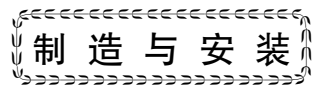


doi:10.3969/j.issn.1001-4837.2023.11.011



双金属复合换热管与固定管板换热器 整体热处理工艺

高成龙¹,李宪爽¹,赵卫君^{1,2},杨红权^{1,2},张松¹,徐祥久^{1,2}

(1. 哈尔滨锅炉厂有限责任公司,哈尔滨 150046;
2. 高效清洁燃煤电站锅炉国家重点实验室(哈尔滨锅炉厂有限责任公司),哈尔滨 150046)

摘 要:为研究双金属复合换热管与固定管板产品管束整体热处理工艺及其技术难点。首先,通过计算壳体与换热管在 50 ℃ 和 100 ℃ 温差下的温差应力,得出结果,升温阶段在 500 ℃ 以下时,换热管与壳体的温差应 $\leq 100\text{ }^{\circ}\text{C}$;降温阶段在 400 ~ 500 ℃ 时,换热管与壳体的温差应 $\leq 50\text{ }^{\circ}\text{C}$,在 400 ℃ 以下时,换热管与壳体的温差应 $\leq 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。根据试验数据、相关标准及前期产品热处理经验制定了合适的热处理工艺参数。通过沿产品管束圆周方向及其中心位置换热管内部 2.5 m 深度处布置热电偶,同时在两侧管板外侧及沿壳体长度方向中间位置布置热电偶进行实时测控温度,使产品管束在整个热处理过程中各测温点的温度得到有效的控制,最终成功对该产品管束进行了炉内整体热处理。

关键词:固定管板式换热器;双金属复合换热管;整体热处理;温差应力

中图分类号:TH49;TG156 **文献标志码:**B

Integral heat treatment process of bimetal composite heat exchanger tube and fixed tubesheet heat exchanger

GAO Chenglong¹, LI Xianshuang¹, ZHAO Weijun^{1,2}, YANG Hongquan^{1,2}, ZHANG Song¹, XU Xiangjiu^{1,2}

(1. Harbin Boiler Company Limited, Harbin 150046, China; 2. State Key Laboratory of Efficient and Clean Coal-fired Utility Boilers (Harbin Boiler Company Limited), Harbin 150046, China)

Abstract: In order to study the integral heat treatment process of bimetal composite heat exchange tube and fixed tubesheet product bundle and the technical difficulties, firstly, by calculating and analyzing the differential temperature stress between the shell and the tube at 50 ℃ and 100 ℃ respectively, it was concluded that when the temperature is below 500 ℃ at the heating stage, the difference temperature between the tube and the shell should be $\leq 100\text{ }^{\circ}\text{C}$; at the cooling stage, when the temperature is between 400 ℃ and 500 ℃, the temperature difference between the tube and the shell should be $\leq 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, when the temperature is below 400 ℃, the temperature difference between the tube and the shell should be $\leq 100\text{ }^{\circ}\text{C}$. According to experimental data, relevant standards and heat treatment experience, the heat treatment process parameters were established. Secondly, the thermocouples were arranged at the depth of 2.5 m inside the tube in the circumferential direction of the product tube bundle and at the central position, at the same time, the thermocouples were arranged at outer side of the tubesheet on both sides and the middle position along the length direction of the shell to measure and control the temperature in real time, and to effectively control the temperature of each measurement point of the product tube bundle during the whole heat treatment process, finally the integral heat treatment of the product bundle in the furnace was successfully carried out.

Key words: fixed tubesheet heat exchanger; bimetal composite heat exchange tube; integral heat treatment; differential temperature stress

0 引言

固定管板式换热器是换热器中一类重要的产品,广泛应用于石油、化工、核电等领域^[1-6]。焊后热处理是保证产品质量和使用寿命的有效措施,在产品生产制造过程中,焊后热处理是关键的工序之一^[7-8]。由于固定管板式换热器结构的特殊性,在进行整体热处理时,换热器整体温差不易控制,容易产生不同程度的温差应力,当温差应力较大时,换热器会产生不可逆的变形破坏,存在质量风险,因此,整体热处理较为困难。

某公司承制的一台具有双金属复合换热管的大型固定管板式换热器设备,关于该类产品整体热处理的研究,目前未有相关报道。本文通过计算换热器壳体与换热管不同温差下的温差应力,选择合适的测温点,布置热电偶测控温度,制定合适的整体热处理工艺参数,同时对整体热处理的难点进行总结和分析,为后续类似产品整体热处理提供参考。

1 产品主要部件材料及结构

管板材料为 14Cr1Mo,规格为 $\varnothing 2\ 400\ \text{mm} \times 45\ \text{mm}$,换热管材料为 SA-213M. T11 + SA-213M. TP347H,规格为 $76\ \text{mm} \times (4+2)\ \text{mm}$,长度 $5\ 000\ \text{mm}$,数量 349 根,壳体材料 14Cr1MoR,规格为 $\varnothing 2\ 400\ \text{mm} \times 70\ \text{mm}$,管束结构如图 1 所示。根据 GB/T 150.4—2011《压力容器:第 4 部分 制造、检验和验收》和 NB/T 47015—2011《压力容器焊接规程》,该产品管束焊后需进行热处理。

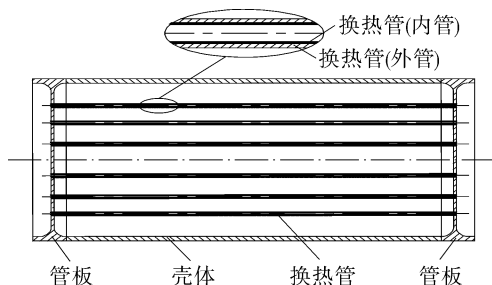


图 1 产品管束结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of tube bundle

根据前期相关报告^[9],对管束进行整体热处理,热处理后的管束有较大破坏,因此针对该类产品管束,在满足标准 GB/T 150.4—2011 和

NB/T 47015—2011 的前提下,还应制定合适的热处理工艺参数。

2 管束整体热处理的技术难点

由于管束相当于一个半封闭空间,同时具有较大的结构约束,在热处理过程中,换热管与壳体不可避免地会产生温差,而其材料的弹性模量和线膨胀系数均不同,使得热膨胀量不同,最终在壳体与换热管之间产生一个较大的应力,这种由温差产生的应力称为温差应力,由此可见,升降温的控制是整体热处理的关键。在热处理过程中,如果温差应力达到壳体或者换热管屈服强度,便会使管束发生塑性变形,甚至焊缝开裂,因此需在满足标准的前提下,计算出适合的升降温速度,并通过合理布置热电偶测控产品管束的温度,最终才能有效避免产品管束整体热处理后的变形或者焊缝撕裂,保证整体热处理效果。

3 温差应力计算及结果分析

根据文献[10],固定管板式换热器热处理时温差应力的计算公式:

$$F = \frac{a_t(t_t - t_0) - a_s(t_s - t_0)}{1/E_t A_t + 1/E_s A_s} \quad (1)$$

其中:

$$A_t = \frac{\pi}{4}(d_o^2 - d_i^2)n \quad (2)$$

$$A_s = \pi\delta(D_i + \delta) \quad (3)$$

式中, F 为温差轴向应力, N; a_t 为换热管线膨胀系数, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; t_t 为换热管平均金属温度, $^{\circ}\text{C}$; t_0 为换热管与壳体初始平均温度, $^{\circ}\text{C}$; a_s 为壳体线膨胀系数, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; t_s 为壳体平均金属温度, $^{\circ}\text{C}$; E_t 为换热管弹性模量, MPa; A_t 为换热管横截面积和, mm^2 ; E_s 为壳体弹性模量, MPa; A_s 为壳体的横截面积, mm^2 ; d_o 为换热管外径, mm; d_i 为换热管内径, mm; n 为换热管数量; D_i 为壳体内径, mm; δ 为壳体壁厚, mm。

换热管所受温差应力为:

$$\sigma_t^T = \frac{F}{A_t} \quad (4)$$

壳体所受温差应力为:

$$\sigma_s^T = \frac{F}{A_s} \quad (5)$$

根据 GB 713—2014《锅炉和压力容器用钢

板》和 ASME II D—2021 规范得出 14Cr1MoR, SA-213M. T11, SA-213M. TP347H 材料的弹性模量、与 20 °C 之间的平均线膨胀系数,同时对产

品壳体及换热管高温屈服强度进行测量,具体数据如图 2 所示,其中图 2(a)、图 2(b)中 14Cr1MoR 与 SA-213M. T11 曲线重合。

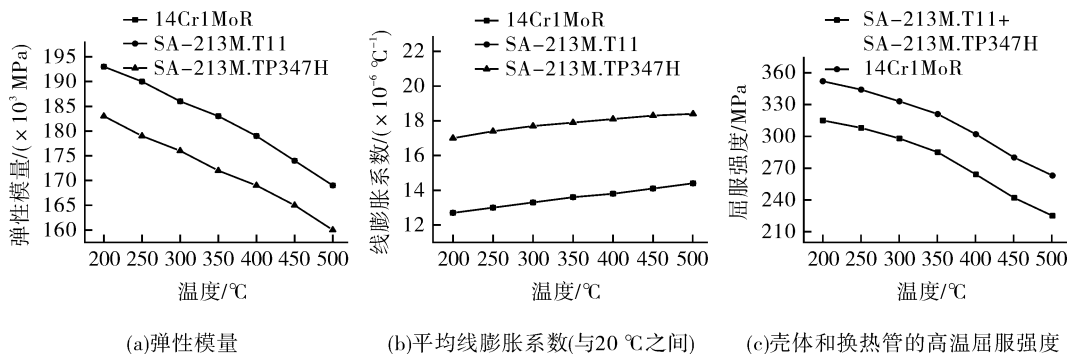


图 2 产品材料性能

Fig. 2 Properties of materials

换热管为 SA-213M. T11 + SA-213M. TP347H 双金属复合管,为便于计算温差应力,将换热管材料设定为 SA-213M. T11 和 SA-213M. TP347H,再根据图 2 选定 200, 250, 300, 350, 400, 450,

500 °C 等温度,计算壳体与换热管在热处理过程中分别以 50, 100 °C 两种不同的温差进行升温 and 降温时所生产的温差应力,具体结果如图 3 和图 4 所示。

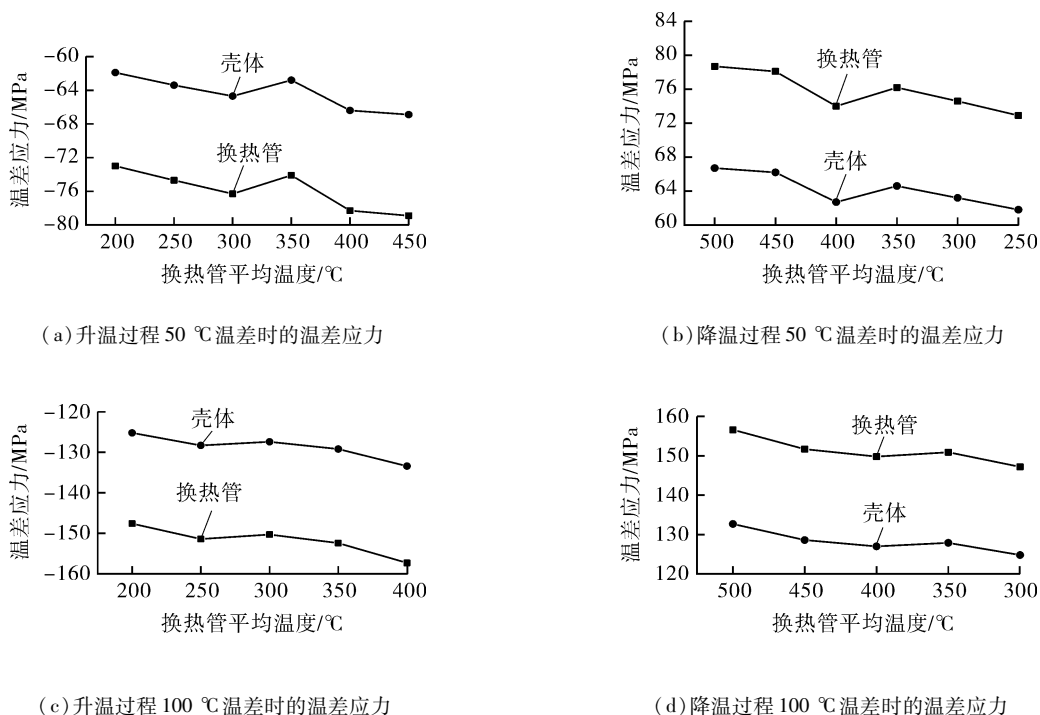


图 3 换热管(SA-213M. T11)与壳体之间的温差应力

Fig. 3 Temperature difference stress between heat exchanger tube (SA-213M. T11) and shell

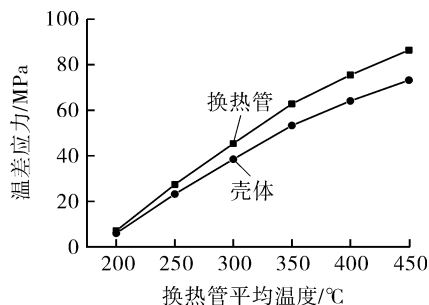
通过图 2(c)和图 3 可看出,在升温过程中,壳体受压应力,换热管受拉应力;在降温过程中,壳体受拉应力,换热管受压应力。当换热管与壳体温差分别在 50 °C 和 100 °C 时,无论升温过程还

是降温过程,换热管和壳体所受的温差应力均低于该温度下换热管和壳体屈服强度。

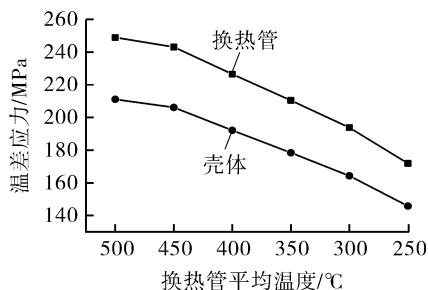
通过图 2(c)和图 3 还可得出,换热管与壳体温差在 50 °C 时,无论升温过程还是降温过程,壳

体均受拉应力,换热管受压应力。在升温过程中,换热管和壳体所受的温差应力均低于换热管和壳体在该温度下的屈服强度。在降温过程中,壳体所受的温差应力低于壳体的屈服强度,而换热管在 450 ℃时所受的温差应力略高于换热管在该温度下的屈服强度。换热管与壳体温差在 100 ℃时,在升温过程中,随着温度的升高,壳体由压应

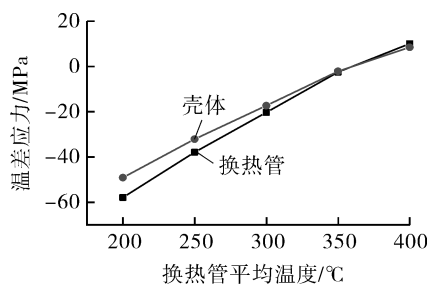
力转变为拉应力,换热管则与之相反,此时壳体与换热管所受的温差应力均低于该温度下壳体和换热管的屈服强度。在降温过程中,壳体受拉应力,换热管受压应力,此时换热管所受的温差应力在 400 ℃以上时高于该温度下换热管的屈服强度,而壳体所受的温差应力在 500 ℃时,高于该温度下壳体的屈服强度。



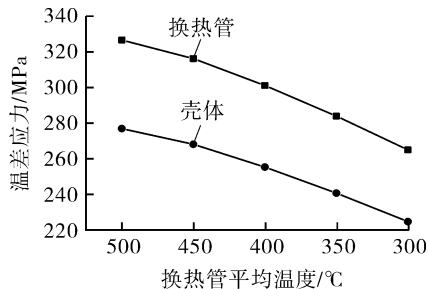
(a) 升温过程 50 ℃温差时的温差应力



(b) 降温过程 50 ℃温差时的温差应力



(c) 升温过程 100 ℃温差时的温差应力



(d) 降温过程 100 ℃温差时的温差应力

图 4 换热管(SA-213M, TP347H)与壳体之间的温差应力

Fig. 4 Temperature difference stress between heat exchanger tube (SA-213M, TP347H) and shell

换热管的材料为 SA-213M, T11 + SA-213M, TP347H双金属复合管,在其他条件相同时,换热管所受温差应力应介于材料为 SA-213M, T11 和 SA-213M, TP347H 时所受温差应力之间,因此,升温阶段在 500 ℃以下时,换热管与壳体的温差控制在 ≤ 100 ℃均是安全的。降温阶段 400 ~ 500 ℃时,换热管与壳体的温差控制在 ≤ 50 ℃;400 ℃以下时,换热管与壳体的温差控制在 ≤ 100 ℃,也应是安全的。

4 产品热处理工艺措施及结果分析

4.1 热处理工艺参数

根据上述试验数据及分析结果及前期产品热处理经验,制定了热处理工艺,如图 5 所示。

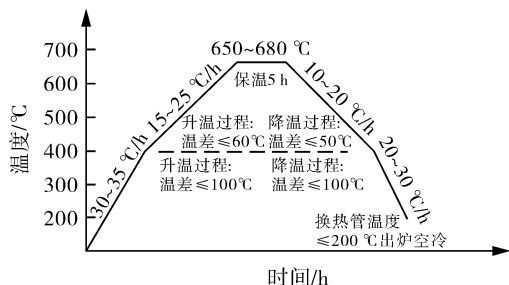


图 5 产品管束整体热处理工艺曲线

Fig. 5 Overall heat treatment process curve of product bundle

管束热处理前,在壳体外壁和换热管内部布置多个热电偶测控热处理过程中各点的温度。管

束室温装炉,以 $30 \sim 35\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ 的速度升至 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$,该过程各点热电偶温差需控制在 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,此后以 $15 \sim 25\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ 的速度缓慢升至 $665\text{ }^{\circ}\text{C}$,该过程各点热电偶温差需控制在 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,当产品各点热电偶温度均在 $650 \sim 680\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后保温 5 h ,之后以 $10 \sim 20\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ 的速度缓慢降至 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$,该过程各点热电偶温差需控制在 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,此后以 $20 \sim 30\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ 的速度降至换热管温度 $\leq 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时出炉空冷。在整个热处理过程中,可根据各点热电偶实际温差情况,调整升降温速度,以保证管束的温差。

4.2 热电偶布置

为了测控产品在热处理过程中的温差,同时结合管束结构,采用 11 支热电偶测控温度。在换热管内部布置 5 支热电偶,热电偶插入换热管深度为 2.5 m ,其中 1 支位于管板中心位置换热管内部,其余 4 支沿圆周方向互成 90 ° 布置于管板边缘换热管内部。在两侧管板外侧及沿壳体长度方向中间位置各布置 2 支沿圆周方向互成 180 ° 的热电偶测控温度,具体布置如图 6 所示。为保证有效测控温度,插入换热管内部的热电偶热端需与换热管内壁充分接触,其余热电偶需装焊在热电偶上。

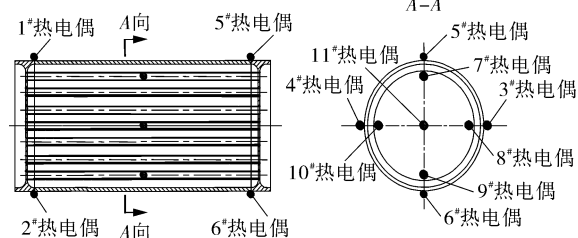


图6 管束热电偶布置示意

Fig. 6 Thermocouple arrangement diagram of tube bundle

4.3 产品热处理时的温度分布

在升温阶段,壳体温度上升较快,上侧壳体温度($1^{\#}, 5^{\#}$ 热电偶)高于下侧壳体温度($2^{\#}, 6^{\#}$ 热电偶),换热管相当于处在一个较封闭的结构中,不能形成有效的空气流通,大部分热量只能通过壳体从外向内的热辐射来传递能量,因此升温速度较慢,此时中心位置换热管温度($11^{\#}$ 热电偶)低于其他位置换热管温度($7^{\#}, 8^{\#}, 9^{\#}, 10^{\#}$ 热电偶),因此该阶段主要控制上侧壳体($1^{\#}, 5^{\#}$ 热电偶)与中心换热管($11^{\#}$ 热电偶)的温差。

在保温过程中,各点温差逐步缩小,最终温差

在 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。

在降温阶段,壳体温度下降较快,此时上侧壳体温度($1^{\#}, 5^{\#}$ 热电偶)仍高于下侧壳体温度($2^{\#}, 6^{\#}$ 热电偶),换热管的热量大部分只能通过热辐射的方式向外传递,降温速度很慢,此时中心换热管的温度最高($11^{\#}$ 热电偶),因此该阶段主要控制中心换热管($11^{\#}$ 热电偶)与下侧壳体($2^{\#}, 6^{\#}$ 热电偶)的温差。

4.4 管束热处理后的检查

4.4.1 无损检测

对管子-管板焊接接头进行 100% PT 检测,符合 NB/T 47013.5—2015 中 I 级规定。对壳程所有 A, B 类接头和 $\text{DN} \geq 80$ 的 D 类接头进行 100% UT 检测,符合 NB/T 47013.3—2015 中 I 级规定。对壳程所有 A, B, D, E 接头进行 100% MT 检测,符合 NB/T 47013.4—2015 中 I 级规定。

4.4.2 硬度检测

产品管束整体热处理后,对管子-管板焊接接头进行硬度检测,具体结果见图 7。

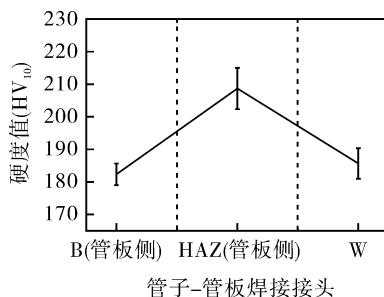


图7 管子-管板焊接接头硬度值

Fig. 7 Hardness of tube and tube-sheet welded joints

从图 7 可看出,管子-管板焊接接头硬度值 (HV₁₀) 在 $175 \sim 215$ 之间,无异常,其中热影响区硬度值高于母材区和焊缝区硬度值。

4.4.3 水压试验

对产品进行 9.0 MPa 整体水压试验,试验过程中无渗漏、无可见变形、无异常声响,试验合格。

5 结语

双金属复合换热管的固定管板式换热器管束整体热处理的技术难度较大,如何确定热处理过程中产品管束的最大温差以及在整个热处理过程中如何有效测控产品管束温差是两大主要难题。首先通过合理的计算温差应力以及大量的实际热

处理经验,在满足标准的前提下,制定了合理的整体热处理工艺,其次通过合理的布置热电偶,有效测控热处理过程中的温差,最终成功对产品管束进行了整体热处理。该产品热处理方案的制定和实施可为同类产品整体热处理提供参考。

参考文献:

- [1] 陈学东,范志超,崔军,等.我国压力容器高性能制造技术进展[J].压力容器,2021,38(10):1-15.
CHEN Xuedong, FAN Zhichao, CUI Jun, et al. Progress in high-performance manufacturing technology for pressure vessels in China[J]. Pressure Vessel Technology, 2021, 38(10):1-15.
- [2] 武靖伟,王志刚,张建晓,等. N06200 镍基合金管板与换热管焊接接头组织与性能研究[J]. 压力容器, 2023, 40(4):8-14.
WU Jingwei, WANG Zhigang, ZHANG Jianxiao, et al. Study on microstructure and mechanical properties of welded joint between N06200 nickel base alloy heat exchanger tube and tubesheet [J]. Pressure Vessel Technology, 2023, 40(4):8-14.
- [3] 赵景玉,黄英,赵石军.大型管壳式换热器的设计与制造[J]. 压力容器, 2015, 32(3):36-44.
ZHAO Jingyu, HUANG Ying, ZHAO Shijun. Designing and fabrication of super-sized tubular heat exchanger [J]. Pressure Vessel Technology, 2015, 32(3):36-44.
- [4] 罗永智,武靖伟,李义民,等.内缩式 316L 换热管与管板焊接接头与性能[J]. 压力容器, 2022, 39(12):10-15.
LUO Yongzhi, WU Jingwei, LI Yimin, et al. Research of microstructure and properties of indented 316L heat exchanger tube-to-tube sheet welded joint[J]. Pressure Vessel Technology, 2022, 39(12):10-15.
- [5] 常健佩,黄翔,贾晨昱,等.立管式间接蒸发冷却器的设计与适用性研究[J]. 流体机械, 2020, 48(12):68-73.
CHANG Jianpei, HUANG Xiang, JIA Chenyu, et al. Design and applicability study of vertical tube indirect evaporative cooler [J]. Fluid Machinery, 2020, 48(12):68-73.
- [6] 密晓光,陈杰,鹿来运,等.绕管式换热器层间质量迁移特性的试验研究[J]. 流体机械, 2020, 48(3):1-5.
MI Xiaoguang, CHEN Jie, LU Laiyun, et al. Experimental investigation on inter-row mass migration characteristics of spiral wound heat exchangers[J]. Fluid Machinery, 2020, 48(3):1-5.
- [7] 董家利,房务农.承压设备焊后热处理工艺[J]. 焊接, 2018(12):37-41.
DONG Jiali, FANG Wunong. Current situation and countermeasure of post-weld heat treatment of domestic pressure equipment[J]. Welding & Joining, 2018(12):37-41.
- [8] 王东坡,刘凯悦,邓彩艳,等.焊后热处理对拘束焊焊缝金属冲击韧性与断裂韧性的影响[J]. 焊接学报, 2020, 41(8):63-67.
WANG Dongpo, LIU Kaiyue, DENG Caiyan, et al. Effects of PWHT on the impact toughness and fracture toughness of the weld metal under restraint welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(8):63-67.
- [9] 王鑫.固定管板换热器整体热处理时所产生的问题分析[J]. 山东工业技术, 2016(9):290.
WANG Xin. Analysis of problems arising from integral heat treatment of fixed tube-sheet heat exchanger[J]. Shandong Industrial Technology, 2016(9):290.
- [10] 谭蔚.化工设备设计基础[M].第3版.天津:天津大学出版社, 2014.
TAN Wei. Design fundamentals of chemical equipment [M]. The third edition. Tianjin: Tianjin University Press, 2014.

作者简介:高成龙(1988),男,工程师,主要从事电站锅炉、压力容器及核设备的焊接工艺研究工作,通信地址:150046 黑龙江省哈尔滨市香坊区三大动力路 309 号哈尔滨锅炉厂有限责任公司, E-mail: maowang4384@yeah.net。

本文引用格式:

高成龙,李宪爽,赵卫君,等.双金属复合换热管与固定管板换热器整体热处理工艺[J].压力容器, 2023, 40(11):75-80.
GAO Chenglong, LI Xianshuang, ZHAO Weijun, et al. Integral heat treatment process of bimetal composite heat exchanger tube and fixed tubesheet heat exchanger[J]. Pressure Vessel Technology, 2023, 40(11):75-80.