

新型碳塑管壳式海水换热器换热特性实验研究

赵玉莹, 李绪泉*, 付泽正, 张亚丽, 龚鸣禹, 于慧俐

(青岛理工大学 环境与市政工程学院, 青岛 266525)

摘要: 在海水源热泵中, 金属管壳式换热器存在易发生管束腐蚀的问题, 而塑料管壳式换热器又存在换热性能较差的问题, 为此提出一种新型碳塑管壳式海水换热器。对碳塑管壳式换热器进行设计计算和实验研究, 实验结果表明, 在相同工况下碳塑管壳式换热器的传热系数均大于普通塑料管壳式换热器的传热系数。在冷水流量一定时, 碳塑管壳式换热器传热系数随热水进口温度的升高而增大; 在热水进口温度保持不变的情况下, 冷水流量越大, 传热系数和壳程压降越大, 欧拉数则越小; 同时增大热水进口温度和冷水流量对碳塑管壳式换热器传热系数有着显著提高的效果。研究成果可为碳塑管壳式换热器的实际应用提供理论支持和技术指导。

关键词: 碳塑; 换热特性; 管壳式换热器; 传热系数; 压降

中图分类号: TK172

文献标志码: A

文章编号: 1673-4602(2024)06-0095-07

Experimental study on the heat transfer characteristics of new-type carbon-plastic shell and tube seawater heat exchanger

ZHAO Yuying, LI Xuquan*, FU Zezheng, ZHANG Yali, GONG Mingyu, YU Huili

(School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

Abstract: In the seawater source heat pump, metal shell and tube heat exchanger has the problem of tube bundle corrosion, and plastic shell and tube heat exchanger has the problem of poor heat transfer performance, so a new carbon-plastic shell and tube seawater heat exchanger is proposed in this study. The design calculation and experimental study of carbon-plastic shell and tube heat exchanger were carried out, and the experimental results show that the heat transfer coefficient of carbon-plastic shell and tube heat exchanger under the same working condition is greater than that of ordinary plastic heat exchanger. When the cold water flow rate is certain, the heat transfer coefficient of carbon-plastic shell and tube heat exchanger increases with the increase of hot water inlet temperature; under the condition that the hot water inlet temperature is kept constant, the larger the cold water flow rate is, the larger the heat transfer coefficient and the shell pressure drop is, and the Eu is reduced; increasing the hot water inlet temperature and the cold water flow rate simultaneously has a significant effect on the heat transfer coefficient of carbon-plastic shell and tube heat exchanger. The research results provide theoretical support and technical guidance for the

收稿日期: 2023-04-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52078257)

作者简介: 赵玉莹(1997—), 女, 山东济南人。硕士, 研究方向为建筑节能。E-mail: zhaoyuying1221@163.com。

* **通信作者:** 李绪泉(1969—), 男, 山东莒南人。博士, 副教授, 主要从事可再生能源利用方面的研究。E-mail: lxuquan@163.com。

practical application of carbon-plastic shell and tube heat exchanger.

Key words: carbon-plastic; heat exchange characteristic; shell and tube heat exchanger; heat transfer coefficient; pressure drop

管壳式换热器是目前应用最广泛的换热器之一,占世界总换热器数量的35%~40%^[1],其特点是结构坚固、可靠性高、适应性强、选材范围广等^[2]。在海水换热器中,管壳式换热器也是常用换热器之一,但传统的金属管壳式换热器存在质量大、易结垢、耐腐蚀性差等问题^[3-4],因此新型材料的换热器得到了广泛关注。GUPTA等^[5]首次对玻璃材质的换热器进行实验研究,并利用示踪颗粒方法对换热器内流动情况开展分析研究。杜喜军等^[6]阐述了影响海水换热器选材的主要原因并对比了工业纯钛和铁白铜的优缺点,结果表明工业纯钛和铁白铜虽然具有较好的抗腐蚀能力,但其使用成本较高。KWON等^[7]对采用钛、铝、不锈钢和铁4种不同材质的海水换热器进行实验研究,发现钛材质的换热器的换热性能最优。黄蕾等^[8]对超级铁素体不锈钢材料换热器在海水中的应用进行了实验研究,结果表明此材料具有良好的力学性能和耐腐蚀性能,可以取代昂贵的钛等材料。除金属换热器外,塑料换热器在海水中的应用也有相关研究,研究表明氟塑料换热器具有优异的抗腐蚀和抗结垢能力^[9-10],且制作价格便宜^[11],但其存在导热系数低、膨胀系数大、机械强度差等问题^[12]。

综合国内外研究发现,金属管壳式换热器和塑料管壳式换热器应用于海水中都存在的问题。为此本文提出一种新型碳塑管壳式海水换热器,以克服金属换热器不耐腐蚀及塑料管壳式换热器传热系数低等缺点,并对该新型碳塑管壳式海水换热器的换热特性进行实验研究。

1 新型碳塑管壳式海水换热器设计

碳塑是在塑料材料里加入超导碳纤维,使塑料材料的导热系数由1 W/(m·K)提高至6 W/(m·K),利用超声波涨接技术将其与导热系数为203 W/(m·K)的铝管结合起来^[13-14]的新型材料。碳塑管外层是2 mm的碳塑材料,外层是1 mm厚的铝管。碳塑换热器可以有效地解决海水管路易腐蚀的问题,又保证了换热器的换热性能。

根据文献^[15]中不同海域不同深度海水温度分布可知,夏季海水温度基本在20℃左右,本文暂设热流体进口温度为300 K,出口温度为296 K,热流体进口流量为0.4 m³/h;冷流体进口温度为280 K,出口温度为282 K。据此已知条件分别进行换热量、换热温差、换热面积、换热管长度、管束数量及壳体内径的设计计算,结果如表1所示,设计的换热器结构如图1所示。

表1 碳塑管壳式换热器设计计算结果

| 名称 | 换热量/W | 换热温差/K | 换热面积/m ² | 换热管长度/m | 管束数量/根 | 壳体内径/mm |
|----|-------|--------|---------------------|---------|--------|---------|
| 数值 | 1867 | 17 | 0.82 | 1.5 | 7 | 140 |

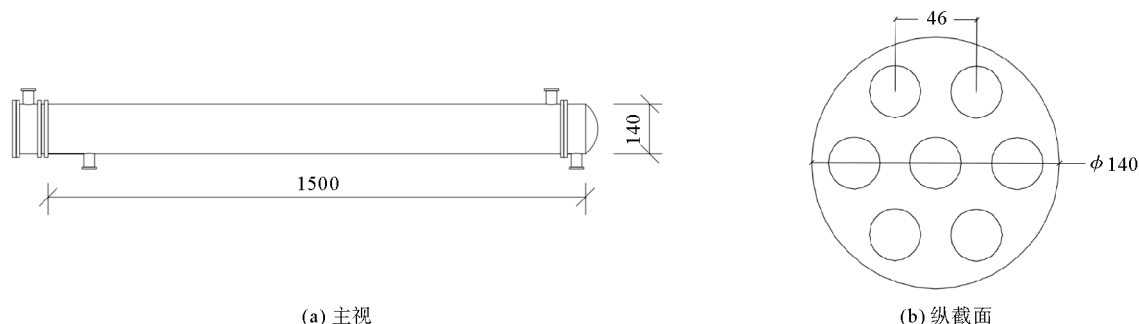


图1 碳塑管壳式换热器结构(单位:mm)

依据设计图纸对碳塑管壳式换热器进行加工,加工实物如图2所示。

2 实验台搭建

2.1 实验台

实验台主要由测试系统、管程水路循环系统、壳程水路循环系统三部分组成,如图 3 所示。

测试系统主要包括管壳式换热器、测试仪器、数据采集仪等,实验开始后通过压力表和数据采集仪对所需的数据进行采集。冷流体采用自来水,

热流体使用加热水箱中的热水,在实验过程中对加热水箱进行恒温操作,因海水的比热约为 $3.9 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,水的比热约为 $4.2 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,两者比热相差不大,所以热流体也采用自来水。

管程水路循环系统主要包括加热水箱、热水泵、流量计等,工质水在加热水箱加热到一定温度后,热水泵将加热水箱中的热水取出,流经流量计进入换热器的管程。热水在管程中换热完毕后,流至加热水箱中再热循环使用。加热水箱中的热水必须浸没水箱中的加热管,以避免水箱干烧。

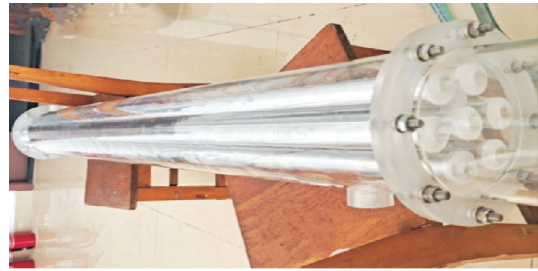


图 2 碳塑管壳式换热器实物

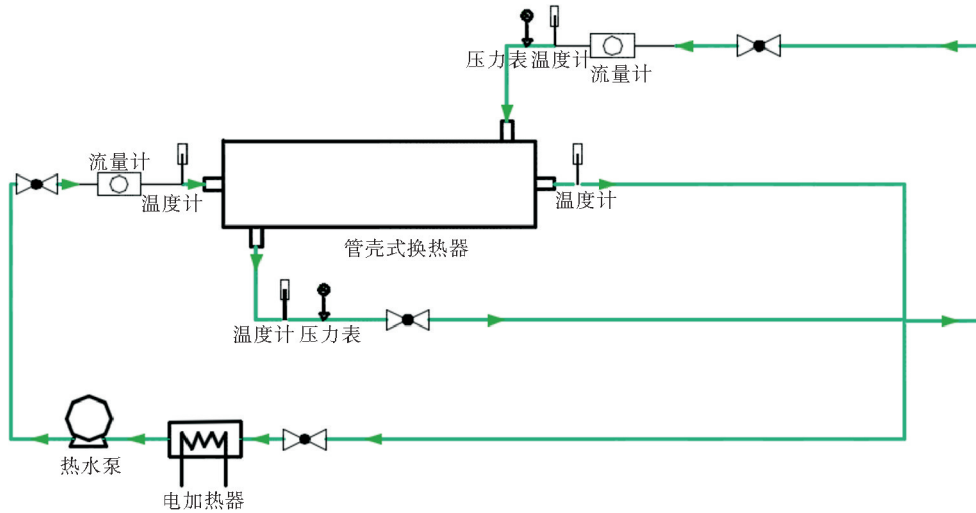


图 3 实验台示意

实验中温度测点有:管程热水进口温度 $t_{1,\text{in}}$ 、管程热水出口温度 $t_{1,\text{out}}$ 、壳程冷水的进口温度 $t_{2,\text{in}}$ 、壳程冷水的出口温度 $t_{2,\text{out}}$ 。流量测点有:管程热水的流量 M_1 、壳程冷水的流量 M_2 。压力测点有:壳程进口压力 P_{in} 、壳程出口压力 P_{out} 。选用的设备、仪表的性能参数如表 2 所示。

表 2 测试设备及仪表性能参数

| 名称 | 型号 | 参数 |
|-------|-------------------------------------|--|
| 热电偶 | 镍铬-镍硅 K 型热电偶 | 量程: $-40 \sim 125 \text{ }^\circ\text{C}$;精度: $< \pm 5\%$ |
| 数据采集仪 | Agilent34970A | — |
| 流量计 | 智能涡轮流量计 | 精度:0.5 级;公称压力:1.6 MPa |
| 压力表 | 数字压力表 | 量程: $0 \sim 200 \text{ kPa}$;精度:0.4 级 |
| 水泵 | LRS40/11 | 最大扬程 14 m,最大流量 53 L/min |
| 加热水箱 | 80 cm \times 60 cm \times 60 cm | — |

2.2 实验工况

1) 在保证热流体流量 $0.4 \text{ m}^3/\text{h}$ 不变的基础上,通过调整加热水箱的加热温度改变热流体进口温度进行实验,实验中热流体的进口温度分别为 301、305、309、313、317 K;

2) 在保证冷流体进口温度 280 K 不变的基础上,通过调整阀门大小改变冷流体流量大小进行实验,实验中冷流体的流量分别为 0.2、0.3、0.4、0.5 m³/h。

3 实验结果处理与分析

3.1 换热量计算

管壳式换热器换热量分为管程流体换热量 Q_1 和壳程流体换热量 Q_2 , 分别为

$$Q_1 = M_1 \times c_{p1} \times (t_{1,in} - t_{1,out}) \quad (1)$$

$$Q_2 = M_2 \times c_{p2} \times (t_{2,out} - t_{2,in}) \quad (2)$$

式中: M 为流体质量流量, kg/s; c_p 为流体比热容, J/(kg · K); t_{in} 、 t_{out} 分别为流体进出口温度, K; 下标 1 代表管程; 下标 2 代表壳程。

热平均误差 ϵ 为

$$\epsilon = \frac{|Q_1 - Q_2|}{(Q_1 + Q_2)/2} \times 100\% \quad (3)$$

当热平均误差 $\epsilon < 5\%$ 时, 实验数据可靠。

根据实验采集的达到稳定状态的原始数据, 取平均值作为该组工况的实验值。以热水进口温度 308.1 K、热水进口流量 0.4 m³/h、冷水进口温度 280 K、冷水进口流量 0.5 m³/h 的工况下达到稳定状态时的一组实验数据为例计算总换热量, 实验数据如表 3 所示。

表 3 换热量计算结果

| 工况 | 热水 | | | | 冷水 | | | |
|----|------------|------------|--|-----------|------------|------------|--|-----------|
| | 进口温度/ K | 出口温度/ K | 进口流量/ (m ³ · h ⁻¹) | 换热量/ W | 进口温度/ K | 出口温度/ K | 进口流量/ (m ³ · h ⁻¹) | 换热量/ W |
| 1 | 308.0 | 300.3 | | 1792.0 | 280.6 | 283.6 | | 1767.5 |
| 2 | 307.9 | 299.5 | | 1953.0 | 280.3 | 283.6 | | 1924.4 |
| 3 | 307.9 | 300.0 | 0.4 | 1859.7 | 280.6 | 283.7 | 0.5 | 1834.0 |
| 4 | 308.0 | 300.1 | | 1843.3 | 280.5 | 283.6 | | 1820.0 |
| 5 | 308.1 | 300.5 | | 1766.3 | 280.4 | 283.4 | | 1749.4 |

根据式(3)计算实验数据的热平均误差, 计算结果如图 4 所示, 可以发现所测得的管程与壳程换热量的热平均误差均保持在 5% 以下, 说明实验数据可靠。

3.2 传热系数计算

对数平均温差 Δt_m 为

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_{\max} - \Delta t_{\min}}{\ln \frac{\Delta t_{\max}}{\Delta t_{\min}}} \quad (4)$$

式中: Δt_{\max} 、 Δt_{\min} 分别为进出口温差的最大和最小值, K。

总换热量 Q 为

$$Q = k \cdot A \cdot \Delta t_m \quad (5)$$

式中: A 为传热面积, m²; k 为总传热系数, W/(m² · K)。

为探究碳塑管壳式换热器传热系数是否优于塑料管壳式换热器, 首先对全塑料管壳式换热器进行了热水进口温度为 301 K 的实验, 分别计算

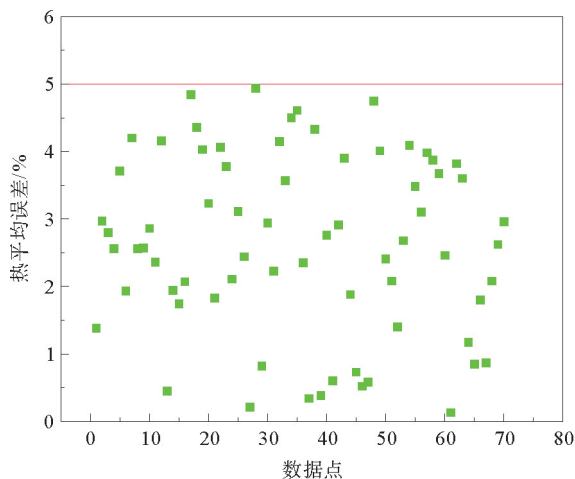


图 4 热平均误差分布

出其在不同冷水流量下的传热系数,与碳塑管壳式换热器比较,如图 5 所示。

根据图 5 可以分析得到,碳塑管壳式换热器与塑料管壳式换热器在不同冷水进口流量时传热系数的变化趋势相同,均随冷水进口流量的增大而增大,但是在同一冷水进口流量下碳塑管壳式换热器比塑料管壳式换热器的传热系数显著提高,在冷水进口流量分别为 0.2、0.3、0.4、0.5 m³/h 时碳塑管壳式换热器传热系数比塑料管壳式换热器分别增大 17.4%、13.7%、13.3%、14.7%,平均增长率为 14.8%。这说明碳塑管壳式换热器的传热系数显著提高。

3.3 不同实验工况实验结果分析

在控制冷水进口温度为 280 K 以及热水进口流量为 0.4 m³/h 不变的情况下,分别改变热水进口温度为 301、305、309、313、317 K,改变冷水进口流量为 0.2、0.3、0.4、0.5 m³/h,计算对应的传热系数,结果如图 6 所示。

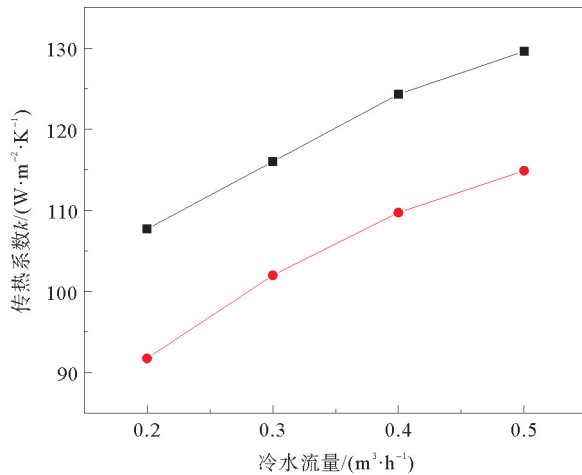


图 5 不同流量下塑料与碳塑管壳式换热器传热系数对比
—■— 碳塑; —●— 塑料

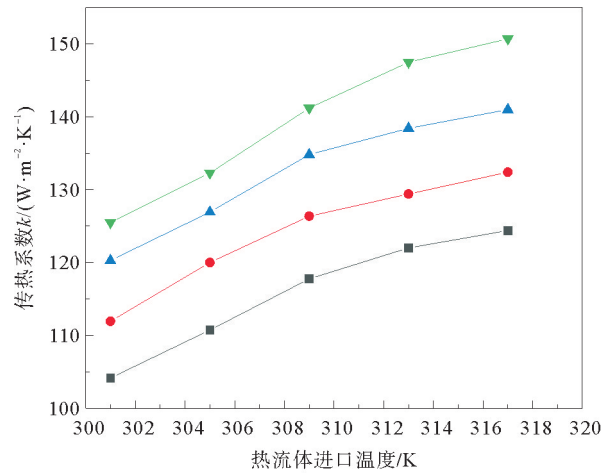


图 6 传热系数计算结果

—■— 0.2 m³/h; —●— 0.3 m³/h; —▲— 0.4 m³/h; —▼— 0.5 m³/h

从图 6 可以看出,当增大热水进口温度时,其传热系数会随着热水进口温度的不断升高而逐渐增大。当热水进口温度从 305 K 升至 309 K 时传热系数增幅最大,热水进口温度从 309 K 升至 313 K、从 313 K 升至 317 K 时传热系数虽然也在升高,但是升高的幅度并不大,由此可以看出碳塑管壳式换热器热水进口温度增大到一定程度时,其对传热系数的影响将会减小。

当热水进口温度不变时,碳塑管壳式换热器的传热系数会随着冷水进口流量的增大而增大,从图 6 中可以发现,流量为 0.2 m³/h 时传热系数最小,流量为 0.5 m³/h 时传热系数最大,且冷水流量从 0.3 m³/h 增大到 0.4 m³/h 时,传热系数的增幅最大。

图 6 中最小的传热系数是在热水进口温度 301 K、冷水流量 0.2 m³/h 时,为 104.2 W/(m²·K);最大传热系数是在热水进口温度 317 K、冷水流量 0.5 m³/h 时,为 150.7 W/(m²·K),传热系数增大了 44.6%。这说明同时提高热流体的进口温度与冷流体的流量会显著提升碳塑管壳式换热器的传热系数。因此在实际工程应用中,适当的提高热水进口温度和冷水流量可以有效提高碳塑管壳式换热器换热性能。

3.4 阻力特性分析

进出口压降 ΔP 计算为

$$\Delta P = P_{in} - P_{out} \quad (6)$$

式中: P_{in} 为进口压力,Pa; P_{out} 为出口压力,Pa。

壳程冷水横掠管束的无量纲阻力准则数,即欧拉数 Eu 为

$$Eu = \frac{\Delta P}{\rho u^2} \quad (7)$$

式中: Eu 为管外欧拉数; ρ 为冷水的密度,kg/m³; u 为冷水的流速,m/s。

数据分析发现,不同热水进口温度下壳程压降变化趋势相同且相差不大,因此以热水进口温度 301 K

为例进行阻力特性分析,不同冷水进口流量下的壳程压降与欧拉数计算结果如图7所示。

由图7壳程压降的变化可知,随着冷水流量的增加,壳程压降增大。当冷水流量从 $0.2\text{ m}^3/\text{h}$ 增至 $0.5\text{ m}^3/\text{h}$ 时,不同流量段的压降分别增大了103.8%、49.7%、70.0%,平均增长率为74.5%。随着冷水流量的增大,欧拉数 Eu 呈下降趋势,当冷水流量从 $0.2\text{ m}^3/\text{h}$ 增至 $0.5\text{ m}^3/\text{h}$,不同流量段的欧拉数 Eu 分别减小了9.4%、4.6%、4.4%,平均下降率为6.1%,下降趋势在不断减缓。

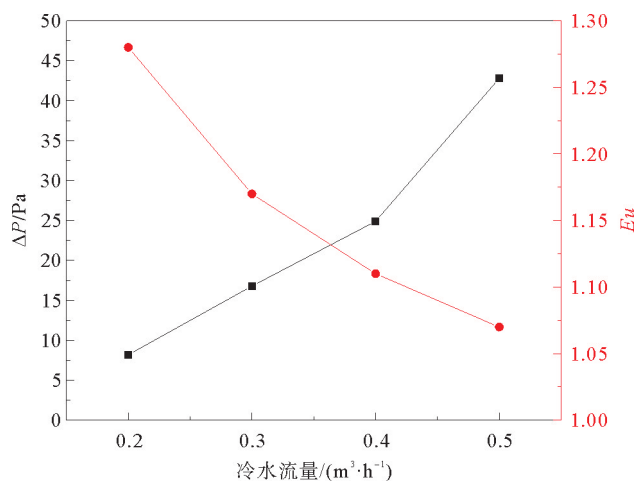


图7 壳程压降和欧拉数变化

—■— ΔP ; —●— Eu

4 结论

提出一种新型的海水碳塑管壳式换热器,并对其设计计算、加工制作。通过对新型碳塑管壳式换热器进行实验研究,得出以下结论:

1) 在相同工况下碳塑管壳式换热器的传热系数均大于普通塑料的传热系数,在冷水进口流量分别为 0.2 、 0.3 、 0.4 、 $0.5\text{ m}^3/\text{h}$ 时碳塑管壳式换热器传热系数比塑料管壳式换热器分别增大17.4%、13.7%、13.3%、14.7%,平均增长率为14.8%。

2) 在冷水流量一定时,碳塑管壳式换热器传热系数随热水进口温度的升高而增大,但当热水进口温度增大到一定程度时对传热系数的影响会减小。在热水进口温度保持不变的情况下,冷水流量越大,传热系数和壳程压降越大,欧拉数则越小,壳程压降平均增长率为74.5%,欧拉数平均下降率为6.1%。

3) 同时增大热水进口温度和冷水流量显著提高了碳塑管壳式换热器的传热系数。

参考文献(References):

- [1] HUMINIC Gabriela, HUMINIC Angel. Application of nanofluids in heat exchanger: A review[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(8): 5625-5638.
- [2] 那俊义. 管壳式换热器腐蚀及防腐措施研究[J]. 中国设备工程, 2022(23): 184-186.
NA Junyi. Study on corrosion and anti-corrosion measures of shell-and-tube heat exchanger[J]. China Plant Engineering, 2022(23): 184-186.
- [3] 颜焱. 管壳式换热器管束失效形式预防措施及在线检验方法[J]. 化工管理, 2017(10): 168.
YAN Yan. Preventive measures and on-line inspection methods for tube bundle failure of shell and tube heat exchanger[J]. Chemical Enterprise Management, 2017(10): 168.
- [4] 龚博, 尉海晶, 刘瑞, 等. 管壳式换热器失效分析及解决方法探究[J]. 设备管理与维修, 2022(10): 81-82.
GONG Bo, WEI Haijing, LIU Rui, et al. Failure analysis and solution of shell and tube heat exchanger[J]. Plant Maintenance Engineering, 2022(10): 81-82.
- [5] GUPTA Rajeshwar K, KATZ Donald L. Flow patterns for predicting shell-side heat transfer coefficients for baffled shell-and-tube exchangers[J]. Industrial & Engineering Chemistry, 2002, 49(6): 998-999.
- [6] 杜喜军, 韩敬艳. 海洋平台用海水换热器材质的选择[C]//中国机械工程学会压力容器分会换热器委员会, 合肥通用机械研究院. 全国第四届换热器学术会议论文集. 合肥: 合肥工业大学出版社, 2011: 103-106.
DU Xijun, HAN Jingyan. Material selection for seawater heat exchanger of offshore platform [C]// Heat Exchanger Committee of Pressure Vessel Branch of Chinese Mechanical Engineering Society, Hefei General Machinery Research Institute. Proceedings of the Fourth National Heat Exchanger Academic Conference. Hefei: Hefei University of Technology Press, 2011: 103-106.
- [7] KWON Chul Young, LEE Hyun Seok, HUH Cheol, et al. A fundamentals study on heat exchanger using deep ocean water: Effects of corrosion on heat transfer performance[J]. Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 2013, 14(11): 5377-5384.

- [8] 黄蕾,孟文俊,李天宝. 超级铁素体不锈钢换热器在海水中的应用[J]. 石油和化工设备,2013,16(2):51-55.
HUANG Lei,MENG Wenjun,LI Tianbao. Application of super ferritic stainless steel heat exchanger in seawater[J]. Petro & Chemical Equipment,2013,16(2):51-55.
- [9] 李剑锋,涂淑平,孙文哲. 氟塑料换热器的研究及应用进展[J]. 应用化工,2019,48(3):685-687.
LI Jianfeng,TU Shuping,SUN Wenzhe. Research and application progress of fluoroplastic heat exchanger[J]. Applied Chemical Industry,2019,48(3):685-687.
- [10] 周黎暘,吴周安,林国辉,等. 氟塑料在燃煤电厂尾气治理中的应用技术[J]. 化工生产与技术,2019,25(4):44-45.
ZHOU Liyang,WU Zhouan,LIN Guohui, et al. Application technology of fluoroplastics in the exhaust gas treatment of coal-fired power plants[J]. Chemical Production and Technology,2019,25(4):44-45.
- [11] 王立国,王世昌,朱爱梅,等. 塑料换热器在海水淡化中的应用[J]. 化工进展,2004(12):1359-1361.
WANG Liguang,WANG Shichang,ZHU Aimei, et al. Application of plastic heat exchangers in desalination[J]. Chemical Industry and Engineering Progress,2004(12):1359-1361.
- [12] WANG Ruiliu,XU Guangbiao,HE Yuechao. Structure and properties of polytetrafluoroethylene (PTFE) fibers[J]. e-Polymers,2017,17(3):215-220.
- [13] 路颖,李绪泉,田然,等. 碳塑平板太阳能集热器性能试验研究[J]. 青岛理工大学学报,2022,43(4):105-110.
LU Ying,LI Xuquan,TIAN Ran, et al. Experimental study on the performance of the carbon plastic flat-plate solar collector[J]. Journal of Qingdao University of Technology,2022,43(4):105-110.
- [14] 李绪泉,黄祯,杨琦,等. 碳塑太阳能平板集热器热损系数的研究[J]. 中国农机化学报,2020,41(3):164-169.
LI Xuquan,HUANG Zhen,YANG Qi, et al. Study on heat loss coefficient of carbon-plastic solar flat-plate collector[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2020,41(3):164-169.
- [15] 赵飞. 海水源热泵节能技术应用研究[J]. 电力技术,2010,19(19):44-51.
ZHAO Fei. Research on the application of energy-saving technology of seawater source heat pump[J]. Electric Power Technology,2010,19(9):44-51.

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)

(上接第42页)

- [19] 张向新,覃盛昆. 双掺微硅粉和粉煤灰对钢纤维再生混凝土力学性能的影响[J]. 当代化工,2021,50(4):775-778.
ZHANG Xiangxin,QIN Shengkun. Effect of adding micro-silica powder and fly ash on mechanical properties of steel fiber recycled concrete[J]. Contemporary Chemical Industry,2021,50(4):775-778.
- [20] 何江. 水利施工中高性能混凝土强度及耐久性研究[J]. 水利科技与经济,2023,29(6):150-154.
HE Jiang. Research on strength and durability of high performance concrete in water conservancy construction[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy,2023,29(6):150-154.
- [21] CONG P L,MEI L N. Using silica fume for improvement of fly ash/slag based geopolymer activated with calcium carbide residue and gypsum[J]. Construction and Building Materials,2021,275:122171.
- [22] KALKAN E. Impact of wetting-drying cycles on swelling behavior of clayey soils modified by silica fume[J]. Applied Clay Science,2011,52(4):345-352.
- [23] LEE N,JEONG Y,KANG H, et al. Heat-induced acceleration of pozzolanic reaction under restrained conditions and consequent structural modification[J]. Materials,2020,13(13):2950.
- [24] KAMPALA A,HORPIBULSUK S. Engineering properties of silty clay stabilized with calcium carbide residue[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2013,25(5):632-644.

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)