

废气中 VOCs 的冷凝回收处理工艺设计及分析

赵健鄂

广州金鹏环保工程有限公司, 中国·广东 广州 510663

摘要: 随着工业化进程的加速, 有机废气排放问题日益突出, 给环境和人类健康带来了严重威胁。有机废气冷凝回收技术作为一种有效的废气处理技术, 因其环保性和资源回收性而备受关注。论文详细介绍了有机废气冷凝回收技术的工艺原理、主要设备、应用范围及优势, 并结合实际案例进行了经济性分析。结果表明, 尽管该技术存在一定的投资和运行成本, 但其环保效益和经济效益显著, 具有较高的推广价值。

关键词: 有机废气; 冷凝回收; 工艺设计; 经济性分析; 环保效益

Design and Analysis of Condensation Recovery Process for VOCs in Exhaust Gas

Jian'e Zhao

Guangzhou Jinpeng Environmental Protection Engineering Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong, 510663, China

Abstract: With the acceleration of industrialization, the problem of organic waste gas emissions has become increasingly prominent, posing a serious threat to the environment and human health. As an effective waste gas treatment technology, organic waste gas condensation recovery technology has attracted much attention due to its environmental friendliness and resource recovery capabilities. This paper elaborates on the process principle, main equipment, application scope, and advantages of organic waste gas condensation recovery technology, and conducts an economic analysis based on practical cases. The results show that although this technology has certain investment and operating costs, its environmental and economic benefits are significant, and it has high promotion value.

Keywords: organic waste gas; condensation recovery; process design; economic analysis; environmental benefits

0 前言

在当今社会, 工业化发展势头迅猛, 众多工业生产活动在为人类创造丰富物质财富的同时, 也带来了诸多环境方面的挑战。其中, 有机废气的排放便是一个不容忽视的问题, 它犹如隐匿在空气中的“阴霾”, 随着排放量的不断增加, 正逐渐对我们所处的生态环境以及人类自身的健康状况构成愈发严重的威胁。面对这一严峻形势, 探寻高效且实用的有机废气处理技术已然成为环保领域的重要课题。而有机废气冷凝回收技术凭借其独特的环保特性以及能够实现资源回收再利用的优势, 在众多废气处理技术中脱颖而出, 吸引了各界的广泛关注。在此背景下, 深入剖析该技术的工艺原理、主要设备、应用范围等方面, 并对其展开经济性分析, 对于全面了解其价值以及推动其广泛应用有着至关重要的意义, 故本文将对此展开详细探讨。

1 VOCs 冷凝回收原理

VOCs 冷凝回收装置是一种高效的工业废气处理设备, 旨在通过物理方法将废气中的 VOCs 从气态转变为液态, 实现回收利用和减少环境污染的目的。其广泛应用于石油化工、制药、印刷、涂装、半导体制造、橡胶制品等行业, 既减少了环境污染, 又为企业带来了经济效益。

在一定条件下, 气液两相共存的体系中, 气液之间会

达到一个平衡状态。此时, 液面处的蒸气压即为该条件下的溶质的饱和蒸气压。例如, 改变这种平衡状态, 则会出现溶质在气液两相间的转移, 从而建立新的平衡。

同一物质的饱和蒸气压是随着温度变化而变化的, 温度越低, 其值越小。当降到某一温度时, 该物质在气相中的分压高于它在此温度下的饱和蒸气压时, 该物质就会被冷却下来变成液态。根据这一原理, 通过将温度控制在 VOCs 的沸点以下而将 VOCs 冷凝下来, 从而达到回收 VOCs 的目的。

2 气体饱和蒸气压及饱和浓度计算理论支撑

气体饱和蒸气压数据可通过查找相应工程数据或由 Antone 方程计算:

$$\log P_D = A - \frac{B}{t + C}$$

式中, P_D ——KPa;

t ——℃;

B 、 C 都是 Antone 方程参数, $A=6.2052$ 、 $B=1138.91$ 、 $C=231.46$ 。

气体饱和和质量浓度计算由以下方程式得出:

$$\rho = \frac{P \times M \times 1000}{(t + 273.15) \times R}$$

式中, ρ ——污染物的质量浓度, mg/m^3 ;

P ——污染物的饱和蒸气压, Pa;

M——气体的相对分子质量, g/mol;

t——气体温度, °C。

3 某储罐废气项目工艺设计

3.1 废气特征分析

废气特征分析如表 1 所示。

3.2 部分温度下氯化苯的饱和蒸气压和饱和浓度

部分温度下氯化苯的饱和蒸气压和饱和浓度如表 2 所示。

国标氯化苯允许排放浓度为 50mg/m³, 根据上表数据氯化苯对应的温度为 -45°C 时排放的饱和浓度 511.3025mg/m³ >

50mg/m³, 不满足排放要求。因 -45°C 时氯化苯的饱和蒸气压已经较低, 再继续降温, 饱和蒸气压的下降空间也不大, 但温度的降低, 会大幅度提高电耗。经冷凝后废气浓度低, 风量低, 为保证达标排放, 可在末端配套活性炭吸附装置。

因此冷凝工艺最终确定的温度为 -45°C。见上表数据氯化苯 15°C 条件下尾气排放浓度为 42020.1588mg/m³, 降温至 -45°C 进行冷凝回收、排放浓度为 511.3025mg/m³, 去除率达到了 (42020.1588-511.3025)/42020.1588=98.78%。

3.3 工艺及流程说明

VOCs 冷凝工艺简图见图 1, VOCs 冷凝结构示意图见图 2。

表 1 废气特征分析

序号	设备	废气成分	产生原因	排气温度 (°C)	排气口直径 (mm)	排放频率
1	500m ³ 储罐	氯化苯	进料及自挥发	常温	DN80	3 小时 / 天
2			进料及自挥发产生, 进料间断, 挥发连续; 无氮封, 含少量氧气, 氧含量未知。进料泵最大流量 100Nm ³ /h, 氯苯 (C ₆ H ₅ Cl): ≤ 20~42g/Nm ³ 排放要求: 氯苯: 浓度限值 50mg/Nm ³ 非甲烷总烃 (氯化苯尾气): 浓度限值 120mg/Nm ³			

表 2 部分温度下氯化苯的饱和蒸气压和饱和浓度

温度 /°C	饱和蒸气压 /Pa	汽化热 / (KJ/kg)	饱和浓度 / (mg/m ³)
-45	8.6166	383.96858	511.3025
-40	14.0474	382.60206	815.6860
-30	34.9430	379.77810	1945.5769
-20	80.2947	376.83218	4294.0929
-10	172.0399	373.76329	8850.9176
0	346.4489	370.57033	17171.1931
10	660.1998	367.25203	31566.1279
15	894.3630	365.54543	42020.1588

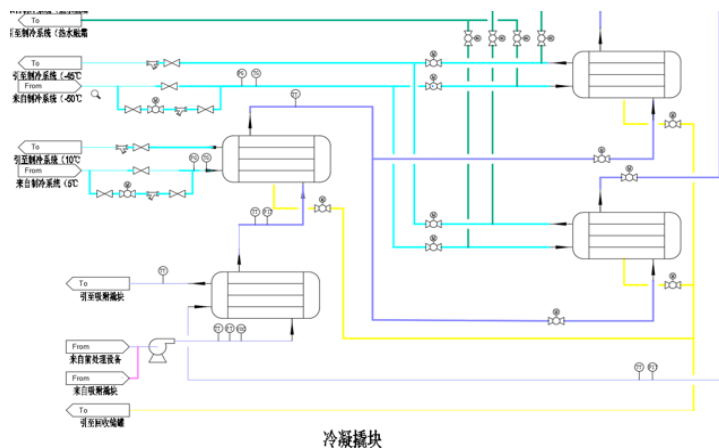


图 1 VOCs 冷凝工艺简图

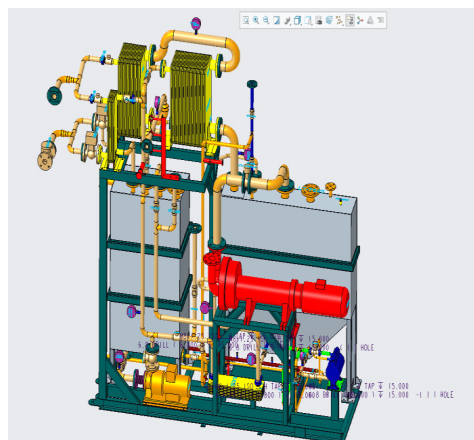


图 2 VOCs 冷凝结构示意图

储罐大小呼吸气等尾气, 首先进入预冷换热器, 在预冷换热器中被冷凝后的低温尾气预冷; 然后进入第一级冷凝器中, 被冷凝至 4°C 左右, 除去尾气中的大部分水分; 再进入第二级冷凝器中被冷凝至 -20°C ~ -25°C, 部分苯系物被冷凝液化; 尾气随后进入到第三级冷凝器中被冷凝至 -45°C,

最低可达到 -60°C, 根据进气浓度的不同, 大部分 VOCs 被冷凝液化, 在重力作用下流至凝液罐, 剩余的不凝气经过预冷换热器的能量回收利用后, 温度升至 15°C ~ 20°C 后进入后续吸附。考虑尾气中水分、VOCs 会在冷凝器内结霜, 冷凝器设置为 1 用 1 备, 通过压差、温差等仪表判断冷凝器内

结霜后，通过电动阀将尾气切换至备用冷凝器中进行冷凝，已结霜的冷凝器经过融霜处理后转为备用。

吸附一般采用串联式两吸一脱的模式，吸附饱和后通过真空脱附将尾气导入到冷凝的进气进行冷凝，吸附后的尾气达标排放。

梯级制冷：采用新一代环保型制冷剂，为 VOCs 气体提供梯级连续冷却，尾气处理温度可低至 -70℃，温度降到分压力下各组分对应的露点温度从而将 VOCs 冷凝为液态，可一次性回收多种 VOCs 气体，回收率 ≥90%。回收：冷凝处理后的低温低浓度不凝气，经特殊设计的换热器进行冷量回收，充分利用冷源的冷量，降低冷凝设备的规模和运行成本。

双通道冷凝器设计——设计为双通道冷凝，运行时当换热器被判断为有融霜需求时，自动切换至另一备用通道继续运行。同时，被判断为结霜的通道进入融霜模式，融霜完成后即转为备用通道，可实现机组 24 小时全自动持续运行。

换热器：利于液态 VOCs 排入储罐。换热性能、密封性、

占地面积均优于传统冷箱。

气液分离器：换热器出口设置有气液分离器，VOCs 气体冷凝后夹带的液滴在气液分离器内进行气液分离，改善后续冷凝器的运行状况，确保冷凝后尾气的浓度满足设计要求。

自动排液：冷凝器排液口设有自动排液阀，冷凝后的 VOCs 液体自动输送至储液罐。

防爆：标配 Ex d IIB T4 GB 防爆，根据具体使用环境，可定制不同的防爆等级。

3.4 配套设备

配套设备如表 3 所示。

有机废气冷凝回收技术的运行成本主要包括能源消耗费、人工费、维护费以及处理后的废弃物处置费等。能源消耗费是运行成本的主要部分，包括制冷设备消耗的电力、冷却水等费用。每小时电耗 6kW，相对于储罐废气高浓度、低流量的性质，采用其他工艺如 RTO、CO、活性炭吸附、化学吸收、生物处理存在投资费用高或不能稳定达标处理的情况，采用冷凝回收 + 活性炭末端处理更为合适。

表 3 配套设备

序号	名称	规格型号	单位	数量
1	风机	风量：100m ³ /h，全压：7000Pa，功率：1.1kW，材质：304，电机防爆 Exd II B T4、变频	台	1
2	制冷系统	制冷量：2.8kW，额定功率：1.35kW，风量 65m ³ /h，制冷出风温度：5℃，换热形式：直接换热防爆等级：ExdIIBT4，蒸发器一用一备装机功率：1.8kW	台	1
3	主控箱	材质：碳钢防腐，控制方式：PLC 连接各分控柜，配人机操作界面控制触摸屏规格：14 寸或以上，通讯方式：以太网防爆等级：ExdIIBT4	项	1
4	仪表系统	压力传感器；温度传感器等	批	1
5	凝液罐	尺寸：Φ1000×1800×6（mm），材质：304	台	1
6	凝液泵	流量：2m ³ /h，扬程：30m，材质：304	台	1

4 结论与展望

有机废气冷凝回收技术以其显著的环保效益和经济效益，成为处理有机废气的重要选择。该技术通过高效回收废气中的有害物质，不仅降低了环境污染，还实现了资源的再利用。尽管初期投资较高，但通过合理的运行管理和资源回收，投资回收期较短，经济效益显著。

未来，随着环保政策的加强和技术的不断创新，有机废气冷凝回收技术将得到更广泛的应用。通过优化工艺、提高回收效率，该技术将进一步提升环保效益。同时，加强技

术研发和人才培养，将推动该技术的持续创新和发展，为环保事业和经济发展做出更大贡献。

参考文献：

[1] 刘新军.活性炭-冷凝回收治理有机废气工程应用研究[J].环境与发展,2022(4):77-79.
 [2] 林夏.有机废气冷凝回收技术的工艺设计与经济性分析[J].环境科学,2023(6):51-53.
 [3] 李鑫磊.冷凝回收技术在有机废气处理中的最新进展[J].科学技术,2024(2):35-37.