

溴化锂制冷技术在浸出油厂的应用

邹志杰, 况楠, 刘庆, 庞雪风, 裴云生

(九三集团天津大豆科技有限公司, 天津 300461)

摘要:对浸出油厂二蒸产生的二次蒸汽热能、汽提毛油的热能利用进行了研究。通过加装溴化锂制冷机,将溴化锂制冷机出来的75℃循环热水与二蒸产生的二次蒸汽和汽提毛油通过换热器制成95℃的热水,用于溴化锂制冷机吸热系统。从溴化锂制冷机出来的7℃的冷冻水用于给尾气和石蜡油降温,之后升温到12℃再回到溴化锂制冷机制冷系统中进行循环。通过使用溴化锂制冷机,2500 t/d大豆加工厂的溶耗下降了0.13 kg/t(以大豆质量计),同时降低了冷凝系统循环水的热负荷1172979.04 kJ/h,对浸出油厂的生产稳定和经济效益提高有重要的意义。

关键词:溴化锂制冷;二次蒸汽;热能;毛油热能;尾气温度;石蜡油温度

中图分类号:TS647;TQ644

文献标识码:B

文章编号:1003-7969(2020)10-0141-04

Application of lithium bromide refrigeration technology in oil leaching plant

ZOU Zhijie, KUANG Nan, LIU Qing, PANG Xuefeng, PEI Yunsheng

(Tianjin Soybean Technology Co., Ltd., Jiusan Group, Tianjin 300461, China)

Abstract: The utilization of the thermal energy of the secondary steam produced by the secondary evaporation and the thermal energy of the stripped crude oil was studied. By installing a lithium bromide refrigerator, the 75℃ cycling hot water from the lithium bromide refrigerator was heated to 95℃ by the thermal energy of the secondary steam and the stripped crude oil through heat exchanger for heat absorption system of the lithium bromide refrigeration. The 7℃ frozen water from the lithium bromide refrigerator was used to cool the exhaust gas and paraffin oil, and then the frozen water with 12℃ was returned to the refrigeration system of the lithium bromide refrigerator for recycling. Through the use of lithium bromide refrigerator, the solvent consumption for the 2500 t/d soybean processing plant was reduced by 0.13 kg/t (on the basis of soybean mass), and the heat load of the condensation system was reduced by 1172979.04 kJ/h. The design was of great significance to the stability of production and the improvement of economic benefits of oil leaching plants.

Key words: lithium bromide refrigeration; secondary steam; thermal energy; crude oil thermal energy; exhaust gas temperature; paraffin oil temperature

溴化锂制冷机是利用水在低压下相态的变化(由液态变为气态),吸收汽化潜热来达到制冷的目的。其间,水是制冷剂,溴化锂溶液为吸收剂。溴化锂制冷技术具有多种优点,如:可以充分利用余热、工业废热等低位热能;除屏蔽泵外,没有其他运行部件,噪声较低,为75~80 dB;制冷量可在20%~

100%的范围内进行无级调节,有利于部分负荷时的运行调节等。溴化锂制冷机已在焦化、化工、钢铁、医药、热电、油田、太阳能、食品、橡胶轮胎、电厂、城市集中供热等多个工业领域成功地应用于余热回收利用,不仅帮助用户节约了大量的煤、燃油、燃气等一次性能源消耗量,也使用户在获得节能收益的同时,大幅减少了二氧化碳的排放量。

在浸出油厂,通常二蒸产生的二次蒸汽(100℃左右)直接进蒸发冷凝器壳程,被管程的循环水冷却,进行溶剂回收;汽提塔出来的热毛油(110℃左

收稿日期:2020-05-03;修回日期:2020-07-06

作者简介:邹志杰(1962),男,工程师,主要从事粮油生产加工技术工作(E-mail)18920139306@163.com。

右)在换热器中被循环水冷却到 65℃ 左右去精炼。现有的工艺中二蒸二次蒸汽、汽提毛油中的热量没有被有效利用,造成了能源浪费。

通过在浸出车间安装一台溴化锂制冷机,在二蒸与蒸发冷凝器之间单独安装一台高效换热器,将二蒸产生的二次蒸汽在高效换热器中与溴化锂制冷机来的循环水换热后再去蒸发冷凝器,而循环水继续与 110℃ 左右的汽提毛油在单独新安装的板式换热器中换热,通过两台换热器将溴化锂制冷机来的循环水加热到 95℃ 用于吸热系统。从溴化锂制冷机出来的 7℃ 的冷冻水,用于给尾气和石蜡油降温,之后升温到 12℃ 返回溴化锂制冷机制冷系统。兹以 2 500 t/d 大豆加工厂为例,对溴化锂制冷技术的应用进行阐述,以期为业界提供参考。

1 改造前基本参数及物料衡算^[1]

大豆加工规模 104.2 t/h(2 500 t/d),原料大豆含水 9.7%,含油率 20%,粕残油 1%,粕水分 13%,湿粕含溶 30%,浸出器出料混合油浓度为 25%(50℃),一蒸出料混合油浓度为 65%(55℃),二蒸出料混合油浓度为 95%(110℃),汽提塔出料毛油浓度为 99.99%(110℃)。

根据物料衡算可得:二蒸溶剂蒸发量为 9 707.77 kg/h;汽提塔出料量(毛油量)为 1 9983.83 kg/h;料溶比为 1:0.92。

2 改造方案及热量衡算

2.1 改造方案

改造方案示意图如图 1 所示。

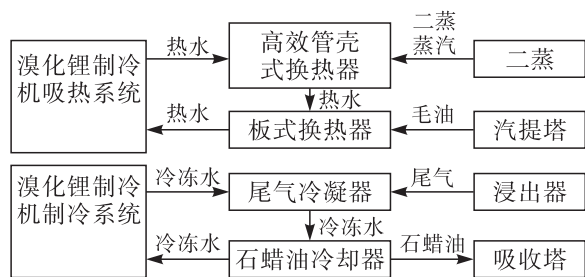


图 1 改造方案示意图

具体为:①在二蒸与蒸发冷凝器之间加装一台高效管壳式换热器,用于溴化锂制冷机来的循环水(管程)与二蒸来的 100℃ 左右的二次蒸汽(壳程)换热,换热后的气体去冷凝器;②在汽提毛油出口安装一台板式换热器,用于溴化锂制冷机来的与二蒸蒸汽换热后的循环水与汽提毛油(110℃ 左右)进行换热;③在浸出车间加装一台吸收式溴化锂制冷机,将经前面换热后 95℃ 的热水用于吸热系统,从溴化锂制冷机出来的 7℃ 的冷冻水去冷却车间的尾气和石蜡油;④将尾气冷凝器改为用溴化锂制冷机来的

7℃ 冷冻水进行降温;⑤将进吸收塔前的石蜡油冷却器改为用溴化锂制冷机来的与尾气换热后的冷冻水进行降温。

2.2 热量衡算^[2-5]

2.2.1 可回收的热量($Q_{\text{热}}$)

2.2.1.1 浸出车间二蒸气相由 100℃ 降到 90℃ 所放出的热量(Q_1)

二蒸产生的蒸汽量为 9 707.77 kg/h,温度以 100℃ 计。根据公式(1)计算 100℃ 和 90℃ 溶剂蒸气的焓值。

$$I = [(50.2 + 0.109t + 0.00014t^2) \times (4 - \rho) - 73.8] \times 4.186 \quad (1)$$

式中: I 为溶剂蒸气焓值, kJ/kg; t 为溶剂蒸气温度,℃; ρ 为溶剂密度, t/m³ ($\rho = 0.6724$ t/m³)。

$$100^\circ\text{C 溶剂蒸气焓值: } I_{100} = [(50.2 + 0.109 \times 100 + 0.00014 \times 100^2) \times (4 - 0.6724) - 73.8] \times 4.186 = 561.66 (\text{kJ/kg})。$$

$$90^\circ\text{C 溶剂蒸气焓值: } I_{90} = [(50.2 + 0.109 \times 90 + 0.00014 \times 90^2) \times (4 - 0.6724) - 73.8] \times 4.186 = 542.77 (\text{kJ/kg})。$$

$$Q_1 = 9\,707.77 \times (561.66 - 542.77) = 183\,379.78 (\text{kJ/h})。$$

2.2.1.2 100℃ 毛油降到 80℃ 所放出的热量(Q_2)

汽提塔出来的毛油为 19 983.83 kg/h,温度以 100℃ 计。根据公式(2)计算大豆油比热容。

$$C = (0.465 + 0.0007t) \times 4.186 \quad (2)$$

式中: C 为大豆油比热容, kJ/(kg·℃); t 为温度,℃。

$$100^\circ\text{C 毛油比热容: } C_{100} = (0.465 + 0.0007 \times 100) \times 4.186 = 2.240 (\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}))。$$

$$80^\circ\text{C 毛油比热容: } C_{80} = (0.465 + 0.0007 \times 80) \times 4.186 = 2.181 (\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}))。$$

$$Q_2 = 19\,983.83 \times 2.240 \times 100 - 19\,983.83 \times 2.181 \times 80 = 989\,599.26 (\text{kJ/h})。$$

$$Q_{\text{热}} = Q_1 + Q_2 = 183\,379.78 + 989\,599.26 = 1\,172\,979.04 (\text{kJ/h})。$$

2.2.2 冷却石蜡油、尾气需带走的热量

2.2.2.1 石蜡油由 40℃ 降为 25℃ 需要冷水带走的热量($Q_{\text{石}}$)

石蜡油循环量为 10 m³/h。查手册,石蜡油比热容为 2.135 kJ/(kg·℃),石蜡油密度为 847 kg/m³。

$$Q_{\text{石}} = 10 \times 847 \times 2.135 \times (40 - 25) = 271\,251.75 (\text{kJ/h})。$$

2.2.2.2 尾气由 35℃ 降为 15℃ 需要冷水带走的热量($Q_{尾}$)

大豆坯片密度 0.36 t/m³、料溶比 1:0.92、溶剂密度 0.672 4 t/m³, 104.2 t/h 坯片产生的尾气量(V)约等于浸出器因进料(坯片)和进溶剂所排出的气体量。

$$V = \frac{104.2}{0.36} + \frac{104.2 \times 0.92}{0.6724} = 432.01 (\text{m}^3/\text{h})。$$

(1) 尾气中溶剂由 35℃ 降为 15℃ 需要冷水带走的热量($Q_{溶}$)

查手册,常压下 35℃ 时正己烷溶剂饱和蒸汽压为 33.4 kPa,常压下 15℃ 时正己烷溶剂饱和蒸汽压为 13.63 kPa,根据公式(3)计算 35℃ 时尾气含溶剂量(G_1)和 15℃ 时尾气含溶剂量(G_2)。

$$G = (M_0 P_0 V) / [P(22.4 + 0.082t)] \quad (3)$$

式中: G 为尾气含溶剂量,kg/h; M_0 为溶剂相对分子质量; P_0 为尾气温下溶剂的饱和蒸汽压,kPa; P 为总压(常压),kPa; t 为尾气温度,℃; V 为尾气量,m³/h。

$$G_1 = (86.1 \times 33.4 \times 432.01) / [101.33 \times (22.4 + 0.082 \times 35)] = 485.18 (\text{kg}/\text{h})。$$

$$G_2 = (86.1 \times 13.63 \times 432.01) / [101.33 \times (22.4 + 0.082 \times 15)] = 211.73 (\text{kg}/\text{h})。$$

$$35^\circ\text{C} \text{ 时溶剂气体焓值: } I_{35} = [(50.2 + 0.109 \times 35 + 0.00014 \times 35^2) \times (4 - 0.6724) - 73.8] \times 4.186 = 445.86 (\text{kJ}/\text{kg})。$$

$$15^\circ\text{C} \text{ 时溶剂气体焓值: } I_{15} = [(50.2 + 0.109 \times 15 + 0.00014 \times 15^2) \times (4 - 0.6724) - 73.8] \times 4.186 = 413.54 (\text{kJ}/\text{kg})。$$

$$Q_{溶} = G_1 \times I_{35} - G_2 \times I_{15} = 485.18 \times 445.86 - 211.73 \times 413.54 = 128763.53 (\text{kJ}/\text{h})。$$

(2) 尾气中水蒸气由 35℃ 降为 15℃ 需要冷水带走的热量($Q_{水}$)

查手册,常压下 35℃ 时水蒸气蒸汽分压为 5.81 kPa,常压下 15℃ 时水蒸气蒸汽分压为 1.71 kPa,35℃ 时尾气含水蒸气量(G_3)和 15℃ 时尾气含水蒸气量(G_4)根据公式(3)计算。

$$G_3 = (M_0 P_0 V) / [P(22.4 + 0.082t)] = (18 \times 5.81 \times 432.01) / [101.33 \times (22.4 + 0.082 \times 35)] = 17.64 (\text{kg}/\text{h})。$$

$$G_4 = (18 \times 1.71 \times 432.01) / [101.33 \times (22.4 + 0.082 \times 15)] = 5.55 (\text{kg}/\text{h})。$$

查手册,35℃ 水蒸气焓值(I_3)为 2565.3 kJ/kg,15℃ 水蒸气焓值(I_4)为 2528.9 kJ/kg。

$$Q_{水} = G_3 \times I_3 - G_4 \times I_4 = 17.64 \times 2565.3 - 5.55 \times$$

$$2528.9 = 31216.50 (\text{kJ}/\text{h})。$$

(3) 尾气中空气气体从 35℃ 降至 15℃ 需要冷水带走的热量($Q_{空}$)

35℃ 时 2500 t/d 大豆坯片产生的尾气溶剂的体积(V_1):

$$V_1 = \frac{G_1}{\frac{M_0}{R} \times \frac{T_{35}}{T_0}} = \frac{485.18}{\frac{86.1}{22.4} \times \frac{273+35}{273}} = 111.88 (\text{m}^3/\text{h})。$$

35℃ 时 2500 t/d 大豆坯片产生的尾气中水蒸气的体积(V_3):

$$V_3 = \frac{G_3}{\frac{M_0}{R} \times \frac{T_{35}}{T_0}} = \frac{17.64}{\frac{18}{22.4} \times \frac{273+35}{273}} = 19.46 (\text{m}^3/\text{h})。$$

因空气体积随温度变化不大,因此 35℃ 和 15℃ 时体积可看作不变。35℃ 时尾气中空气气体体积($V_{空}$)为:

$$V_{空} = V - V_1 - V_3 = 432.01 - 111.88 - 19.46 = 300.67 (\text{m}^3/\text{h})。$$

查手册 35℃ 干空气密度(r)为 1.15 kg/m³、焓值(I_{35})为 129 kJ/kg,15℃ 时空气焓值(I_{15})为 41.79 kJ/kg。

$$Q_{空} = V_{空} \times r \times (I_{35} - I_{15}) = 300.67 \times 1.15 \times (129 - 41.79) = 30154.65 (\text{kJ}/\text{h})。$$

$$Q_{尾} = Q_{溶} + Q_{水} + Q_{空} = 128763.53 + 31216.50 + 30154.65 = 190134.68 (\text{kJ}/\text{h})。$$

冷却尾气和石蜡油需要溴化锂制冷机的总制冷量($W_{总}$)为:

$$W_{总} = Q_{尾} + Q_{石} = 190134.68 + 271251.75 = 461386.43 (\text{kJ}/\text{h})。$$

3 溴化锂制冷机余热利用计算^[5]

二蒸、汽提毛油产生的余热通过换热器制出 95℃ 热水,输送至溴化锂制冷机吸热后降为 75℃,再通过余热利用加热至 95℃ 循环利用。95℃ 时水的焓值为 398.64 kJ/kg,75℃ 时水的焓值为 314.44 kJ/kg,可利用余热为 1172979.04 kJ/h,热水循环量($V_{循1}$)按下式计算。

$$V_{循1} = 1172979.04 / [(398.64 - 314.44) \times 1000] = 13.93 (\text{t}/\text{h})。$$

管道设计长度 600 m(其中 300 m 热水,300 m 冷冻水)、管径 DN100、保温层厚度 50 mm、绝热材料导热系数(λ)为 0.33 kJ/(m·h·℃)。则管道热量损失按公式(4)计算。

$$Q_{损1} = (\Delta t \times F) / (\delta / \lambda) \quad (4)$$

式中: F 为散热面积,m²; Δt 为平均温差,℃; λ 为不锈钢导热系数,kJ/(m·h·℃); δ 为厚度,m。

热水管道热损 $Q_{损1}$: $Q_{损1} = [(95 - 75) \times 100 \div 1\,000 \times 3.14 \times 300] / (50 \div 1\,000 \div 0.33) = 12\,434.4$ (kJ/h)。

冷冻水管道损失热量($Q_{损2}$) (制冷机冷冻水进/出口温度 $12\text{ }^\circ\text{C}/7\text{ }^\circ\text{C}$): $Q_{损2} = [(12 - 7) \times 100 \div 1\,000 \times 3.14 \times 300] / (50 \div 1\,000 \div 0.33) = 3\,018.6$ (kJ/h)。

$Q_{损} = Q_{损1} + Q_{损2} = 12\,434.4 + 3\,018.6 = 15\,453.00$ (kJ/h)。

换热及沿程损失率不大于 0.5%, 制冷机可使用热量(W)为:

$$W = 1\,172\,979.04 \times 0.995 = 1\,167\,114.15 \text{ (kJ/h)}。$$

溴化锂制冷机热水进/出水温度为 $95\text{ }^\circ\text{C}/75\text{ }^\circ\text{C}$, 冷冻水进/出水温度为 $12\text{ }^\circ\text{C}/7\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 溴化锂制冷机 COP(制冷量(W)与输入功率(W)的比率定义为热泵的能效比)值不小于 0.79, 则溴化锂制冷机可制冷量(Q)为:

$$Q = W \times 0.79 = 1\,167\,114.15 \times 0.79 = 922\,020.18 \text{ (kJ/h)}。$$

溴化锂制冷机可供的制冷量($Q_{溴}$)为:

$$Q_{溴} = Q - Q_{损} = 922\,020.18 - 15\,453.00 = 906\,567.18 \text{ (kJ/h)}。$$

冷冻循环水进/出水温度为 $12\text{ }^\circ\text{C}/7\text{ }^\circ\text{C}$ 时, $12\text{ }^\circ\text{C}$ 时水的焓值为 210.67 kJ/kg , $7\text{ }^\circ\text{C}$ 时水的焓值为 122.85 kJ/kg , 则冷冻水循环量($V_{循2}$)为:

$$V_{循2} = 906\,567.18 / [(210.67 - 122.85) \times 1\,000] = 10.32 \text{ (t/h)}。$$

4 可行性分析

日加工 $2\,500 \text{ t/d}$ 大豆的浸出车间二蒸产生的二次蒸汽可利用热量为 $183\,379.78 \text{ kJ/h}$, 汽提毛油的可利用热量为 $989\,599.26 \text{ kJ/h}$, 总可利用热量为 $1\,172\,979.04 \text{ kJ/h}$ 。通过溴化锂制冷机, 制得的冷冻水(进/出水温 $12\text{ }^\circ\text{C}/7\text{ }^\circ\text{C}$) 提供的制冷量为 $906\,567.18 \text{ kJ/h}$, 大于尾气和石蜡冷却所需冷量 $461\,386.43 \text{ kJ/h}$, 所以此系统完全能满足 $2\,500 \text{ t/d}$ 大豆浸出车间尾气由 $35\text{ }^\circ\text{C}$ 降到 $15\text{ }^\circ\text{C}$ 和石蜡油由 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 降到 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 的要求, 方案是科学的、可行的。

5 成本回收计算

石蜡油尾气回收系统溶剂回收效率为 $92\% \sim 98\%$, 取回收效率 95% 计算溶剂回收量。

5.1 改造前溶耗

改造前 $35\text{ }^\circ\text{C}$ 尾气经石蜡油系统吸收后直接排到空气中的溶剂量($W_{损}$)为:

$$W_{损} = G_1 \times (1 - 95\%) = 485.18 \times 5\% = 24.26 \text{ (kg/h)}。$$

改造前 $35\text{ }^\circ\text{C}$ 尾气经石蜡油系统吸收后吨大豆溶耗为:

$$24.26 \div 104.2 = 0.23 \text{ (kg/t)}。$$

5.2 改造后溶耗

改造后尾气温度降至 $15\text{ }^\circ\text{C}$ 排到空气中的溶剂量($W_{损}$)为:

$$W_{损} = G_2 \times (1 - 95\%) = 211.73 \times 5\% = 10.59 \text{ (kg/h)}。$$

$15\text{ }^\circ\text{C}$ 尾气经石蜡油系统吸收后吨大豆溶耗为:

$$10.59 \div 104.2 = 0.10 \text{ (kg/t)}。$$

5.3 效益分析

按吨溶剂 $6\,000$ 元、电价 0.8 元/(kW·h)、年加工量 75 万 t 大豆计算。

溶剂损失可减少: $[(0.23 - 0.10) \times 750\,000 \div 1\,000] \times 6\,000 = 585\,000$ (元) = 58.5 (万元)。

溴化锂制冷机 3 台水泵总功率为 25.5 kW (效率 80%), 全年耗电费用: $25.5 \times 24 \times 300 \times 0.8 \times 0.8 = 117\,504$ (元) = 11.7504 (万元)。

年创效: $58.5 - 11.7504 = 46.7496$ (万元)。

根据计算工程投资可在 24 个月收回。

6 结论

溴化锂制冷技术对浸出油厂二蒸产生的二次蒸汽热能、汽提毛油的热能利用后, 得到 $95\text{ }^\circ\text{C}$ 的热水, 用于溴化锂制冷机吸热系统。从溴化锂制冷机出来的 $7\text{ }^\circ\text{C}$ 的冷冻水用于给尾气和石蜡油降温, 使尾气在 $15\text{ }^\circ\text{C}$ 以下进入吸收系统, 使溶耗下降 0.13 kg/t , 同时降低了冷凝系统循环水的热负荷 $1\,172\,979.04 \text{ kJ/h}$, 年创效 46.7496 万元, 并且投资两年后就可收回, 并在以后每年带来 46.7496 万元的效益, 对浸出油厂的生产稳定和经济效益提高有重要的意义。

参考文献:

- [1] 邹志杰, 况楠, 刘庆, 等. 负压蒸发系统汽提塔二次蒸汽利用的分析[J]. 中国油脂, 2020, 45(9): 119-121.
- [2] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册: 无机卷[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [3] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册: 有机卷[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [4] 中国电子工程设计院. 空气调节设计手册[M]. 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [5] 倪培德. 油脂工程工艺设计[M]. 江苏 无锡: 无锡轻工学院, 1988.