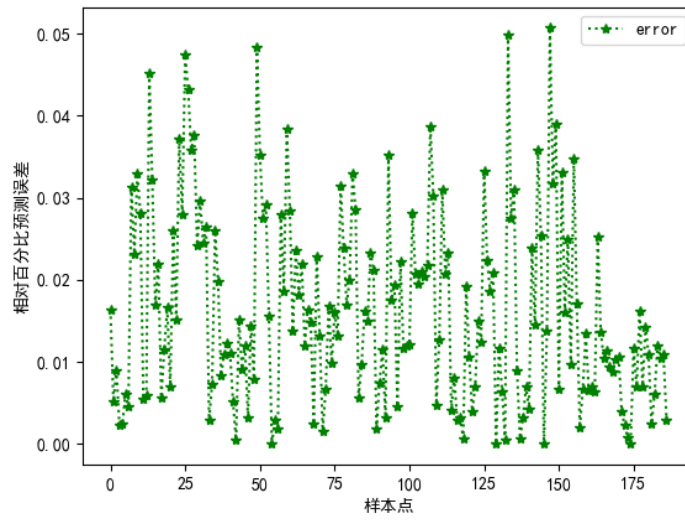


图 6 LSTM-RMSprop 模型立磨差压预测误差

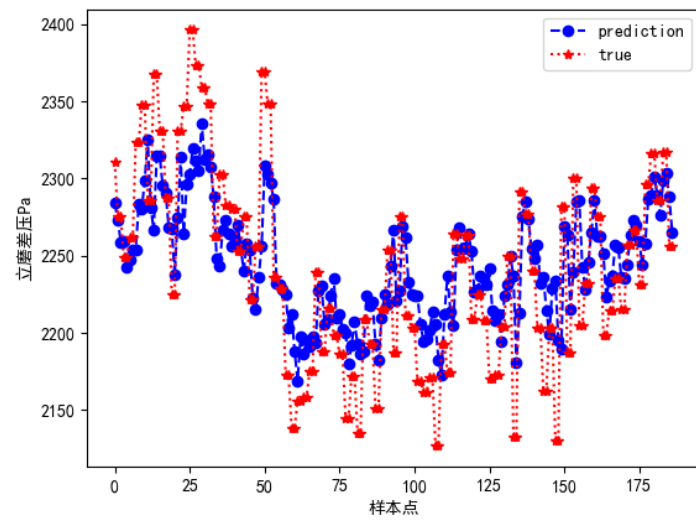


图 7 LSTM-Nadam 模型立磨差压预测结果

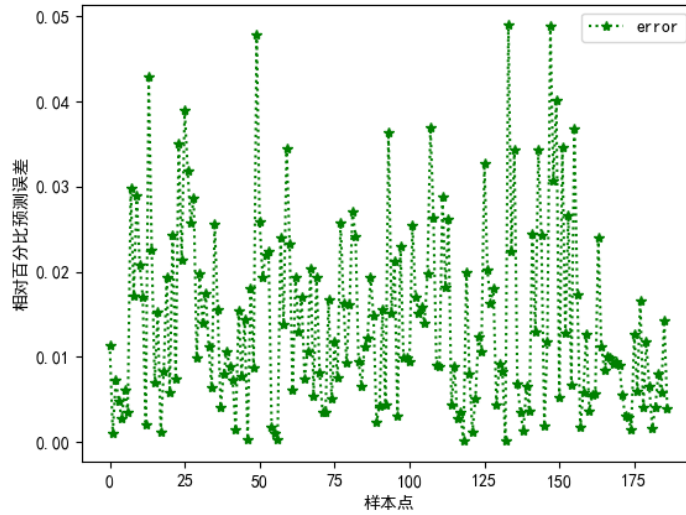


图 8 LSTM-Nadam 模型立磨差压预测误差

上述三种模型预测结果的相关分析指标见表 1。

表 1 三种方法预测立磨差压的相关分析指标对比

样本	拟合度	均方根误差	平均绝对误差	最大绝对误差	最小绝对误差	平均绝对百分比误差
LSTM-AMSgrad	0.65	37.84	29.19	113.77	0.28	0.013
LSTM-RMSprop	0.51	44.96	36.41	114.48	0.007	0.016
LSTM-Nadam	0.61	39.85	31.76	113.42	0.30	0.014

从上表可以看到，LSTM-AMSgrad 模型拟合度为 0.65，相较于其他两种模型较大，均方根误差和平均绝对误差分别为 37.84、29.19，相较于另两种模型较小，说明基于 LSTM-AMSgrad 算法的立磨差压模型相比之下预测精度更高。

4 结论

本文提出一种基于 LSTM-AMSgrad 的立磨差压预测方法，仿真结果表明，该方法能够有效地预测立磨差压，可指导立磨优化控制系统，为立磨的稳定运行提供有力支持。在未来的研究中，我们可以进一步考虑将更多先进的时序数据处理技术和优化算法应用于立磨差压预测任务，以提高预测精度和效率。

参考文献：

- [1] 李雨田,刘俊,陈业先.自动寻优控制系统在生料立磨中的应用实践[J].水泥,2023,(09):71-73.DOI:10.13739/j.cnki.cn11-1899/tq.2023.09.023
- [2] 杨黎明.基于残差网络与长短时记忆网络的水泥游离钙软测量方法研究[D].燕山大学,2020.DOI:10.27440/d.cnki.gysdu.2020.001051
- [3] 李满园,罗飞,顾春华等.基于自适应动量更新策略的Adams算法[J].上海理工大学学报,2023,45(02):112-119.DOI:10.13255/j.cnki.jusst.20230106004

重水拉曼技术表征嗜热微生物在污泥中生长活性的应用研究

陈磊^{1,2}, 李宁^{1,2,*}, 黄婷^{1,2}, 李志坚^{1,2}

(1. 合肥水泥研究设计院有限公司, 安徽 合肥 230022

2. 水泥制造绿色低碳技术安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230022)

0 引言

嗜热微生物是指能够在大于 50 °C 高温环境中生长和繁殖的微生物, 其中包括最适生长温度 65~80 °C 的极端嗜热微生物和生长温度大于 80 °C 且低于特定温度时停止生长的超嗜热微生物^[1]。作为兼具污染属性与资源潜力的固体废弃物, 污泥的安全处理处置始终是环境工程领域的研究热点。近年来, 嗜热微生物在污泥处理中的应用逐渐受到关注。Oshima 等^[2]首次揭示了极端嗜热微生物在高温堆肥过程中的重要作用。廖汉鹏^[3]等通过宏基因组分析发现土芽孢杆菌属 (*Geobacillus*)、栖热菌属 (*Thermus*) 和 *Calditerricola* 等属的极端嗜热菌种群在提升堆体温度、促进有机质腐熟方面具有显著作用。有研究表明向污泥好氧堆肥中接种 *Calditerricola yamamurae* (最适生长温度 80 °C) 和 *Thermus thermophilus* (最适生长温度 72 °C) 等嗜热细菌, 可使堆体快速升温至 80~100 °C, 明显加快了有机物降解、促进了堆肥腐熟, 对抗生素抗性基因、微塑料和芳烃类有机物等污染物表现出良好的去除效果, 且有利于甲烷和氧化亚氮等温室气体减排^[4,5]。

关于嗜热微生物功能的研究, 除基于纯培养体系的代谢活性分析外, 也需要研究其在土壤、污泥等复杂环境中的原位生长活性。基于光密度值的 OD₆₀₀ 测试方法, 通过测定菌悬液浊度表征微生物生物量, 是微生物生长状态监测的常用指标^[6,7]。然而该方法在含有固体颗粒物的复杂基质 (如土壤、污泥等) 中存在显著局限性, 非生物颗粒会干扰光吸收信号, 导致 OD₆₀₀ 值无法准确表征微生物真实生物量。其他分析手段 (如 16S rRNA 测序) 耗时较长, 无法满足原位、快速的检测要求。

重水拉曼技术是一种将重水 (D_2O) 标记与拉曼光谱技术相结合的分析方法。该技术展现出如特异性高、能够实现无损检测等诸多优点,且应用范围广泛。许多学者将其应用于生物医学、微生物学、环境科学等领域^[8-10]。重水拉曼技术的基本原理在于利用 D_2O 中的氘 (D) 原子替代水中的氢原子 (H),当微生物进行代谢时, D 原子会被整合到细胞内的生物大分子中,比如脂质和蛋白质。借助拉曼光谱技术,在 $2040\sim 2300\text{ cm}^{-1}$ 这一范围内,可以检测到 C-D 键的特定振动峰。并且 C-D 峰的强度与微生物的代谢活性经常呈现出正相关关系。通过分析微生物细胞对 D_2O 的吸收情况,能够判断其代谢活性^[11-13]。Li 等^[14]使用 D_2O 标记方法来研究复杂土壤系统中微生物群落的代谢通量,根据重水标记后土壤微生物 C-D 伸缩振动与拉曼光谱的比值鉴定释磷菌活性。Eichorst 等^[15]发现同样的 D_2O 标记方法能够用于客观评价土壤细菌代谢活性的差异,表明氘同化量可以做为代谢活性的指标。污泥的成分极为复杂,包含多种有机和无机成分,与土壤具有一定的相似性。在利用污泥培养嗜热菌的过程中,通过重水拉曼技术表征嗜热菌的生长活性具有一定可行性。而目前在表征污泥中微生物生长情况的研究中应用重水拉曼技术的相对较少,嗜热微生物在污泥中生长活性的分析也鲜有报道。

本研究首先开展重水质量分数对嗜热菌生长活性及重水标记效果的影响研究,明确重水拉曼技术分析嗜热菌的适宜重水质量分数;其次,应用重水拉曼技术对不同生长条件下 (pH 和盐度) 嗜热菌的生长情况进行表征,深入分析嗜热菌对重水的吸收情况,分析重水拉曼技术测定嗜热菌生长活性的可行性;最后,通过重水拉曼技术对嗜热菌在污泥中的生长活性进行研究,以期实现复杂浑浊培养条件下嗜热菌生长活性的准确表征,为筛选培养用于污泥处理处置的嗜热菌提供一种基于重水拉曼技术的方法。

1 材料与方法

1.1 实验菌株和培养基

实验所用的嗜热菌分别是 *Thermus thermophilus* (最适生长温度 $75\text{ }^\circ\text{C}$), *Calditerricola satsumensis* (最适生长温度 $78\text{ }^\circ\text{C}$), *Thermaerobacter composti* (最

适生长温度 70 °C), *Calditerricola yamamurae* (最适生长温度 72 °C)。

实验所用培养基成分为:胰蛋白胨 3.0 g, 酵母粉 2.0 g, 可溶性淀粉 1.0 g, 氯化钠 (NaCl, 分析纯) 3.0 g, 氯化镁 (MgCl₂, 分析纯) 0.125 g, 氯化钙 (CaCl₂, 分析纯) 0.025 g, 七水合硫酸亚铁 (FeSO₄·7H₂O, 分析纯) 0.01 g, 纯水 1.0 L, 加入 10.0 mL 微量元素溶液, 用 1.0 mol·L⁻¹ 的氢氧化钠 (NaOH, 分析纯) 或氯化氢 (HCl, 分析纯) 溶液调 pH 值到 7.5±0.05, 在 121 °C 下灭菌 20 min 备用。

1.2 材料和仪器

重水 (99.9%原子 D) 购自美国 Cambridge-Isotope-Laboratories (美国); 碘海醇 (分析纯) 购自上海易恩化学技术有限公司; 市政脱水污泥样品取自合肥十五里河净水厂; 电热恒温培养箱 (博讯, 中国); 酶标仪 (Infinite M Nano, TECAN, 瑞士); 离心机 (H1750R 湘仪, 中国); 共聚焦显微拉曼光谱仪 (LabRAM Soleil, Horiba, 日本)。

1.3 嗜热菌的重水标记

将 4 种嗜热菌分别接种于 10.0 mL 液体培养基中, 并置于各自最适生长温度下培养至对数生长期, 用液体培养基调整菌液浓度值 OD₆₀₀=0.5, 作为种子液备用。取不同体积重水配制为最终浓度分别为 0%、10%、20%、30%、40% 的液体培养基。将培养至对数生长期的 4 种嗜热菌按照体积比 1:10 分别接种于含不同重水质量分数的培养基中 (0% 为对照组), 培养 24 h 后测定菌液样本的 OD₆₀₀ 值。同时, 取 1.0 mL 菌液作为样本用于后续单细胞拉曼光谱分析。

1.4 不同生长条件下嗜热菌的重水标记

将 4 种嗜热菌培养至对数生长期的种子液按体积比 1:10 分别接种于不同盐度 (0、1.0、3.0、5.0、7.0、9.0 g·L⁻¹) 和不同 pH (4、5、6、7、8、9、10) 含一定比例重水的液体培养基中, 培养 24 h 后测定菌液样本的 OD₆₀₀ 值。同时, 取 1.0 mL 菌液作为样本用于后续单细胞拉曼光谱分析。用 1.0 mol·L⁻¹ 的氢氧化钠溶液或盐酸溶液调节培养基的 pH 值, 用氯化钠试剂调节培养基的盐度。

1.5 污泥液中嗜热菌的重水标记

取 1.0 g 污泥与 10.0 g 水（含一定比例重水）混合，在 121 °C 下灭菌 20 min 后作为污泥液用于接种嗜热菌。分别取 1.0 mL 培养至对数生长期的 4 种嗜热菌的种子液置于 1.5 mL 的离心管中，在 10 000 g 下离心 2 min，弃去上清液，收集菌体，将获得的菌体分别接种于灭菌后且含重水的污泥液中，培养 24 h 后。按照 Nycodenz 密度梯度分离法从污泥液中提取嗜热菌^[16]，提取所得菌液作为样本用于后续单细胞拉曼光谱分析。

1.6 单细胞拉曼光谱测定与分析

将菌液样本在 10 000 g 下离心 2 min，去除上清液，收集菌体，用 PBS 缓冲液洗涤 3 次，去除可能干扰拉曼检测的杂质。然后将获得的菌体重新悬浮在去离子水中，以最大程度地将菌体团分散成单个菌体（图 1）。在进行拉曼测量之前，将 2.0 μL 嗜热菌悬液点在铝箔上。单细胞拉曼光谱使用 LabRAM Soleil 共聚焦拉曼显微系统获得，激发波长为 532 nm，收集拉曼光谱的范围为 500~3 200 cm^{-1} ，光谱用 LabSpec6 软件进行分析，校正和归一化采集拉曼光谱的基线。为了定量分析每种嗜热菌中 C-H 键的 D 取代程度，将平均 C-D 带（2 040~2 300 cm^{-1} ）峰积分除以 C-D 带与 C-H 带（2 800~3 100 cm^{-1} ）峰积分之和，该比值即为氘相对同化量，被用作细菌从重水中同化氘的程度及其代谢活性的指标^[10-11]。使用 Origin 软件进行统计分析和绘图。

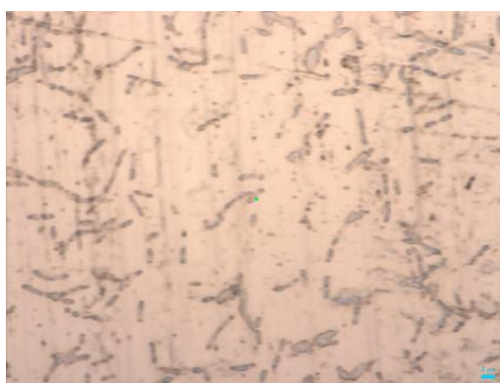


图 1 嗜热菌的显微拉曼图像

2 结果与讨论

2.1 不同浓度重水中嗜热菌的生长和氘同化

在微生物的重水（ D_2O ）标记培养中，重水质量分数的升高可能对微生物的生

长具有刺激或抑制作用^[17]。图 2 展示了 4 种嗜热菌株在 0%、10%、20%、30%、40% 重水质量分数梯度下的单细胞拉曼光谱特征。通常情况下，未标记细菌的单细胞拉曼谱图在 $1\ 800\sim 2\ 700\ \text{cm}^{-1}$ 区间呈现无信号状态（即所谓的“静区”），而经重水标记后，在 $2\ 040\sim 2\ 300\ \text{cm}^{-1}$ 区域会出现显著可辨的氘代特征峰，未标记样本则无此特征峰。此外，本研究同步测定了不同浓度 D_2O 培养条件下 24 h 的细菌 OD_{600} 值动态变化（图 3a）。结果显示，10%、20%、30%、40% 的 D_2O 均对 4 种嗜热菌产生生长抑制作用，其中 10%、20%、30% D_2O 浓度的抑制效应无显著差异，而 40% D_2O 浓度的抑制程度明显高于其他浓度组。

图 3(b) 显示了不同重水质量分数下氘相对同化量的变化。当 D_2O 浓度梯度设置为 10%、20%、30% 时，随着重水添加比例的递增， $2\ 160\ \text{cm}^{-1}$ 处的 C-D 特征峰强度明显逐渐增强，同时氘相对同化量指标也逐渐上升，这一现象验证了 4 种嗜热菌对氘的代谢同化能力。当 D_2O 浓度提升至 40% 时，特征峰强度及氘同化量均出现了明显下降，推测可能是由于高浓度重水对嗜热菌的生长代谢产生抑制作用所致。基于实验数据的分析结果，30% D_2O 浓度下不仅获得了最强的 C-D 特征信号，且氘同化效率最高，因此确定 30% D_2O 为后续实验的最佳重水添加浓度。

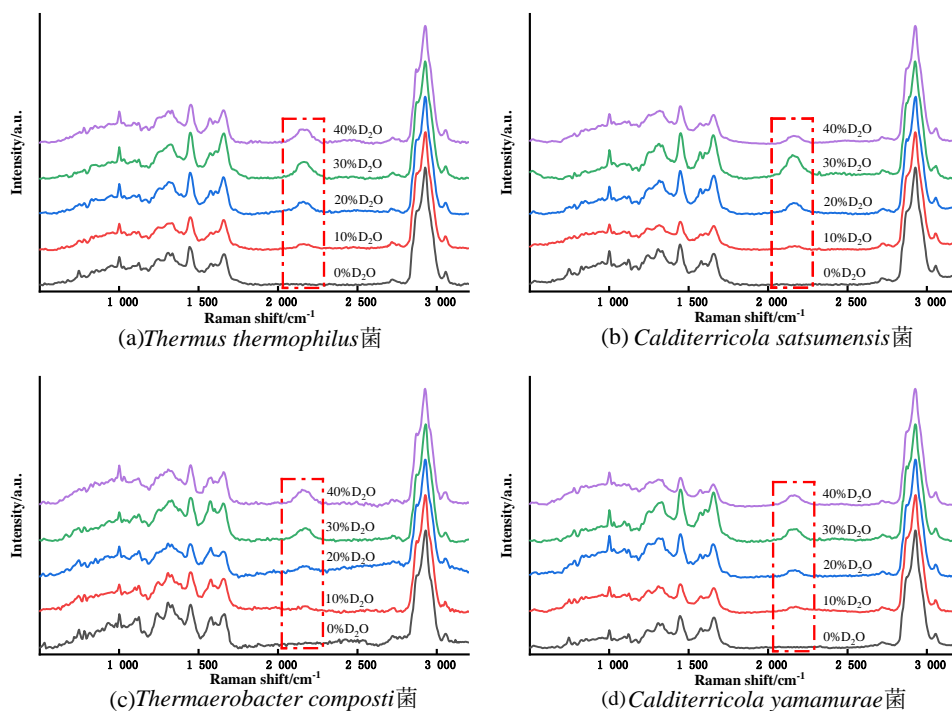


图 2 不同重水质量分数下 4 种嗜热菌的单细胞拉曼光谱图

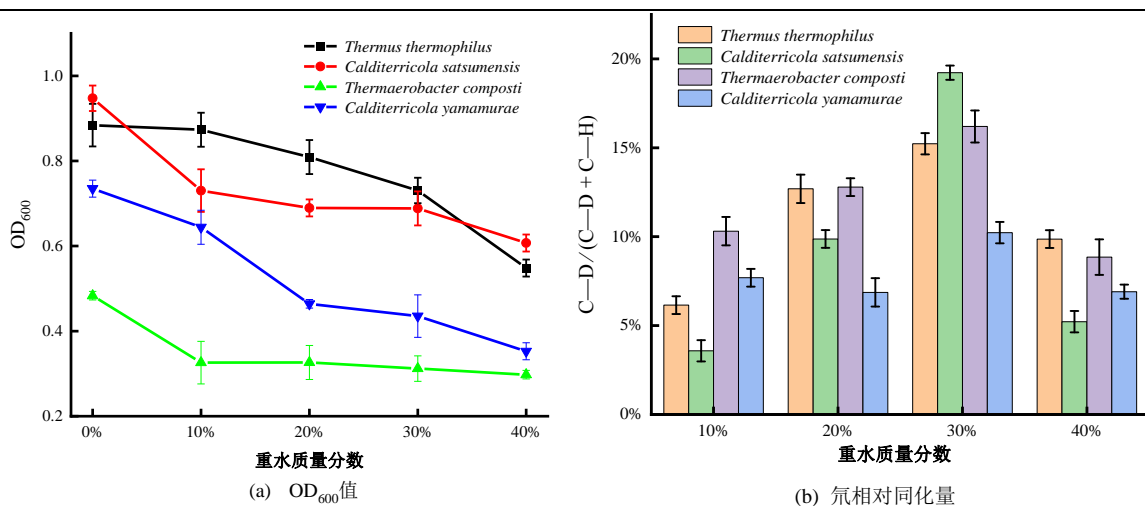


图3 不同重水质量分数下培养4种嗜热菌24 h的OD₆₀₀值、氮相对同化量

2.2 重水标记下不同pH和盐度的培养基中嗜热菌的生长和氮同化

(1) 不同pH条件下培养基中嗜热菌。pH值是影响微生物生长的重要因素之一^[18]。微生物的生长和代谢活动对环境pH值的变化极为敏感，不同种类的微生物具有最适生长pH值范围。图4显示了4种嗜热菌在不同pH下培养的单细胞拉曼光谱特征。当培养体系pH值分别设定为4和10时，所有菌株在2040~2300 cm⁻¹区域均未检测到特征拉曼峰；而在pH为5~9的范围内，该区域均出现显著的C-D特征峰，表明实验嗜热菌株在强酸性(pH≤4)或强碱性(pH≥10)环境中无法进行代谢活动与增殖，而在中性至弱酸碱的范围内生长活性良好，能够完成氮代反应。

同时，图5显示了4种嗜热菌液样本的OD₆₀₀值变化(图5(a))和不同pH下氮相对同化量的变化(图5(b))。4种嗜热菌的氮相对同化量随pH的变化趋势整体相似，但峰值的出现点不同。*Thermus thermophilus*菌和*Thermaerobacter composti*菌的氮相对同化量在pH=8时达到最大，OD₆₀₀值也是pH=8时最大，说明这两种菌的最适pH为8，在此时生长活性最高。*Calditerricola satsumensis*菌和*Calditerricola yamamurae*菌的氮相对同化量在pH=7时达到最大，OD₆₀₀值也在pH=7时达到最高，说明这两种菌的最适pH为7，在此时生长活性最高。而当pH为4和10时，所用嗜热菌的氮相对同化量均为0，且OD₆₀₀值未有增长，说明此时这4种嗜热菌没有生长活性，这与图4的结果是一致的，实验所用的嗜热菌在过酸(pH≤4)或

过碱 ($\text{pH} \geq 10$) 的条件下不能生长。

图 6 显示了不同 pH 培养基下 4 种嗜热菌的氘相对同化量与 OD_{600} 值之间的线性拟合结果, 4 种嗜热菌的线性拟合结果的 R^2 均高于 0.8 ($p < 0.05$), 表明嗜热菌在不同 pH 条件下培养的氘相对同化量值与 OD_{600} 值之间有良好的相关性, 验证了氘相对同化量表征嗜热菌在不同 pH 条件下的生长活性的可行性。

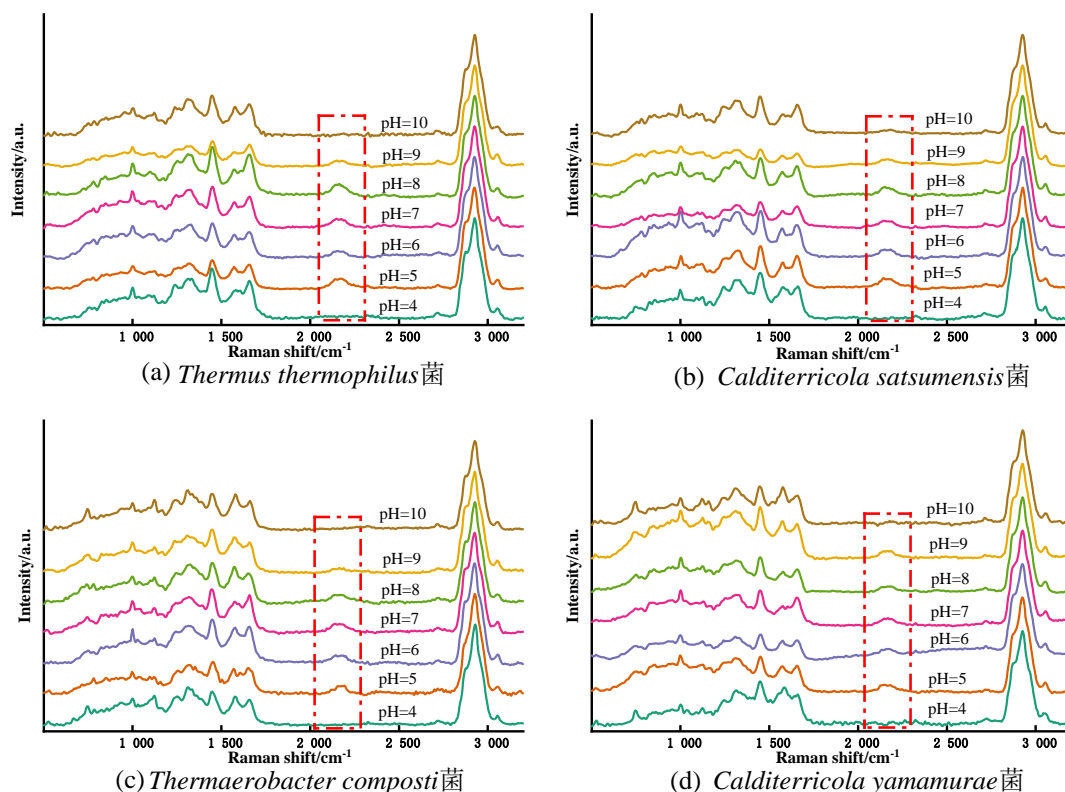


图 4 不同 pH 培养基下 4 种嗜热菌的单细胞拉曼光谱图

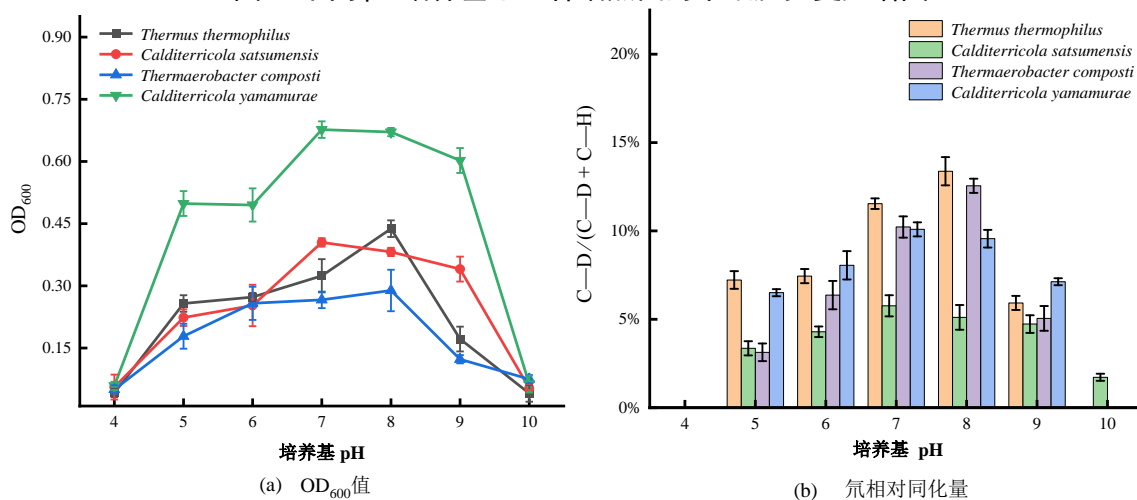


图 5 不同 pH 培养基下嗜热菌培养 24 h 的 OD_{600} 值和氘相对同化量

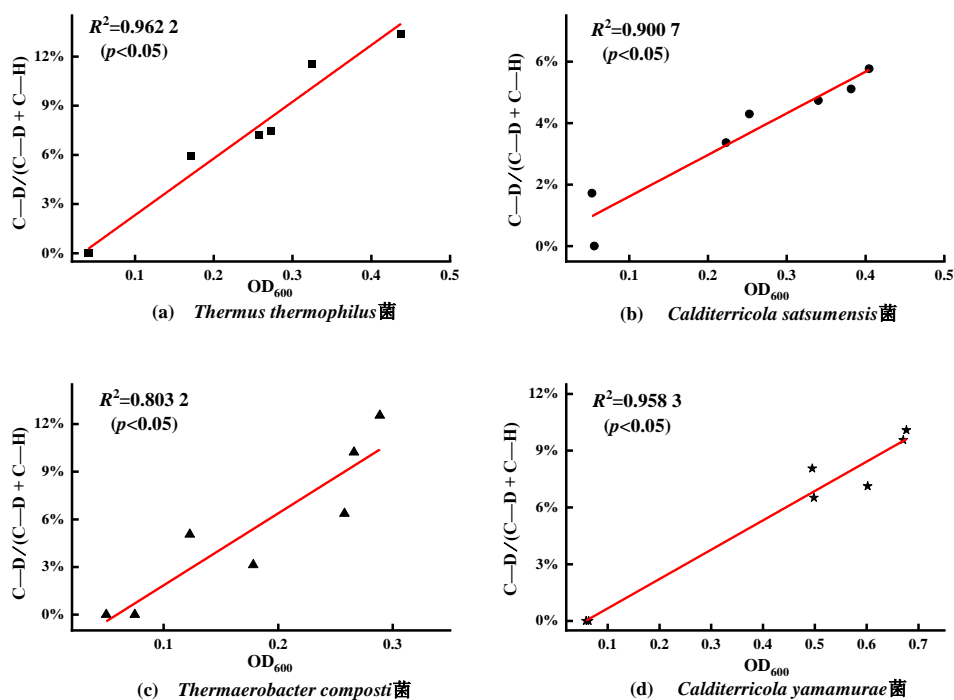


图 6 不同 pH 培养基下 4 种嗜热菌的氘相对同化量与 OD_{600} 值之间的线性结果 ($p \leq 0.05$)

(2) 不同盐度条件下培养基中的嗜热菌。盐度也是微生物培养和生长过程中的关键因素之一^[19]。4 株嗜热菌在不同盐度下培养的单细胞拉曼光谱特征如图 7 所示。在 $0 \sim 9 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐度梯度培养条件下，4 株嗜热菌的单细胞拉曼图谱在 $2040 \sim 2300 \text{ cm}^{-1}$ 区域内均出现了 C-D 特征峰，且其强度随盐度的升高而变化，表明实验菌株在 $0 \sim 9 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐度范围内均能生长繁殖。不同盐度组间的 C-D 特征峰强度差异表明了不同菌株生长活性对盐度变化的响应区别。

图 8 显示 4 种嗜热菌的生长活性 (OD_{600}) 随盐度的变化情况 (图 8(a)) 以及不同盐度下氘相对同化量的变化 (图 8(b))。嗜热菌 *Thermus thermophilus* 随盐度的增大其氘相对同化量出现先增大后减小的趋势，在 $3.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐度条件下达到峰值，表明该盐度为其最适生长浓度，此盐度下 *Thermus thermophilus* 菌的生长活性最高。该菌 OD_{600} 值随盐度的变化趋势与氘相对同化量基本一致，说明 OD_{600} 值和氘相对同化量均能准确反映 $3.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的盐度为 *Thermus thermophilus* 菌的最适盐度。*Calditerricola satsumensis* 和 *Thermaerobacter composti* 两株菌的氘相对同化量随盐度的增大也出现了先增大后减小的趋势，但其峰值出现在 $5.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐度条件下，说明该浓度为 *Calditerricola satsumensis* 和 *Thermaerobacter composti* 的最适生长盐度，两株菌的活性最高。对于嗜热菌 *Calditerricola yamamurae* 来说其氘相对

同化量虽随盐度的增大也出现了先增大后减小的趋势，氘相对同化量最大值出现在盐度为 $5.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，但当盐度超过 $5.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 后，氘相对同化量的减小趋势明显缓于其他 3 种嗜热菌。结合 OD_{600} 值变化曲线所呈现相同趋势，说明该菌的最适生长盐度为 $5.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ，并且盐度耐受性高于其他 3 株菌。4 种嗜热菌的最适生长盐度存在一定差异，且当盐度偏离最适浓度时，嗜热菌的生长活性均会受到显著抑制。

基于不同盐度培养条件下的实验数据，对 4 种嗜热菌的氘相对同化量与 OD_{600} 值开展了线性拟合分析，结果如图 9 所示。拟合后的决定系数 (R^2) 显示，各菌株的线性相关系数为 0.75 (*Calditerricola yamamurae*) ~ 0.90 (*Thermaerobacter composti*)，置信区间 $p < 0.05$ ，表明氘相对同化量与微生物生长活性指标 (OD_{600}) 之间存在明显线性相关，验证了氘相对同化量可以表征嗜热菌在不同盐度条件下的生长活性。

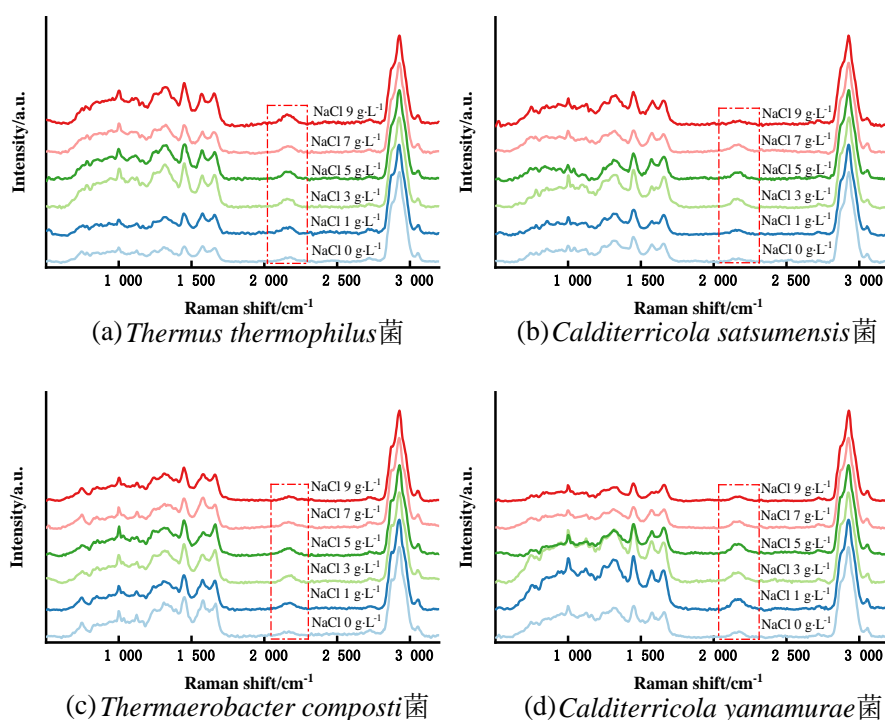


图 7 不同盐度培养基下 4 种嗜热菌的单细胞拉曼光谱图

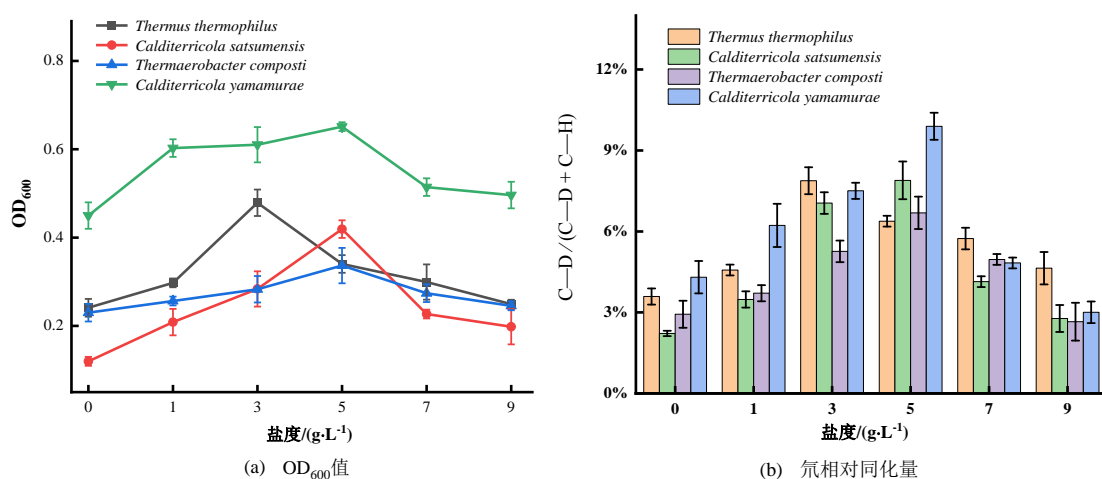


图 8 不同盐度培养基下嗜热菌培养 24 h 的 OD₆₀₀ 值、氮相对同化量

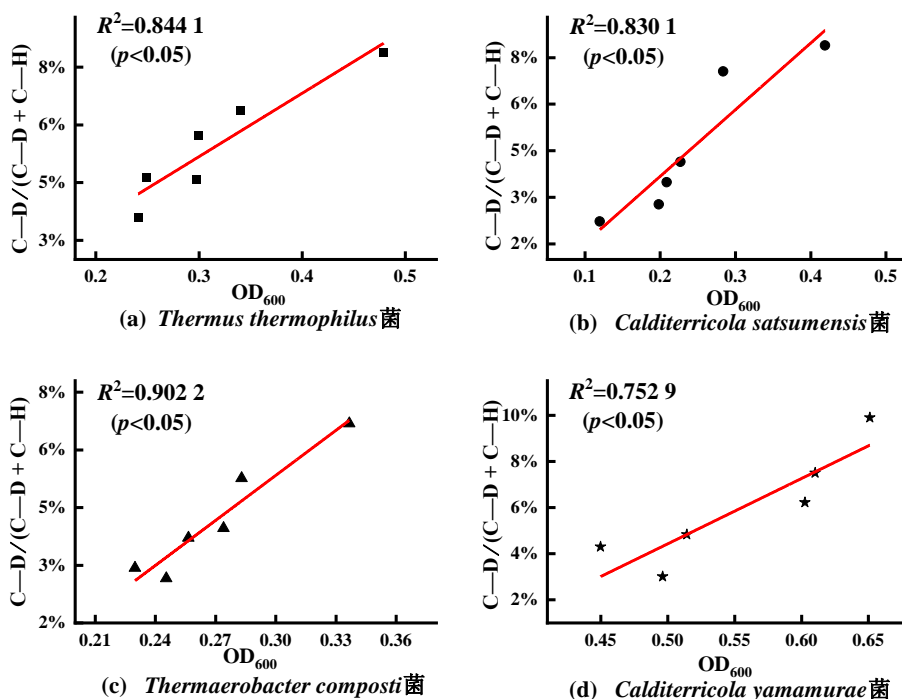


图 9 不同盐度培养基下 4 种嗜热菌的氮相对同化量与 OD₆₀₀ 值之间的线性结果

上述两组实验结果表明，嗜热菌单细胞拉曼谱图中 2040 cm⁻¹ 至 2300 cm⁻¹ 区域的 C-D 特征峰强度变化能够反映嗜热菌的生长活性。氮相对同化量和 OD₆₀₀ 值之间的线性拟合结果表明两个指标具有良好的线性关系（如图 6、图 9 所示），验证了氮相对同化量能够表征嗜热菌在不同条件下（pH 和盐度）生长活性的变化。

2.3 污泥中嗜热菌的生长和氮同化

污泥的 pH 范围通常在 6.5~8.5 之间，盐度一般小于 6.0 g·L⁻¹，根据 3.1 和 3.2 节的研究结果，在利用污泥培养嗜热菌时，采用重水拉曼技术表征嗜热菌的生长

活性，是具有可行性的。基于此，利用重水拉曼技术对 4 种嗜热菌在污泥中的生长活性差异进行了表征（图 10）。图 10(a)显示了 4 种不同嗜热菌在污泥中的单细胞拉曼光谱，*Thermus thermophilus* 菌、*Calditerricola satsumensis* 菌和 *Calditerricola yamamurae* 菌的单细胞拉曼谱图在 2 040~2 300 cm^{-1} 区域内均出现了明显 C-D 特征峰，说明这 3 种嗜热菌在污泥中有生长活性，可以通过微生物的合成反应将氘代谢进入细胞内；这 3 种嗜热菌的 C-D 特征峰强度明显不同则说明这 3 种嗜热菌在污泥中的生长活性存在差异。而 *Thermaerobacter composti* 菌在此区域内仍为“静区”，未有拉曼峰出现，说明 *Thermaerobacter composti* 菌在污泥中无法生长。

图 10(b)显示了嗜热菌在污泥中培养时氘相对同化量的变化，用于评估嗜热菌在污泥中的生长活性差别。根据氘相对同化量的分析的结果，4 种嗜热菌的氘相对同化量从大到小依次为 *Calditerricola satsumensis* 菌、*Thermus thermophilus* 菌、*Calditerricola yamamurae* 菌和 *Thermaerobacter composti* 菌，这个结果表明在污泥培养中，*Calditerricola satsumensis* 菌的生长活性最高，通过合成相对更多的大分子导致细胞内摄入了更多的氘；其次为 *Thermus thermophilus* 菌，再其次是 *Calditerricola yamamurae* 菌；而 *Thermaerobacter composti* 菌的氘相对同化量为 0，表明该菌在污泥中没有生长活性，无法利用污泥中的物质供自身生长繁殖。

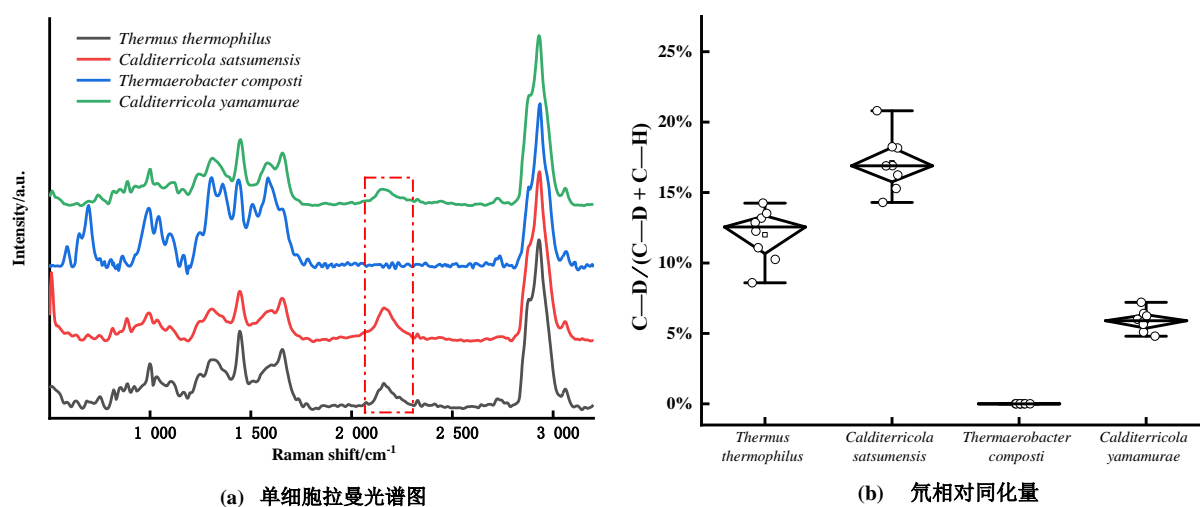


图 10 重水标记的污泥培养液培养 4 种嗜热菌的单细胞拉曼光谱图、氘相对同化量

3 结论

(1) 随重水比例的增大,嗜热菌的生长会逐渐受抑制;当重水质量分数达到30%时,C-D特征峰强度达到峰值且氘相对同化量处于较高水平,因此确定30% D₂O为后续实验的最佳标记浓度,该浓度既保证了氘代反应的高效进行,又避免了过高重水质量分数对微生物代谢活性的过度抑制。

(2) 重水标记的不同生长条件(pH和盐度)下嗜热菌单细胞拉曼谱图中的C-D特征峰强度的不同,反映出嗜热菌不同的生长活性;同时,氘相对同化量与传统生长活性指标OD₆₀₀值之间有良好的线性相关性,验证了其作为嗜热菌生长活性测试指标的可行性。特别是当传统OD₆₀₀检测方法存在局限性时(如浑浊培养体系),重水拉曼技术能够通过分析嗜热菌氘相对同化量实现生长活性的表征。

(3) 重水拉曼技术表征嗜热菌在污泥中的生长活性结果显示,*Thermaerobacter composti*菌的拉曼谱图中未检测到C-D特征峰,表明该菌株在污泥中没有生长活性;而*Calditerricola satsumensis*、*Thermus thermophilus*和*Calditerricola yamamurae*均在该区域呈现显著的C-D特征峰,证实其在污泥体系中具备生长活性。基于氘相对同化量的量化分析显示,3株活性菌株的生长活性呈现如下梯度特征:*Calditerricola satsumensis* > *Thermus thermophilus* > *Calditerricola yamamurae*。

参考文献:

- [1] 周顺桂,余震.超嗜热微生物资源与应用[M].北京:科学出版社,2024:1-15.
- [2] OSHIMA T, MORIYA T. A preliminary analysis of microbial and biochemical properties of high-temperature compost[J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2008, 1125(1): 338-344.
- [3] 廖汉鹏,陈志,余震,等.有机固体废物超高温好氧发酵技术及其工程应用[J]. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 2017, 46(4): 439-444.
- [4] 余震,周顺桂.超高温好氧发酵技术:堆肥快速腐熟与污染控制机制[J]. *南京农业大学学报*, 2020, 5(43): 781-789.
- [5] LIAO H, LU X, RENSING C, et al. Hyperthermophilic composting accelerates the removal of antibiotic

- resistance genes and mobile genetic elements in sewage sludge[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018(52): 266-276.
- [6] MAGDALENA D, KAMILA H, BARTOSZ J, et al. Bacteriological contamination detection in water and wastewater samples using OD600[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2019, 28(6): 4503-4509.
- [7] TANJA B, RAMSEY S. Optimizing E. coli cell growth performance with in-line, real-time OD600 (abs/mm) monitoring during the fermentation process[J]. 2022, 8(8): 827-834.
- [8] YANG K, LI H Z, ZHU X, et al. Rapid antibiotic susceptibility testing of pathogenic bacteria using heavy-water-labeled single-cell Raman spectroscopy in clinical Samples[J]. *Analytical Chemistry*, 2019, 91(9): 6296-6303.
- [9] WANG Y, XU J, KONG L, et al. Raman-deuterium isotope probing to study metabolic activities of single bacterial cells in human intestinal microbiota[J]. *Microbial Biotechnology*, 2019, 13(2): 572-583.
- [10] 郭中瑞, 朱超, 张涵瑞, 等. 重水标记-单细胞拉曼光谱表征反硝化菌代谢活性与电子[J]. *环境科学学报*, 2023, 4(43): 228-235.
- [11] BERRY D, MADER E, LEE T K, et al. Tracking heavy water (D₂O) incorporation for identifying and sorting active microbial cells[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 2(112): 194-203.
- [12] WANG Y, HUANG W E, CUI L, et al. Single cell stable isotope probing in microbiology using Raman microspectroscopy[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2016(41): 34-42.
- [13] TAO Y, WANG Y, HUANG S, et al. Metabolic-activity-based assessment of antimicrobial effects by D₂O-labeled single-cell Raman microspectroscopy[J]. *Analytical Chemistry*, 2017, 7(89): 4108-4115.
- [14] LI H, BI Q, YANG K, et al. D₂O Isotope Labeling Approach to Probing Phosphate-Solubilizing Bacteria in Complex Soil Communities by Single-Cell Raman Spectroscopy[J]. *Analytical Chemistry*, 201, 991(3): 2239-2246.
- [15] EICHORST S A, STRASSER F, WOYKE T, et al. Advancements in the application of Nano-SIMS and Raman microspectroscopy to investigate the activity of microbial cells in soils[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2015, 91(10): 371-376.
- [16] CUI L, YANG K, LI H, et al. Functional single-cell approach to probing nitrogen-fixing bacteria in soil communities by resonance raman spectroscopy with ¹⁵N₂ labeling[J]. *Analytical Chemistry*, 2018, 2(15): 5082-5089.
- [17] OLANIYI O O, YANG K, ZHU Y, et al. Heavy water-labeled Raman spectroscopy reveals carboxymethylcellulose-degrading bacteria and degradation activity at the single-cell level[J]. 2018, 103: 1455-1464.
- [18] 杨革. 微生物学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2020: 133-137.
- [19] MADIGAN M T, BROCK T D. Brock biology of microorganisms[M]. San Francisco: Pearson/Benjamin Cummings, 2009: 111-184.

加大煤矸石在预分解窑系统中掺加量的 技术改造措施

焦国徽¹ 顾新星² 刘丽³

- (1. 合肥水泥研究设计院有限公司, 安徽 合肥 230000;
2. 定华能源建材有限责任公司, 云南 丽江 674100;
3. 南阳市天泰水泥有限公司, 河南 南阳 473000)

0 引言

近几年随着煤炭行业的形势变化, 煤炭价格大幅度飙升, 5500 大卡左右的原煤价格 700 元/吨左右涨至 1300 元/t 左右, 甚至更高, 给水泥企业的生产成本造成了巨大的压力, 水泥企业面临着严峻的生产成本的考验。

定华能源建材有限责任公司(以下简称定华建材)拥有一条日产 2500t/d 生产线, 煤磨为 $\Phi 3.0 \times (7.25 + 1.75)$ m 风扫煤磨, 原料磨为立磨, 规格为 ZJTL3840, 回转窑规格为 $\Phi 4.2 \text{ m} \times 60 \text{ m}$, 窑头燃烧器配置艾法史密斯 DBC-220-450-615 燃烧器; 分解炉规格为 $\Phi 5.4 \text{ m} \times 36.2 \text{ m}$, 预热器系统采用单系列五级预热器, 喷腾式分解炉; 篦冷机为江苏羚羊机械有限公司, 规格为 $4 \times 16.8 \text{ m}$ 。该公司为降低生产成本、增加煤矸石掺加量, 与我公司合作, 在 2020 年 9 月开始进行相应的节能降耗的技术改造工作。

1 定华建材烧成系统技术改造前运行情况

1.1 存在的问题

- (1) 煤矸石掺加量偏低, 基本维持在原料配比中的 2%左右, 再提高, 容易导致 C3 旋风筒锥部结皮甚至堵塞。
- (2) 原料立磨磨辊门和排渣皮带漏风严重。
- (3) 平均产量为 2900 t/d, 熟料烧成标煤耗 118kg/t.c1, 综合电耗 61 kW·h/t。
- (4) 预热器系统阻力偏大, C1 出口温度偏高, 高达 380℃; 出口负压偏高,

高达 7000Pa。

1.2 原燃材料情况

1.2.1 原料情况

表 1 原料配对比

项目	石灰石/%	煤矸石/%	砂岩/%	有色金属灰渣/%	黄磷渣/%
改造前	82.17	2.49	9.30	3.77	2.27
改造后	79.76	9.18	6.43	2.33	2.29

表 2 煤矸石成份分析

项目	LOI	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
煤矸石	19.69	42.95	28.20	5.59	0.59	1.81	0.21

表 3 入窑生料成分技改前后对比

项目	化学成分/%						率值			细度/%		水分 %
	LOI	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	KH	n	P	80μ m 筛	200μ m 筛	
改造前	34.86	12.68	3.56	2.36	44.20	0.68	1.027	2.07	1.64	13.4	1.4	0.2
改造后	34.80	12.93	3.96	2.23	44.66	0.74	1.034	2.09	1.72	15.2	1.5	0.2

1.2.2 燃料情况

表 4 入窑煤粉工业分析

项目	细度/%	M _{ad} /%	A _{ad} /%	V _{ad} /%	fC _{ad} /%	S _{t,ad} /%	Q _{net,ad} (kJ/kg)
煤粉	3.3	2.66	20.89	26.50	49.95	1.04	5768

1.2.3 熟料情况

表 5 熟料质量对比

项目	化学成分%								率值			矿物组分				3D 强度 MPa	28D 强度 MPa	液相量%
	loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	f-caO	KH	n	p	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF			
改造前	0.68	21.85	5.85	3.59	66.07	1.15	1.15	1.4	0.888	2.31	1.63	45.48	28.6	9.44	10.91	27.4	56.65	27.93
改造后	0.32	21.35	5.99	3.47	65.82	1.45	0.72	0.81	0.908	2.26	1.73	55.39	19.73	10.01	10.53	33.1	60.6	27.95

3 采取的技术措施

3.1 原料立磨磨辊门和排渣系统密封改造

定华建材公司立磨磨辊门和排渣采用漏风比较大，这是直接整机系统电耗和热耗的一个点，磨辊门采取的密封是废旧帆布或者硅胶布，密封效果不好且磨损量大，使用寿命短，维修更换不方便；排渣系统是采用敞开式皮带输送，在立磨排渣口和入循环斗提都是较大的漏风点，对其分别进行改造，磨辊门采取环形弹簧式密封（见图1），排渣系统采用完全密封式振动给料机输送（见图2）。



图1 磨辊门改造前后对比



皮带机输送

振动给料机输送

图2 排渣系统改造前后对比

3.2 分解炉扩容

拆除现有分解炉，分解炉直径由 5.4m 改为 6.2m，分解炉炉容（ 690m^3 ）+鹅颈管容积（ 364m^3 ）= 1054m^3 ，扩容至分解炉炉容（ 980m^3 ）+鹅颈管容积（ 364m^3 ）= 1344m^3 ；C4 下料入分解炉采用双分料方式（见图 3），保证分解炉炉内温度场分布均匀，避免产生局部高温，进而导致炉内结皮。分解炉扩容是目前烧成系统提产改造的主流措施，主要目的改善碳酸钙的分解和煤粉的燃烧，业内亦有多篇论文论述，在此不再过多赘述。

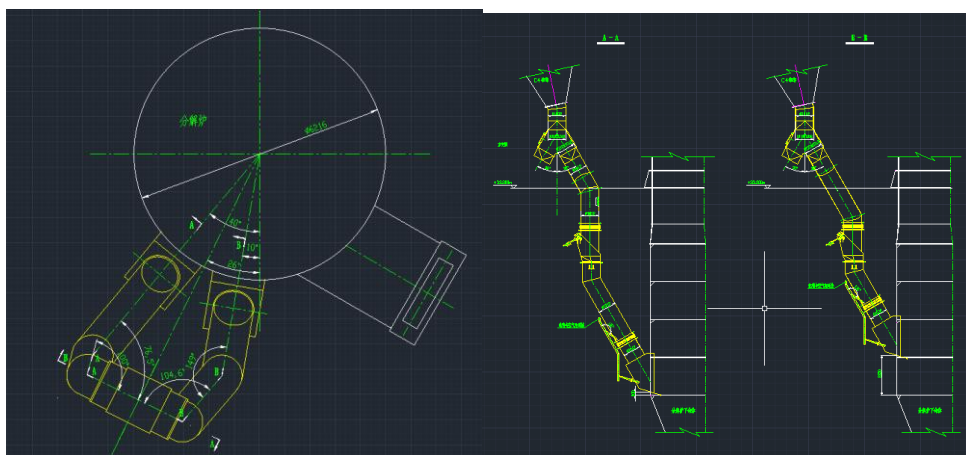
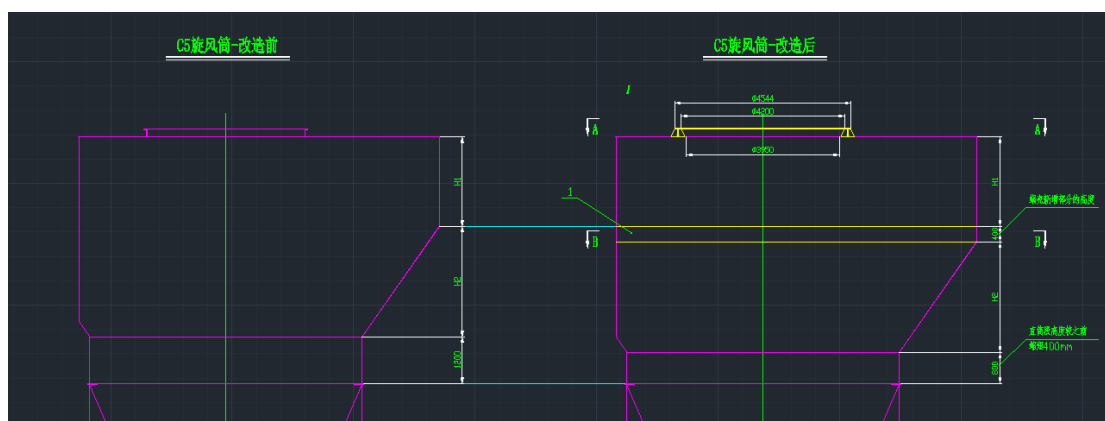


图 3 分解炉改造示意图

3.3 优化预热器各级旋风筒的结构

加大 C2—C5 出风管直径，优化各旋风筒进口形式，旋风筒加高加大、取消相关平段降低积料风险、减小旋风筒进口阻力损失等，详细见图 4。



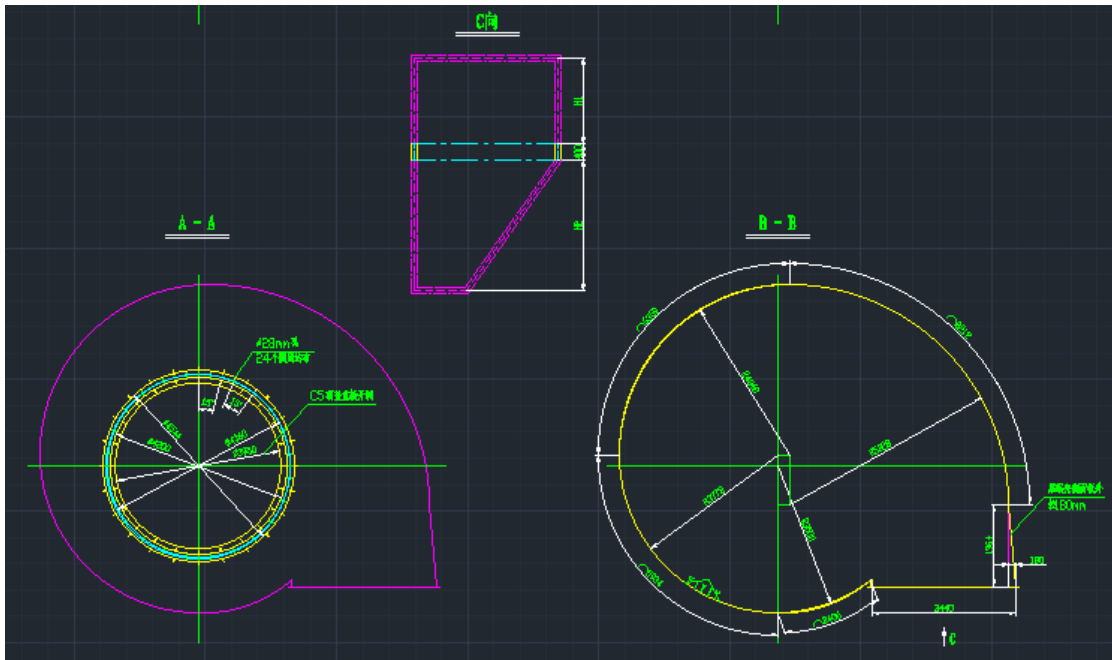


图 4 C5 旋风筒改造示意图

3.4 更换火焰强度更高的窑头燃烧器

窑尾产量的提升，需要配置火焰强度更高的 HP3500 强涡流型大推力燃烧器，一次风机配置变频罗茨风机，风量 $94\text{m}^3/\text{min}$ ，风压 58.8 kPa ；同时根据定华建材进厂原煤波动大的情况，将内风风翅角度提高至 43° ；加强其对原煤的波动的适应性。



图 5 HP3500 燃烧器端面

3.5 篦冷机整体更换第四代步进式冷却机

定华建材采用了第三代往复推动篦式冷却机，故障率高、熟料温度高，采取整体更换为第四代高效冷却机，破碎机采用中置辊破，增加篦床有效宽度和长度，根据定华建材篦冷机空间受限，长度偏短的情况，创造性的采用了八道传动系统、短宽的定制第四代篦冷机（见图6），篦床面积由 61.2m^2 增加为 85m^2 ，以满足窑提产之后熟料冷却需求。

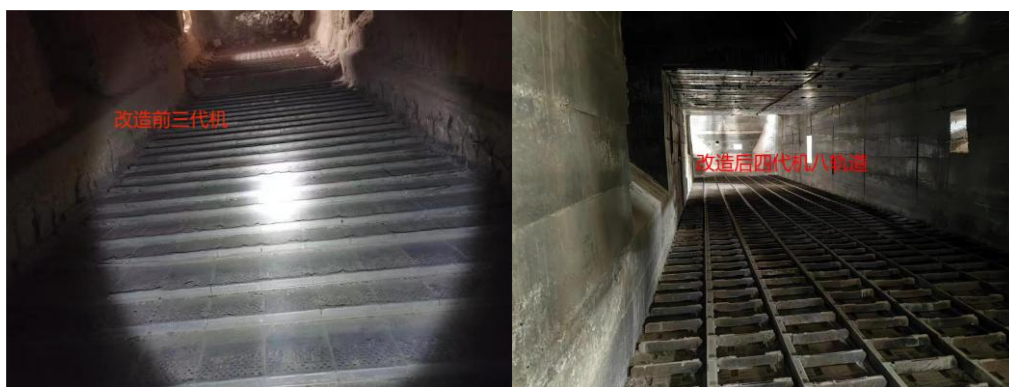


图6 冷却机改造前后对比

3.6 优化各个撒料箱的高度和角度

根据C3锥塌料情况，将C3上升管道上的C1撒料箱距离C3旋风筒顶盖距离加高，同时将C3上升管二个撒料箱底部角度由 18° 调整为 14° （见图7）撒料箱进行更换，并对位置进行调整，进一步改善撒料效果，进而提高换热效率，有效降低C1出口温度，降低烧成热耗。

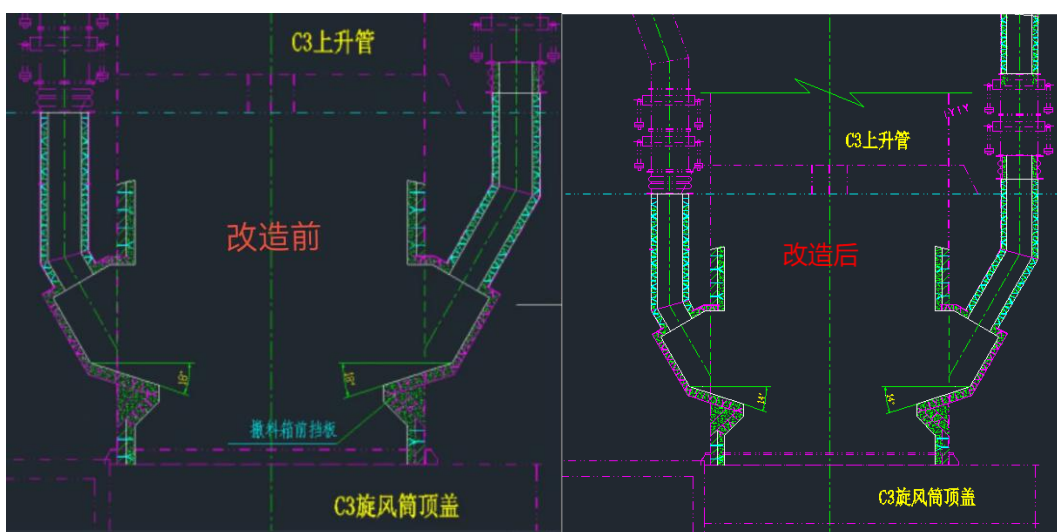


图7 C3 上升管道撒料箱改造前后对比

4 效果

本次技术改造项目实施完成后，根据原料系统改造后效果显著，煤矸石掺加量由原来 2.5%提升至 9 %（见表 1），通过生产调试、以及日常生产过程中的工艺参数的控制和优化、窑头燃烧器的调整、熟料三率值的调整（见表 5）等优化措施后，与技改前相比，定华建材窑产量大幅度提升，熟料标煤耗，熟料综合电耗大幅度下降，C1 出口温度，负压有较大下降，窑皮平整（见图 8），熟料 3d 强度和 28d 强度均有不同程度的增加。具体技术指标见表 5 和表 6。

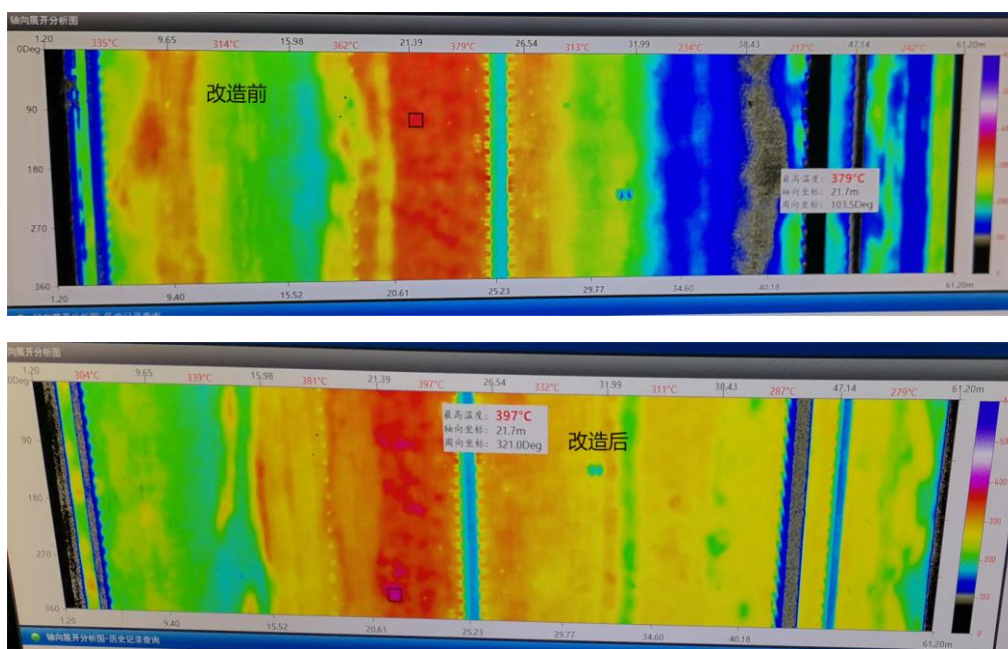


图 8 技改前后窑筒体温度分布情况

表 6 技改前后窑系统运行参数以及技术指标对比

项目	技改前	技改后	增减
熟料日产量 t/d	2900	3550	+650
熟料标煤耗 kg/t. cl	118	101	-17
熟料综合电耗 kwh/t	61	54	-7
C1 出口负压 Pa	7000	6200	-800
C1 出口温度℃	380	340	-40
生料工序电耗 kwh/t	16	13.5	-2.5
二次风温℃	1050	1200	+150
出篦冷机熟料温度℃	180	108	-72
熟料 3d 强度 MPa	27.4	33.1	+5.7
熟料 28d 强度 MPa	56.5	60.6	+4.1

5 经济效益

本次改造总投入约 2459.57 万元，按照目前国家环保以及错峰停产政策现状，按年运转 200 d 计，标煤价格 1000 元/t，电价 0.6 元/kWh，吨熟料利润 150 元计算。

(1) 提产年效益： $(3550 - 2900) \times 200 \times 150 \div 10000 = 1950$ 万元。

(2) 节煤年效益： $3550 \times 200 \times (118 - 101) \div 1000 \times 1000 \div 10000 = 1207$ 万元。

(3) 节电年效益： $3550 \times 200 \times (61 - 54) \times 0.6 \div 10000 = 298.23$ 万元。

经上述计算，定华建材公司经过改造后，可获得经济效益合计 3455.23 万元/年，投资回报周期约 0.71 年，经济效益大，回报周期较短，同时增加了定华建材公司的水泥和熟料等产品在市场上的竞争力。

6 结束语

采取一系列措施之后，定华能源建材有限责任公司，不仅使煤矸石掺加量由 2.5 % 左右加至 9 %，极大的降低了煤炭成本，而且熟料产量由 2900t/d 提产至 3550t/d，生料工序电耗下降 2.5kwh/. t，熟料标煤耗下降 17 kg/t. cl，熟料综合电耗下降 7 kwh/t，熟料质量明显改善，3d 强度增加近 6MPa，28d 增加 4MPa，也为后续水泥粉磨系统降低熟料配比、降低水泥成本打下坚实基础。提产、节能降耗效果显著，今后对生产系统进行持续优化改进，仍有较大节能降耗空间。

参考文献：

- [1] 崔洪坤, 刘志强. 4500t/d 水泥熟料生产线节能降耗优化措施[J]. 水泥技术, 2022(4): 21-26
- [2] 李洋. 2500t/d 生产线预分解系统节能降耗改造[J]. 中国水泥. 2020(10):114-116.
- [3] 曾学锋. 2500 t/d 熟料生产线窑尾预热器技术改造[J]. 水泥工程. 2015(2): 60-62.
- [4] 熊会思. 预热预分解系统设备的设计(二)[J]. 新世纪水泥导报. 2004(2): 42-44.

低品位碳酸锰矿煅烧提纯制备电解锰 原料工艺研究

时继明

(合肥水泥研究设计院有限公司, 安徽 合肥 230051)

0 引言

锰是一种重要的金属元素，在工业上用途很大，主要用于生产锰钢，此外也用于有色金属、化工、医药、食品、分析和科研等方面。宁夏某企业是我国最大的电解金属锰生产单位，在国外拥有了自己的优质碳酸锰矿山，但根据国外锰矿山信息所知，每年约有 200 多万吨含锰 18-22% 的低品位碳酸锰矿石，因海运费及国家对低品位矿进口限制尚未能充分使用，如果能将碳酸锰矿石经过预处理，采用高温煅烧分解、还原工艺，将含锰量提高数个百分点以上，并保证低价锰 Mn^{2+} 的含量和高价锰 Mn^{4+} 的还原率，不但节约运行费用，而且可提高锰矿资源综合利用率，因此，研究经济地综合利用低品位碳酸锰矿工艺就显得尤为迫切。

1 现有低品位碳酸锰矿富集技术

本项目低品位碳酸锰矿富集技术研究，主要是验证碳酸锰矿（粉状）烧结提纯工艺路线，实现碳酸锰分解、高价锰还原、熟料烧成结粒全过程。其中相关学者进行较多技术研究，主要分析了高价锰的还原，即 MnO_2 还原为 MnO ，再经酸浸生产锰的湿法冶金产品和化工产品^[1]。国内通常采用的富集方法为火法焙烧还原，也有利用湿法冶金处理低品位锰矿，如硫酸盐法、氨基甲酸盐法、硝酸盐法、氯盐法、直接浸出法、硫酸还原浸出法、细菌冶金法等，但湿法处理因存在较大的环境污染问题也未广泛应用。火法焙烧还原技术有微波强化还原、流态化强化还原、移动床、多管竖炉等还原新技术等。低品位锰矿石的富集方法较多，现有工艺都存在着焙烧时间长、传热效率差、能源利用率低、环境污染严重、劳动条件恶劣的缺点。因此需根据原矿的性质，采用适合的富集方法，取得较好的经济

效益，是低品位锰矿资源综合利用的重要研究方向^[2]。

本项目研发团队基于对新型干法水泥技术和装备的深刻理解和类似技术的启发，借鉴新型干法水泥悬浮预热预分解技术原理，对低品位碳酸锰矿富集技术生产工艺和装备，进行重大技术革新不仅是可能的而且可实现的，完全可以在资源综合利用、节能环保、智能控制、装备大型化等方面达到相当高的水平。

2 基础实验及中试试验研究

为了技术思路和工艺方案的适用合理，也为中试试验提供准确依据，项目团队对项目所用碳酸锰矿进行矿物组成、化学成份、微观形貌、分解特性、物理特性等基础研究分析。

2.1 基础实验研究

(1) 矿物组成

本项目碳酸锰矿矿物组成较为简单，主要成份为菱锰矿，石英，其次还有少量的锰橄榄石(Mn_2SiO_4)、硅酸锰($MnSiO_3$)、白云石($CaMg(CO_3)_2$)等矿物。因此碳酸锰矿粉煅烧提纯主要是菱锰矿分解，同时伴随着少量碳酸盐矿物($CaCO_3$ 、 $MgCO_3$)分解。

(2) 化学成份

本项目碳酸锰矿的主要成份为 MnO 、 SiO_2 、 CaO 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MgO 等。

表 1 碳酸锰矿的化学成分

名称	LOSS	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Cl	全 Mn	高价锰
矿粉 1	28.06	14.09	6.58	1.31	6.93	5.13	0.62	1.31	0.38	0.028	27.60	0.00
矿粉 2	27.85	14.54	6.28	1.20	6.93	4.98	0.55	0.83	0.45	0.031	28.21	0.00

(3) 岩相结构

为了掌握本项目碳酸锰矿的晶粒分布对煅烧分解的影响，利用扫描电子显微镜对碳酸锰矿的显微结构进行了观察，SEM 显微结构见图 2。

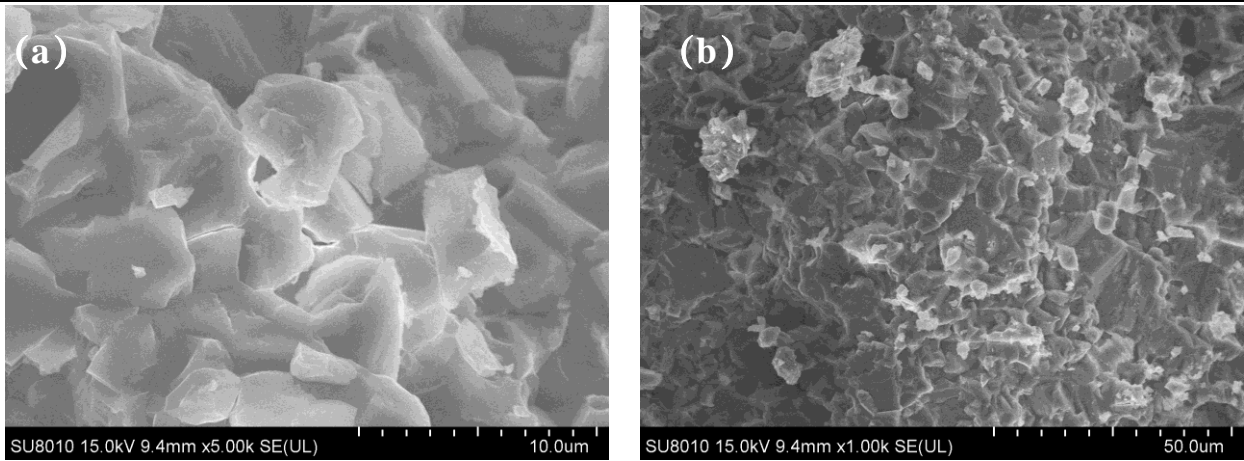


图 2 碳酸锰矿的 SEM 显微结构

图 (a) 和图 (b) 是碳酸锰矿放大 5000 (10 μ m) 和 1000 (50 μ m) 倍的 SEM 照片, 图中显示碳酸锰矿结晶良好, 具有较多界面, 碳酸锰矿矿晶粒度大小不均匀且粒度较大, 晶粒范围在 10-50 μ m。

(4) 高温液相温度试验

采用高温液相温度检测装备对纯碳酸锰矿粉, 碳酸锰矿粉混合样进行高温液相温度试验, 实验结果如图 3 所示, 纯碳酸锰矿粉熔化开始温度 1224 $^{\circ}$ C, 因为纯碳酸锰矿粉中含有 14% 石英 (SiO₂), 全熔温度较高。碳酸锰矿粉与煤粉混合物液相温度区为 1160 $^{\circ}$ C~ 1234 $^{\circ}$ C, 烧结范围约为 80 $^{\circ}$ C, 低于通常硅酸盐水泥熟料的烧结范围 150 $^{\circ}$ C。

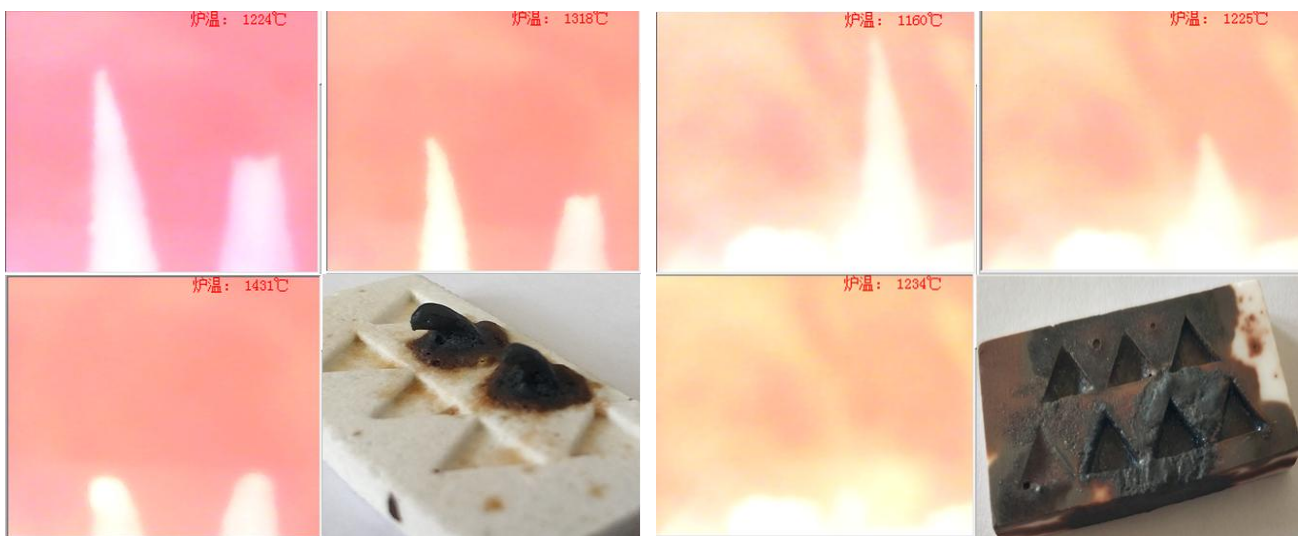


图 3 纯碳酸锰矿粉和混合样高温液相温度检测图

2.2 中试试验研究

本次中试试验利用宁夏某企业硫酸锰联产活化煅烧生产线作为试验点，完成碳酸锰矿粉悬浮预热、分解、还原、烧成结粒及冷却等工艺过程。拟达到如下试验目的：探索 C3 下料管碳酸锰入窑分解率、烟室上升烟道中 MnO 被氧化为高价锰的比例、了解分解炉温度控制参数及推算预分解窑系统窑产量。

本次中试试验最佳窑操参数：

生料喂料量：122t/h；焦炭喂料量：3.0t/h；窑头喂料量：3.2t/h；

入窑混合生料 C 元素含量为 12.57%；

高温风机转速：520rpm；

C1 出口：285℃ -1834Pa；

C2 出口：457℃ -856Pa；

C3 出口：628℃ -390Pa；

烟室：956℃ -10 Pa；

窑速：2.5rpm；

窑头：1027℃ 8 Pa；

篦冷机转速：4.4rpm；

篦冷机风机 F2A/B 出口压力：5314Pa 4976Pa；

篦冷机余风：441.1℃ -54Pa；

熟料试验分析数据：全 Mn 为 40.05，Mn⁴⁺为 0.27，粒径 20mm 左右。

表 2 烧结矿的化学成分

名称	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Cl	全 Mn	高价锰
烧结矿 1	19.91	7.48	2.15	10.07	7.24	-	-	-	-	41.04	1.51
烧结矿 2	20.58	7.33	2.15	10.28	7.09	-	-	-	-	40.74	2.47

本次中试试验结果如下：生料最大喂料反馈量为 133.6t/h，焦炭配料喂料反馈量为 3.0 t/h，系统产量 1750t/d；烧成段火焰温度约为 1500℃，烧成段窑气温度约为 1360℃，烧成段熟料温度约为 1250℃；窑尾烟室氧含量需要基本保持在 0.22%

左右，CO 含量基本保持在 300ppm 左右，否则出窑熟料 Mn⁴⁺含量就会超过目标值 1.5%；C3 下料 Mn⁴⁺含量范围为 1.92~10.50%，相应熟料成品 Mn⁴⁺含量范围为 0.27~4.79%，Mn⁴⁺的还原率最高达 95.8%，Mn²⁺氧化率主要受窑尾烟室氧含量影响，烟气氧含量越高，分解产物 Mn²⁺氧化率就越高，Mn⁴⁺还原反应主要影响因素：C3 下料 Mn⁴⁺含量、还原温度区间停留时间、还原剂固定碳含量；

3 烧结矿作为电解锰原料的对比研究

本项目以碳酸锰原矿、烧结矿（3:1）、烧结矿（2:1）、烧结矿（纯矿）和焙烧粉进行对比收酸实验，考察五种烧结矿的收酸效果。

表 3 烧结矿和焙烧粉常规检测数据

编号	原料	项 目			
		全 Mn (%)	Mn ⁴⁺ (%)	酸矿比	浸取率
1	碳酸锰原矿	27.91	0	0.72	84.12
2	烧结矿（3:1）	36.82	1.78	1.04	75.37
3	烧结矿	41.10	0	1.06	79.68
4	焙烧粉	38.27	2.19	1.14	82.31
5	烧结矿（2:1）	33.22	1.78	/	79.00

表 4 反应时间 30min 内不同物料对阳极液浸取率和收酸效果

编号	名称	全 Mn 含量 (%)	Mn ²⁺ (g/L)	锰浸取率 (%)	H ⁺ (g/L)	收酸率 (%)
1	碳酸锰原矿	27.91	15.6	4.30	39.96	11.48
2	烧结矿（3:1）	36.82	28.2	71.70	8.51	81.15
3	烧结矿（纯矿）	39.50	28.1	66.33	5.92	86.89
4	焙烧粉	38.27	27.6	65.83	3.15	93.02
5	烧结矿（2:1）	33.22	25.00	60.22	17.76	60.66

表 5 反应时间 60min 内不同物料对阳极液浸取率和收酸效果

编号	名称	全 Mn 含量 (%)	Mn ²⁺ (g/L)	锰浸取率 (%)	H ⁺ (g/L)	收酸率 (%)
1	碳酸锰原矿	27.91	16.0	7.17	35.89	20.49
2	烧结矿（3:1）	36.82	28.6	73.87	7.4	83.61
3	烧结矿（纯矿）	39.50	28.6	68.86	5.18	88.52
4	焙烧粉	38.27	28.2	68.98	2.22	95.08
5	烧结矿（2:1）	33.22	25.00	60.22	16.10	64.33

表 6 反应时间 90min 内不同物料对阳极液浸取率和收酸效果

编号	名称	全 Mn 含量 (%)	Mn ²⁺ (g/L)	锰浸取率(%)	H ⁺ (g/L)	收酸率 (%)
1	碳酸锰原矿	27.91	19.2	30.17	35.15	22.13
2	烧结矿 (3:1)	36.82	28.7	74.42	6.66	85.25
3	烧结矿 (纯矿)	39.50	29.1	71.39	5.18	88.52
4	焙烧粉	38.27	28.6	71.07	1.80	96.01
5	烧结矿 (2:1)	33.22	25.20	61.41	15.91	64.75

表 7 反应时间 120min 内不同物料对阳极液浸取率和收酸效果

编号	名称	全 Mn 含量 (%)	Mn ²⁺ (g/L)	锰浸取率(%)	H ⁺ (g/L)	收酸率 (%)
1	碳酸锰原矿	27.91	20.4	38.70	32.93	27.05
2	烧结矿 (3:1)	36.82	29.0	76.05	6.66	85.25
3	烧结矿 (纯矿)	39.50	29.2	71.90	4.96	89.01
4	焙烧粉	38.27	-	-	-	-
5	烧结矿 (2:1)	33.22	25.20	61.41	15.73	65.15

由上述实验数据可知：

(1) 相同条件下即使不同反应时间内，四种原料中锰的浸出率排序一样，即烧结矿 (3:1) > 烧结矿 (纯矿) > 焙烧粉 > 烧结矿 (2:1) > 碳酸锰原矿；四种原料的收酸率排序一样，即焙烧粉 > 烧结矿 (纯矿) > 烧结矿 (3:1) > 烧结矿 (2:1) > 碳酸锰原矿。经推断焙烧粉中其它杂质含量较高 (Fe 等) 且与硫酸反应，所以收酸率较高。焙烧粉的收酸率比烧结矿 (纯矿) 高 6-8%，锰的浸取率相近。

(2) 烧结矿 (纯矿) 可代替焙烧粉，从而降低电解锰的生产成本。

4 结语

项目团队利用硫酸锰联产活化煅烧成品生产线作为试验点，成功进行了加纳碳酸锰矿粉煅烧提纯试验，摸索认知了碳酸锰矿悬浮预热分解、高价还原、熟料烧成结粒、熟料冷却的反应过程；探索分析了煅烧制度 (回转窑气氛控制、还原剂焦炭掺入量) 对产品质量的影响规律；初步总结了一些有益的热工参数，并结合一系列物化性能分析、热工检测分析，得到了以下主要结论：

(1) 加纳碳酸锰矿粉矿物较为简单，其中主要金属矿物为菱锰矿，煅烧提纯主要是菱锰矿分解。

(2) 加纳碳酸锰原矿石普氏硬度系数 f 平均值为 11.35, 属于 II 级岩石, 坚硬程度属于很坚固。

(3) 纯碳酸锰煅烧提纯烧成温度区间较窄, 部分矿物已经形成烧成共熔体, 部分矿物还以黑砂料存在。最佳烧成控制温度: 火焰温度约为 1500°C , 窑气温度约为 1360°C , 熟料烧成温度约为 1250°C 。

(4) 纯碳酸锰煅烧提纯煅烧对窑内气氛十分敏感, 首先控制入回转窑物料中 Mn^{4+} 含量, 同时有炭作为还原剂的情况下才能控制好出窑料 Mn^{4+} 含量, 因此需要严格控制窑内弱氧化气氛。

总体而言, 利用悬浮预热回转窑进行加纳碳酸锰矿粉进行煅烧提纯技术是可行的; 可实现工业化生产; 可以实现烧结后物料烧失量 $\leq 1.0\%$, 烧结后物料中高价锰离子 $\leq 1.5\%$ 的技术目标; 要求烧结后物料粒度 20mm 以上 $\geq 70\%$, 可以实现, 但需要一定的窑操水平; 烧结产物可满足电解锰工艺要求。

参考文献:

- [1] 湛曙永, 碳酸锰热解生成二氧化锰的试验研究 [J]. 中国锰业 9 (6) 1991, 21-24.
- [2] 刘孟科, 小型回转窑进行各种锰矿原料烧结及石灰石煅烧可行性试验 [J]. 第 26 届全国 铁合金学术研讨会论文集, 44-48.

市政污泥混合搅拌输送系统的设计开发

王上锋

(合肥水泥研究设计院有限公司, 研发中心, 合肥 230041)

0 引言

市政污泥是城市有机固废的典型代表。根据我国住房与城乡建设部公布信息显示, 2022年我国污泥的年产生量约8909万吨(以含水率80%计)。长期以来, 市政污泥产生量大、来源复杂、资源利用率低、存在二次污染风险, 污泥处置问题一直没得到有效解决, 急需开展污泥安全处置与资源化利用示范研究, 为我国城市水环境保护提供科技支撑^[1]。

薄层垂直压滤工艺是目前较为先进的一种污泥脱水深度水工艺, 该工艺使用药剂与污泥混合后压力破壁的方式脱水, 可使污泥含水率降低至60%以下。该工艺由污泥与药剂混合搅拌输送单元, 双层滤布收放铺泥单元, 立式液压压滤单元等设备单元等组成, 可承受更大的挤压力进行脱水。

目前污泥与药剂的混合方式, 通常是在输泥螺旋输送机前把药剂溶液加入到污泥中, 在污泥螺旋输送的过程中, 对污泥和药剂进行简单混合, 混合时间短, 混合均匀性差等问题。输送过程采用敞开式结构, 输送量波动大, 铺泥量误差较大, 同时易造成泄漏污染和空气污染。因此需要设计开发一套新型污泥与药剂混合搅拌压力输送系统, 为全新薄层垂直压滤机研发工作的开展提供有力的技术支持。

1 整体结构设计与分析

1.1 工艺流程设计

市政污泥属于触变型非牛顿流体, 其流变特性容易受到各方面因素的影响^[2]。因此污泥的搅拌、输送需要充分考虑各方面因素对污泥流变特性的影响。

另外, 根据薄层垂直压滤机的工作原理, 以及整个搅拌、铺泥、收放布和压滤的工艺要求, 设计了一套混合搅拌输送工艺流程(如图1所示)。

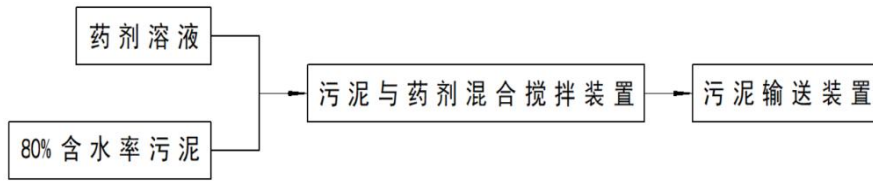


图1 混合搅拌输送工艺流程图

1.2 各单元方案设计

1.2.1 污泥与药剂混合搅拌装置方案设计

污泥压滤第一步就是把药剂溶液按照一定比例添加到污泥当中，并充分搅拌，使药剂溶液与污泥充分融合。将80%含水率污泥和（40%–50%）聚合硫酸铁水溶液，按照10:1比例（100kg污泥配比1kg聚合硫酸铁药粉）分别注入螺旋搅拌罐内，按照一定速度对污泥和药剂溶液进行搅拌，搅拌时间可根据需求设定。搅拌轴为对称双螺旋结构，对污泥和药剂进行搅拌的过程中，会把搅拌罐两端的污泥向中间汇集。搅拌罐中部下端设置一个出泥口，出泥口与输送泵入泥口相连接且尺寸规格相同。出泥口处配一刀闸阀，其开合控制搅拌单元与输送单元的连通和闭合。污泥与药剂混合搅拌单元方案（如图2所示）。

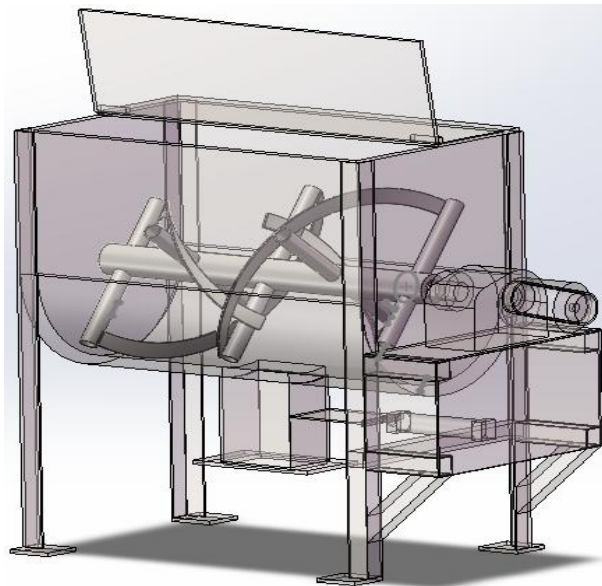


图2 污泥与药剂混合搅拌装置

1.2.2 污泥输送装置方案设计

与药剂溶液混合后的污泥需要按照一定的厚度均匀的排布在两层滤布中间。为了避免外溢污染、减小空气污染，污泥输送采用管道密闭式压力输送。管道内的输送压力通过螺杆泵提供，螺杆泵持续供泥，在管道入口端持续提供压力，推动

污泥向管道尾端流动，把污泥定量输送到两层滤布之间的铺泥单元。

污泥输送采用管道密闭式压力输送方式，需要考虑管径与路径弯曲情况对整个系统的影响。另外一般情况下搅拌输送单元和铺泥单元两者之间有一定的高度差，所以压力输送需要考虑一定的距离和高度因素。污泥输送装置方案（如图3所示）。

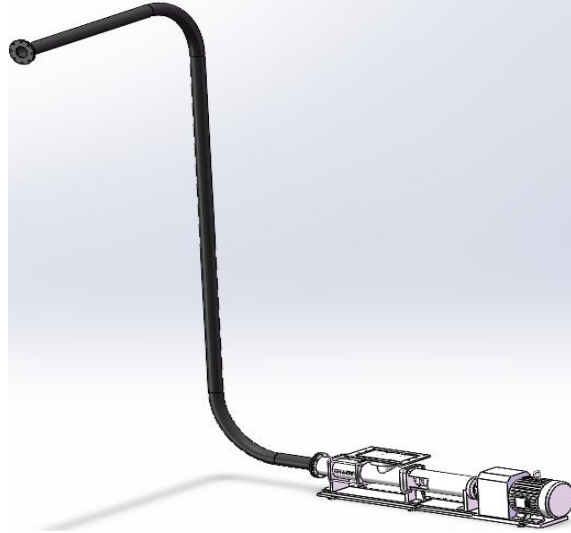


图3 铺泥输送装置

1.2.3 控制方案设计

为满足污泥混合搅拌输送系统控制需求，设计一套基于西门子S7-1200系列PLC，由上位机、下位机以及上下位机之间的TCP/IP以太网数据通信三部分组成的控制系统。

下位机S7-1200系列PLC有开关量和模拟量的输入，可将搅拌电机、螺杆泵电机、各部分电磁阀信号接入，S7-1200系列PLC通过输出控制信号，驱动变频器、控制器、继电器等作出一系列相应处理。

上位机采用西门子触摸屏KTP900进行设计。利用S7-1200系列PLC对各数据进行实时采集、处理以及控制，与上位机进行数据传输，并在触摸屏KTP900上显示相关信息和系统运行参数。搅拌输泥系统控制界面（如图4所示）

各系统通过PROFINET以太网连接，实现数据和图像等信息的交互。PROFINET使用的TCP/IP标准是基于工业以太网的网络技术，其响应时间是ms量级，此响应量级足以满足系统控制要求。

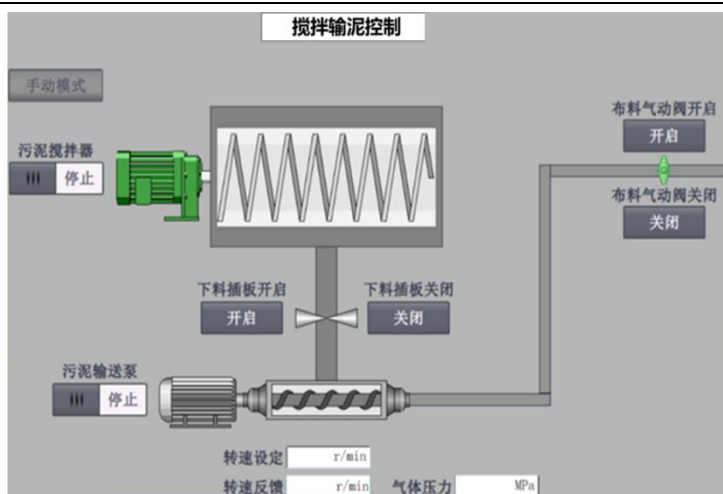


图4 系统控制界面

2 设计计算

2.1 污泥与药剂混合搅拌单元设计计算

2.1.1 搅拌轴设计计算

搅拌装置的搅拌轴由一定螺距的螺旋钢带镜像布置组焊而成，保证搅拌物料由两端向中间汇集。外层螺旋钢带1和内层螺旋钢带2通过支撑杆3与主轴4连接，形成一个具有足够刚性的整体搅拌轴（如图5所示）。

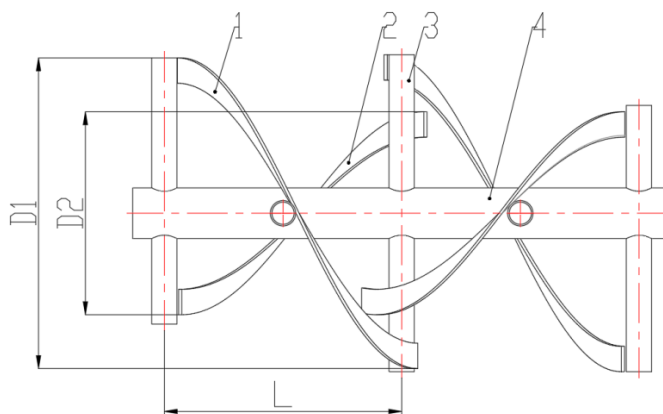


图5 搅拌轴结构图

结合搅拌机械设计经验^[3]，外层螺旋钢带直径、内层螺旋钢带直径、螺距以及内、外螺旋钢带的带宽计算的公式如下：

$$D1 = D - 2\delta \quad (2.1)$$

其中，D1—外层螺旋钢带直径，mm；D—搅拌罐内直径，mm； δ —外层螺旋钢带与槽底间隙，mm。

$$D2 \approx \frac{2}{3} D1 \quad (2.2)$$

其中, D2—内层螺旋钢带直径, mm。

$$L = \lambda D1 \quad (2.3)$$

其中, L—螺距, mm; λ —变距系数。

$$b \approx 0.05D1 \quad (2.4)$$

其中, b—内、外螺旋钢带的带宽, mm。

D为搅拌罐内直径1110mm, δ 取5mm。 λ 取(0.3~1)。计算可得外层螺旋钢带直径D1=1100mm、内层螺旋钢带直径D2=730mm、螺距L=800mm、内、外螺旋钢带的带宽b=50mm。

2.1.2 搅拌单元电机减速器选型设计计算

搅拌料罐采用卧式结构, 普通四极三相异步交流电机驱动, 配减速箱实现低速定速搅拌; 搅拌料罐内尺寸: 长1800mm宽1100mm, 高1300mm, 搅拌料罐容积2.3m³、满载约2m³; 搅拌叶片采用对称双螺旋结构, 叶片宽度50mm, 叶片厚度10mm, 搅拌叶片偏角45°, 叶片数量2。

$$P = n^3 \times D^5 \times \rho \times N_p \quad (2.5)$$

其中, P—搅拌轴输入功率, W; n—搅拌速度, r/s; D—搅拌叶片外径, m; ρ —80%含水率的污泥密度, kg/m³; N_p —搅拌功率系数。

$$R_e = \frac{D^2 n \rho}{\mu} \quad (2.6)$$

其中, R_e —雷诺数; μ —80%含水率的污泥粘度, Pa·s。

由于80%含水率的污泥粘度高、流动性差, 因此搅拌轴转速不宜过大, 选择(0.5-0.7) r/s; 搅拌叶片外径1.1m; 80%含水率的污泥密度1100kg/m³; 80%含水率的污泥粘度取值20Pa·s^[4]。

综上所述, 计算可得搅拌功率系数 $R_e=41.75$ 。根据对称双螺旋搅拌叶片的功率准数曲线(如图6所示)^[5], 查表可得功率准数 N_p 取1。则计算可得搅拌轴输入

功率 $P=400.05\text{kw}$ 。搅拌电机选用普通四极三相异步交流电机，电机额定转速 1450rpm ，由于选择搅拌轴转速 $(0.5-0.7)\text{r/s}$ 即 $(30-40)\text{r/min}$ ，则减速器选用普通二级齿轮减速器，减速比 $i=40.17$ ，计算出减速器输入功率不应小于 9.96kw 。安全系数取 1.2 ，则搅拌电机功率应大于 11.95kw 。选取标准规格 15kw 普通四极三相异步交流电机。最终搅拌轴转速约为 36r/min 即 0.6r/s ，符合设计要求。

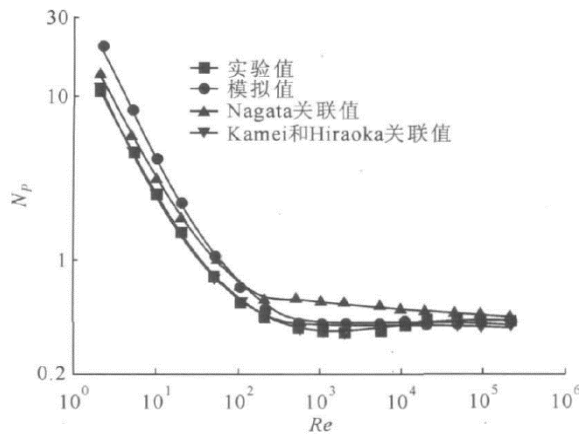


图6 双叶片斜浆功率准数曲线

2.2 污泥输送装置设计计算

2.2.1 污泥输送螺杆泵选型设计计算

污泥输送量需要与铺泥量一致，通过选择适合的螺杆泵排量实现，其大小可由下面公式计算而得。

$$Q = w \times h \times v \quad (2.7)$$

其中， Q —污泥输送量/铺泥量， m^3/h ； w —铺泥宽度， m ； h —铺泥厚度， m ； v —铺泥速度， m/h 。

根据具体案例：铺泥速度 720m/h ，布泥宽度 0.7m ，布泥厚度最大 0.01m 。计算可得污泥输送量/铺泥量约为 $5\text{m}^3/\text{h}$ 。考虑到螺杆泵内泄量以及后续磨损会降低输送量，螺杆泵排量应大于铺泥量。

由于螺杆泵在地面，布泥腔体安装在放布小车上，污泥输送高度差约为 5m ，输送管路总长约为 10m ；同时考虑到 80% 含水率的污泥粘度、流动性等参数，根据日本大晃株式会社推荐单螺杆泵介质粘度与选取转速的关系（如表1所示）。

表1 大晃推荐介质粘度与选取转速的关系

动力粘度/Pa·s	泵使用转速/r/min
0.001-1.0	400-700
1.0-10	200-400
10-100	<200
100-1000	<100

因此选用2级单螺杆泵，出口压力1.2MPa，螺杆泵选取小于200r/min的低转速输送，既有利于输送量的稳定，又可减少螺杆泵磨损增加使用寿命。选用标准规格螺杆泵排量约7m³/h。

螺杆泵电机选用普通四极交流变频电机，额定转速约1450r/min，配RC系列斜齿硬齿面减速器，有减速增矩的作用，速比取6.67。螺杆泵摩擦功率 N_f 和轴功率 N 计算公式^[6]如下。

$$N_f = K \times n^{1.5} \times D^2 \times \mu \times m \quad (2.8)$$

其中，K—与螺杆长度有关的系数；n—螺杆泵转速，r/min；D—转子螺杆外径，m；m=0.3-0.5。

$$N = N_f \times P \times Q \times t \quad (2.9)$$

其中，P—螺杆泵出口压力，MPa；Q—螺杆泵排量，m³/h；t—螺杆导程，m。

2级单螺杆泵排量7m³/h，螺杆泵的螺杆长度0.86m，不足1m时K取0.5，螺杆泵转速214.5r/min，转子螺杆外径0.065m，出口压力1.2MPa，螺杆导程0.2m。计算可得螺杆泵摩擦功率 N_f 最大约为53.1kw，螺杆泵轴功率89.2kw。由于减速器速比6.67，安全系数取1.1，选取标准规格15kw四极交流变频电机。

综上所述，螺杆泵由四极15kw交流变频电机驱动，配RC87系列斜齿硬齿面减速器，速比取6.67；选择输送管径与螺杆泵出口管径一致PN100；最终螺杆泵额定转速约214.5r/min，当需要污泥输送量为5m³/h时，螺杆泵转速约153r/min，螺杆泵电机转速约1022r/min，符合设计要求。

2.2.2 污泥输送管路设计计算

SF pressure-drop压降计算软件是基于基本物理原理设计的管道压降计算软

件。当流体流经管道时，由于管道表面粗糙度、流体介质不同，管路直径，管路配置等因素的影响，会产生阻力流特征，该阻力导致压力下降。该软件可以计算管道中流动液体和气体的压降（层流和湍流），也可以计算由管道垂直差异和动能变化引起的压力变化（动态压力变化）。因此要计算管路压降，需要流动介质数据（密度、粘度）、体积流量、管道材质（粗糙度）、管道内径、管道长度，管道高度差，管路配置的弯头数量及角度等输入参数。

根据压滤工艺设计及现场布置等情况，80%含水率污泥的密度约 1100kg/m^3 、粘度约 $20\text{Pa}\cdot\text{s}$ ，系统体积流量 $8\text{m}^3/\text{h}$ ，管道采用普通碳钢材质，管道总长度约 14m ，管道高度差约 5m ，管路配置2个弯头（弯曲半径大于2倍管径）。管径选择PN100和PN200两种规格，通过软件运算得出两种规格管径下管道内压降等结果（如图7所示）。

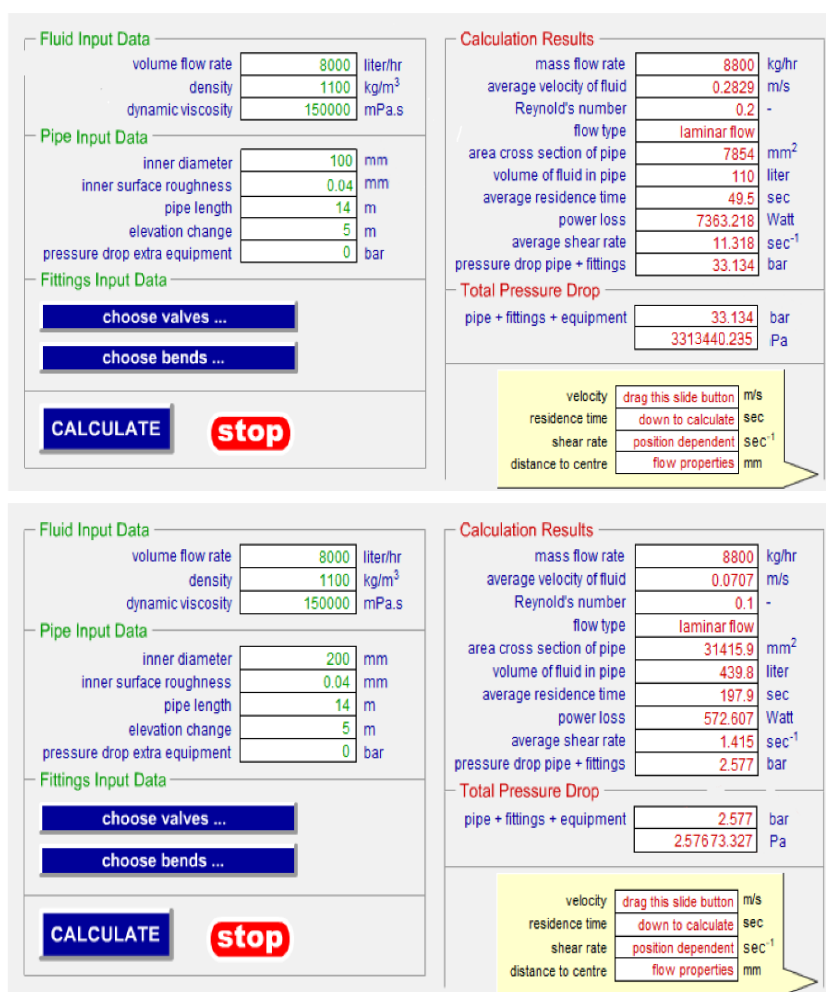


图7 两种管径下管道内压降对比

管径PN100时管道系统内压降约33MPa；管径PN200管道系统内压降约2.6MPa。综合输送污泥的螺杆泵正常出口压力1.2MPa，管道入口端积蓄压力达到2.6MPa更容易实现，满足系统要求。因此管路管径选取PN200。

3 结束语

本文针对具体案例，提供了一套市政污泥混合搅拌输送系统设计开发的方法。该方法是通过方案设计、设计计算等手段，设计出污泥与药剂混合搅拌装置、污泥输送装置以及电控单元的自动化系统。经过生产验证，该系统符合工艺要求，运行稳定可靠，为后续垂直高压薄层压滤机研发工作的开展提供有力的技术支撑。

参考文献：

- [1] 柴宝华, 李文涛, 元伟, 等. 我国市政污泥处理处置现状研究 [J]. 新能源进展, 2023, 11(1): 38-44.
- [2] 陈惠钊. 粘度测量 [M]. 北京: 中国计量出版社, 2003
- [3] 康有新等. 一种卧式单轴双螺带加热搅拌装置的设计试验 [J]. 机械研究与应用, 2020, 33(4): 91-94.
- [4] 徐永亮. 市政污泥基础特性及低温负压干化技术的研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2020
- [5] 谢明辉等. 桨式搅拌器功率准数三种取得方法的对比 [J]. 化学工程, 2010. 10: 167-170
- [6] 李福天. 螺杆泵 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010

基于污泥浸提液的好氧嗜热菌培养优化

黄婷

(合肥水泥研究设计院有限公司, 安徽 合肥 230051)

1 引言

随着城市化进程的加快和污水处理量的激增,我国污泥产量呈逐年上升趋势,2023年已突破6000万吨(以含水率80%计)。污泥中含有大量有机质、氮磷等营养元素,同时富集重金属、病原菌等有害物质,若处置不当易造成二次污染。将污泥作为水泥窑替代燃料(SRF,Substitute Refuse Fuel)是实现其减量化、无害化与资源化的重要途径之一。水泥窑高温(1450℃以上)环境可彻底灭活病原菌,重金属固化于熟料晶格中,且污泥热值(约8-12MJ/kg)可部分替代煤炭,降低水泥生产的化石能源消耗与碳排放。然而,污泥机械脱水后含水率普遍高达80%-85%,直接入窑需消耗大量热量用于水分蒸发。据测算,含水率每降低10%,水泥窑热耗可减少8%-10%,高效降低污泥含水率是提升其作为替代燃料经济性的关键前提。

污泥高温生物干化是实现污泥绿色低碳减重的重要技术。嗜热菌作为生物干化过程高温期(50~70℃)的主导菌群,通过分泌蛋白酶等胞外酶降解复杂有机物,对缩短干化周期、提升干化效率至关重要^[1]。然而,污泥中营养成分失衡(如碳氮比不合理、微量元素缺乏)导致生物干化过程嗜热菌生长受限,而现有商业培养基虽满足菌体生长要求,但成本高,限制了其工程应用^[2]。以污泥浸提液为基础,通过优化碳氮源、无机盐及pH等关键因子,可降低培养基成本并提升菌株与污泥生物干化环境的适配性^[3]。

目前,针对嗜热菌的培养基优化研究多集中于单一因子筛选,缺乏多因子交互作用分析。本研究以前期分离的耐70℃嗜热菌为对象,首先通过单因素实验确定污泥浸提液、补充碳源、补充氮源、pH、无机盐及盐浓度的最优水平,继而采

用响应面法 (RSM) 解析关键因子的协同效应, 构建高效培养基配方, 为嗜热菌在污泥生物干化中的规模化应用提供技术支撑。

2 材料与amp;方法

2.1 实验材料

2.1.1 菌株与培养基

嗜热菌菌株分离自食品加工废弃物与污泥混合堆肥样品 (堆体温度 $\geq 75^{\circ}\text{C}$), 经纯化后保存于 -20°C 冰箱, 可在 70°C 、好氧条件下稳定生长。基础培养基为污泥浸提液: 取污水处理厂污泥样品 100 g, 加入 500 mL 去离子水, 37°C 振荡浸提 24 h, 8000 r/min 离心 10 min, 滤液经 $0.45\ \mu\text{m}$ 滤膜灭菌后使用。商业培养基为 CYS 培养基 (胰酪蛋白胨 3 g/L, 酵母提取物 2 g/L, 可溶性淀粉 1g/L, NaCl 3 g/L, MgCl_2 0.125 g/L, CaCl_2 0.025 g/L, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.01g/L, pH 7.5)。

2.2.1 主要试剂与仪器

葡萄糖、蔗糖、淀粉、乙酸钠、酵母粉、蛋白胨等生化试剂 (国药集团, 中国); 酶标仪 (infinite m nano, 帝肯, 瑞士); 恒温振荡培养箱 (ZQZY-60S, 上海博迅, 中国)。

2.2 实验方法

2.2.1 生长曲线测定

将菌株分别接种于 CYS 培养基与污泥浸提液 (初始 $\text{OD}_{600}=0.1$, OD_{600} 为 600 nm 处吸光值), 在 70°C 、180 r/min 振荡培养, 每 8 h 测定 OD_{600} , 绘制生长曲线。

2.2.2 单因素实验设计

以污泥浸提液为基础, 分别考察以下因子对 24 h 菌体生长 (OD_{600}) 的影响: 碳源 (5 g/L): 葡萄糖、蔗糖、淀粉、乙酸钠、酵母粉; 氮源 (5 g/L): 尿素、胰蛋白胨、氯化铵; pH: 7.0、8.0、9.0 (用 1 mol/L NaOH/HCl 调节); 无机盐 (0.01%): CaCl_2 、 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、混合盐 (等比例混合); 盐浓度 (NaCl): 0%、1%、2%、3%。

2.2.3 响应面优化实验

基于单因素结果，选取酵母粉 (X_1 , 5~15 g/L)、胰蛋白胨 (X_2 , 5~15 g/L)、 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (X_3 , 0.005%~0.015%) 为自变量，以 OD600 (Y) 为响应值，采用 Box-Behnken 设计 (3 因素 3 水平，共 17 组实验)。

3 结果与讨论

3.1 培养基适应性比较

如图 1 所示，菌株在 CYS 培养基中表现出良好的生长特性，对数生长期持续至 24 h，OD600 峰值达 0.93；而在污泥浸提液中，10%污泥添加组的生长效果最佳，OD600 峰值为 0.39。这一结果表明，污泥浸提液中的营养成分（如有机碳、氮源等）相对不足，限制了菌体的生长，因此需通过培养基优化提升其培养性能。值得注意的是，20%污泥添加组的生长表现反而低于 10%组，说明高污泥浓度抑制菌株生长，其可能的原因包括：（1）污泥中某些成分（如重金属、有机毒物）在高浓度时产生毒性效应；（2）营养比例失衡，影响菌株代谢活性。基于上述结果，本研究选择 10%污泥添加的浸提液作为后续培养基优化的基础。

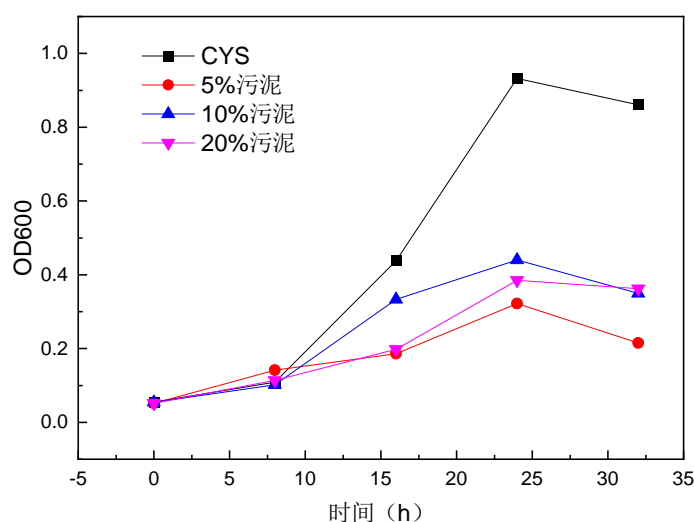


图 1 TC 菌株在 CYS 培养基和 5、10、20%污泥培养基中的生长曲线

3.2 单因素实验结果

3.2.1 碳源筛选

如图 2 所示，不同碳源对菌体生长的影响存在显著差异。以 OD600 为评价指标，酵母组 (0.41) 的菌体密度最高，显著优于淀粉、葡萄糖、乙酸钠和蔗糖组。

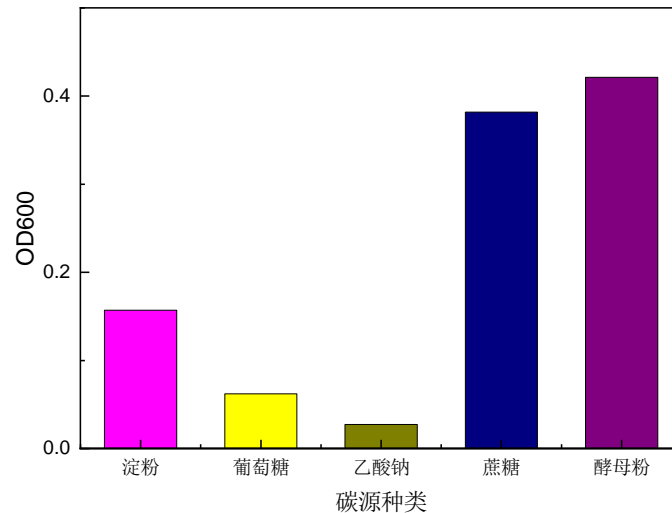


图 2 TC 菌株在不同碳源添加的污泥浸提液培养基中生长 24h 的 OD600 值

这一现象可能与酵母提取物的复合营养成分密切相关：其不仅含有丰富的氨基酸和 B 族维生素，还提供多种微量金属元素，能够满足嗜热菌对辅酶前体及能量代谢底物的需求，从而促进关键酶的合成与活性维持^[5]。相比之下，单一碳源（如葡萄糖、蔗糖、乙酸钠）由于缺乏必要的生长因子，可能导致菌体对碳源的利用不完全，致使能量转化效率降低^[6]。

3.2.2 氮源筛选

如图 3 所示，蛋白胨作为氮源时菌体生长最佳（OD600=0.37），其效果显著优于尿素和氯化铵。这一结果证实该菌株对有机氮源具有更高的利用效率，这与嗜热菌普遍偏好利用多肽、氨基酸等小分子氮源的生理特性相符^[7]。进一步分析表明，酵母与蛋白胨的组合能够协同促进菌体生长，其作用机制主要体现在：

（1）提供丰富的碳骨架（如葡萄糖、氨基酸前体）和易利用氮源（多肽、游离氨基酸）；

（2）酵母中的维生素（如生物素、硫胺素）作为关键辅酶因子参与能量代谢过程；

（3）优化培养基的碳氮比显著提升了细胞增殖速率和蛋白酶分泌水平。本研究结果与 Zhang 等^[8]在嗜热脂肪芽孢杆菌培养基优化中的发现一致，进一步验证了有机碳氮源的合理配比对提升嗜热菌活性的重要性。

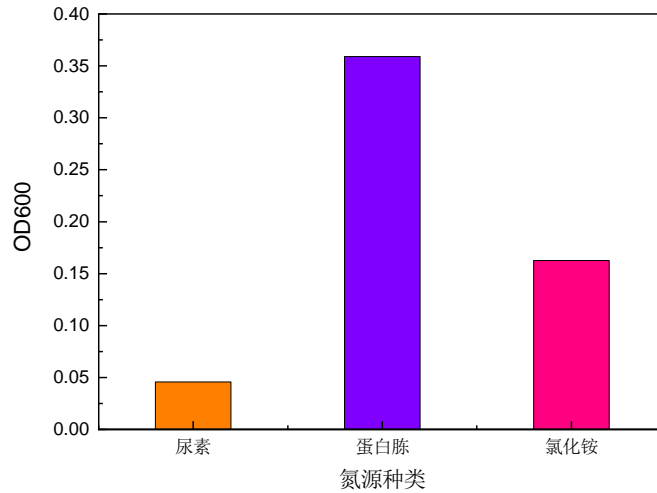


图 3 TC 菌株在不同氮源添加的污泥浸提液培养基中生长 24h 的 OD600 值

3.2.3 无机盐效应

如图 4 所示，不同无机盐添加剂对嗜热菌株生长表现出差异性影响。氯化钙 (CaCl_2) 可能通过调节细胞膜通透性和胞内钙信号通路双重机制影响菌体生长。七水硫酸镁 ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 作为 Mg^{2+} 的主要来源，其作用主要体现在作为 ATP 依赖酶（包括激酶和聚合酶）的必需辅因子。

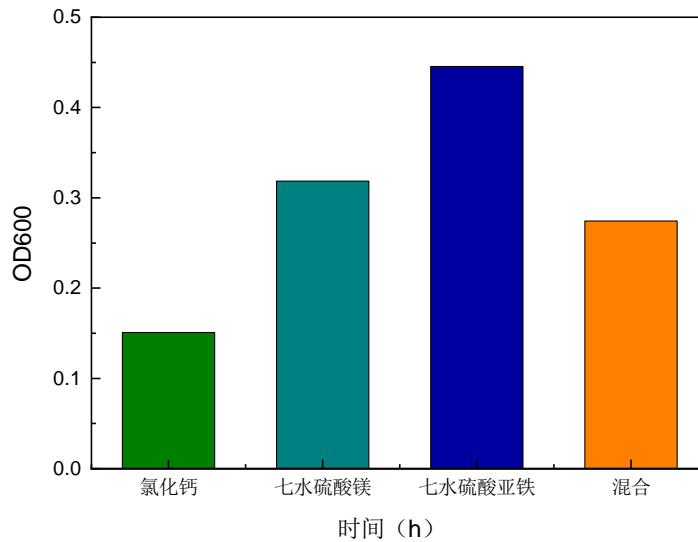


图 4 TC 菌株在不同无机盐添加的污泥浸提液培养基中生长 24h 的 OD600 值

值得注意的是，七水硫酸亚铁 ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 展现出最显著的促生长效应。机理研究表明， Fe^{2+} 在嗜热菌代谢中发挥多重关键作用：

- (1) 作为电子传递链核心组分（如细胞色素氧化酶）及铁硫蛋白的必需辅因子，显著提升电子传递效率与 ATP 生物合成；

(2) 通过维持过氧化氢酶等抗氧化酶系统活性,有效缓解高温环境诱导的氧化损伤;

(3) 潜在调控热休克蛋白表达水平,增强菌体热胁迫适应能力。过量 Fe^{2+} 可能通过芬顿反应产生活性氧自由基,导致细胞氧化损伤^[9]。因此,确定 Fe^{2+} 的最佳浓度范围对于平衡其促进生长作用与潜在毒性效应至关重要。

3.2.4 pH 与盐浓度影响

如图 4 所示,菌株在 pH 8.0 时生长最佳 ($OD_{600}=0.56$),该最适 pH 值可能与污泥生物干化的中性偏碱环境(通常 pH 7.5~8.5)相适应。盐浓度实验表明,0% NaCl 条件下菌体生长最优,且生长性能随盐浓度升高而显著下降,这可能是由于菌株通过积累相容性溶质(如脯氨酸)来适应低盐环境,而高盐浓度会导致细胞渗透压失衡^[10],1% 盐浓度即对菌株生长产生明显抑制作用。菌株在无盐条件下的最优生长特性与污泥生物干化的低盐环境(通常 NaCl 浓度<1%)高度匹配,有效避免了高盐浓度对菌体的不利影响。这一特性在实际应用中具有显著优势,既能减少培养基对盐离子的依赖,降低外源添加物成本,又可提升菌株在复杂堆体环境中的定殖能力。

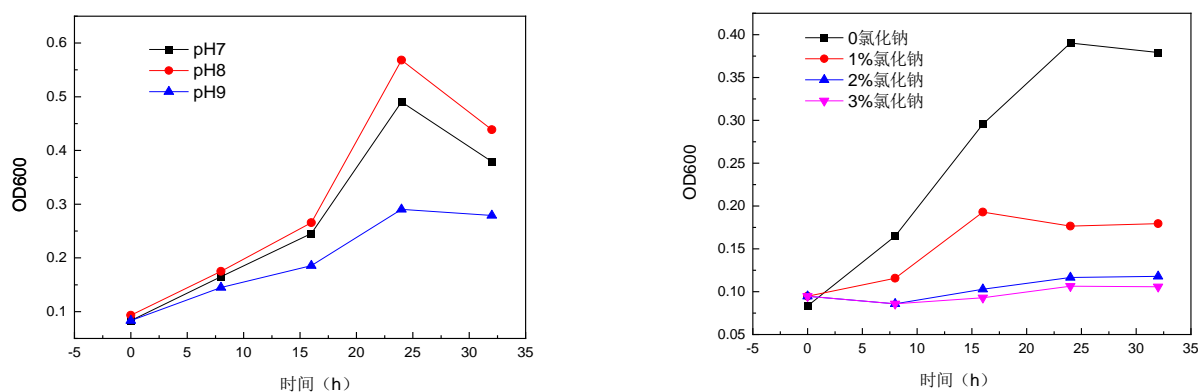


图 5 pH 与盐浓度对嗜热菌生长的影响

3.3 响应面优化结果

根据单因素实验结果,确定 TC 菌在 pH 为 8、0%氯化钠添加时生长较好,适宜碳源、氮源和无机盐为酵母粉、胰蛋白胨和铁盐(七水硫酸亚铁)。故进一步进行浓度范围确定的单因素实验,确定其适宜生长浓度范围为:酵母粉 5~15 g/L、胰蛋白胨 5~15 g/L、 $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.005%~0.015%,以此进行响应面实验设计。

3.3.1 回归模型建立与方差分析

以 OD600 为响应值，通过 Design expert 8.0.6 对二次回归系数的分析和计算得到 A 酵母粉、B 胰蛋白胨和 C 七水硫酸亚铁对 TC 菌株 OD600 影响的模型方程：

$$OD600 = -0.99500 + 0.19510 * A + 0.10835 * B + 15.88500 * C - 1.00000E-004 * A * B + 0.31000 * A * C - 0.44000 * B * C - 0.011880 * A^2 - 4.38000E-003 * B^2 - 85.80000 * C^2$$

方差分析结果为模型显著 (P<0.05)，失拟项不显著 (P>0.05)，决定系数 R² 为 0.95，表明模型拟合度良好，可用于预测。表 1 为相应面实验设计及响应值结果，每组实验均做 3 组平行，响应值为平均值。

表 1 Box-Behnken 实验设计及响应值

序号	酵母粉 (g/L)	胰蛋白胨 (g/L)	七水硫酸亚铁 (%)	OD600
1	5	5	0.1	0.74
2	15	5	0.1	0.64
3	5	15	0.1	0.56
4	15	15	0.1	0.45
5	5	10	0.05	0.77
6	15	10	0.05	0.47
7	5	10	0.15	0.36
8	15	10	0.15	0.37
9	10	5	0.05	0.85
10	10	15	0.05	0.77
11	10	5	0.15	0.81
12	10	15	0.15	0.29
13	10	10	0.1	0.99
14	10	10	0.1	0.94
15	10	10	0.1	1.12
16	10	10	0.1	0.87
17	10	10	0.1	1.1

3.3.2 因子交互作用分析

酵母、蛋白胨浓度和铁盐浓度对 OD600 的交互效应如图 6 所示，三者相互呈协同促进作用，当酵母浓度 9~11g/L、蛋白胨浓度 5~9g/L 时，OD600 达到峰值，表明适当提高有机碳氮源浓度可增强菌体代谢活性；铁盐浓度与酵母浓度等高线图显示，0.08%~0.1% 铁盐浓度下 OD600 较高，过高 (>0.13%) 或过低 (<0.05%)

均会抑制酶合成，可能因过量铁离子引发氧化应激损伤细胞结构^[11]。

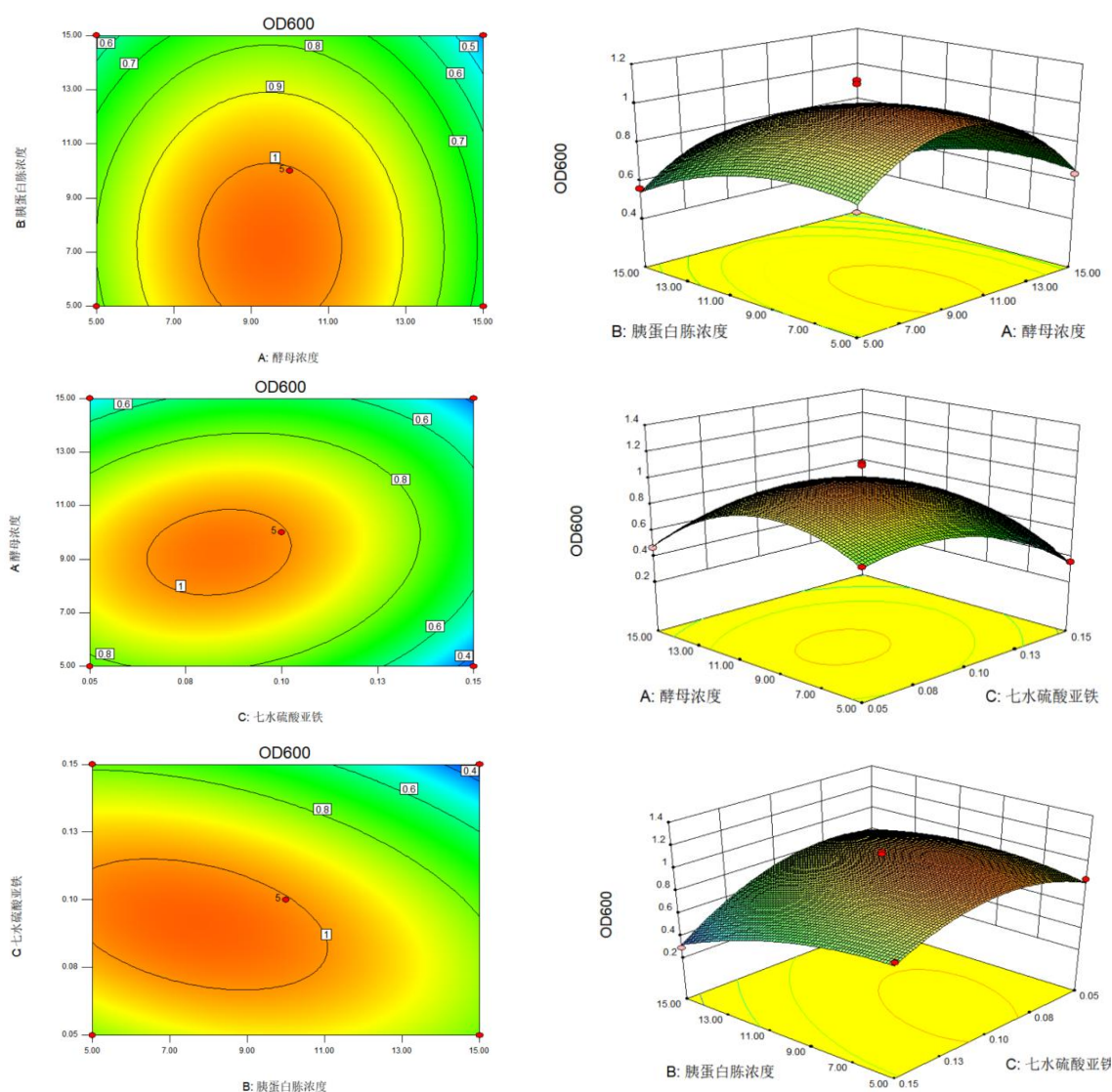


图 6 三种因素对 TC 菌株生长交叉影响的等高线和三维曲面

3.3.3 最优条件验证

如表 2 所示，通过模型优化确定了最佳培养基组成（10%污泥浸提液、酵母 6.19 g/L、蛋白胨 8.13 g/L、铁盐 0.08%，pH 8.0，无氯化钠添加），并预测其 OD600 为 0.93。实验验证表明，使用该最佳培养基培养 TC 菌株 24 小时后，OD600 实测值达 1.05；而以去离子水替代污泥浸提液的对照组 OD600 仅为 0.72。该结果不仅证实了优化培养基能有效促进 TC 菌株生长（较仅使用初始污泥浸提液培养提升了 138.6%，且优于 CYS 培养基），同时也直接证明了添加污泥浸提液对菌株生长具有显著的促进作用。

表 2 最佳培养基配方及 OD600 值预测

编号	10%污泥浸提液/L	酵母浓度 (g/L)	胰蛋白胨浓度 (g/L)	七水硫酸亚铁 (g/L)	OD600	可信度
1	1	6.19	8.13	0.08	0.93	0.83

4 结论

本研究以污泥浸提液为基础，通过单因素实验与响应面法，成功构建了嗜热菌高效培养基，确定酵母、蛋白胨、铁盐为关键优化因子，最佳浓度分别为酵母 6.19g/L、蛋白胨 8.13g/L、铁盐 0.08%。并明确 pH 8.0、无氯化钠添加为适宜培养条件。优化后的培养基显著提升了菌体生物量（OD600 提升 138.6%），为嗜热菌在污泥生物干化中的低成本、高效工程化应用提供了可行方案。

参考文献：

- [1] 刘克椿.堆肥中嗜热菌群的分离鉴定及其应用研究[D].广西大学,2024.
- [2] 陈磊,李宁,黄婷,等.重水拉曼技术表征嗜热微生物在污泥中生长活性的应用研究[J/OL].环境工程学报,1-13[2025-07-09].
- [3] 张智英,张旭,林童,等.嗜热菌筛选及其腐熟菌剂制备和应用[J].中南农业科技,2023,44(04):3-6.
- [4] 邱旭,于瀚章,孙俊杰,等.湿垃圾高温好氧堆肥处置过程中嗜热菌的应用及研究进展[J].生物加工过程,2024,22(06):659-670.
- [5] 蒋彪,王常高,杜馨,等.响应面法优化芽孢杆菌 CJPE209 产角蛋白酶发酵培养基的研究[J].中国酿造, 2017, 36(5):5.DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2017.05.016.
- [6] Quan, H., Zhu, T., Ma, F., Zhan, K., Zhu, Y. N., Wang, Y. Z., & Lv, Z. (2023). Enhanced bio - drying effect in low - temperature: Characteristics of sludge hyperthermophilic aerobic bio - drying by inoculating with thermophilic bacteria and full - scale operation. *Drying Technology*, 1 - 11. DOI: 10.1080/07373937.2023.2210213.
- [7] 朱向东.微生物发酵工艺优化研究进展[J].化工管理,2019,(16):202+205.
- [8] ZHANG L, WANG Y, LI X, et al. Optimization of culture medium for thermophilic protease production by a newly isolated *Bacillus stearothermophilus*[J]. *Process Biochemistry*, 2020, 89: 220-227.
- [9] 周丽亚,张悦,刘瑞琪,等.肌酐酶在大肠杆菌中外源表达及发酵优化[J].食品与发酵工业, 2023, 49(23):33-40.DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.035136.
- [10] Yabe S , Kato A , Hazaka M ,et al.Thermaerobacter composti sp. nov. a novel extremely thermophilic bacterium isolated from compost[J].*Journal of General & Applied Microbiology*, 2009, 55(5):323.DOI:10.2323/jgam.55.323.
- [11] 王茹,刘梦瑜,刘冰茵,等.共基质模式下铁盐脱氮反应器的运行性能及微生物学特征[J].环境科学,2019,40(12):5446-5455.DOI:10.13227/j.hjkk.201905237.

水泥工厂节水措施分析

王崇昊

(合肥水泥研究设计院有限公司 安徽 合肥 230051)

0 引言

水泥行业是高耗水行业之一，虽然目前多数企业已采用了生产废水循环利用系统，但由于生产工艺限制、管理措施不合理，生产过程中仍需补充大量新鲜水，企业在节水方面的潜力仍待挖掘。

1 水泥企业取、用水情况分析

水泥企业取、用水情况的差异性体现在以下几个方面：

- (1) 南北差异：南方蒸发耗水量较大；
- (2) 气温影响：夏季蒸发耗水量较冬季大；
- (3) 循环水冷却方式：开式冷却塔蒸发量较闭式冷却塔大；
- (4) 环保取水：对于环保要求较严的地区，脱硫脱硝等环保设施用水大幅增加；
- (5) 区域取/用水定额及取水证管理：各地取/用水定额差异较大，定额严的地区，企业采取适当节水措施；
- (6) 水质影响：水质直接影响企业取水量^[1]。

2 节水措施

2.1 循环水工艺选用电化学处理等新技术

化学加药法虽然是常用的循环水处理方法，但有自身的缺点和局限性：

- (1) 阻垢效果有限，只能提高循环水的临界碳酸盐硬度，成垢离子仍然存在于循环水中，故浓缩倍数一般控制在较低水平（2~4倍）；
- (2) 残余药剂随排污水排放容易造成二次污染，增加排污成本；
- (3) 药剂的投加量和投加浓度不易确定和控制；

(4) 不易实现全自动控制，需要频繁人为干预、配制、调整加药量和加药浓度、水中药剂保持的浓度；

(5) 药剂为持续性消耗，成本较高，国内的药剂供应商普遍水平不高，无法提供全方位的药剂解决方案。

电化学法是利用水及水中离子在电场作用下的化学特性改变、阴阳极板发生的电化学反应来实现水质稳定的。通常阳极采用钛合金材料，阴极采用不锈钢材料，两极之间通入低压直流电，极板间水溶液中正、负离子分别向极性相反处迁移，在阴极反应生成 OH^- ，形成碱性区域，为钙镁离子的沉淀提供条件，使钙镁在阴极表面成垢，从而减少换热器及管线内壁的结垢，达到除垢的目的。与此同时，在阳极反应产生 H_2O_2 、 OH 、次氯酸根等物质，具有强氧化性和渗透性，一方面使铁离子完全氧化，在设备和管线内壁形成一层氧化膜 (Fe_3O_4)，起到缓蚀的作用，另一方面可使水中菌藻细胞渗透、分裂，起到杀菌的作用^[7]。

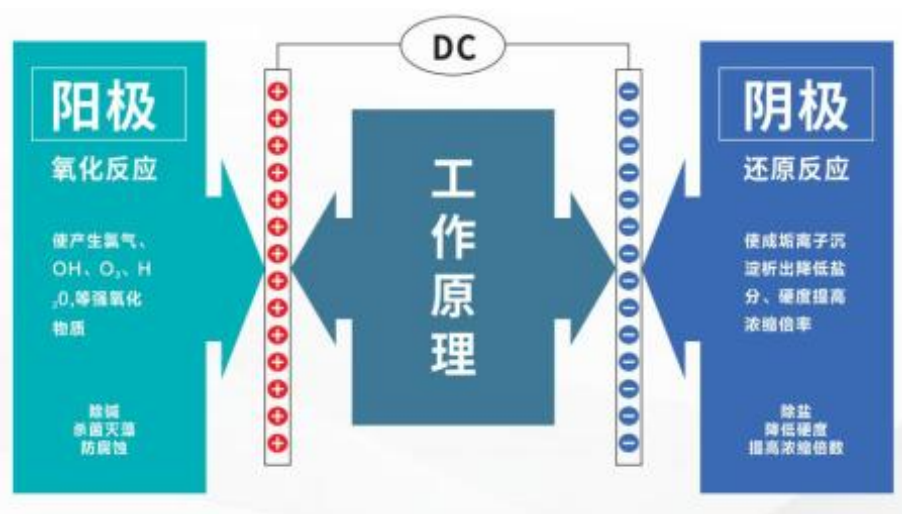


图 1 电化学法工作原理

电化学设备的技术特点：

- (1) 明显提高浓缩倍数，大幅减少排污量和补水量，节省水费和原水处理费用；
- (2) 无需投加阻垢剂、杀菌灭藻剂及缓蚀剂，减少二次污染；
- (3) 处理过程本身不另外产生任何污染物，排出的垢渣属于一般固废，运行仅耗电，运行成本低；
- (4) 旁流安装，仅需在系统回水母管开设旁路取水即可，设备安装以及自身的短

时间停机检修不影响系统的运行；

(5) 水质适应性强，高、低硬度和碱度的水质同样适用；

(6) PLC 控制，可实现全自动运行，操作维护简单，除了常规保养，基本无需人工干预。

复合电吸附装置是电化学与物理相结合的全自动处理系统。循环水经过设备时，在阴极附近形成强碱环境，使循环水中的钙镁离子从水中析出，并沉积在设备的阴极表面，通过定期清理排出系统。而阳极附近氯离子、水中的溶解氧等被变成自由基和次氯酸，使水中的细菌、藻类被直接杀死。电解电流将水中的部分氯离子转化成游离氯，同时产生臭氧、氧自由基、氢氧根自由基和双氧水等强氧化剂，实现杀菌灭藻功能。同时阴极高 pH 环境和阳极低 pH 环境，进一步增强杀菌灭藻能力。

2.2 提高自动化程度

通过设置压力传感器、温度传感器等调整循环水水量，进而影响循环水系统补水量。变频控制技术能够对水泵电机、风机的智能化控制，实现对循环水的精准调节，达到节能效果。

在采用变频控制技术时，具体控制方案可以在循环水出口处设置一个压力传感器和温度传感器，监测循环水的温度与压力变化情况。当循环水温度升高，高于设定的温度上限时，通过变频控制技术，调节电机功率至上限，提高循环水流量。当检查到循环水温度低于温度下限时，通过变频控制技术，调节电机功率至下限。当监测到循环水温度处于最高温度与最低温度之间时，变频控制技术通过智能化控制实现无级调速，使水泵达到最佳工作状态，达到节能降耗的目的。

2.3 初期雨水收集回用

随着雨水利用的推广，近年部分工程对初期雨水进行了回收、处理及利用，实现了雨水的资源化，节约用水，也可修复生态环境。

初期雨水是指降雨初期时的雨水。由于降雨初期，雨水溶解了空气中的大量酸性气体、汽车尾气、工厂废气等污染性气体，降落地面后，又由于冲刷企业内

的露天场地、道路等，使得前期雨水中会含有大量的有机物、病原体、重金属、油脂、悬浮固体等污染物质，因此初期雨水的污染程度较高，通常超过了普通的城市污水的污染程度。

初期雨水收集池容积可根据《城镇雨水调蓄工程技术规范》GB 51174-2017 中第 3.1.5 条，当调蓄设施用于源头径流总量和污染控制以及分流制排水系统径流污染控制时，调蓄量的确定可按下式计算：

$$V=10DF\Psi\beta$$

其中：D 为单位面积调蓄深度（mm），源头雨水调蓄工程可按年径流总量控制率对应的单位面积调蓄深度进行计算；分流制排水系统径流污染控制的雨水调蓄工程可取 4mm~8mm；

F 为汇水面积（ hm^2 ）；

Ψ 为径流系数，按综合径流系数取，其中城镇建筑密集区为 0.6~0.7；

β 为安全系数，一般取 1.1~1.5。

如某水泥粉磨站在雨水沟末端设置了初期雨水收集系统。该工程占地面积约 10 hm^2 ，计算所得初期雨水调蓄池的有效容积约为 450 m^3 ，这部分雨水经沉淀过滤等处理过后，可回收利用于浇洒道路及绿化用水，这样可以节省部分用于浇洒道路及绿化的新鲜水量；另外经过深度处理可以作为循环水系统补充用水，也减少了新鲜水消耗量。

2.4 生产废水处理回用

循环水系统排污水与 RO 反渗透系统浓排水，水质含杂质和含盐量比较高，水质比较复杂，日排水量也很大，建议对该部分水进行处理回用做循环水补水或者绿化用水等，处理工艺可选用图 2。

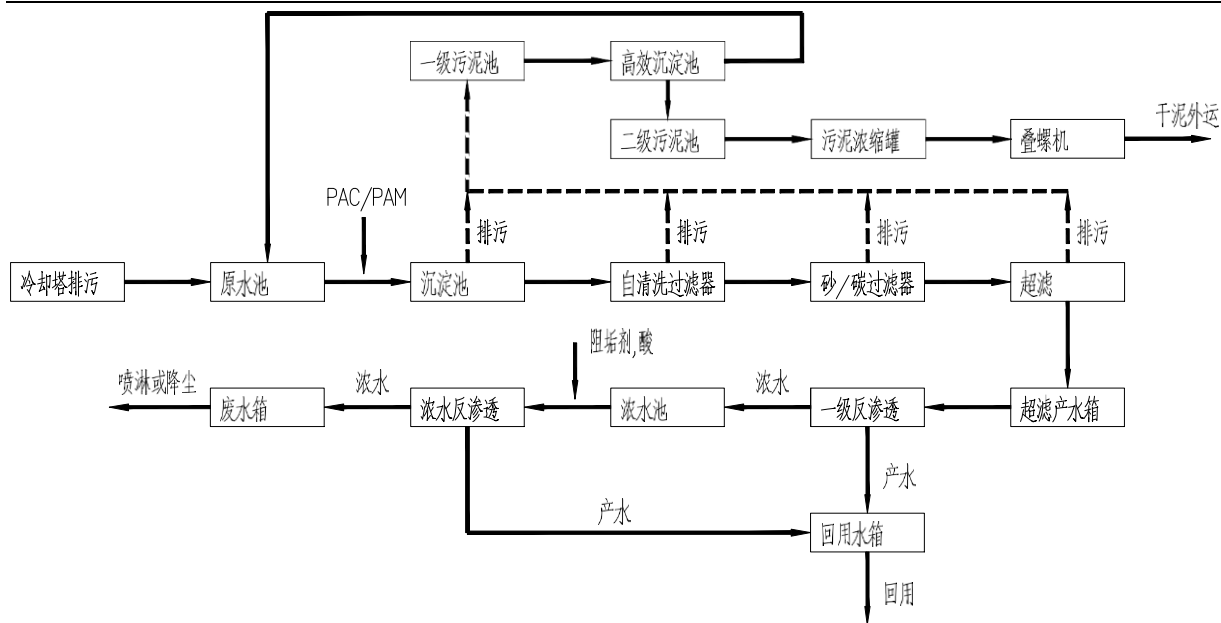


图2 综合废水处理工艺流程图

该系统主要分为沉淀、过滤、RO 脱盐、污泥处理等多个处理单元，循环水排污收集后先通过投加絮凝剂后进入沉淀池，经过沉淀池沉淀后进入原水池，通过提升泵进入过滤及 RO 系统，过滤系统选用自清洗过滤器、全自动多介质过滤器及超滤系统，通过前期沉淀过滤处理，超滤出水完全满足 RO 装置进水要求，RO 装置配套一级 RO 装置，二级浓水 RO 装置，最终 RO 装置回收率设置为 85%，RO 产水进入清水池用于循环水补水及绿化用水等，二级 RO 浓水进入废水池。另外过滤系统排污进入污泥池集中提升进入污泥处理系统。

主要设备如下：

(1) 沉淀池

沉淀池主要用于沉淀。加入 PAC 与废水充分混合，进入澄清器沉淀区内，经沉淀区内的斜管填料，突然改变水流方向，水经斜管后进入集水渠流入调节水箱，污泥沉积于斜管上，当达到一定重量后，滑入下部污泥斗经排泥阀排入污泥池。

(2) 多介质过滤器

多介质过滤器是重要预处理装置。它的作用是通过过滤和吸附去除原水中的细小颗粒、悬浮物、胶体、有机物等杂质，保证其出水 SDI（污染指数） <4 。同时去除水中的余氯，避免余氯对膜产生损害。特性：能够有效地去除原水中对反渗透膜组件非常敏感的胶体、悬浮物及有机物。具有独特的均匀布水方式，使过

滤达到最大效果，能长期满足反渗透膜对污染指数 $SDI < 4$ 的要求。

(3) 反渗透装置

本系统的主要作用是把预处理的产水进行膜分离脱盐，它包括下列单元设备。主要包括保安过滤器、高压泵、反渗透本体装置、清洗系统等。

反渗透系统利用反渗透膜的特性来去除水中绝大部分可溶性盐分、胶体、有机物及微生物。经过处理后合格的原水进入置于压力容器内的膜组件，水分子和极少量的小分子量有机物通过膜层，经收集管道集中后，通往产水管再注入反渗透产水的脱盐水箱。反之不能通过的就经由另一组收集管道集中后通往浓水排放管，排入反洗水池中或排出系统之外。系统的进水、产水和浓水管道上都安装有一系列的阀门、监控仪表及程控操作系统，它们将保证设备能长期保质、保量的系统化运行。

2.5 其他措施

减少管网漏损率，定期检查隐蔽水管。传统供水管网大多使用易腐蚀的铁质或水泥管路，对年久失修管路进行更换，改用耐久且不易腐蚀的 PVC 或 PE 管路，以防漏损^[5]。

全面推行节水型用水器具，提高生活用水节水效率。强化现行《节水型生活用水器具标准》的执行力度。今后企业所有新建、改建、扩建的建筑中均不得继续使用非节水型器具，尽可能减少不必要的用水。

3 结论

产品名称	先进值	通用值
水泥熟料	0.225	0.510
水泥	0.195	0.460

注：1.先进值用于新建（改建、扩建）企业的水资源论证、取水许可审批和节水评价；通用值用于现有企业的日常用水管理和节水考核。

2.使用湿法脱硫工艺的水泥产品，通用值增加 $0.08 \text{ m}^3/\text{t}$ ，先进值增加 $0.06 \text{ m}^3/\text{t}$ 。

表 1 水泥用水定额（单位： m^3/t ）

水利部和工业和信息化部 2023 年发布了水泥行业工业用水定额（表 1），对新鲜水取水量要求非常苛刻，随着水泥企业生产规模和用水量逐年增长、用水成本

逐年增加的背景下，节水任重而道远。一是大力推广节水工艺、积极开发非传统水源、分质供水、降低供水水质、减少废水排放等，在前期阶段或改造阶段通过优化设计可实现高效节水。二是加强供水单位和用水单位的沟通、完善管理体系、梳理全厂水系统、建立智慧管网，在现有阶段通过优化管理可实现有效节水。

参考文献：

- [1] 王桂凤. 节水措施在水泥工厂设计中的应用[J]. 水泥工程, 2013, 6: 75-81
- [2] 胡志颖, 李晋梅, 尹靖宇, 刘庆祯, 王勇. 水泥行业取水现状及节水措施分析[J]. 中国水泥, 2020. 2: 108-112
- [3] 宋伟刚. 化工企业循环水系统节水节能技术改造分析[J]. 化工设计通讯, 2021年08期: 153-154
- [4] 赵洪涛. 工业循环冷却水系统的节水措施分析[J]. 山东化工, 2015年第44卷: 101-105
- [5] 姜慧超. 石化企业循环水系统节能案例及节水措施研究[J]. 天津化工, 2022年11月: 85-88
- [6] 苏艳, 杨阳, 古克亚等, 循环冷却水系统的电化学除垢技术研究进展[J]. 工业水处理, 2023, 43(08): 30-37
- [7] 车凯, 张天琪, 杨玉坤, 电化学技术在炼化循环水系统中的应用[J]. 石油石化节能, 2020, 10(06): 14-17

关于钢结构工程项目成本控制的总结与应用

阮厚国

(合肥水泥研究设计院有限公司, 安徽 合肥 230051)

0 引言

钢结构工程因其施工速度快(较传统结构工期缩减 30%~50%)、强度高(钢材强度达混凝土的 5 倍以上)、环保性好(碳排放强度仅为混凝土结构的 60%)等核心优势,在大型工业厂房、体育场馆、交通枢纽等公共建筑中广泛应用。然而,其成本构成呈现“三高复杂性”,控制难度大,材料成本占比高(钢材占建安成本 55%~70%),受国际大宗商品价格波动影响显著;专业协同要求高,设计与施工深度交织导致变更频发(行业平均变更率达 8%);技术附加值高,深化设计、焊接工艺等环节直接决定用钢量与损耗率。本文结合某大型工业厂房钢结构项目(以下简称“本项目”)的实践,系统总结了在设计阶段、招投标阶段、施工阶段、竣工结算阶段四个关键阶段实施的成本控制措施及其应用效果,旨在为类似项目提供可借鉴的管理经验。

1 设计阶段

一般来说,钢结构厂房的设计费占项目总投资的 1.5%~5%,但设计阶段决定了整个项目的 70%~85%的成本。但从目前的行业现状来说,设计院为求中标,只能不断地降低设计费,中标后设计院为了自身利益,配备的设计人员技术水平良莠不齐。部分设计人员欠缺施工经验,设计时仅满足理论需求和设计规范要求,未考虑方案的可施工性,造成后期发生设计变更;设计各部门沟通协调不充分,设计提资不准确不及时,待施工时出现返工现象;设计保守系数取值过大,设计方案过于保守,造成不必要的浪费等。

对于整个项目来说,设计方案的优化从成本角度来说,是最容易出成果的,但也最能考验项目管理团队的技术实力。

1.1 推行限量设计

项目伊始根据项目钢结构类型，测算本项目的钢结构含量限额目标（比如本项目为重型机械厂房，含钢量控制在 75kg/m²）。要求设计院在保证结构安全（符合《钢结构设计标准》GB 50017）和使用功能的前提下，进行多方案比选优化。同时，可在设计合同中设置奖罚条款，来提高设计院的限量设计动力，实现项目的共赢。

厂房类型	跨度(m)	吊车吨位(t)	檐高(m)	用钢量(kg/m ²)	主要部位占比
轻型门式刚架	15~30	≤10	6~9	18~35	主钢构 60%+檩条 25%+支撑 15%
重型机械厂房	24~36	20~100	12~20	55~90	柱梁系统 70%+吊车梁 15%+屋面 10%
物流仓储库房	20~40	无或≤5(堆垛机)	8~12	25~45	刚架 55%+墙面系统 30%+其他 15%
电子洁净厂房	12~18	无	5~7(多层)	40~65(含楼承板)	框架柱梁 80%+次结构 20%
火力发电主厂房	30~45	50~200	25~40	80~130	桁架体系 60%+吊车梁 25%+支撑 15%

注：数据根据《全国通用工业建筑造价指标》（2024 版）及典型项目案例整理

1.2 基础形式的选择

钢结构工程常用的基础形式为独立基础和桩基+承台形式。根据项目的实际工程经验，基础开挖深度超出 5.0m 以上的部位，需通过成本-工期双维度对比确定基础形式。项目团队经过从成本、工期、施工难易程度等多方面分析，结论是桩基工程方案都有较大的优势。

指标	独立基础	桩基+承台	对比
综合成本(元/m ²)	380-450	320-380	↓ 15%~20%
施工周期(天)	45-60	30-40	↓ 25%~35%
地质适应性	限于持力层浅区域	软土/回填土区域	

1.3 标准化与模数化设计

在满足工艺要求的前提下，尽量采用标准跨度、标准构件、标准节点，提高工厂预制化率，降低加工和安装成本。

1.4 严格设计变更审批

建立严格的设计变更流程。任何涉及成本增加的变更，必须经过成本部、工程部、设计院等多方会审评估，并经项目经理和业主批准后方可实施。

1.5 工业厂房屋顶光伏方案的选择

当前国家大力支持绿色建筑发展，新建工业厂房应同步配套建设光伏设施，且光伏发电组件投影面积不少于有效屋顶面积的 50%。对于新建厂房来说，BIPV 建筑光伏一体化模式（Building Integrated Photovoltaic 光伏组件作为建筑构件，将太阳能光伏产品集成到建筑上，与建筑物同时设计、同时施工、同时安装，并与建筑物完美结合的太阳能光伏发电系统）相较于传统的 BAPV（附着式光伏系统）模式，核心优势减少二次施工成本、延长屋面系统使用寿命至 25-30 年，且光伏单位承担整体屋面的维保责任。

2 招投标阶段

编制招标文件、工程量清单和清单控制价，是本阶段最主要的工作内容，此阶段的核心是通过充分竞争和精细化招标文件锁定合理成本，选优合作伙伴与明确成本预期。

2.1 资格预审与评标办法设定

资格预审条件既要筛掉不合格的投标人，又不能设置过高门槛导致竞争不足。评标办法则根据项目的规模与复杂程度进行设置，如大型、特殊要求的钢结构工程采用综合评标法（技术分和商务分按比例计算）；中小型钢结构工程采用经评审最低价法（剔除异常报价后最低价中标）。

2.2 招标文件编制

（1）工程量清单清晰准确：提供基于深化设计图的详细工程量清单（符合《建设工程工程量清单计价规范》GB 50500），明确项目特征描述，减少投标人理解偏差和后期争议。明确钢材品牌、规格、质量等级（如 Q355B）等技术要求。

（2）合同条款严密：在合同中明确约定计价方式（本项目采用综合单价合同）、价格调整机制（明确钢材等主材价格大幅波动的调价公式）、变更签证程序、质量

验收标准、工期延误罚则、安全文明施工要求等，规避潜在风险。

(3) 明确分包范围与界面：清晰界定钢结构分包与土建、机电、幕墙等其他专业的工程界面和责任划分，避免漏项或重复计价。

2.3 合理低价中标与商务谈判

在技术标合格的前提下，采用合理低价中标原则。对中标候选人进行详尽的商务澄清和谈判，尤其关注不平衡报价项、措施费计取、潜在风险点的应对承诺等，最终确定中标价。

3 施工阶段

施工阶段是成本实际发生和控制的焦点，需进行全过程的动态监控与精细化管理。

3.1 材料成本动态管控

(1) 采购管理：根据施工进度计划和钢材价格走势，与分包商协同制定最优采购计划，在价格低位时锁定资源。严格审核进场钢材的质保书、规格型号和数量，执行第三方复检制度。

(2) 限额领料与损耗控制：依据深化设计料单，对分包商实行严格的限额领料制度。制定合理的材料损耗率标准（如控制在 5%以内），并定期考核。鼓励边角料再利用（如用于小型支撑、连接板等）。

3.2 加强变更签证管理

(1) 源头控制：尽量减少非必要变更。确需发生的变更，严格执行“先估价、后审批、再实施”的程序。

(2) 及时性与准确性：要求现场工程师及时、准确地记录变更签证事实，收集支撑资料（如影像、测量记录、图纸、联系单等）。成本工程师及时进行费用测算和审核。

(3) 分类管理：明确区分业主原因、设计原因、施工原因导致的变更，清晰界定责任归属和费用承担方。

(4) 进度与资源协调：科学编制和动态调整施工进度计划，确保钢结构吊装

与土建、机电等专业的紧密衔接，减少大型机械（如塔吊、履带吊）的闲置时间，降低台班费用。优化现场构件堆场布置，减少二次搬运。

（5）质量与安全管理：严格过程质量管控，避免因返工、返修造成的成本浪费。强化安全投入和监管，杜绝安全事故带来的巨额损失和工期延误。

（6）过程成本核算与分析：定期（如每月）进行钢结构部分的成本核算（实际成本与目标成本/合同价的对比分析），及时发现偏差（如材料超耗、签证费用超预期等），分析原因并制定纠偏措施。

通过严格的现场管控，本项目钢结构施工阶段材料实际损耗率低于目标值5%，变更签证费用控制在合同总价的2%以内，有效遏制了成本超支风险。

4 竣工结算阶段

此阶段是成本控制的最后关口，需确保成果真实准确反映合同履行情况。组织专业人员对项目进行复盘总结，建立数据库，提升企业核心竞争力。

4.1 竣工资料完整性审查

要求分包商提交完整、规范的竣工结算资料，包括：竣工图（反映最终完成情况）、完整的变更签证单及支撑材料（签字盖章齐全）、材料进场验收及复检记录、质量验收记录、工期记录等。重点核对竣工图与变更签证的符合性。

4.2 结算审核重点

依据合同约定的计价原则、定额标准、取费程序、调价条款、奖罚条款等，对结算书进行逐项审核。重点关注：

- （1）工程量计算准确性（对照竣工图、变更签证重新核算）。
- （2）综合单价套用的合规性（是否与中标单价一致，变更项目单价是否合理）。
- （3）变更签证费用的真实性和有效性（资料是否齐全有效，费用计算是否正确）。
- （4）合同约定的扣款项（如水电费、罚款、质保金等）是否足额扣除。
- （5）对关键部位或争议较大的工程量，进行必要的现场实地测量复核。
- （6）建立结算内部多级审核机制（预算员初审、成本经理复审、项目经理终

审), 引入第三方造价咨询机构进行独立审计。

(7) 与分包商进行充分沟通和谈判, 就争议点依据合同和事实达成一致意见, 最终形成双方确认的竣工结算书。

4.3 数据库建设与运用

(1) 建立数据库 (如企业内部定额/供应商库/): 选取若干有代表性的项目, 组织专业技术人员不断完善数据库。

(2) 按厂房类型分类测算指标 (如吨钢结算价、平米含钢量、建筑指标综合单价), 用于后续项目对标。

通过严谨细致的结算审核, 本项目钢结构分包最终结算金额较合同金额增加幅度控制在 2%以内, 实现了成本的有效闭环控制。

5 结语

钢结构工程项目的成本控制是一项贯穿项目全生命周期的系统性工程。关键在于源头把控 (设计)、过程严管 (招投标、施工)、结果确权 (结算)。本项目实践证明, 通过在设计阶段推行限额设计和设计优化, 在招投标阶段精心编制文件并优选分包商, 在施工阶段强化材料、变更和现场管理, 在竣工结算阶段严把资料和审核关, 能够有效实现钢结构工程成本目标的动态受控, 提升项目的整体经济效益和管理水平。这些措施对类似钢结构工程项目具有重要的参考和推广价值。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建设工程工程量清单计价规范 (GB 50500-2013)[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准 (GB 50017-2017)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [3] 戚安邦, 孙贤伟. 工程项目全面造价管理[M]. 天津: 南开大学出版社, 2015.
- [4] 王雪青, 杨秋波. 工程成本规划与控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. (着重看钢结构工程成本管理章节)
- [5] 中国建设工程造价管理协会. 工程造价咨询业务操作指导规程[S]. 北京, 现行有效版本.

煤立磨MVM2900H改造经验浅谈

刘运华

(合肥中亚建材装备有限责任公司, 安徽 合肥 230051)

0 引言

在水泥生产工艺流程中,煤粉的制备是熟料烧成系统的“动力源头”与“能耗关键”。煤立磨作为现代水泥厂粉磨原煤的核心装备,其运行状况和性能指标直接关乎窑系统的发热量、火焰形态、熟料质量及全线能耗。一台稳定、高效、低耗的煤立磨,是保障回转窑稳定运行、降低熟料综合成本、提升企业市场竞争力的重要基石。

然而,随着设备服役年限的增长以及国家“双碳”战略下对能耗与排放指标的严苛要求,许多水泥企业早期配置的煤立磨已逐渐暴露出诸多问题:一方面,设备本体可能存在研磨效率较低、故障率较高等缺陷,导致台时产量低下、电耗指标落后;另一方面,由于原煤来源不稳定,煤磨难以适应煤质变化的波动,造成煤粉产品无法满足细度及水分的较高要求,进而引发窑况波动、热工制度紊乱,甚至影响熟料强度和污染物排放。这些痛点不仅推高了生产成本,更成为制约企业绿色、高质量发展的瓶颈。

因此,对早期煤立磨进行有针对性的技术改造与系统性优化,不再是简单的设备维修替代,而是一场旨在提质、稳产、降耗、增效的“精益化革命”。

1 改造背景

山东 B 水泥公司现有日产 4000 吨水泥熟料生产线,煤粉制备系统采用南京 L 公司生产的 MVM2900H 煤立磨粉磨烟煤,实际产量约为 38~40t/h,产品细度 0.08mm 方孔筛筛余 5~6%左右。在对预热器改造升级后,煤粉需求产量 50t/h,由于目前的煤立磨产量较低,很难满足升级后窑对煤粉的需求。另外该煤立磨本身结构上也存在诸多缺点:如磨辊加压采用压力框架的形式,不能空载启动,磨内

磨损件多、维护极为不便，检修磨辊时须拆除选粉机、压力框架等，辊套衬板不能在线堆焊。煤立磨的性能指标也较差，如产量低、压差大、电耗高等。

2 改造方案

将原来的煤立磨 MVM2900H 改造成合肥院煤立磨 HRM34.3M。为了节省改造成本，保留原设备主传动部分（主电机和主减速机及其润滑油站），主减速机由于功率较小，需做改造扩容，原煤立磨本体全部拆除替换为新煤立磨 HRM34.3M；保留原有的煤立磨基础，改造时在原来基础上钻孔，不但可以节省了土建费用，还可以大量缩短改造周期。

3 改造实施过程

(1) 拆除原有煤立磨 MVM2900H 全部设备。

(2) 主传动：保留原煤立磨主传动装置，主电机、联轴器以及主减速机润滑系统利旧。减速机为洛矿 MZL60A，额定功率为 650kW，为了保障主减速机的安全稳定运行，主减速机送至原厂家进行扩容，功率扩容至 800kW，并将减速机的速比由 $i=30.67$ 改造为 $i=34.74$ 。

(3) 基础：保留原煤立磨土建基础，主传动基础部分维持不变，新磨机基础螺栓孔（即机架及液压支座基础螺栓孔）在原基础上采用水钻钻孔，共计 $28 \times 3 = 84$ 个 $\varnothing 200$ 水钻孔。

(4) 下壳体：进风口位置与原立磨一致，增加进风口膨胀节，重新设计制作非标连接原有热风管。

(5) 磨盘装置：根据利旧的减速机法兰接口尺寸与 HRM34.3M 新磨盘的接口尺寸，设计制作新的过渡连接板，使减速机和磨盘通过过渡连接板完全对接。

(6) 选粉机：采用新式动静态选粉机，提高选粉效率，控制成品细度，其进料口保持与原立磨进料口位置一致，重新设计制作非标连接进料口。出风口保持与原立磨出风口位置一致，增加出风口膨胀节，重新设计制作非标连接原有出风管。

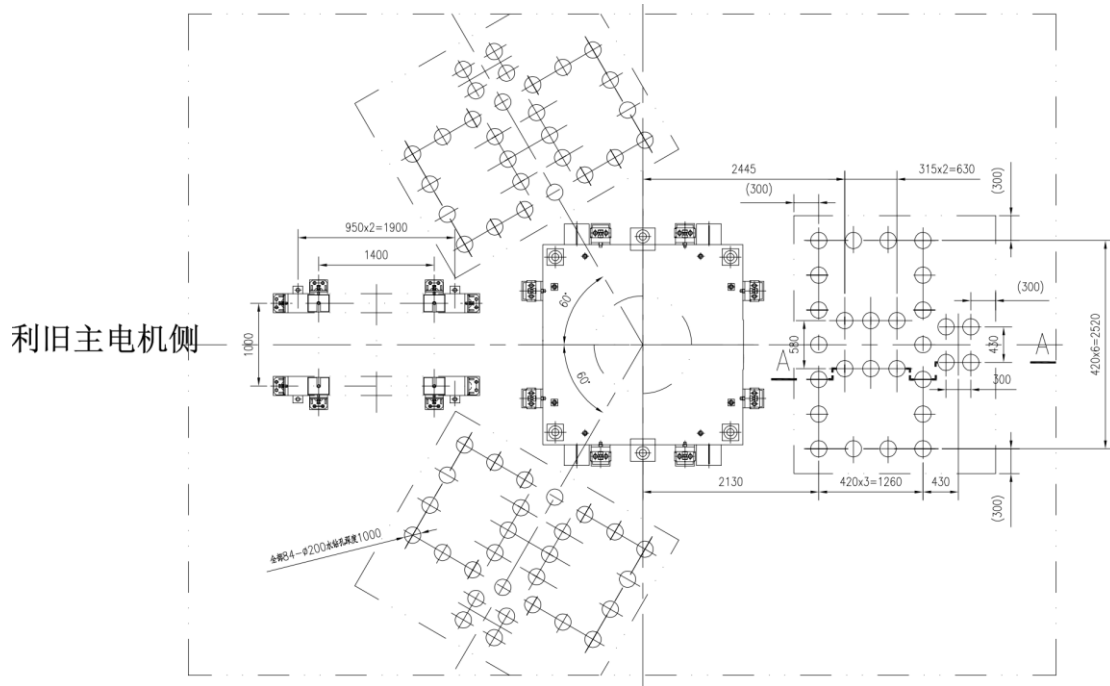


图 1 改造后煤立磨基础钻孔图

4 煤立磨改造周期

- (1) 旧设备拆除周期：7 天。
- (2) 减速机改造：23 天，此期间基础钻孔。
- (3) 煤立磨安装周期：20 天

5 改造前后煤立磨布置图比较

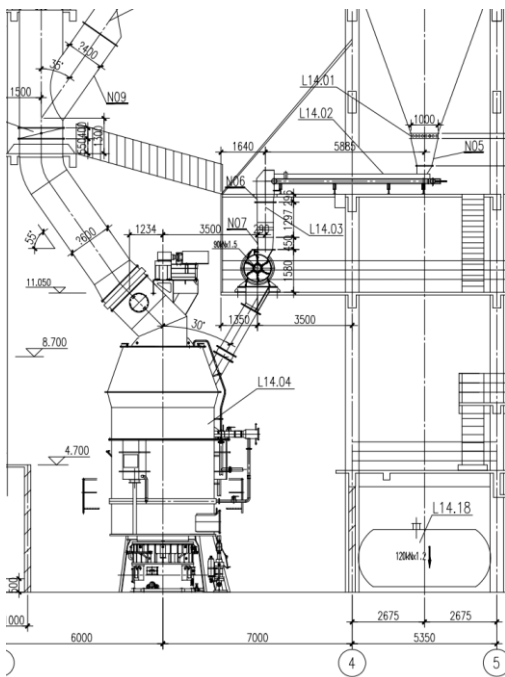


图 2 改造前煤立磨布置图

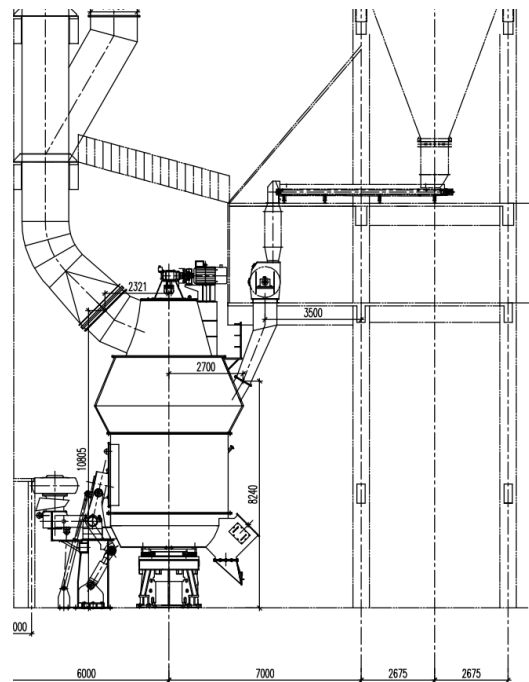


图 3 改造后煤立磨布置图

改造后的煤立磨 HRM34.3M，其磨机中心位置不变，原煤仓以及喂料设备都不用变动，热风管道、出风管道、进料溜槽位置也都无需改动。

6 改造效果



图 4 改造前煤立磨 MVM2900H



图 5 改造后煤立磨 HRM34.3M

表 1 煤立磨改造前后性能指标对比

性能指标	改造前 MVM2900H	改造后 HRM34.3M	变化
产量 (t/h)	39	50	+11
细度: 0.08mm 筛余	5~6	3~4	-2
煤立磨压差 (Pa)	5100	3600	-1500
单机电耗 (kWh/t)	17.2	14.1	-3.1

煤立磨改造后产量提高了 11t/h，增幅超 28%，细度 (0.08mm 筛余) 由 5%~6% 降低到 3%~4%，煤立磨的进出口压差减小了 1500Pa，煤立磨单机电耗降低了 3.1kWh/t，同时，煤粉细度及水分控制更为精准，为回转窑的稳定煅烧提供了坚实基础。

改造后的煤立磨与改造前相比还具有以下优点：

(1) 磨辊检修方便：改造后的煤立磨每个磨辊都有单独的传动臂、加压油缸和检修油缸，每个磨辊都能单独抬辊落辊，都能通过检修油缸将磨辊翻出磨机壳

体外，检修及更换易损件十分方便，并能大量节省检修时间和强度。

(2) 磨辊轴承的密封：改造后的煤立磨磨辊轴承密封是延伸至磨机壳体外部，机械密封既简单又可靠，并且不需要密封风机，减少了密封风机带入磨内含氧量。

(3) 磨辊轴承的润滑：配置单独的磨辊润滑油站，磨辊的轴承采用稀油强制润滑，有效的降低磨辊轴承的温度，大大提高磨辊轴承的使用寿命。

(4) 进风口与排渣口的独特的设计，减少进风口煤粉的堆积，能有效的防止进风口处出现自燃的现象。

(5) 在线堆焊：磨辊辊套和磨盘衬板采用复合堆焊材质，在磨损后，可以在线堆焊，无需再将辊套拆卸下后再进行修复，能大大减少修复时间和工作量。

(6) 改造后的煤立磨对原煤的适应性更强，能在粉磨易磨性较差、水分较高的煤质，产量和细度仍能满足窑的需求。

本次煤立磨改造的成功，为同行业处理类似问题提供了可借鉴的范例。它表明，对现有老旧设备进行技术改造，是水泥企业实现节能降耗、提质增效目标的一条投入少、见效快、回报高的有效途径。

袋装水泥自动装车机研制

徐立娟

(合肥固泰自动化有限公司, 安徽 合肥 230041)

1 引言

水泥装运环节普遍依赖人工作业, 存在粉尘浓度高(总尘限值超 4 mg/m^3)、劳动强度大、招工困难等问题^[1-2], 且行业破包率标准($<2\%$)难以达标^[3]。国家环保政策(如 GBZ 2.1-2019)及智能制造规划(《建材工业智能制造数字转型三年行动计划》)要求企业实现装车无人化^[4]。国内运输车辆种类繁多, 尺寸不一, 现有装车机技术难以适应高栏板车型, 导致较高的装车破包率, 因此, 亟需开发一款低位落包方式可自动适应车型高度的自动装车机, 实现高效、低损的自动化装车。

2 自动装车机的总体方案

根据水泥厂的包装发运工艺, 装车车辆进入装车车道, 按引导停好车辆, 司机刷卡操作读取车辆和装载数量, 装车系统启动, 自动扫描系统开始工作, 扫描车辆轮廓尺寸, 同时装车系统根据装包量和车辆尺寸自动计算物料包的码放层数及形式, 并将需码放数量信息自动反馈至包装系统。随后, 机头部分自动运行至车厢装车起点, 做好装车准备。包装系统开始工作, 物料包通过输送系统输送至装车系统, 装车机内部一系列复杂的操作, 将物料包整齐地码放于车厢内。

自动装车系统主要由以下六部分组成: (1) 水平输送系统: 对接包装输送系统; (2) 倾斜输送系统: 将水泥包输送至码垛机头; (3) 自动识别和生成车厢栏板长、宽、高等数据; (4) 升降机构: 码垛机头升降和前后行走; (5) 收尘系统: 移动式收尘, 收集装车过程的粉尘; (6) 码垛机头: 水泥包姿态调整与码垛。如图 1 所示。

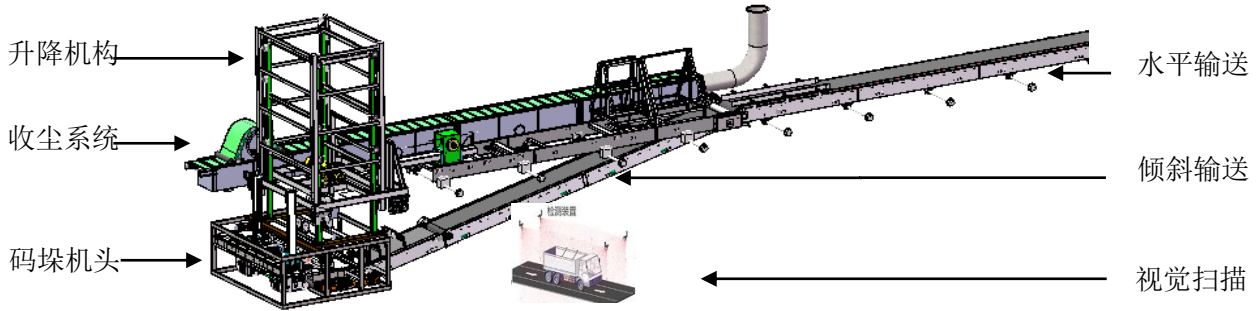


图 1 自动装车系统总体结构组成

根据装车要求，装车产能要达 100t/h，适应装车车辆宽度 1.6~2.6m，结合二次装车最长装车长度 13m，采用低位落包型式（落包高度 600mm），横竖向度可以码包，使用车辆轮廓扫描系统引导和测量测量尺寸，允许一定的停车偏差，自动装车系统的主要参数如表 1 所示。

表 1 自动装车系统主要技术参数

名称	分项	参数指标
装车效能	装车总效能	100t/h
车辆规格	车辆尺寸	装车宽度：1.6~2.6m 装车长度：13m
装车垛型	垛形方案	自动生成：可横向、竖向堆垛
	落包方式	低位落包
定位偏差	水平方向定位偏差	测量误差在实际尺寸的 1%以内
	上下提升定位偏差	测量误差在实际尺寸的 1%以内
停车允许偏差	中轴偏离系数	±150mm
	角度偏离	±1.5 度
装车方案	装车方式	可二次装车
安装方案	安装方案	就地安装
车辆进场	自动引导	基于轮廓扫面系统实时引导（语音播报可配显示屏实时纠正）

3 下探式码垛机头设计

自动装车机最主要的技术难点在于装车速度和栏板适应性问题，装车速度按每小时 100t 也就是每小时 2000 包，输送速度平均 1.8s/袋水泥，实现自动装车的全过程实际在连续不断地执行落包循环。为了适应高栏板车型的装车需求，实现低位落包（落包高度 600mm），四自由度落包装置是码垛机头的核心部件，完成码垛循环必须经历：进包-移动-下探-落包-返回移动五个工序，按最大车厢宽度 2.6m 计算，落包装置最大横向移动距离约 2.4m，进包和落包至少占用 1s，剩余

0.8s 实现落包装置加水泥包约 200kg 负载的移动 2.4m 在技术上难度太大。因此，需要多组进包和落包机构同时运行，并且合并移动和下探工序来减少工序占用时间，以增大落包周期，是解决装车速度和低位落包的有效措施。下探式码垛机头如图 2 所示。

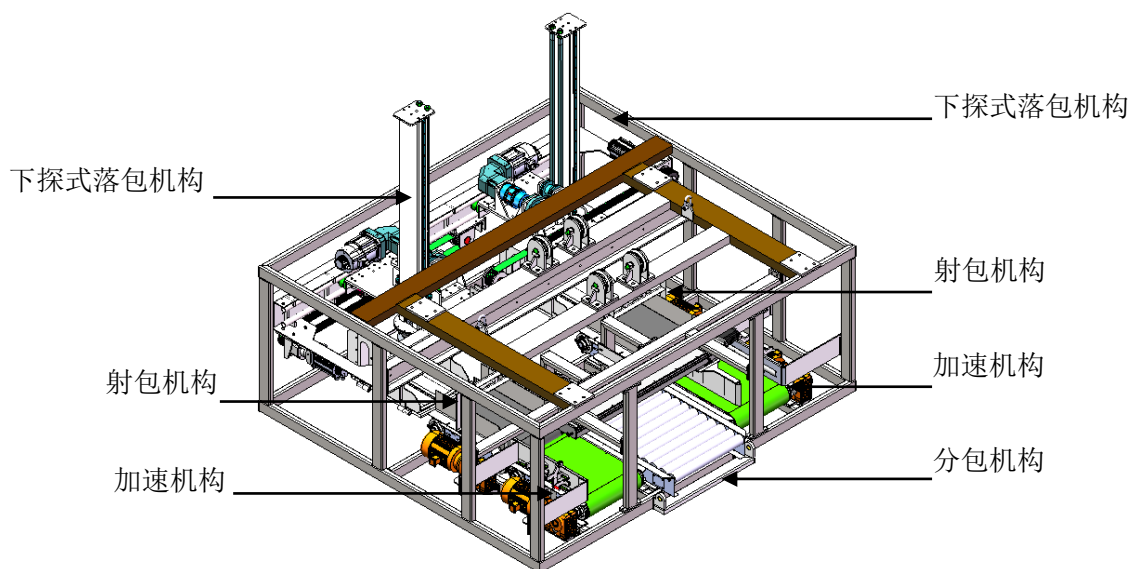


图 2 下探式码垛机头示意图

四自由度落包装置是实现自动装车循环落包的主要部分，是自动装车机的核心装置，主要包括横向定位移动机构、升降移动机构、旋转机构和落放机构等，如图 3 所示。

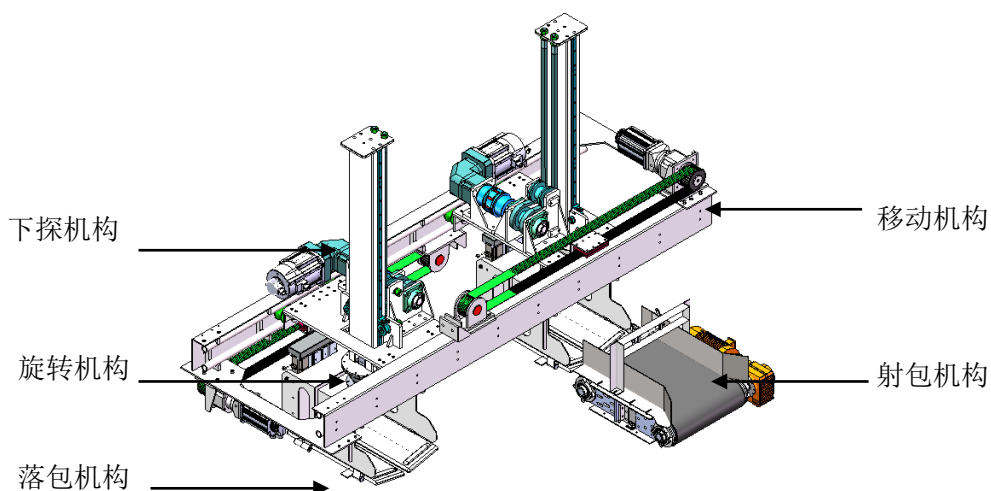


图 3 四自由度落包机构

横向定位移动机构主要保证水泥包沿车厢宽度方向的落包位置控制，有定位精度、最大行程和最大运行时间限制等要求，升降移动机构主要功能是使落包小

车能够进入车厢侧板高度以下而进入车厢内，降低落包高度，保证落包位置的准确性、降低扬尘和水泥包的损坏率；旋转机构保证水泥包可以纵向和横向姿态摆放到车厢内，实现纵横交错码包。按照设计计算横向定位移动行程 1.2m，加速度 7.5m/s^2 ，占用工序时间 1s，升降移动距离 0.6m，加速度 4 m/s^2 ，占用工序时间 0.9s，旋转机构旋转角度 $\pm 90^\circ$ ，加速度 $1000^\circ/\text{s}^2$ ，占用时间 0.4s，落包机构，行程 0.2m，加速度 5m/s^2 ，升降工序与移动工序可以并行，总时间 1.8s，刚好满足装车产能 2000 包的需求。

4 装车效果及经济效益分析

自动装车机在江西抚州南方水泥厂进行了工业试点应用，如图 4 所示。水泥厂原先人工装车费用约 2.5 元/t，使用自动装车机后加上人工维护及电费约 0.36 元/t，每吨可以为企业节省 2.14 元，按照水泥厂 30000t/月的装车量，每年可以节省 77 万元，本次项目总投资约 100 万元，预计 1.3 年即可收回投资，经济效益良好。本次抚州南方水泥厂发运技术改造后经过连续 3 个月的稳定运行，稳定装车产能 2000 包/h，破袋率小于 2%，各项指标满足预期设计和合同要求，彻底解决企业请人难、用工贵，装车破袋率高等问题，有效遏制职业病危害，提升了水泥产品附加值，推动品牌价值高端化，对企业数字化转型及智能工厂建设具有重要意义。



图 4 自动装车机装车效果图

5 结论

本文设计的袋装水泥下探式码垛机头，通过双包并行落放、四自由度定位及智能码垛策略，解决了传统装车效率低、适应性差及粉尘污染问题。实际应用表明，该系统显著降低人工成本与破包率，符合智能制造与环保政策要求，具有行业推广价值。

参考文献：

- [1]孙宝云,董松波,吴玲,等. 叠包机及移动式装车机在我公司的应用 [J]. 四川水泥, 2007, (05): 26-27.
- [2] 尚再国, 吴亮. 袋装水泥装车系统的技术改造 [J]. 水泥工程, 2019, (05): 52-53. DOI:10.13697/j.cnki.32-1449/tu.2019.05.019.
- [3]朱万友,陈猛. 水泥包装输送转包机的技术改造 [J]. 中国水泥, 2016, (03): 96-97.
- [4]付金强,朱攀勇. 自动装车机在水泥装运系统的应用 [J]. 水泥, 2022, (01): 76-78