

# 基于 VHEX 高效防垢换热器的电脱盐污水换热系统改造与能效分析研究

崔亚续 (中海石油中捷石化有限公司, 河北 黄骅 061108)

**摘要:** 本文针对某 350 万 t/a 重交沥青装置电脱盐排污水中含杂质、易结垢导致传统管壳式换热器效率低下、运行维护频繁等问题, 探讨了采用 VHEX 高效防垢换热器进行系统改造的工程实践与综合效益。项目通过更换原换热设备, 利用 VHEX 设备传热效率高、抗结垢能力强的技术特点, 对改造前后的运行数据进行为期数月的采集与对比分析。结果表明, 改造后脱盐切水外排平均温度显著降低, 经济效益分析显示, 年节省运行成本约 125 万元, 节能效益折合标煤约 579.67t/a。本研究论证了 VHEX 高效防垢换热器在易结垢、高能耗工业换热场景中的应用可行性、显著的经济性与节能潜力, 为同类装置的节能技术改造提供了详实的数据支持和实践参考。

**关键词:** VHEX 高效防垢换热器; 电脱盐污水换热; 防结垢; 节能改造; 经济效益

**中图分类号:** TE965 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 003-0053-03

## Research on the Transformation and Energy Efficiency Analysis of Electric Desalination Wastewater Heat Exchange System Based on VHEX High-Efficiency Anti-Scaling Heat Exchanger

Cui Yaxu (Cnooc Zhongjie Petrochemical Co., Ltd, Huanghua Hebei 061108, China)

**Abstract:** This paper discusses the engineering practice and comprehensive benefits of system transformation using VHEX high-efficiency anti-scaling heat exchangers in response to the problems of low efficiency and frequent operation and maintenance of traditional shell and tube heat exchangers caused by impurities and easy scaling in the wastewater from the electric desalination of a 3.5 million tons/year heavy exchange asphalt plant. The project replaced the original heat exchange equipment and took advantage of the technical features of VHEX equipment, such as high heat transfer efficiency and strong anti-scaling ability, to collect and comparatively analyze the operation data before and after the renovation for several months. The results show that the average temperature of the desalted water discharged after the transformation has significantly decreased. The economic benefit analysis indicates that the annual operating cost savings are approximately 1.25 million yuan, and the energy-saving benefits are equivalent to about 579.67 tons of standard coal per year. This study demonstrates the feasibility of applying VHEX high-efficiency anti-scaling heat exchangers in industrial heat exchange scenarios prone to scaling and high energy consumption, as well as their significant economic viability and energy-saving potential. It provides detailed data support and practical references for the energy-saving technological transformation of similar devices.

**Key words:** VHEX high-efficiency anti-scaling heat exchanger; Heat exchange for electric desalination wastewater; Anti-scaling; Energy-saving renovation; Economic benefits

在常减压蒸馏装置的电脱盐工段, 脱盐切水与脱盐注水间的热量交换是回收低温余热、降低装置能耗的关键环节。传统工艺普遍采用常规管壳式换热器进行此项任务。然而, 在实际长周期运行中, 脱盐切水的复杂成分极易在换热器管束表面形成严重结垢, 导致传热系数迅速衰减、换热效率急剧下降。这会造成两个严重后果: 一是, 脱盐切水冷却不充分, 外排温度超标, 对下游污水生化处理装置的菌群活性造成冲击; 二是, 汽提水升温不足, 导致注入电脱盐罐前需要消耗更多燃料气进行额外加热, 增加了装置能耗。

因此, 开发和应用兼具高效传热与优异抗结垢性能的新型换热设备, 成为炼油企业实现节能降耗、降

本增效的迫切需求。VHEX 高效防垢换热器作为一种对传统管壳式换热器进行深度结构优化的更新换代产品, 声称通过无死区设计、模块化组装和强化传热技术, 能够在提升传热效率 20-40% 的同时, 将清洗周期延长至普通设备的 3-20 倍。VHEX 高效防垢换热器在解决电脱盐污水换热这类易结垢、高能耗问题上具有显著的技术优势和应用价值, 其高效传热、防结垢的特性能够实现显著的降本增效与节能减排。

### 1 VHEX 高效防垢换热器技术原理与项目背景

#### 1.1 VHEX 高效防垢换热器技术特点

VHEX 高效防垢换热器是一种组装式大长径比管壳式换热器。其技术先进性主要体现在以下几个方面:

表 1 关键温度参数改造前后对比汇总表

对比项目	脱盐切水进高效 EC106(°C) 平均	脱盐切水出高效 EC106/冷却后 (°C) 平均	汽提水进高效 EC106(°C) 平均	汽提水出高效 EC106/换热后 (°C) 平均
改造前 (2022.11.30-12.14)	111	39	53	71
改造后第一阶段 (2023.2.11-2.26)	110	24	57	94
改造后第二阶段 (2023.5.17-5.31)	108.73	30.51	58.20	89.73

①被加热物料出口温度高 VHEX 换热技术更接近纯逆流传热，传热温差校正系数 Ft 较小，可以显著提高被加热物料的出口温度，降低烟损，因此具有高效传热的特点；②传热效率高：优化选型，采用专利技术的高效传热技术，对管程和壳程进行强化，提高传热效率。与传统的管壳式换热器相比，传热系数提高 20-40%；③防结垢设计技术：该技术主要是在换热器管程和壳程采用无死区设计技术，Hi-Re 和 3D-Bf 技术配套高精度装配技术，使换热器的抗结垢能力显著提升。

### 1.2 项目背景与改造目标

原 350 万 t/a 重交沥青装置电脱盐系统采用二级电脱盐工艺。汽提水经泵升压后，先与原含盐污水换热器 (EC-2106) 换热，再注入电脱盐罐。一级电脱盐罐的排水经同一台 EC-2106 换热冷却后外排。长期运行中，EC-2106 及后续冷却器因脱盐切水结垢严重，导致换热效率恶化，具体问题表现为：脱盐切水冷却后温度波动大，时常无法稳定满足下游污水装置对进水温度 (目标 20~28°C) 的要求。汽提水换后温度偏低 (平均约 71°C)，增加了后续加热炉的燃料气消耗。循环水消耗量大，运行成本高。需要频繁停车清理，维护工作量大，存在泄漏安全隐患。

因此，本项目改造的核心目标是用 VHEX 高效防垢换热器及配套的高效冷却器替换原有老旧设备，以实现强化换热效果，确保脱盐切水外排温度稳定达标。大幅提高汽提水换后温度，减少原油经过电脱盐罐的温降，从而降低加热炉负荷。提高冷却效率，显著降低循环水消耗量。延长设备运行周期，减少维护，提升装置运行安全性。

## 2 项目改造方案与实施

项目于 2023 年 1 月 16 日至 2 月 2 日实施，建设周期 18 天。具体方案为：拆除装置二层平台南侧的原碱液罐，利旧并加固原有基础横梁，以满足新设备的安装承载要求。将 VHEX 高效换热器安装于原碱液罐位置，将 VHEX 高效冷却器安装于原柴油 / 新鲜水换热器位置，并对脱盐切水、汽提水及循环水的工艺管线进行对应连接改造。项目总投资约 106.87 万元，其中设备费 75.6 万元，材料及工艺包费 26.27 万元，施工费约 5 万元。新系统于 2023 年 2 月 10 日正式投用。

### 3 改造前后运行数据对比与分析

为全面、客观评价改造效果，项目组分别采集了

改造前 (2022 年 11 月 30 日至 12 月 14 日)、改造后第一阶段 (2023 年 2 月 11 日至 2 月 26 日，冬季及初投运期) 和第二阶段 (2023 年 5 月 17 日至 5 月 31 日，夏季稳定运行期) 三个时间段的详细运行数据，涵盖温度、流量及燃料消耗等关键参数。

#### 3.1 主要工艺温度对比分析

分析脱盐切水冷却效果，改造效果极为显著。脱盐切水外排 (冷却后) 温度从改造前平均 39°C 大幅降低。第一阶段 (冬季)，通过调节高效冷却器循环水阀，可将平均温度精确控制在 24°C 左右，完全满足下游污水装置 20~28°C 的工艺要求，解决原系统冷却不足的核心问题。第二阶段 (夏季)，尽管面临循环水来水温度高达平均 29.6°C 的严苛条件，且冷却器已满负荷运行，脱盐切水平均外排温度仍能维持在 30.51°C，与下游确认，此温度在夏季工况下仍可接受，证明 VHEX 系统在极端条件下的稳定性和强大冷却能力。

汽提水加热效果：汽提水换热后温度的提升是项目节能的关键。该温度从改造前平均仅 71°C，跃升至第一阶段平均 94°C 和第二阶段平均 89.73°C，升温幅度分别达到 37°C 和约 31.5°C。这意味着从高温脱盐切水中回收的热量大大增加。据现场测算，这部分回收的热量直接导致原油经过电脱盐罐的温降从改造前的约 7°C，锐减至改造后的 2~2.2°C。

#### 3.2 循环水单耗对比分析

经现场实际测算，同时剔除冬季供暖期对于循环水的调整，采集非供暖期数据对比，改造前循环水单耗 6.36。

改造后第一阶段采集数据期间循环水单耗 5.76，差值 0.6，即每加工一吨原油节省了 0.6t 循环水，按照第一阶段采集期间装置 220t/h 的加工量计算，则可降低循环水量  $220 \times 0.6 = 132$  (t/h)。满足降低循环水量 55t/h。

改造后第二阶段采集数据期间循环水单耗 4.28，差值 2.08，即每加工一吨原油节省了 2.08t 循环水，按照目前装置加工量 230t/h 计算，可降低循环水量  $230 \times 2.08 = 478.4$  (t/h)。满足降低循环水量 55t/h。

#### 3.3 燃料气单耗对比分析

##### 3.3.1 第一阶段采集期间

改造前 2022 年 11 月 30 日至 12 月 14 日装置加工原油 76416t，耗用燃料气 587036.4 方，燃料气单

耗  $7.682\text{m}^3/\text{t}$ ; 改造后第一阶段采集期间 2023 年 2 月 11 日至 2 月 26 日装置加工原油 92106t, 耗用燃料气 696237.4 方, 燃料气单耗  $7.559\text{m}^3/\text{t}$ 。

改造后燃料气单耗较改造前降低约  $0.123\text{m}^3/\text{t}$ , 按照年加工计划 189.25 万 t、燃料气最新单价 3.6 元/方计算, 每年节省燃料气费用 837999 元。

改造后, 每加工一吨原油节省了 0.6t 循环水, 2023 年预计加工原油 189.25 万 t, 则将节省循环水量  $0.6 \times 189.25 = 113.55$  万 t, 按照循环水最新单价 0.32 元/t 计算, 每年节省循环水费用  $0.32 \times 113.55 = 36.336$  万元。

此次改造, 共计每年可节省  $837999 + 363360 = 120.13$  (万元)。

### 3.3.2 第二阶段采集期间

改造前 2022 年 11 月 30 日至 12 月 14 日装置加工原油 76416t, 耗用燃料气 587036.4 方, 燃料气单耗  $7.682\text{m}^3/\text{t}$ ; 改造后第二阶段采集期间 2023 年 5 月 17 日至 5 月 31 日装置加工原油 82800t, 耗用燃料气 635405 方, 燃料气单耗  $7.673\text{m}^3/\text{t}$ 。

## 4 项目经济效益与节能效益综合评价

### 4.1 经济效益分析

改造后燃料气单耗较改造前降低约  $0.009\text{m}^3/\text{t}$ , 按照年加工计划 189.25 万 t、燃料气最新单价 3.6 元/方计算, 每年节省燃料气费用 61317 元。

改造后, 每加工一吨原油节省了 2.08t 循环水, 2023 年预计加工原油 189.25 万 t, 则将节省循环水量  $2.08 \times 189.25 = 393.64$  万 t, 按照循环水最新单价 0.32 元/t 计算, 每年节省循环水费用  $0.32 \times 393.64 = 125.96$  万元。

此次改造, 共计每年可节省  $6.13 + 125.96 = 132.09$  (万元)。

### 4.2 节能与减排效益分析

#### 4.2.1 节能效益

第一阶段采集期间。通过改造, 停用原含盐污水换热器和冷却器, 投用 VHEX 高效防垢换热器、冷却器, 每年可节省燃料气耗用 232777 方。折算成标油  $= (232777 \times 0.75 / 1000) \times 950\text{kg} = 165853\text{kg}$ , 折算成标煤  $165853 / 0.7 / 1000 = 236.93\text{t}$ 。同时, 每年可节省循环水量 1135500t, 折算成标油  $1135500 \times 0.1 = 113550\text{kg}$ , 折算成标煤  $= 113550 / 0.7 / 1000 = 162.21\text{t}$ 。

综上, 则改造后每年共节省标煤  $236.93 + 162.21 = 399.14\text{t}$ 。

第二阶段采集期间。通过改造, 停用原含盐污水换热器和冷却器, 投用 VHEX 高效防垢换热器、冷却器, 每年可节省燃料气耗用 17032.5 方。折算成标油  $= (17032.5 \times 0.75 / 1000) \times 950\text{kg} = 12135.65\text{kg}$ , 折算成标煤  $12135.65 / 0.7 / 1000 = 17.33\text{t}$ 。同时, 每年可节省循环水量

3936400t, 折算成标油  $3936400 \times 0.1 = 393640\text{kg}$ , 折算成标煤  $= 393640 / 0.7 / 1000 = 562.34\text{t}$ 。

综上, 则改造后每年共节省标煤  $17.33 + 562.34 = 579.67\text{t}$ 。

#### 4.2.2 经济效益

通过改造, 停用原含盐污水换热器和冷却器, 投用 VHEX 高效防垢换热器、冷却器, 每年可节省燃料气费用约  $(818462.39 + 61317) / 2 = 439889.69$  元, 每年节省循环水费用  $(363360 + 1259600) / 2 = 811480$  元, 共计节省 1251369.69 元, 且产生持续稳定的经济效益。

第一阶段采集期间应污水装置要求, 外送脱盐切水温度控制  $25^\circ\text{C}$  左右, 以保证污水装置菌群活跃度; 第二阶段采集期间, 受外界气温影响, 循环水来水温度为  $29.6^\circ\text{C}$  左右, 且高效冷却器循环水侧已全部投用, 含盐污水外排温度平均  $30.51^\circ\text{C}$ , 在一定程度上限值了高效换热器的能效发挥。

## 5 结论

经济效益与投资回报极佳: 年均节约运行费用约 125 万元, 项目投资回收期仅 10 个月, 为典型的“短平快”优质节能技改项目。同时, 年节能量达 579.67t 标煤, 实现了经济效益与节能减排的双赢。

能效提升显著: 改造实现项目设定的所有目标: 脱盐切水外排温度可控且达标; 汽提水出口温度提升超过  $20^\circ\text{C}$ ; 原油经电脱盐罐温降减少约  $5^\circ\text{C}$ ; 循环水单耗最大降幅超 30%。系统综合能效得到质的飞跃。

技术验证成功: VHEX 高效防垢换热器及冷却器在 350 万 t/a 重交沥青装置电脱盐系统的成功应用, 彻底解决了原管壳式换热器因结垢导致的效率低下、运行不稳问题。超过半年的运行数据表明, 其高效传热与卓越防垢性能得到了工程实践的充分验证。

### 参考文献:

- [1] 寿建祥, 陈伟军. 常减压蒸馏装置技术手册 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2016.
- [2] 马秉骞. 炼油设备基础知识 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2019 (2024 重印).
- [3] 王宾. 常减压蒸馏装置技术问答 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2023.
- [4] 杨允, 闫文瑞, 殷卫峰, 等. 一种高效防垢换热器及工业余热回收系统: 中国, CN202020164753.7 [P]. 2020-09-25.
- [5] VHEX 微分换热器 [Z]. 石油化工设备管理网, 2023-11-27.

### 作者简介:

崔亚续 (1991-), 男, 河北沧州肃宁人, 本科, 助理工程师, 研究方向: 常减压蒸馏工艺。