

基于有限元模拟分析重沸器管束失效行为

宋成立¹, 冯泉², 夏明明², 付安庆¹, 武刚¹, 刘新宝³

(1. 中国石油集团石油管工程技术研究院 石油管材及装备材料服役行为与结构安全国家重点实验室, 西安 710077; 2. 中国石油塔里木油田分公司, 新疆 库尔勒 841000; 3. 西北大学 化工学院, 西安 710069)

摘要: **目的** 针对某重沸器在生产过程中发生的管束泄漏问题, 开展失效行为及原因分析, 为此类重沸器的失效控制提供理论依据。**方法** 基于此类管束的服役工况和生产标准, 通过化学成分分析、金相组织检验、腐蚀产物分析等理化检验, 以及有限元数值模拟的方法, 综合分析重沸器管束材料性能、腐蚀机理和温度场及流场的特征。**结果** 该重沸器管束理化检验结果表明, 其化学成分符合相关标准的要求, 金相组织未见异常, 其外壁穿孔处堆积了一层疏松的腐蚀产物, 其化学成分组成为 C、O、S、Fe 和少量 Cl, 物相组成为 Fe_3O_4 、 Fe_2O_3 、 FeCO_3 和 CaSO_4 。流场有限元模拟结果表明, 壳程凝析油的流速整体较低, 存在流体滞留现象 (约 $1.5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$)。温度场有限元模拟结果表明, 壳程存在一处局部高温区 (约 $105 \sim 112 \text{ }^\circ\text{C}$)。**结论** 该重沸器管束失效行为是在局部高温区和流体滞留区的管束外壁发生严重的 CO_2 局部腐蚀, 较高含量的 Cl^- 穿透 FeCO_3 腐蚀产物膜促进点蚀而进一步加剧了管束腐蚀的进程, 进而导致管束发生外腐蚀穿孔泄漏。

关键词: 重沸器; 管束; 腐蚀; 穿孔; 失效分析; 有限元分析

中图分类号: TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)05-0009-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.05.002

Analysis on Failure Behavior of Reboiler Tube Bundle Based on Finite Element Simulation

SONG Cheng-li¹, FENG Quan², XIA Ming-ming², FU An-qing¹, WU Gang¹, LIU Xin-bao³

(1. State key Laboratory for Performance and Structure Safety of Petroleum Tubular Goods and Equipment Materials, CNPC Tubular Goods Research Institute, Xi'an 710077, China; 2. Petro China Tarim Oilfield Company, Koral 841000, China; 3. School of Chemical Engineering, Northwest University, Xi'an 710069, China)

ABSTRACT: The work aims to analyze the failure behavior and cause for the leaking problems of tube bundle during the production process of reboiler and then provide theoretical basis for the failure control of such reboiler. Based on production standards and service conditions of the faulty tube bundle, material properties, corrosion mechanism and flow and temperature distribution characteristics were analyzed through chemical composition analysis, metallographic structure analysis, corrosion products analysis and finite element analysis. From the physiochemical test results, the chemical composition of tube bundle was in conformity with relevant standards, and no abnormality was detected in metallographic structure. However, a layer of loose corrosion products was accumulated at the perforated outer wall and the chemical elements included C, O, S, Fe, and a small

收稿日期: 2018-11-24; 修订日期: 2019-03-04

Received: 2018-11-24; Revised: 2019-03-04

基金项目: 国家“十三五”国家重点研发计划课题 (2017YFC0805804)

Fund: National Key Research and Development Project of the 13th Five-year Plan (2017YFC0805804)

作者简介: 宋成立 (1989—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为石油管材腐蚀与防护及失效分析。邮箱: songcl@cnpc.com.cn

Biography: SONG Cheng-li (1989—), Male, Master, Engineer, Research focus: corrosion and protection of tubular goods and failure analysis. E-mail: songcl@cnpc.com.cn

amount of Cl. Besides, the main phase compositions were Fe_3O_4 , Fe_2O_3 , FeCO_3 and CaSO_4 . Based on the result of finite element simulation of flow distribution, the flow rate of condensate oil in shell side was generally low and there was fluid retention phenomenon (about 1.5×10^{-4} m/s). In addition, a local high-temperature zone (about 105~112 °C) on the shell side was found according to finite element simulation of temperature distribution. The failure behavior of the reboiler tube bundle is serious local CO_2 corrosion caused to the outer wall of tube bundle in local high-temperature and fluid retention areas. The Cl^- with high concentration penetrates corrosion product film (FeCO_3) and promotes pitting corrosion, thus ultimately leading to external corrosion perforation and leaking problem.

KEY WORDS: reboiler; tube bundle; corrosion; perforation; failure analysis; finite element analysis

近年来,由于对油气品质和节能环保提出了更严的要求,高效大型换热器的需求随之旺盛^[1]。然而,随着油气开采的深入,综合含水量不断上升,且常伴有 H_2S 、 CO_2 等酸性气体,导致换热器内腐蚀环境更加苛刻^[2-3]。同时,换热器类型较多且结构复杂,壳程流动是一个繁杂的三维流动过程,与流体间的热量交换也是耦合在一起的,使得流速流态和温度分布直接影响管束及壳体的腐蚀过程^[4-5]。现有对换热器流场和温度场的计算通常采用数值仿真模拟的方法,而且仿真模拟主要集中于中、小型规模的换热器^[6],而本文将针对西部某油田发生泄漏的大型 U 型管式重沸器(一种壳程带有蒸发空间的卧式换热器),通过理化检验和流场及温度场的有限元模拟,综合研究其失效行为,为此类重沸器的失效控制与预防提供理论依据。

1 失效样品及实验方法

1.1 失效样品

该重沸器在油气处理单元的原稳装置中与分馏塔合用,对原油进行换热,以回收其中溶解的轻组分($\text{C}_1\text{-C}_4$ 烃),从而降低原油的蒸气压,使原油在集输、储存中的蒸发损耗降低,并可以显著提高原油输送的安全性^[7-8]。该重沸器由壳体、U 型换热管束、管板、管箱以及挡板等多个部件组成,长度为 9.93 m,直径为 1.70 m,运行时间 1.2 a。重沸器管程介质是导热油(型号:道达尔 3120),壳程介质是凝析油(水的体积分数为 2%, CO_2 气压为 0.08 MPa)。U 型管束共计 741 对,其材质为 10[#]钢,规格为 $\phi 19 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$,制造标准为 GB 9948—2013《石油裂化用无缝钢管》。对管束进行水压试验,显示 14 对管束穿孔,且发现穿孔集中在第 4 个与第 5 个挡板之间的部位且靠近中部。管束穿孔附近附着了一层黑色的油污和疏松的腐蚀产物(见图 1),局部也有腐蚀坑,但对其纵向剖开后,发现内壁光滑,且未见腐蚀痕迹。

1.2 实验方法

本文将对穿孔的管束开展材质检验和腐蚀产物分析,同时考虑工况(温度和流速)对腐蚀的影响,



图 1 管束穿孔形貌

Fig.1 Perforated photograph of tube bundle

进一步开展流场和温度场的分析。

1.2.1 理化检验

依据 ASTM A751-14a 标准,采用 ARL4460 直读光谱仪对失效管束取样进行化学成分分析。依据标准 GB/T 13298—2015、GB/T 6394—2002 和 GB/T 10561—2005,采用 MEF4M 金相显微镜及图像分析系统,对失效管束的管体和腐蚀坑处金相组织进行检测分析。利用 TESCAN VEGA II 型扫描电子显微镜(SEM)及其自带的能谱分析仪(EDS),对管束穿孔形貌和腐蚀产物进行分析,并利用 D8-advance 型 X 射线衍射仪对穿孔处腐蚀产物的物相组成进行分析。

1.2.2 有限元模拟

利用 COMSOL 有限元软件,模拟实际工况条件,对该重沸器进行全尺寸 3D 建模,并进行网格划分、材料参数和边界条件加载以及有限元计算,获得壳体内部的流场和温度场。

2 结果及分析

2.1 理化检验结果

2.1.1 化学成分分析

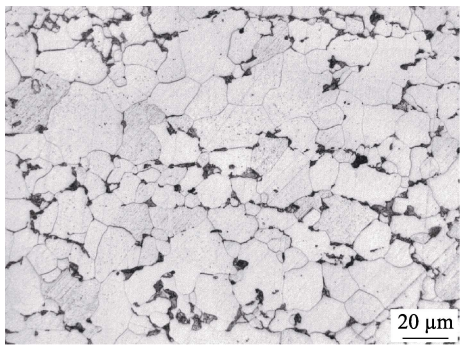
图 1 所示管束的化学成分分析结果见表 1。由表 1 可知,管束化学成分符合 GB 9948—2013 对 10[#]钢的要求,这表明管束的化学成分是合格的。

表 1 化学成分分析结果
Tab.1 Results of chemical composition analysis

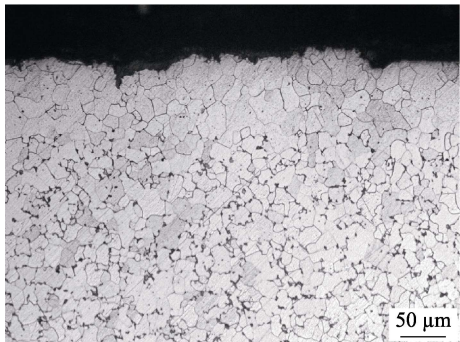
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Cu
Tube bundle	0.094	0.2	0.43	0.012	0.0062	0.016	<0.0009	0.0058	0.0013	0.0081
GB 9948—2013	0.07~0.13	0.17~0.37	0.35~0.65	≤0.025	≤0.015	≤0.15	≤0.15	≤0.25	≤0.08	≤0.20

2.1.2 金相组织分析

图 1 所示管束的管体和穿孔处的组织均为铁素体+珠光体（见图 2），非金属夹杂物为 A0.5、B0.5、D0.5，晶粒度为 8.0 级，表明管束的管体和穿孔处的金相组织均未见异常。



a 管体



b 穿孔处

图 2 管束金相组织

Fig.2 Metallographic structure of tube bundle:
a) tube body; b) perforation

2.1.3 微观形貌及物相分析结果

图 3 是管束穿孔处腐蚀产物的微观形貌。由图 3 可知，腐蚀产物堆积在管束表面，其形貌凹凸不平，存在微孔，且有裂缝，表明腐蚀产物比较疏松。腐蚀产物的能谱分析结果如表 2 所示。由表 2 可知，腐蚀产物的主要化学成分为 C、O、S、Cl 和 Fe。此外，腐蚀产物的物相分析结果显示，其组成为 Fe₃O₄、Fe₂O₃、FeCO₃ 和 CaSO₄，如图 4 所示。

2.2 有限元模拟结果

2.2.1 重沸器几何模型构建

该重沸器几何建模如图 5 所示。其中，重沸器外

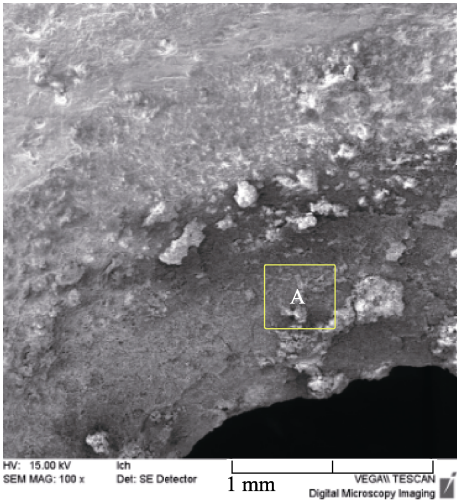


图 3 管束穿孔处的 SEM 照片

Fig.3 SEM photographs of perforated tube bundle

表 2 管束表面的 EDS 分析结果
Tab.2 EDS analysis results of tube bundle

	C	O	Cl	S	Na	Ca	K	Fe
Area A	17.10	41.43	0.74	1.21	1.00	1.55	0.53	36.43

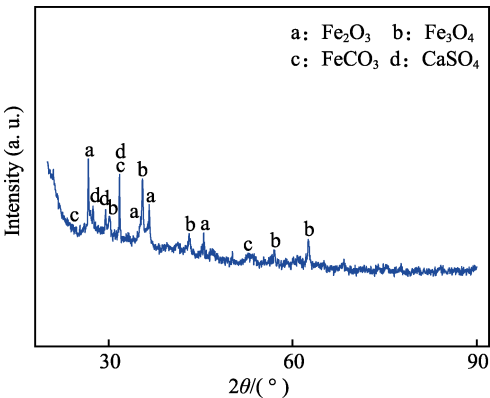


图 4 管束腐蚀产物的 XRD 分析结果

Fig.4 XRD analysis results of corrosion products of tube bundle

壁面（厚度 24 mm）、挡板（厚度 16 mm）、导热油出/入口管（厚度 14 mm）、凝析油出/入口管（厚度 12 mm）以及换热管束（厚度 2 mm）等结构均具有薄壁特征，同时其材料为强导热的结构钢，因而可利用 COMSOL 软件中的薄壳模型传热建模技术对这些结构进行建模，即几何厚度为零，而只需指定相应厚度用于传热计算^[9-10]。

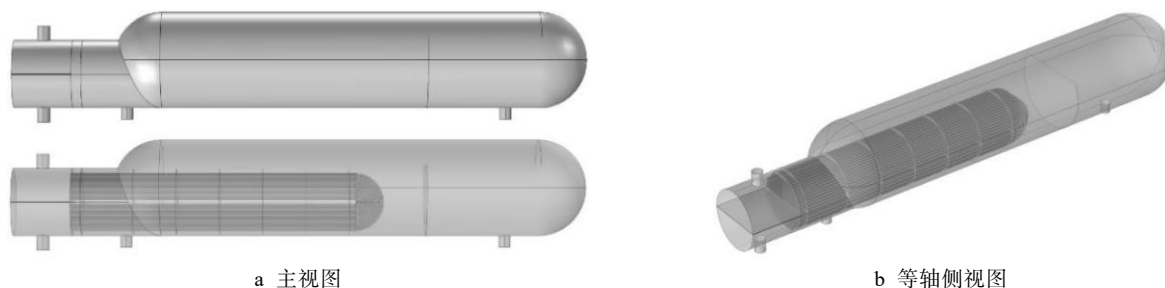


图 5 重沸器 3D 几何模型

Fig.5 Three-dimensional geometric model diagram of reboiler: a) front view; b) isometric side view

此外,为了简化计算模型,利用相似性原理,保证所建模型和实际重沸器具有相似的流体运动模式和相同的换热效果^[11],则需满足雷诺数 Re 相等、普朗特数 Pr 相等以及各环节的热流量 Φ 相等(包括导热油到管束内壁的热流量传递、管束内壁到外壁的热流量传递和管束外壁到凝析油的热流量传递),最终构建的 3D 模型中管束从实际的 741 对、 $\phi 19$ mm 换热管束简化成了 168 对、 $\phi 42$ mm 的 U 型管束。

2.2.2 重沸器计算模型网格划分

利用 COMSOL 软件自带网格划分模块与边界层网格划分技术,对图 5 所示的重沸器模型剖分后的网格(几何顶点单元 5881 个,几何棱边单元 142 819

个,边界层单元 588 077 个,体网格总数 2 610 841 个,网格质量 0.084 39)如图 6 所示。同时,对温度梯度可能出现较大变化的界面区域进行边界层网格细化(设置界面处的边界层数为 2,具体如图 6 中圆圈所示),使之更加接近实际,以保证其温度场的计算精度。

2.2.3 材料物性与边界条件加载及流体计算设置

依据实际运行工况,设置该重沸器中壳程和管程流体的相关物性参数,如表 3 所示。同时,设置凝析油的入口速度为 0.8 m/s,温度为 64 °C;导热油的入口速度为 0.35 m/s,温度为 142 °C。此外,所有流体均选用非等温条件下的 $k-\epsilon$ 湍流模型^[12]。

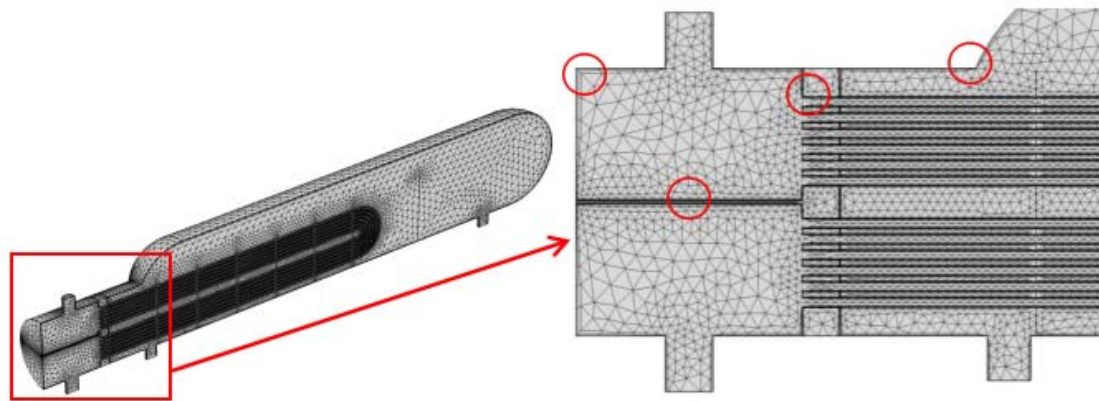


图 6 重沸器计算模型网格划分结构

Fig.6 Compute model grid partitioning structure of reboiler

表 3 重沸器壳程和管程流体相关物性参数

Tab.3 Physical parameters of shell side and pipe side of reboiler

Medium	Density $\rho /$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Specific heat $C_p / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	Kinematic viscosity $\nu / (\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	Dynamic viscosity $\mu / (\text{Pa} \cdot \text{s})$	Coefficient of heat conductivity $\lambda / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
Condensate oil	777.5	2292	1.659	1.2899	0.1115
Conduction oil	877	2084	3.48	3.052	0.109

2.2.4 重沸器流场分析结果

经过有限元计算后,重沸器 3D 模型流场速度云图如图 7 所示,其中可以看出,最大速度为 0.96 m/s,最小速度只有 1.02×10^{-7} m/s,说明存在滞留区。图 8 为第四个与第五个挡板中间截面的流场云图,图 9 分

别给出了图 8 中沿黄色“→”(即径向方向)和中心“⊗”(即水平轴向,也即图 7 中的黄色箭头)方向上的速度变化曲线。由图 9 可知,在第四个与第五个挡板之间且靠近中心的换热管区域的凝析油流速仅为 1.5×10^{-4} m/s 左右(红色圆圈标记处)。

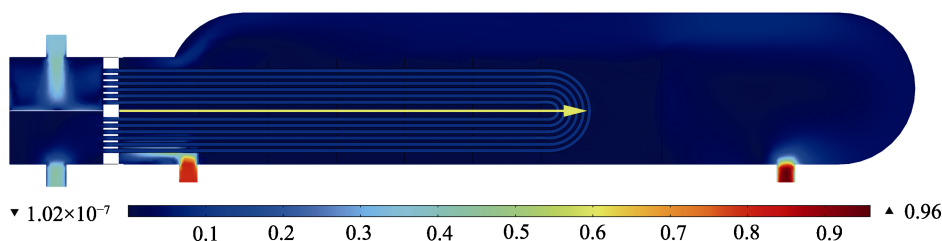


图 7 重沸器流场速度云图

Fig.7 Cloud chart of Flow distribution of reboiler

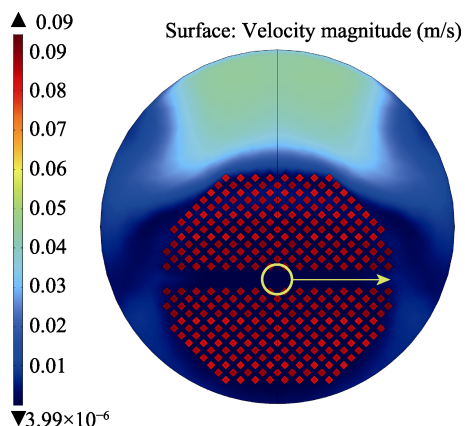


图 8 重沸器第四个与第五个挡板中间截面的流场云图
Fig.8 Cloud chart of flow distributions between the forth baffle and the fifth baffle of reboiler

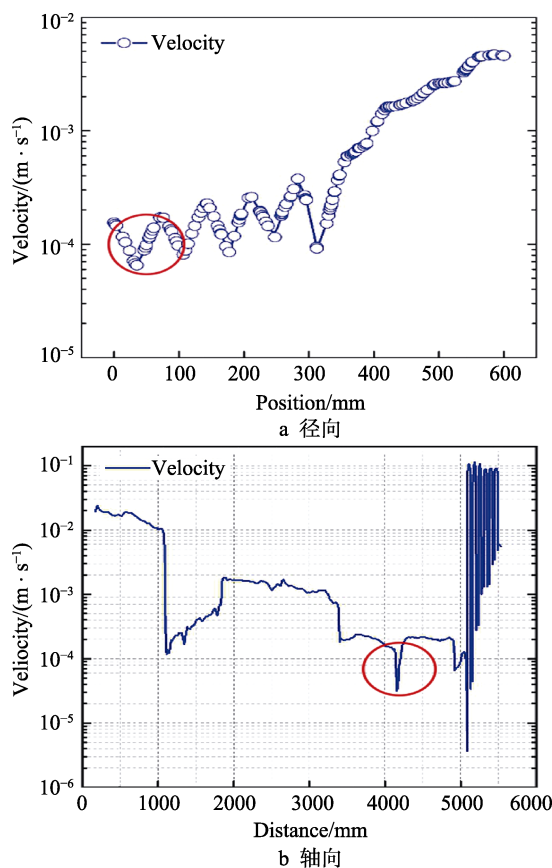


图 9 凝析油沿图 8 中所示方向流速变化图
Fig.9 Flow rate variation diagram of condensate oil following the arrow shown in Fig.8:
a) radial direction; b) axial direction

2.2.5 重沸器温度场分析结果

重沸器管束表面的温度场云图如图 10 所示。由图 10 可知, 在第四个与第五个挡板之间的区域(黄色圆圈标注处)出现了局部高温。图 11a 为第四个与第五个挡板中间截面的温度场云图, 图 11b 为实际穿孔点截面示意图, 由此可知, 穿孔点集中在局部高温区域。图 12 给出了图 11 中沿红色“→”(即径向方向)和中心“⊗”(即水平轴向, 也即图 7 中的黄色箭头)方向上的温度变化情况。由图 12 可知, 第四个与第五个挡板间的区域刚好位于凝析油高温区(红色圆圈标记处, 温度大约 105~112 °C), 进而证实了上述局部高温现象。

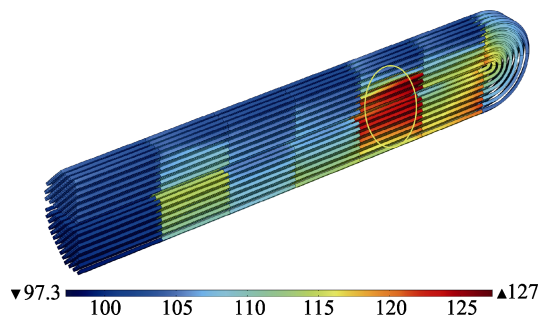


图 10 管束表面温度场分布云图
Fig.10 Cloud chart for temperature distributions of the surface of tube bundle

2.3 综合分析及讨论

由理化性能检测结果可知, 重沸器管束的化学成分符合 GB 9948—2013 对 10#钢的要求, 金相组织未见异常。这表明重沸器管束的材料性能未见异常。宏观特征分析可以看出, 管束外壁附着了一层疏松的腐蚀产物, 内壁光滑, 未见腐蚀, 且穿孔呈“底小口大”的锥状腐蚀坑, 由此可知管束发生了局部外腐蚀穿孔。

同时, 微观分析表明, 管束外壁发生明显的局部腐蚀, 腐蚀产物疏松, 主要是 CO_2 的腐蚀产物 FeCO_3 ^[13] (见图 4)。此外, 重沸器温度场显示, 在第四个与第五个挡板之间的区域存在局部高温区(大约 105~112 °C), 而有研究表明碳钢的 CO_2 腐蚀根据温度对腐蚀特性的影响划分为三类: (1) 温度 < 60 °C, 腐蚀产物膜 FeCO_3 软而无附着力, 金属表面光滑, 产生均匀腐蚀; (2) 温度在 100 °C 左右, 腐蚀产物厚而

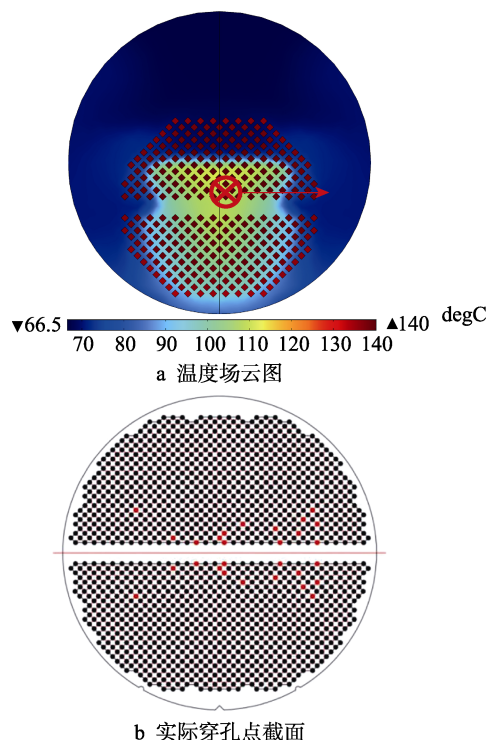


图 11 第四个与第五个挡板中间截面的温度场云图
Fig.11 Cloud chart for temperature distributions between the forth baffle and the fifth baffle of reboiler: a) temperature distributions; b) cross section of actual perforated points

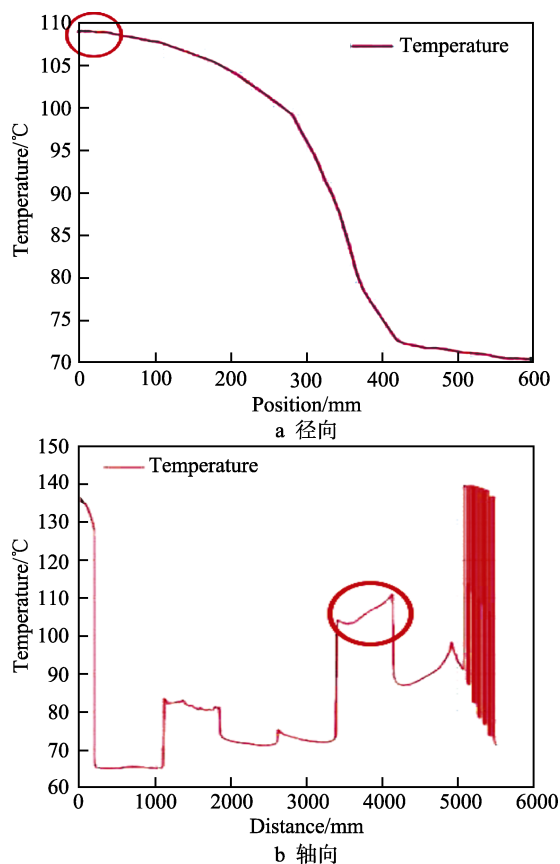


图 12 凝析油沿图 11a 中所示方向流速变化图
Fig.12 Temperature variation diagram of condensate oil following the arrow shown in Fig.11a: a) radial direction; b) axial direction

松, 腐蚀速率迅速增大, 产生严重的局部腐蚀;
(3) 温度大于 150 °C, 产生细致、紧密、附着力强的 FeCO_3 和 Fe_3O_4 膜, 腐蚀速率降低^[14-15]。重沸器流场显示, 壳程凝析油的流速整体较低, 尤其在第四个与第五个折流板之间, 凝析油处于滞流状态, 将有利于水相吸附在管束外壁面(凝析油含有 2% 的水), 由此提供了电化学腐蚀最基本的条件——水的存在。由此可知, 该重沸器第四个与第五个折流板之间的管束发生了严重的 CO_2 腐蚀, 与管束实际穿孔泄漏的位置一致。

此外, 对壳程介质中水相化验结果显示, Cl^- 质量浓度高达 $6.85 \times 10^4 \text{ mg/L}$, 而高含量的 Cl^- 极易穿透疏松的 FeCO_3 膜而诱发点蚀, 当点蚀坑形成后, 液相中的 Cl^- 进入点蚀坑内, 形成闭塞电池, 导致蚀孔的发展, 直至穿孔^[16], 穿孔处的腐蚀产物微观分析也发现存在 Cl 元素。

因此, 该重沸器管束的失效行为是: 局部高温区和流体滞留区的管束外壁发生严重的 CO_2 局部腐蚀, 较高含量的 Cl^- 穿透 FeCO_3 膜促进点蚀而进一步加剧了管束腐蚀的进程, 进而导致管束外壁发生外腐蚀穿孔泄漏。

3 结论及建议

1) 该重沸器管束的化学成分均符合 GB 9948—2013 对 10[#] 钢的要求, 其金相组织未见异常。

2) 该重沸器管束穿孔由局部外腐蚀引起, 腐蚀产物的化学成分主要为 C、O、S、Fe 和少量 Cl, 物相组成为 Fe_3O_4 、 Fe_2O_3 、 FeCO_3 和 CaSO_4 。

3) 有限元模拟分析表明, 该重沸器的第四个与第五个折流板间的区域存在局部高温和流体滞留, 是导致管束外表面局部腐蚀甚至穿孔的重要因素。

4) 该重沸器管束的失效行为是: 局部高温区和流体滞留区的管束外壁发生严重的 CO_2 局部腐蚀, 较高含量的 Cl^- 穿透 FeCO_3 膜促进点蚀而进一步加剧了管束腐蚀的进程, 进而导致管束外壁发生外腐蚀穿孔泄漏。

5) 建议制造商改进重沸器结构设计, 使内部流速和温度分布更合理, 同时选择耐蚀性更好的管束, 如 304、316、316L 不锈钢。

参考文献:

- [1] 陈永东, 陈学东. 我国大型换热器的技术进展[J]. 机械工程学报, 2013, 49(10): 134-143.
CHEN Yong-dong, CHEN Xue-dong. Technology development of large-scale heat exchanger in china[J]. Journal of mechanical engineering, 2013, 49(10): 134-143.
- [2] 李磊, 邝献任, 姬蕊, 等. 某油田 316L/L360NB 机械式双金属复合管失效行为及原因分析[J]. 表面技术, 2018,

- 47(6): 224-231.
LI Lei, KUANG Xian-ren, JI Rui, et al. Analysis on failure behavior and reason of 316L/L360NB mechanically bimetallic composite pipes used in an oilfield[J]. Surface technology, 2018, 47(6): 224-231.
- [3] 路民旭, 白真权, 赵新伟, 等. 油气采集运输中的腐蚀现状及典型案例[J]. 腐蚀与防护, 2002, 23(3): 105-116.
LU Min-xu, BAI Zhen-quan, ZHAO Xin-wei, et al. Actuality and typical cases for corrosion in the process of extraction, gathering, storage and transmission for oil and gas[J]. Corrosion & protection, 2002, 23(3): 105-116.
- [4] 卜英南, 陈祥彬, 张莹莹, 等. 折流板结构对换热器壳程流动和传热性能的影响[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2018, 38(5): 72-76.
BU Ying-nan, CHEN Xiang-bin, ZHANG Ying-ying, et al. Shell-side fluid flow and heat transfer in curved baffle heat exchanger [J]. Journal of Liaoning Shihua University, 2018, 38(5): 72-76.
- [5] 王为良. 管壳式换热器壳侧流场数值模拟[D]. 北京: 中国石油大学, 2010: 2-6.
WANG Wei-liang. Numerical simulation of shell-side fluid-flow in the shell-and-tube heat exchanger [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2010: 2-6.
- [6] 付磊, 曾焱林, 唐克伦, 等. 管壳式换热器壳程流体流动与传热数值模拟[J]. 压力容器, 2012, 29(5): 36-41.
FU Lei, ZENG Yan-lin, TANG Ke-lun, et al. Numerical simulation study of shell-side fluid flow and heat transfer in shell-and-tube heat exchanger[J]. Pressure vessel, 2012, 29(5): 36-41.
- [7] 王秋灵. 再生塔底重沸器的腐蚀和对策[J]. 腐蚀与防护, 2004(10): 432-433.
WANG Qiu-ling. Corrosion and counter measures of reboiler in regenerator[J]. Corrosion & protection, 2004 (10): 432-433.
- [8] HAN C, ZOU L. Study on the heat transfer characteristics of a moderate-temperature heat pipe heat exchanger[J]. International journal of heat & mass transfer, 2015, 91: 302-310.
- [9] DIAO Y, ZHANG J, ZHAO W Y Y. Experimental study on the heat recovery characteristic of a plate heat pipe heat exchanger in room ventilation[J]. HVAC & R research, 2014, 20(7): 828-835.
- [10] LAUBSCHER R, DOBSON R T. Theoretical and experimental modelling of a heat pipe heat exchanger for high temperature nuclear reactor technology[J]. Applied thermal engineering, 2013, 61(2): 259-267.
- [11] YONG G L, YA L H, RUI L, et al. Effects of baffle inclination angle on flow and heat transfer of a heat exchanger with helical baffles[J]. Chemical engineering and processing, 2008(47): 2336-2345.
- [12] LAUNDER B E, SPALDING D B. Lectures in mathematical models of turbulence[M]. London: Academic Press, 1972: 355-392.
- [13] 王春泉. 雅克拉气田集输管材的 CO₂ 腐蚀研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2009: 7-8
WANG Chun-quan. Study on the CO₂ corrosion of the gathering pipeline for gas in Yakela gas field[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2009: 7-8
- [14] 张学元, 王凤平, 陈卓元, 等. 油气开发中二氧化碳腐蚀的研究现状和趋势[J]. 油田化学, 1997(2): 95-101.
ZHANG Xue-yuan, WANG Feng-ping, CHEN Zhuo-yuan, et al. A review on carbon dioxide corrosion of steel in aqueous media for oilfield chemical engineers[J]. Oilfield chemistry, 1997(2): 95-101.
- [15] 肖雯雯, 宋成立, 白真权, 等. 油田地面集输管道腐蚀穿孔风险分析[J]. 油气田地面工程, 2017, 36(4): 81-85.
XIAO Wen-wen, SONG Cheng-li, BAI Zhen-quan, et al. Risk analysis on surface gathering pipeline corrosion in oil fields [J]. Oil-gas field surface engineering, 2017, 36(4): 81-85.
- [16] 陈长风, 路民旭, 赵国仙, 等. 温度、Cl⁻浓度、Cr 元素对 N80 钢 CO₂ 腐蚀电极过程的影响[J]. 金属学报, 2003, 39(8): 848-854.
CHEN Chang-feng, LU Min-xu, ZHAO Guo-xian, et al. Effects of temperature, Cl⁻ concentration and Cr on electrode reactions of CO₂ corrosion of N80 steel[J]. Acta metallurgica sinica, 2003, 39(8): 848-854.