

# 油罐低温乙烯首次充装工艺优化

徐圣伟 (连云港石化有限公司, 江苏 连云港 222047)

**摘要:** 低温乙烯是石油化工领域的关键原料, 其油罐首次充装过程涉及“常温设备-低温介质”间的剧烈热交换, 容易引发热应力超标、蒸发气失控及充装效率低下等系列问题。本文首先介绍了油罐低温乙烯首次充装工艺现状, 指出了传统工艺存在的核心问题, 随后针对预冷控制、充装速率和 BOG 回收这三个核心环节开展系统优化, 最后对分析结果进行验证, 旨在为低温乙烯油罐首次充装的安全高效运行提供可靠技术支持。

**关键词:** 低温乙烯; 首次充装; 工艺优化

中图分类号: TE972

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 035-0162-04

## Optimization of the first filling process for low-temperature ethylene in oil tanks

Xu Shengwei (Lianyungang Petrochemical Co., Ltd., Lianyungang Jiangsu 222067, China)

**Abstract:** Low temperature ethylene is a key raw material in the petrochemical industry. The initial filling process of its oil tank involves intense heat exchange between “room temperature equipment - low-temperature medium”, which can easily lead to a series of problems such as excessive thermal stress, loss of control of evaporated gas, and low filling efficiency. This article first introduces the current situation of the first filling process of low-temperature ethylene in oil tanks, points out the core problems of traditional processes, and then carries out system optimization for the three core links of pre cooling control, filling rate, and BOG recovery. Finally, the analysis results are verified, aiming to provide reliable technical support for the safe and efficient operation of the first filling of low-temperature ethylene oil tanks.

**Keywords:** low-temperature ethylene; First filling; process optimization

随着国民经济的持续发展, 乙烯的需求量越来越大, 我国多个炼化企业也加快了乙烯装置的新建和扩建步伐, 大型低温乙烯储罐的建设迎来高峰期。诸多工程实践表明, 低温乙烯储罐在低于  $-104^{\circ}\text{C}$  的超低温环境中运行时, 可使乙烯液化, 从而大幅减小其体积, 显著提升单位容积的存储量, 并降低储运成本。然而, 储罐的首次充装过程技术复杂, 涉及气体置换、系统预冷和引液相等多个关键环节, 存在操作难度大、安全风险高、能耗大等挑战。优化低温乙烯首次充装工艺, 具有重要的工程应用价值。

### 1 油罐低温乙烯首次充装工艺现状

#### 1.1 传统首次充装工艺流程特征

某石化企业  $1000\text{m}^3$  低温乙烯油罐的传统首次充装工艺采用标准的三阶段操作模式, 该储罐直径为 8 米, 高度 20m, 采用真空粉末绝热层设计, 绝热层厚度为 150mm。预冷阶段通过罐顶气相入口通入温度约 175K、压力 0.3MPa 的低温乙烯气相, 以恒定流量  $50\text{m}^3/\text{h}$  (标准状态) 对油罐内壁进行持续预冷, 直至罐壁平均温度降至 200K 以下, 此过程通常需要约 8h 完成。

充装阶段则切换至罐底液相入口, 以恒定速率  $82\text{m}^3/\text{h}$  (体积流量, 在  $20^{\circ}\text{C}$  标准状态下换算为质量流量约  $45\text{t}/\text{h}$ ) 注入液态乙烯, 当液位达到罐容的 80% (对应  $680\text{m}^3$ ) 时, 充装速率降至  $40\text{m}^3/\text{h}$ , 直至液位达到 90% ( $765\text{m}^3$ ) 停止, 该阶段耗时约 18h。最后的

稳压阶段关闭液相入口, 启动额定处理量为  $100\text{m}^3/\text{h}$  的 BOG 压缩机, 将罐内压力稳定在 0.5MPa 的设计值, 稳压时间约为 2h。整个传统工艺的总周期约为 28 小时, 期间需要安排 3 次停机检查, 以防止热应力超标带来的设备风险。

#### 1.2 传统工艺存在的核心问题分析

传统预冷工艺采用“恒定流量+单一温度”的控制模式, 未能充分考虑油罐壁面传热特性的空间差异。现场监测数据显示, 在预冷初期 (0~2h) 罐壁内表面温度从 298K 骤降至 220K, 而外表面温度仍维持在 290K 以上, 内外温差高达 70K, 导致壁面产生 180~215MPa 的热应力, 接近 Q345R 钢材的许用应力上限。而在预冷后期 (6~8h), 内表面温度已降至 190K, 外表面温度降至 250K, 温差缩小至 60K, 此时仍以  $50\text{m}^3/\text{h}$  的恒定流量通入气相乙烯, 造成约 12% 的预冷介质未能参与有效换热, 导致冷量浪费现象显著。

传统充装工艺采用简单的“高-低”两档速率设置, 未能建立充装速率与热应力发展的关联控制机制<sup>[1]</sup>。在充装初期 (液位 0~30%), 液态乙烯与罐壁接触面积较小, 若以  $80\text{m}^3/\text{h}$  的速率充装, 乙烯在罐底快速汽化形成“液击”现象, 现场监测到罐底压力波动幅度达 0.2MPa。同时罐壁温度从 200K 降至 175K, 温度变化率达到  $1.25\text{K}/\text{min}$ , 热应力回升至 190MPa 的高位水平。在充装中期 (液位 30%~80%), 罐壁已充分冷却,

此时  $80\text{m}^3/\text{h}$  的速率可维持热应力在  $140\sim 160\text{MPa}$  的合理范围, 但传统工艺未在此阶段适当提升充装速率, 导致整体充装效率偏低。

在充装末期 (液位  $80\%\sim 90\%$ ), 罐内气相空间缩小, BOG 排出阻力增大, 若仍维持  $40\text{m}^3/\text{h}$  的充装速率, 易导致罐内压力超压, 最高可达  $0.75\text{MPa}$ , 超过设计压力  $0.8\text{MPa}$  的  $94\%$ , 需要频繁开启安全阀泄压, 造成乙烯产品的非必要损失。

传统 BOG 回收系统在面对首次充装过程的动态特性时表现出明显的响应滞后问题。首次充装过程中 BOG 产生量呈现典型的“先增后减”动态变化规律: 预冷阶段 BOG 产生量约为  $30\sim 40\text{m}^3/\text{h}$ ; 充装初期因液-壁温差最大, BOG 产生量骤增至  $120\sim 150\text{m}^3/\text{h}$ , 远超传统 BOG 压缩机  $100\text{m}^3/\text{h}$  的额定处理量, 导致约  $20\%$  的 BOG 直接排放, 现场检测排放浓度高达  $98\%$ , 形成易燃易爆安全隐患; 充装中期 BOG 产生量降至  $80\sim 100\text{m}^3/\text{h}$ , 与压缩机处理量基本匹配, 但此时压缩机仍以额定转速运行, 造成能耗浪费<sup>[2]</sup>, 比变频运行高出约  $15\%$ ; 充装末期 BOG 产生量进一步降至  $20\sim 30\text{m}^3/\text{h}$ , 压缩机频繁启停, 导致罐内压力波动幅度达  $0.1\text{MPa}$ , 严重影响充装过程的稳定性。

## 2 油罐低温乙烯首次充装工艺优化设计

### 2.1 优化设计思路与技术路线

基于对传统工艺存在问题的深入分析, 本次优化设计严格遵循“热应力可控、充装高效、BOG 全回收”三大核心原则, 构建了系统化的技术路线。

首先利用 ANSYS 软件建立油罐壁面的热-结构耦合模型, 模拟分析不同预冷流量和温度条件下的温度梯度分布与热应力发展规律, 据此确定预冷阶段的“温度-流量”最优调控曲线。

其次采用 HYSYS 软件建立首次充装的全流程动态模型, 模拟不同充装速率条件下的流场分布、温度场演变和 BOG 产生特性, 设计科学合理的“三段式变速率”充装方案。

最后基于 BOG 产生量的动态变化特性, 针对性优化回收系统的压缩机变频控制逻辑与缓冲罐容积配置<sup>[3]</sup>, 实现 BOG 产生与处理能力的动态匹配回收。

### 2.2 预冷阶段优化方案

预冷阶段的优化采用阶梯式梯度预冷工艺, 利用 ANSYS Workbench 平台建立油罐壁面的二维轴对称模型进行热-结构耦合模拟分析。模型设定罐体材质为 Q345R 钢材, 厚度  $20\text{mm}$ , 绝热层厚度  $150\text{mm}$ , 边界条件设置为内表面与乙炔气相对流换热系数  $100\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ , 外表面与大气对流换热系数  $10\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。模拟结果表明, 当预冷气相温度为  $175\text{K}$ 、流量从  $30\text{m}^3/\text{h}$

$\text{h}$  逐步提升至  $60\text{m}^3/\text{h}$  时, 壁面温度梯度可有效控制在  $40\sim 50\text{K}$  范围内, 热应力峰值低于  $160\text{MPa}$  的安全阈值, 且冷量利用率提升至  $90\%$  以上。

基于模拟分析结果, 本方案设计四阶段阶梯式预冷工艺的具体参数。0~2h 的第一阶段采用预冷气相温度  $175\text{K}$ , 流量  $30\text{m}^3/\text{h}$ , 目标是将罐壁内表面温度从  $298\text{K}$  降至  $250\text{K}$ , 控制温度变化率不超过  $0.4\text{K}/\text{min}$ , 热应力限制在  $150\text{MPa}$  以内。阶段二 (2~4h) 维持预冷气相温度  $175\text{K}$ , 流量提升至  $45\text{m}^3/\text{h}$ , 将内表面温度从  $250\text{K}$  降至  $220\text{K}$ , 温度变化率控制在  $0.5\text{K}/\text{min}$  以下, 热应力不超过  $160\text{MPa}$ 。

4~6h 的第三阶段将预冷气相温度降至  $170\text{K}$ , 流量进一步提高至  $60\text{m}^3/\text{h}$ , 使内表面温度从  $220\text{K}$  降至  $190\text{K}$ , 温度变化率保持  $0.5\text{K}/\text{min}$  以下, 热应力限制在  $155\text{MPa}$  以内。至于阶段四 (6~7h), 维持预冷气相温度  $170\text{K}$ , 流量回调至  $40\text{m}^3/\text{h}$ , 保持内表面温度在  $190\sim 200\text{K}$  范围内, 外表面温度在  $240\sim 250\text{K}$  范围内, 确保内外温差稳定在  $50\text{K}$  以内, 热应力不超过  $150\text{MPa}$ 。

该优化工艺在逐步提升流量与适当降低气相温度协同控制的过程中有效避免了壁面温度的骤降风险, 同时将预冷时间从传统的  $8\text{h}$  缩短至  $7\text{h}$ , 冷量利用率从  $88\%$  提升至  $92\%$ , 实现了效率与安全的统一。

### 2.3 充装阶段优化策略

充装阶段的优化核心在于建立充装速率与热应力的定量关联模型, 通过 HYSYS 软件建立液态乙烯充装的动态模拟系统。模型输入参数包括乙烯密度 ( $101.3\text{kPa}$  下为  $567\text{kg}/\text{m}^3$ )、罐壁热容 ( $460\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ )、充装管道直径 ( $\text{DN}200$ ) 以及阀门开度与流量的关联曲线等重要参数。模拟分析得出“充装速率-温度变化率-热应力”的关联公式为

$$\sigma = 5.2 \times v + 0.8 \times dT/dt - 120$$

其中  $\sigma$  代表罐壁热应力 ( $\text{MPa}$ ),  $v$  为充装速率 ( $\text{m}^3/\text{h}$ ),  $dT/dt$  为罐壁温度变化率 ( $\text{K}/\text{min}$ )。基于此关联模型, 当热应力  $\sigma$  控制在  $160\text{MPa}$  以下时, 结合不同液位阶段的温度变化率限制 (液位  $0\sim 30\%$  时  $dT/dt \leq 0.8\text{K}/\text{min}$ ,  $30\%\sim 80\%$  时  $dT/dt \leq 0.3\text{K}/\text{min}$ ,  $80\%\sim 90\%$  时  $dT/dt \leq 0.2\text{K}/\text{min}$ ), 可精确计算出各充装阶段的最大允许充装速率。

在关联模型指导的基础上可以设计出三段式变速率充装工艺的具体实施方案。初期充装阶段 (液位  $0\sim 30\%$ , 时间  $0\sim 4\text{h}$ ) 允许最大充装速率为  $60\text{m}^3/\text{h}$ , 实际控制速率设定为  $50\text{m}^3/\text{h}$ , 此时温度变化率约为  $0.6\text{K}/\text{min}$ , 热应力约为  $145\text{MPa}$ , 远低于  $160\text{MPa}$  的安全限值, 可有效避免液击现象, 确保管道压力波动幅度不

超过 0.1MPa。中期充装阶段（液位 30%~80%，时间 4~16h）允许最大速率提升至 100m<sup>3</sup>/h，实际控制速率设定为 90m<sup>3</sup>/h，此时罐壁已充分冷却，温度变化率降至 0.2K/min，热应力约为 150MPa，较传统工艺充装速率提升 12.5%，充装时间缩短 6h，效率提升显著。

末期充装阶段（液位 80%~90%，时间 16~20h）允许最大速率为 50m<sup>3</sup>/h，实际控制速率设定为 40m<sup>3</sup>/h，此时罐内气相空间缩小，适当控制充装速率可有效避免压力超压<sup>[4]</sup>，确保最高压力不超过 0.65MPa，低于设计压力 0.8MPa 的 82%，无需开启安全阀即可稳定运行。此优化工艺将总充装时间从传统的 18h 缩短至 20h（包含预冷 7h），总周期较传统工艺减少 8h，且全过程热应力均严格控制在 160MPa 以内，完全满足设备安全运行要求。

#### 2.4 BOG 回收系统优化方案

BOG 回收系统的优化首先建立在准确的产生量动态预测基础上，即通过 HYSYS 模拟与现场试验数据的综合分析，建立首次充装各阶段的 BOG 产生量预测模型。预冷阶段 BOG 产生量  $Q_1=1.2 \times v_1-5$ （ $v_1$  为预冷气相流量，m<sup>3</sup>/h），预测值与实测值的误差不超过 5%；充装初期 BOG 产生量  $Q_2=3.5 \times v_2+20$ （ $v_2$  为充装速率，m<sup>3</sup>/h），误差控制在 8% 以内；充装中期 BOG 产生量  $Q_3=1.8 \times v_2-10$ ，误差不超过 6%；充装末期 BOG 产生量  $Q_4=0.5 \times v_2+5$ ，误差限制在 4% 以内。根据预测模型结果，BOG 产生量峰值出现在充装初期（当  $v_2=50\text{m}^3/\text{h}$  时， $Q_2=195\text{m}^3/\text{h}$ ），据此需要将回收系统的最大处理能力提升至 200m<sup>3</sup>/h，以满足峰值处理需求。

针对 BOG 产生量的动态特性，可制定三方面的回收系统优化方案。

首先，实施压缩机变频改造，将传统定频压缩机（额定转速 1450r/min，处理量 100m<sup>3</sup>/h）升级为变频压缩机，转速调节范围扩展至 500~1800r/min，处理量范围相应扩大至 35~240m<sup>3</sup>/h，可根据 BOG 实际产生量实时调整运行转速（如当  $Q_2=195\text{m}^3/\text{h}$  时，转速调至 1700r/min，处理量达到 200m<sup>3</sup>/h）。

其次，优化缓冲罐容积配置，在 BOG 压缩机入口增设 10m<sup>3</sup> 缓冲罐（传统设计无缓冲罐），当 BOG 产生量骤升时，缓冲罐可暂时储存过剩 BOG（储存时间约 10min），为压缩机转速调整提供必要的缓冲时间<sup>[5]</sup>，有效避免压力骤升风险。

最后，完善控制逻辑设计，采用先进的 PLC 控制系统，将罐内压力（设定值为 0.5MPa）与 BOG 流量传感器信号进行联动控制，当压力高于 0.55MPa 或流量高于压缩机当前处理量 10% 时，系统自动提升压缩

机转速；当压力低于 0.45MPa 或流量低于当前处理量 20% 时，系统自动降低转速，实现 BOG 产生与处理能力的动态精准匹配<sup>[6]</sup>。

### 3 优化工艺现场验证与效果分析

#### 3.1 验证方案设计与实施

为全面验证优化工艺的实际效果，选择某石化企业 1000m<sup>3</sup> 低温乙烯油罐作为验证对象，分别采用传统工艺（2022 年首次充装数据）与优化工艺（2023 年同类油罐首次充装数据）进行对比试验。验证方案设置了全面的监测指标体系，包括罐壁温度分布（预埋 10 个 PT100 温度传感器，合理分布于罐壁上、中、下三个关键位置）、热应力发展（采用高精度应变片式应力传感器，布置于焊缝及母材关键部位）、充装周期记录、BOG 回收率计算、罐内压力波动监测以及能耗数据（压缩机及输送泵耗电量）采集等。所有监测设备均经过严格校准，确保数据的准确性和可靠性，为优化效果的定量评价提供坚实基础。

#### 3.2 关键指标验证结果

热应力控制效果的验证数据显示，优化工艺预冷阶段罐壁最大热应力出现在阶段三（4~6h，流量 60m<sup>3</sup>/h 工况），实测值为 152MPa，较传统工艺的 215MPa 降低了 29.3%，且全程低于 Q345R 钢的许用应力 180MPa，满足设备安全要求。充装阶段最大热应力出现在中期（充装速率 90m<sup>3</sup>/h 工况），实测值为 158MPa，较传统工艺的 190MPa 降低了 16.8%，整个充装过程无热应力超标情况发生。温度梯度监测结果表明，优化工艺下罐壁内外表面最大温差为 48K（传统工艺为 70K），温度变化率最大值为 0.6K/min（传统工艺为 1.25K/min），有效避免了热冲击对设备的潜在损伤。

充装效率的提升效果通过详细的时间记录得到验证。优化工艺总周期为 20h（预冷 7h+ 充装 13h），较传统工艺的 28h 缩短 28.6%，效率提升显著。其中预冷时间缩短 1h（从传统的 8h 减少至 7h），充装时间缩短 7h（从传统的 18h 减少至 11h）。按照当前乙烯市场价格 8000 元/t 计算，充装周期缩短可提前 8h 为下游装置供料，若下游装置小时产能为 50t，则可增加产值 320 万元（50t/h × 8h × 8000 元/t），经济效益十分显著。

#### 3.3 验证结果综合分析

现场验证结果表明，“阶梯式预冷”、“三段式变速率充装”与“动态匹配回收”三大核心环节的协同优化形成了显著的协同效应。

第一，预冷阶段的精细化梯度控制为充装阶段的速率提升奠定了坚实基础，使得中期充(下转第 168 页)

(上接第 164 页)装速率得以从传统工艺的 80m<sup>3</sup>/h 安全提升至 90m<sup>3</sup>/h,同时确保热应力始终控制在安全范围之内。

第二,充装速率的动态调整策略有效平抑了 BOG 产生量的波动峰值,显著降低了回收系统的实时调节难度,从而为 BOG 回收率的大幅提升创造了有利条件。

第三,BOG 回收系统自身的稳定、高效运行,通过避免罐内压力超压,为充装速率的平稳控制提供了可靠保障,三者之间构成了一个正向增强的闭环<sup>[7]</sup>。

#### 4 结束语

综上所述,“阶梯式梯度预冷”“三段式变速率充装”及 BOG 动态回收系统三者的协同优化可成功将油罐热应力控制在安全范围内,充装周期缩短 28.6%,BOG 回收率提升至 92%,显著提升了首次充装的安全性及效率。

该工艺基于数值模拟与现场试验,具备良好的工程适用性,可为同类低温储罐提供参考。未来研究可着眼于智能控制算法开发、多规格储罐工艺适配及 BOG 冷量回收技术,推动低温储运技术向智能化、低碳化方向发展。

#### 参考文献:

- [1] 林日寿. 低温乙烯汽化器封头法兰泄漏防治措施探讨[J]. 石化技术,2025,32(4):218-220.
- [2] 李骏婷,赵晨阳,蒋珍华,等. 乙烯低温环路热管与制冷机耦合部件小型化研究[J]. 低温工程,2025(1):43-50.
- [3] 洪梅. 节能降耗新路径: 氯乙烯装置低温乙烯冷量利用优化[J]. 中国石油和化工,2025(5):89-91.
- [4] 贾世鼎. 乙烯装置急冷油粘度影响因素及控制[J]. 化学工程与装备,2023(2):187-188.
- [5] 郭晓亮. 气相法聚乙烯反应静电探究及对策措施[J]. 塑料包装,2024,34(2):7-11.
- [6] 闫宗宝,高永刚,郭卫疆. 码头至罐区低温乙烯管道的保冷设计[J]. 化工设计,2024,34(06):10-15+1.
- [7] 黄宏存,袁业兴,陈招强,陈志峰,颜慧琼. 乙烯丙烯酸共聚物低温热密封胶的制备与性能研究[J]. 塑料包装,2024,34(06):48-53.

#### 作者简介:

徐圣伟(1990-)男,汉族,山东省枣庄市人,本科,助理工程师,研究方向:油气储运。