

生产实践

DOI: 10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.200593

# 浸出车间冷冻技术辅助矿物油吸收系统 降低尾气残溶

温小荣, 梁椿松, 袁媛

(迈安德集团有限公司, 江苏扬州 225127)

**摘要:**通过化工模拟软件 Pro II, 对浸出车间冷冻技术辅助矿物油吸收系统降低尾气残溶工艺进行模拟优化, 并将其应用于 5 000 t/d 大豆浸出车间。结果表明: 利用冷冻系统产生低温水, 降低正己烷在尾气中的分压, 可减小吸收塔的负荷。当进吸收塔尾气温度由 33 ℃ 降低至 10 ℃ 时, 尾气总质量流量下降 41.6%, 尾气中正己烷的质量流量下降 73.2%。降低矿物油进入吸收塔的温度, 尾气残溶呈现先降低后升高的趋势, 在矿物油温度为 25 ℃ 时尾气残溶达到最低。5 000 t/d 大豆浸出车间尾气冷冻系统总冷凝负荷为 578 379 kJ/h, 需要配置的尾气冷冻冷凝器和矿物油冷冻水板式换热器的面积分别为 90 m<sup>2</sup> 和 15 m<sup>2</sup>。实际应用结果表明, 控制吸收塔进气温度和进油温度分别为 10 ℃ 和 25 ℃, 尾气残溶由改造前的 3 000 mg/m<sup>3</sup> 降低至 800 mg/m<sup>3</sup>, 尾气残溶降低 73.3%。

**关键词:** 冷冻系统; 吸收塔; 尾气残溶; 浸出车间

中图分类号: TQ647; X701

文献标识码: B

文章编号: 1003-7969(2021)09-0125-04

## Reducing residual solvent in exhaust by mineral oil absorption system assisted with refrigeration technology in leaching plant

WEN Xiaorong, LIANG Chunsong, YUAN Yuan

(Myande Group Co., Ltd., Yangzhou 225127, Jiangsu, China)

**Abstract:** Through chemical simulation software Pro II, the process of reducing residual solvent in exhaust by mineral oil absorption system assisted with refrigeration technology in leaching plant was simulated and optimized, and it was used in 5 000 t/d soybean leaching plant. The results showed that the low-temperature water generated by refrigeration system could reduce the partial pressure of hexane in exhaust, which may reduce the absorber load. When the absorber inlet gas temperature reduced from 33 ℃ to 10 ℃, the total exhaust mass flowrate and hexane mass flowrate were reduced by 41.6% and 73.2%, respectively. Lowering the mineral oil temperature of absorber inlet, the residual solvent in exhaust first decreased and then increased, and reached the minimum value at 25 ℃. The total condensation load of refrigeration system of 5 000 t/d soybean leaching plant was 578 379 kJ/h, and the heat exchanging areas of vent gas condenser and mineral oil cooler were 90 m<sup>2</sup> and 15 m<sup>2</sup>, respectively. Practical application results showed that controlling absorber gas inlet temperature 10 ℃ and mineral oil inlet temperature 25 ℃, the residual solvent in exhaust was reduced from 3 000 mg/m<sup>3</sup> to 800 mg/m<sup>3</sup>, and residual solvent in exhaust was reduced by 73.3%.

**Key words:** refrigeration system; absorber; residual solvent in exhaust; leaching plant

近年来,在油脂生产企业、工程公司和科研工

作者的共同努力下,油脂浸出生产线的溶剂单耗越来越低。每吨大豆的溶剂消耗由早期的 5 kg 以上,降低至目前的 0.5 ~ 1.0 kg,甚至有些生产线已经达到了 0.4 kg 以下。降低溶剂消耗的手段主要从各个消耗点入手,逐个优化,比如:提高设备

收稿日期:2020-10-12;修回日期:2021-05-19

作者简介:温小荣(1989),男,工程师,硕士,主要从事油脂制取及油脂化工工艺设计工作(E-mail)wxr@myande.cn。

的加工和安装水平,减少车间内的跑冒滴漏<sup>[1-2]</sup>;优化蒸脱机的结构,降低粕中携带的溶剂量<sup>[3]</sup>;采用新型的筛孔式汽提塔,降低毛油中溶剂含量<sup>[4]</sup>;优化蒸煮罐的结构,减少废水中溶剂含量。此外,减少尾气中的溶剂含量,也是降低溶剂消耗的一个重要方向。

浸出车间尾气经过最终冷凝器冷凝后进入矿物油吸收系统,吸收后通过尾气风机排放。优化操作参数,提高矿物油吸收和解吸的效率,可大大降低尾气中的残溶<sup>[5]</sup>。但根据实际生产数据看,优化后尾气中残溶仍然高达2 000~5 000 mg/m<sup>3</sup>,远高于GB 16297—1996《大气污染物综合排放标准》(非甲烷总烃含量小于120 mg/m<sup>3</sup>)。因此,油脂生产企业积极升级改造,旨在尽可能地回收尾气中的溶剂,降低

排放尾气中的残溶。

近年来,尾气冷冻技术作为新的尾气处理技术得到了越来越广泛的应用。尾气冷冻吸收的原理是一方面减小进吸收塔的尾气的流量,降低吸收塔负荷;另一方面降低进入吸收塔的矿物油温度,改善吸收效果。目前,冷冻系统的选型、冷冻温度的选择以及冷冻吸收可以达到的效果,仍缺乏相关的数据和理论分析。本文利用化工模拟软件 Pro II,研究冷冻技术对降低浸出车间尾气残溶效果,对冷冻系统关键设备进行选型计算,将选用的设备用于5 000 t/d大豆浸出车间尾气系统,评价改造前后尾气吸收效果。

## 1 冷冻技术辅助矿物油吸收系统工艺模拟优化

### 1.1 冷冻吸收模拟工艺流程(见图1)

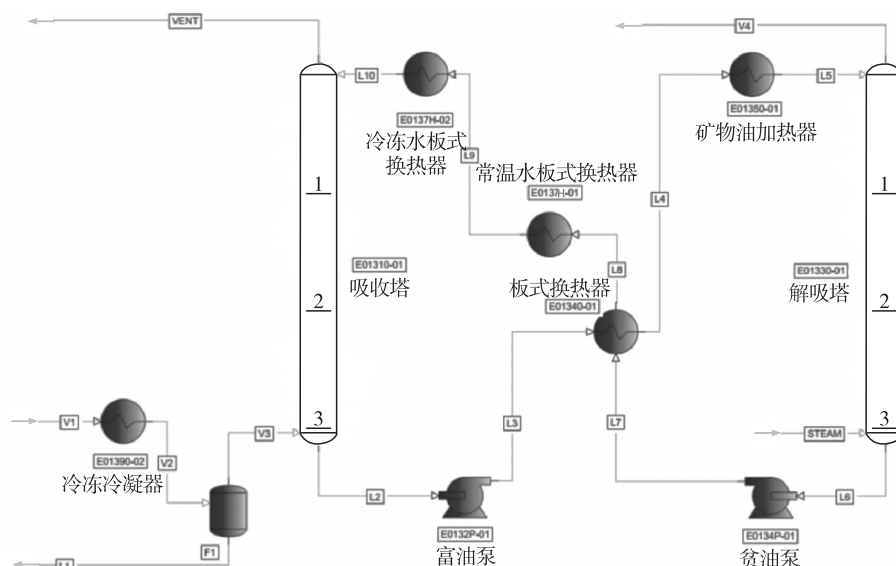


图1 冷冻吸收模拟工艺流程

如图1所示,冷冻吸收系统在常规矿物油吸收系统基础上做了两个方面的调整:①尾气进吸收塔之前增加冷冻冷凝器E01390-02;②矿物油进吸收塔之前增加冷冻水板式换热器E0137H-02。V1为来自常温最终尾气冷凝器的气相,进入冷冻冷凝器E01390-02进一步冷凝后气液分离,气相V3进入吸收塔E01310-01,液相L1进入分水箱。经过吸收后的尾气经VENT管线进入风机后排空,富油L2进入富油泵E0132P-01,泵出口L3进入板式换热器E01340-01,换热后L4进入矿物油加热器E01350-01,加热后L5进入解吸塔E01330-01,解吸出来的气相V4进入蒸发冷凝器,控制气相压力为-60 kPa。汽提后的贫油L6进入贫油泵E0134P-01,泵出口L7进入板式换热器E01340-01,换热器出口L8进入常温水板式换热器E0137H-01,冷却

后L9进入冷冻水板式换热器E0137H-02,进一步冷却后L10进入吸收塔,完成一个闭合循环回路。

### 1.2 冷冻吸收系统工艺参数的确定

#### 1.2.1 不同冷冻温度对尾气流量影响

尾气中主要含有空气、正己烷和水蒸气,其中空气流量为坯片带入的空气和环境向系统渗入的空气总和。由于空气为不凝性气体,温度降低,气相中空气的质量流量不变。正己烷和水蒸气为可凝性气体,根据理想气体状态方程,温度降低,饱和蒸气压降低,尾气中正己烷和水蒸气含量下降。

以某5 000 t/d大豆浸出生产线为例,冷冻前尾气温度为33℃。根据检测结果:尾气流量为493 kg/h,其中空气质量流量为214 kg/h,水蒸气质量流量为10 kg/h,正己烷质量流量为269 kg/h。冷冻温度对尾气流量、正己烷流量和冷凝器负荷的影响如图2所示。

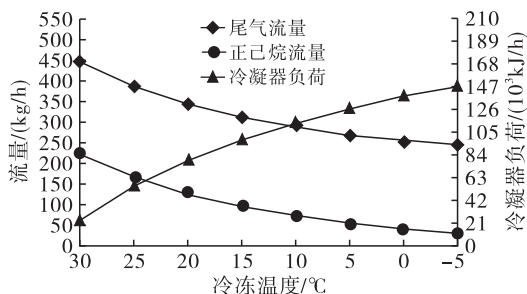


图2 冷冻温度对尾气流量、正己烷流量和冷凝器负荷的影响

由图2可以看出:随着冷冻温度的下降,尾气流量急剧下降,冷冻温度降至15℃时,尾气流量为312 kg/h,相比33℃时下降36.7%;当冷冻温度降至10℃时,尾气流量为288 kg/h,相比33℃时下降41.6%。而冷冻温度下降过程中,正己烷流量的下降趋势更为明显,冷冻温度降至15℃时,正己烷流量由33℃时的269 kg/h下降至95 kg/h,下降64.7%;当冷冻温度降至10℃时,正己烷流量下降至72 kg/h,较33℃时下降73.2%。

由图2还可以看出,随着冷冻温度的降低,冷凝器负荷逐渐上升。当冷冻温度降至15℃时,冷凝器负荷为98 700 kJ/h;当冷冻温度降至10℃时,冷凝器负荷为113 946 kJ/h。冷凝器负荷的增大势必会增大冷冻机的型号,使电耗增加。因此,在选择冷冻温度时,还需要结合吸收塔的尺寸和性能。

### 1.2.2 进气温度的确定

冷冻温度的选择主要考虑尾气冷冻冷凝器温度和矿物油冷冻水板式换热器的温度。经过检测,在增加冷冻吸收系统之前,吸收塔进气温度为33℃,尾气的平均残溶为3 000 mg/m<sup>3</sup>。增加尾气冷冻冷凝器主要用于降低吸收塔的进气温度,减少尾气中的正己烷含量,从而降低吸收塔的负荷。设定吸收塔进油温度为38℃,尾气残溶随吸收塔进气温度的变化如图3所示。

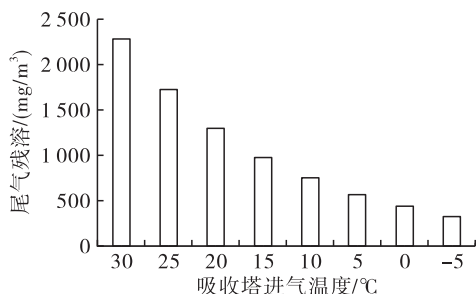


图3 吸收塔进气温度对尾气残溶的影响

由图3可以看出,随着吸收塔进气温度降低,尾气残溶呈现下降的趋势。当进气温度为10℃时,尾气残溶为740 mg/m<sup>3</sup>,较33℃时下降75.3%;进气温度继续下降时,尾气残溶下降趋势逐渐平缓。考

虑到冷冻机的投资成本和操作成本,采用出水温度为5~7℃的冷冻机,可将尾气温度冷冻至10℃。

### 1.2.3 进油温度的确定

设定吸收塔进气温度为10℃,改变吸收塔的进油温度,尾气残溶和矿物油黏度变化如图4所示。由图4可以看出,随着吸收塔进油温度的降低,尾气残溶呈现先下降后上升的趋势。进油温度降低至25℃时,尾气残溶最小,为637 mg/m<sup>3</sup>,相比30℃时下降19.6%;进油温度低于25℃时,尾气残溶反而上升。这是因为随着进油温度的降低,矿物油的黏度升高(见图4),使矿物油在吸收塔中的流动性和分配均匀度受阻,导致吸收效果变差。因此,确定进油温度为25℃。

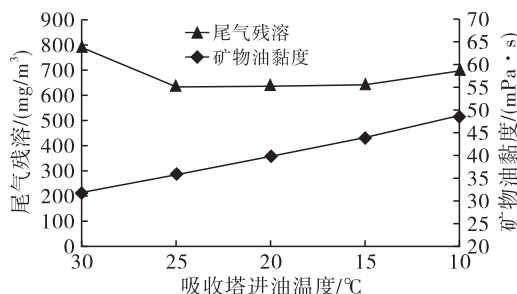


图4 吸收塔进油温度对尾气残溶和矿物油黏度的影响

## 2 冷冻机负荷计算及设备选型

冷冻机的负荷为尾气冷冻冷凝器和矿物油冷冻水板式换热器的负荷总和。尾气冷冻冷凝器的负荷按尾气由33℃冷却至10℃计算;矿物油冷冻水板式换热器按矿物油由38℃冷却至25℃计算。尾气冷冻冷凝器在冷凝过程中正己烷和水蒸气的分压是不断变化的,趋势是分压逐渐减小,凝固点不断降低。

简略计算,尾气冷冻冷凝器的冷却过程可分为两部分,一部分是气相由33℃冷却至10℃的显热,另一部分是冷凝部分在10℃时释放的潜热;矿物油冷冻水板式换热器的负荷为矿物油由38℃至25℃的显热。计算参数如表1所示。

尾气冷冻冷凝器的冷凝负荷( $Q_1$ )按式(1)计算。

$$Q_1 = C_{p1} \times M_1 \times \Delta T + M_{\text{水}} \times \Delta H_{\text{水}} + M_{\text{正己烷}} \times \Delta H_{\text{正己烷}} = 1.76 \times 493 \times (33 - 10) + 8 \times 2482 + 197 \times 378 \approx 114279 \text{ (kJ/h)} \quad (1)$$

矿物油冷冻水板式换热器的负荷( $Q_2$ )按式(2)计算。

$$Q_2 = C_{p2} \times M_2 \times \Delta T = 2.1 \times 17000 \times (38 - 25) = 464100 \text{ (kJ/h)} \quad (2)$$

冷冻机总负荷( $Q$ )按式(3)计算。

$$Q = Q_1 + Q_2 = 114279 + 464100 = 578379 \text{ (kJ/h)} \approx 161 \text{ (kW)} \quad (3)$$

考虑约 25% 的余量, 可选用制冷量为 200 kW 左右的 R22 氟利昂冷冻机, 冷冻机出水温度为 7℃, 进水温度为 12℃。

尾气冷冻冷凝器建议选择列管冷凝器, 水走管程, 气相走壳程, 管程采用 304 不锈钢材质, 壳程选用碳钢或 304 不锈钢。其换热面积( $S_1$ )按式(4)计算。

$$S_1 = \frac{Q_1}{K_1 \times \Delta T_{m1}} = \frac{114\ 279}{210 \times 9} \approx 60 \text{ (m}^2\text{)} \quad (4)$$

考虑车间生产不稳定时, 尾气流量容易波动, 设计冷凝器余量为 50%, 即选用总换热面积为 90 m<sup>2</sup> 的换热器。

矿物油冷冻水板式换热器, 板片材质 316L, 其换热器面积( $S_2$ )按式(5)计算。

$$S_2 = \frac{Q_2}{K_2 \times \Delta T_{m2}} = \frac{464\ 100}{1\ 680 \times 22} \approx 12.6 \text{ (m}^2\text{)} \quad (5)$$

考虑约 20% 的余量, 选用换热面积为 15 m<sup>2</sup> 的板式换热器。

表 1 计算参数

项目	指标
尾气冷冻冷凝器	
气相流量( $M_1$ )/(kg/h)	493
水蒸气冷凝量( $M_{水}$ )/(kg/h)	8
正己烷冷凝量( $M_{正己烷}$ )/(kg/h)	197
气相比热容( $C_{p1}$ )/(kJ/(kg·℃))	1.76
水蒸气潜热( $\Delta H_{水}$ )/(kJ/kg)	2 482
正己烷潜热( $\Delta H_{正己烷}$ )/(kJ/kg)	378
热侧进口温度/℃	33
热侧出口温度/℃	10
冷侧进口温度/℃	7
冷侧出口温度/℃	12
对数传热温差( $\Delta T_{m1}$ )/℃	9
经验总传热系数( $K_1$ )/(kJ/(m <sup>2</sup> ·h·℃))	210
矿物油冷冻水板式换热器	
矿物油流量( $M_2$ )/(kg/h)	17 000
比热容( $C_{p2}$ )/(kJ/(kg·℃))	2.1
热侧进口温度/℃	38
热侧出口温度/℃	25
冷侧进口温度/℃	7
冷侧出口温度/℃	12
对数传热温差( $\Delta T_{m2}$ )/℃	22
经验总传热系数( $K_2$ )/(kJ/(m <sup>2</sup> ·h·℃))	1 680

### 3 冷冻吸收系统的应用

将冷冻吸收系统应用于 5 000 t/d 大豆浸出车间尾气系统, 改造前后矿物油吸收塔的参数如表 2 所示。由表 2 可以看出, 与改造前相比, 将吸收塔进气温度降为 10℃, 并将吸收塔进油温度降低至 25℃, 其他操作参数不变。尾气残溶由改造前的 3 000 mg/m<sup>3</sup> 降低为 800 mg/m<sup>3</sup>, 降低率为 73.3%。按照吸收后尾气流量 214 kg/h, 尾气密度 1.06 kg/m<sup>3</sup>,

每小时多回收溶剂为 214/1.06 × (3 000 - 800)/10<sup>6</sup> ≈ 0.44 (kg), 每天多回收溶剂 10.6 kg, 按年运行天数 300 d 计算, 每年多回收溶剂 3.2 t。因此, 将冷冻技术应用于尾气吸收系统可降低溶剂单耗, 并减少大气污染, 保护环境。

表 2 改造前后矿物油吸收塔、解吸塔相关参数

项目	改造前	改造后
产量/(t/d)	5 000	5 000
吸收塔进气温度/℃	33	10
吸收塔进油温度/℃	38	25
吸收塔塔径/mm	1 000	1 000
解吸塔塔径/mm	1 000	1 000
矿物油循环量/(m <sup>3</sup> /h)	20	20
解吸塔进口温度/℃	102	102
解吸塔真空/kPa	-60	-60
直接汽压力/MPa	0.8	0.8
直接汽流量/(kg/h)	400	400
吸收塔底部矿物油含溶/%	1.58	0.42
尾气残溶(平均)/(mg/m <sup>3</sup> )	3 000	800

### 4 结论

通过化工模拟软件 Pro II, 对浸出车间冷冻技术辅助矿物油吸收系统降低尾气残溶工艺进行模拟优化, 并将其应用于 5 000 t/d 大豆浸出车间。结果表明: 当吸收塔进气温度由 33℃ 降低至 10℃, 进油温度由 38℃ 降低至 25℃ 时, 5 000 t/d 大豆浸出车间尾气冷冻系统总冷凝负荷为 578 379 kJ/h, 需要配置的尾气冷冻冷凝器和矿物油冷冻水板式换热器的面积分别为 90 m<sup>2</sup> 和 15 m<sup>2</sup>。实际应用结果表明, 尾气残溶由改造前的 3 000 mg/m<sup>3</sup> 降低至 800 mg/m<sup>3</sup>。但单纯增加冷冻系统并不能将尾气中的非甲烷总烃含量降至 GB 16297—1996《大气污染物综合排放标准》中规定的 120 mg/m<sup>3</sup> 以下。目前, 正在积极地研究冷冻技术结合催化氧化及其他处理方案的可行性, 期望在广大油脂行业工作人员共同努力下, 开发出更为经济有效的解决方案。

### 参考文献:

- [1] 张立伟, 段国聪, 万光, 等. 如何降低浸出车间“不可避免的溶剂消耗”[J]. 中国油脂, 2002, 27(2): 40-43.
- [2] 徐树元, 杨志华. 论浸出油厂溶剂消耗的途径与应采取的措施[J]. 中国油脂, 1997, 22(3): 26-27.
- [3] PARAÍSO P R, CAUNETO H, ZEMP R J, et al. Modeling and simulation of the soybean oil meal desolventizing - toasting process[J]. J Food Eng, 2008, 86(3): 334-341.
- [4] 梁椿松, 温小荣, 杭明, 等. 浸出车间筛孔式汽提塔设计与应用[J]. 中国油脂, 2017, 42(11): 154-156.
- [5] 温小荣, 梁椿松, 孙明奎, 等. 浸出车间尾气吸收系统操作参数模拟优化[J]. 中国油脂, 2017, 42(12): 157-160.