

油脂精炼余热回收耦合高温热泵制备蒸汽技术应用研究

刘汉尚 牛新朝 吴邦喜

华商国际工程有限公司 北京 100069

摘要: 油脂精炼过程中的一级油产品存在余热, 传统工艺通过冷却水降温将热量直接散失, 造成显著的能源浪费。本文以某油脂企业一级油余热回用技术改造项目为研究对象, 提出了一种基于高温热泵的余热回收蒸汽发生技术方案。该方案利用热泵回收 42t/h、85℃一级油的热量, 制取 116℃热水, 经闪蒸罐产生 104℃、0.016 MPa 的低压蒸汽, 供预处理车间调质塔使用。实际运行数据表明, 在热泵系统产汽量 1.80t/h 时, 单位蒸汽电耗 218.89kWh/t, 年节省能源费用约 103.09 万元, 减少 CO₂ 排放约 1900 吨。本文对项目方案设计、系统能效、经济效益及环境效益进行了系统分析, 为油脂加工行业余热回收提供了可复制的技术路径。

关键词: 高温热泵; 余热回收; 油脂精炼; 蒸汽发生; 节能降碳

引言: 油脂加工是典型的能源密集型行业, 预处理、精炼等工序消耗大量热量(一般以蒸汽作为热源, 以燃煤锅炉、天然气锅炉等形式提供)传统油脂加工工艺中, 各加工工序热源一般独立设置, 阶梯利用和循环复用较少, 大量中低温余热被直接排放, 造成蒸汽需求量大、成本较高、环保排放问题突出。在节能减排趋势和“双碳”战略背景下, 如何提高蒸汽热量的利用率、高效回收低品位余热并将其提升为可用的高品位热能, 已成为油脂加工行业节能降碳的关键课题之一。

传统蒸汽生产过程中一般以直接燃烧消耗化石能源作为热量来源, 燃烧过程中将热量转化为蒸汽内能, 并产生 CO₂、H₂O、NO_x、SO₂ 等气体和煤渣等固体废物排入自然环境中。热泵技术完全摒弃了化石能源的需求, 能够从低温热源(地源、水源、气源等)吸收热量, 通过少量电力驱动实现热量转移和高温供热, 高温工业热泵供热温度可达 100~150℃或更高。其生产过程中不消耗化石能源、不产生固体或气体废物, 仅消耗电能(电能生产过程中可能会消耗的化石能源不做讨论), 且其热效率远高于电加热。近年来, 高温热泵在工业余热回收领域取得了显著进展。周昌勇等研究表明, 基于 R245fa 的高温热泵蒸汽系统在低温热源 55~60℃、蒸汽温度 120℃的工况下, 生产 40 kg 蒸汽的能耗可降低 70%~75%, 碳排放量减少 18.1%~73.7%^[1]。某公司在植物油厂 DC 废气余热回收项目中, 采用大功率高温热泵多机并联取热制热系统, 在 45℃进水温度下输出 103℃热水, 热泵能效比达 4.0^[2]。这些成果验证了高温热泵在工业余热回收特别是油脂加工行业

余热回收领域的技术可行性。

本文以某粮油公司油脂加工精炼环节一级油(大豆油)余热回用技术改造项目为案例, 讨论了油脂加工环节中液态物质余热的回收及一种高温热泵蒸汽发生系统的设计思路, 与目前已开展研究的气态物质余热回收形成补充, 旨在为同类企业的余热回收改造提供技术参考。

1 系统设计

1.1 工艺需求

某粮油公司欲将精炼环节一级油降温(油温由 85℃降至 55℃)热量回收利用, 使用热泵蒸汽系统产生蒸汽直接替换或补充预处理环节调质塔的高温蒸汽需求, 要求蒸汽产量≥1.70t/h, 温度≥103℃。

1.2 工艺原理及系统流程

本项目的基本工艺原理为: 在精炼车间一级油冷却环节中利用板式换热器等热交换设备与热泵工质进行热交换, 将油温从 85℃降至 55℃, 将该部分热量回收并利用高温热泵进行品质提升, 高温工质与循环水进行换热制取高温热水, 热水通过泵和管道输送至闪蒸罐, 在闪蒸罐内闪发出低压蒸汽, 在通过鼓风机将蒸汽导入预处理车间调质塔, 用于调质塔内大豆等原料的加热。

方案系统流程为: 一级油(85℃、42t/h)进入热泵蒸发器与热泵工质进行热交换, 放热降温至 55℃后进入后续冷却和储藏工艺环节(一级油仅作为热源, 不参与热泵蒸汽系统其他工艺流程)。热泵压缩机消耗电力驱动工质循环, 在冷凝器侧将循环水加热至 116℃。

116℃热水经泵送至闪蒸罐，热水节流后在 0.016MPa 压力下闪发出 104℃的低压蒸汽，蒸汽经鼓风机输送至预处理车间调质塔，替代原有蒸汽。闪蒸罐底部的热水（104℃）由循环水泵打回热泵冷凝器继续加热，系统缺水由调质塔内蒸汽凝水（约 55℃）或其他水源补充。

系统主要设备包括热泵机组、闪蒸罐、蒸汽鼓风机、循环水泵、阀门仪表及自控系统等，核心设备为热泵机组和闪蒸罐。

按照环保、安全、高效的原则进行热泵工质的遴选，最终选用 R1233zd 环保工质，其安全等级为 A1，无毒不可燃，全球变暖潜能 GWP = 4.5，臭氧消耗潜能 ODP 近似于 0，相较于同类氟利昂工质，为一种环保、安全的新型工质，完全满足项目需求。

1.3 系统参数计算及设备选型

一级油降温阶段与热泵工质进行热交换，热量交换计算如下（热交换过程中不考虑热量损耗，即一级油所释放的所有热量均被热泵工质接收）：

$$Q = c \times m \times \Delta T \quad (1)$$

其中： $\Delta T = T_1 - T_2$

式中：Q 为一级油热交换所释放的热量，kJ/h；c 为大豆油比热容，kJ/(kg · °C)；m 为热交换大豆油质量，kg；T₁ 为热交换前温度，°C；T₂ 为热交换后温度，°C。

$$Q = 2.38 \times 42,000 \times (85 - 55) = 2,998,800 \text{ kJ/h}$$

$$2,998,800 \text{ kJ/h} \div 3,600 = 833 \text{ kW}$$

按照蒸汽产量 1.80t/h、温度 104℃（略大于蒸汽需求量及温度）对闪蒸过程计算如下（闪蒸过程中不考虑热量损耗，即闪蒸过程中高温水释放的显热均转化为蒸汽潜热）：

$$x = (h_{f,T1} - h_{f,T2}) / h_{fg,T2} \quad (2)$$

式中：x 为闪蒸率，%； $h_{f,T1}$ 为闪蒸罐进口温度 T₁ 下水焓值，kJ/kg； $h_{f,T2}$ 为闪蒸后温度 T₂ 下水焓值，kJ/kg； $h_{fg,T2}$ 为闪蒸后温度 T₂ 下饱和汽化潜热，kJ/kg；T₁ 为闪蒸前温度，°C；T₂ 为闪蒸后温度，°C。

$$x = (h_{f,T1} - h_{f,T2}) / h_{fg,T2} = (486.796 - 435.988) / 2245.853 = 2.26\%$$

按照闪蒸率计算流入闪蒸罐的高温水流量：

$$1.8 / 0.0226 = 79560 \text{ kg/h}$$

即进入闪蒸罐的水流量为 79.56 t/h，其中 1.8 t/h 的水完全转化为蒸汽，闪蒸罐回流水为 77.76 t/h，回流水与调质塔内蒸汽凝水（55℃）混合后温度为 103℃。

利用热泵机组将流量为 79.56 t/h 的水温从 103℃提升至 116℃所需热量为（热交换过程中不考虑热量损耗，即热泵工质所释放的所有热量均循环水接收）：

$$Q = c \times m \times \Delta T \quad (3)$$

其中： $\Delta T = T_1 - T_2$

式中：Q 为热泵工质与水热交换所释放的热量，W；c 为水比热容，kJ/(kg · °C)；m 为热交换水质量，kg；T₁ 为热交换前温度，°C；T₂ 为热交换后温度，°C。

$$Q = 4.186 \times 79,560 \times (116 - 103) = 4,329,496.08 \text{ kJ/h}$$

$$4,329,496.08 \text{ kJ/h} \div 3,600 = 1202.64 \text{ kW}$$

通过计算，欲回收一级油热量并达到蒸汽产量 ≥ 1.70t/h，温度 ≥ 103℃的要求，热泵机组必须能够产生高于 1202.64kW 的热量。对设备进行选型配置，选择一台 2 机头并联热泵机组，在蒸发温度/冷凝温度为 51℃/119℃条件下制热量为 1206kW，满足需求，设备输入功率 370kW，制热性能系数（COP）为 3.26。闪蒸罐为 304 不锈钢材质，直径 1400mm，容积 4.5m³，配备差压式液位计。蒸汽鼓风机风量 3000m³/h、风压 4kPa，功率 5.5kW。循环水泵为不锈钢材质，流量 80t/h、扬程 50m，功率 18.5kW，系统总功率 394kW。控制系统采用 PLC 可编程控制器及触摸屏。蒸汽进入调质塔前设置三通阀门，实现新老工艺的自由切换，确保调质塔生产的稳定性。

2 能效及环境效益分析

2.1 能效分析

系统总输入功率为 394kW（热泵 370kW+ 循环水泵 18.5kW+ 鼓风机 5.5kW），按照产汽量 1.80t/h 计算，单位蒸汽电耗为 218.89kWh/t。以当地工业电价 0.7 元/kWh 计算，单位蒸汽电力成本为 153.22 元/t。相比该企业原有蒸汽成本 245 元/t，单位蒸汽节省能源费用 91.78 元/t，节能率达 37.46%。

按照设备年运行 6240 小时（260 天 × 24 小时）计算，蒸汽年产量 11232 吨，年节省能源费用约 103.09 万元，节能效益明显。这一节能效果与同类项目相比处于合理区间（某公司 DC 尾气低热回收项目年经济效益约 80 万元^[3]，考虑到产汽量和蒸汽成本的差异，本项目年效益符合预期）。

2.2 环境效益

传统蒸汽生产过程中需燃烧消耗大量化石能源，并产生 CO₂、H₂O、NO_x、SO₂ 等气体和煤渣等固废物质，而热泵技术完全修补了以上问题，研究表明，采用氟利

昂工质的热泵方案高效节能,降低 CO₂排放量减碳率高达 60%以上。采用氨(NH₃)工质的热泵减碳率可高达 66.8%^[4](氨工质具有一定毒性,部分区域和行业使用受限)。本项目通过电力驱动替代化石燃料燃烧,以燃煤锅炉平均碳排放强度计算(按给水 20℃、蒸汽 104℃、燃煤锅炉效率 $\eta = 80\%$ 计算),相当于每年减少约 1250 吨标准煤的消耗,等效年减少 CO₂ 排放约 3300 吨,并可完全消除 NO_x、SO₂ 等气体和煤渣等固废的排放,扣除热泵功耗之后亦可减少 CO₂ 排放约 1900 吨。

3 技术创新点

液相余热的高效回收。区别于已有研究多关注废气余热回收,本项目针对油脂精炼一级油液相冷却余热进行回收,拓宽了油脂加工行业余热回收的应用场景。一级油作为液相热源,具有热容大、温度稳定、易于换热的特点,为热泵系统提供了优质的低温热源。

环保工质高温热泵应用。采用 R1233zd 作为热泵工质,其全球变暖潜值(GWP)为 4.5,臭氧消耗潜能 ODP 近似于 0,远低于传统氟利昂类工质,符合环保制冷剂的发展方向。在 51℃蒸发/119℃冷凝的工况下,COP 达到 3.26,体现了良好的高温制热性能。

“热泵+闪蒸”耦合蒸汽发生技术。通过热泵制取 116℃热水,再经闪蒸罐产生 104℃低压蒸汽,避免了直接制取蒸汽时对压缩机排气温度的高要求,闪蒸罐减少了用电设备,在保证系统可靠性的同时实现了较低的能耗。

结论

本文提出的基于螺杆压缩机高温热泵的一级油余热

回收蒸汽发生技术方案,可将 42t/h、85℃的一级油降温至 55℃,回收热量 833kW,产生 1.80t/h 的 104℃低压蒸汽,满足后续工艺需求。

系统单位蒸汽电耗 218.89kWh/t,蒸汽成本 153.22 元/t,较传统蒸汽成本 245 元/t 节省 37.46%,年节省能源费用约 103.09 万元。

项目年减少 CO₂ 排放约 1900 吨,完全消除 NO_x、SO₂ 等气体和煤渣等固废的排放,具有良好的环境效益。

本项目表明,高温热泵技术不仅适用于废气余热回收,同样可有效回收油脂精炼过程中液相冷却余热。该技术方案可为同类油脂加工企业的余热回收改造提供可复制的技术参考,对推动油脂加工行业电气化转型和节能降碳具有积极意义。

参考文献

- [1] 周勇昌,刘宏伟,刘欢,等.基于 R245fa 的高温热泵蒸汽系统实验研究[J].化学工程,2026(4):89-94.
- [2] 中企联合油脂镇江公司.镇江公司“植物油厂 DC 废气余热回收耦合蒸汽热泵装备开发与应用”项目通过科技成果评价[EB/OL].(2025-8-5).
<https://mp.weixin.qq.com/s/13aiAtC5wYEaxERaXCM6Lg>.
- [3] 中企联合油脂镇江公司.镇江公司 DC 干燥尾气低热回收项目取得成功[EB/OL].(2025-4-23).
<https://mp.weixin.qq.com/s/zZ8X8YwvW5Qo8qMs5HOC3w>.
- [4] 宋占寿,马天红,董迎章,王本良,伍晓辉,程建路,何锦漪.余热源热泵在油脂加工中的应用[J/OL].中国油脂.<https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.260197>.