

锅炉给水预热器管板的优化设计与分析

李艳芹^a, 丁昌^b, 吴超^a, 张德海^a

(郑州轻工业大学 a. 机电工程学院; b. 能源与动力工程学院, 郑州 450002)

摘要: **目的** 对锅炉给水预热器的管板进行结构优化设计及有限元分析。**方法** 首先通过给定设计参数计算出管板的厚度及受力分析, 进而明确管板的结构设计确定主要参数, 利用 SolidWorks 软件建立管板的三维分析模型, 并用 Ansys 软件进行管板应力应变分析及温度场的分析, 按标准方法计算 4 种工况下管板应力、壳程筒体的轴向应力以及换热管的轴向应力, 同时采用 JB/T 4732 的方法对管板与筒体的应力进行评定, 采用 GB/T 151 的方法对换热管的轴向应力、拉脱应力进行评定。**结果** 该预热器能够在给定工况下安全运行。**结论** 采用的设计方法为锅炉给水预热器管板的结构性能优化提供了理论依据和判定标准。

关键词: 预热器; 管板; 有限元法

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2020.03.016

中图分类号: TQ051.2 文献标识码: A 文章编号: 1674-6457(2020)03-0131-06

Optimal Design and Analysis of Boiler Water Preheater Tube Plate

LI Yan-qin^a, DING Chang^b, WU Chao^a, ZHANG De-hai^a

(a. School of Mechanical and Electrical Engineering;

b. School of Energy and Power Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

ABSTRACT: This paper aims to perform structure optimization design and finite element analysis of boiler water preheater tube plate. First, the thickness of the tube plate was calculated and the force analysis was carried out with given design parameters, and then the structure design of the tube plate was made clear to determine the main parameters. The SolidWorks software was used to establish three-dimensional analysis model of tube plate; and the Ansys software was used to analyze stress, strain and temperature field of the tube plate. Finally, the stress of the tube plate, the axial stress of the cylinder and the heat exchange tube under four working conditions were calculated according to the standard method. At the same time, the stress of tube plate and barrel body was evaluated by JB/T 4732 method, and the axial stress and pull stress of the heat exchange pipe were evaluated by GB/T 151. The results show that the preheater can operate safely under a given operating condition. The design method provides theoretical basis and judgment standard for the structural performance optimization of boiler feed water preheater tube plate.

KEY WORDS: preheater; tube plate; the finite element method

在化工、石油、动力、食品以及其他工业部门中, 管壳式换热器是目前应用最广泛、最重要的一种换热器型式, 在工业生产中占据着主导地位, 其中固定管板式换热器使用量占最大比例^[1-2]。固定管板式换

热器结构主要由管箱、管板、壳体、封头、管子等零部件组成, 而管板是管壳式换热器的主要受压元件。

早在 2000 年马永其就对“薄管板”问题和危险工况进行了深入研究, 并论述了标准规范的局限性,

收稿日期: 2020-01-15

基金项目: 国家自然科学基金(11602229); 河南省科技攻关项目(202102210087, 202102210071)

作者简介: 李艳芹(1974—), 女, 高级工程师, 主要研究方向为先进材料成形过程控制。

通讯作者: 张德海(1973—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为三维检测和先进材料成形过程控制。

提出运用有限元法对管壳式换热器管板进行整体模拟分析的方法^[3]。关婷等利用 SolidWorks 软件建立管板的三维模型,对管板进行了应力应变及温度应变的分析,为提高和改善管板的结构性能提供了理论依据和实际方法^[4]。杨连红等^[5]和占双林等^[6]先后利用 Ansys 和 SolidWorks 对管板 6 种工况下的应力进行了分析研究和强度校核,并提出对应的改善方案和优化措施。

用于吸收变换气过热的锅炉给水预热器,也是固定管板式换热器的一种。文中主要研究锅炉给水预热器管板在给定工况下的应力状态以及完成工作状态下的强度校核,并提出提高和改善管板结构性能的实际方法,对节约材料、降低成本有着至关重要的作用。

1 预热器初始参数和设计结果

设计的锅炉给水预热器是用于吸收变换气的高温以提高锅炉给水温度的列管式换热器,预热器管程内介质为变换气,其为有毒气体,因此在换热管内要提高其密封效果。低温给水走壳程,以逆流的形式与管程变换气完成换热,以提高锅炉给水的温度,进而达到锅炉给水标准,节省燃料。设计参数如表 1 所示。经工艺计算确定设备公称直径为 1000 mm,换热管规格为 $\Phi 25\text{ mm} \times 2\text{ mm}$,管间距为 32 mm,长度为 2500 mm,需要换热管 790 根。换热器材料参数如表 2,其中材料数据取自 GB 150.2,热分析材料参数如表 3,其中材料数据取自 GB 150.2。

表 1 换热器初始参数
Tab.1 Initial parameters of heat exchanger

种类	介质	设计压力/MPa	工作压力/MPa	设计温度/°C	工作温度 (进) /°C	工作温度 (出) /°C	金属壁温/°C
管程	变换气	4.5	3.26	190	167.6	165.4	155.88
壳程	锅炉给水	1.6	0.7	170	104	155	129.5

表 2 换热器材料参数表
Tab.2 Parameters of heat exchanger material

材料	设计温度 /°C	许用应力强度/ MPa	泊松比
Q345R (壳体)	170	183	0.3
00Cr19Ni10 (换热管)	190	110	0.3
16Mn (管板)	170	150	0.3

表 3 热分析材料参数
Tab.3 Parameters of thermal analysis material

材料	温度/°C	平均线膨胀 系数/(mm·°C ⁻¹)	弹性模量/ MPa
Q345R	100	11.53	197
	150	11.88	194
	200	12.25	191
00Cr19Ni10	100	16.84	189
	150	17.06	186
	200	17.25	183
16Mn	100	11.53	197
	150	11.88	194
	200	12.25	191

选型及厚度计算。

管板的选型和选材是根据 GB/T 151 选择 e 型连接方式,该连接方式中管板与壳程圆筒连为整体,其延长部分兼作法兰,用螺柱、垫片和管箱连接。依据 GB 150.2^[8]给出的材料特性,并结合设计条件要求选择 16Mn 锻件作为管板材料。

管板布管方式是采用换热管正三角形标准排列方式,换热管外径及管中心距如图 1 所示。管板计算厚度计算见式 (1)。

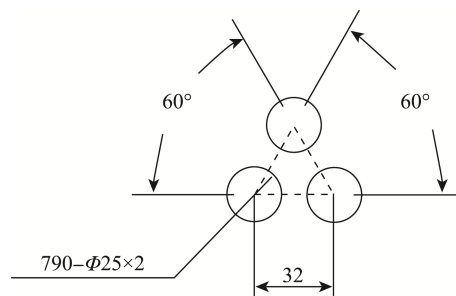


图 1 布管尺寸

Fig.1 Size of cloth tube

$$\delta = 0.82 D_G \sqrt{\frac{C_c p_d}{\mu [\sigma]_r}} \quad (1)$$

式中: δ 为管板厚度 (mm); D_G 为垫片压紧力作用中心圆直径 (mm); C_c 为管壳式换热器管板计算因数; p_d 为管板设计压力 (MPa); μ 为管板强度削弱系数,取 0.4; $[\sigma]$ 为管板材料的许用应力:当 $3\text{ mm} \leq \delta < 16\text{ mm}$ 时, $[\sigma]=183\text{ MPa}$;当 $16\text{ mm} \leq \delta < 36\text{ mm}$ 时, $[\sigma]=170\text{ MPa}$;当 $36\text{ mm} \leq \delta < 60\text{ mm}$ 时, $[\sigma]=160\text{ MPa}$ 。

2 管板的结构设计简述

管板是换热器的主要受压元件,起支撑固定换热管的作用,管板结构的正确合理设计对换热设备的安全运行有着极其重要的意义。基于设计条件要求,遵照 GB/T 151^[7],对该锅炉给水预热器的管板进行结构

根据公式计算出管板外径为 1295 mm, 厚度为 100 mm, 材质为 16Mn 锻件, 换热管规格为 $\Phi 25 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$, 材质为 00Cr19Ni10。根据其外形及结构尺寸在 SolidWorks 里绘制出管板的三维模型, 如图 2 所示。



图2 管板结构
Fig.2 Structure of tube plate

3 模型建立及有限元分析

3.1 分析模型的建立

选取换热器的左管板、壳程圆筒和换热管为分析对象, 以中轴线为 z 轴, 按照右手定则建立直角坐标系, 将机械应力和热应力进行耦合计算获得图 3。



图3 有限元分析模型
Fig.3 Finite element analysis model

3.2 模型网格化

有限元模型网格的合理划分对应力分析以及热应力分析至关重要^[9]。通过施加约束条件, 规定自由度, 采用系统自动加密网格化参数, 网格类型为实体单元网格, 满足分析要求。网格单元共有 177 211 个, 节点有 601 259 个, 如图 4 所示。

3.3 载荷及约束的施加

模型分析时需要的载荷包括管程压力、壳程压力以及温度载荷。取管程温度载荷恒定为管程的设计温度, 壳程温度载荷恒定为壳程的设计温度^[10]。对于位移边界, 管板螺栓面施加轴向约束, 圆筒断面施加轴向约束。

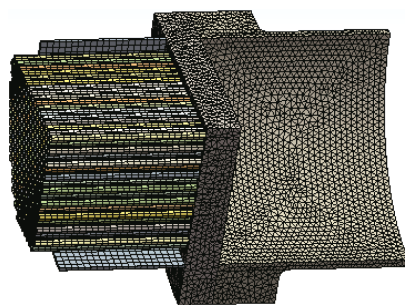


图4 有限元网格模型
Fig.4 Finite element grid model

1) 温度载荷。管程温度选 190°C , 壳程选 170°C , 壳程和筒体外表面的空气对流边界数值选 $12 \times 10^{-6} \text{ W}/(\text{mm}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, 环境温度选 20°C 。

2) 机械载荷。机械应力分析: 工况 I, 壳程单独作用, 板材应力 $p_s=1.6 \text{ MPa}$, 管材应力 $p_t=0 \text{ MPa}$; 工况 II, 管程单独作用, $p_s=0$, $p_t=4.5 \text{ MPa}$; 工况 III, 壳程+管程, $p_s=1.6 \text{ MPa}$, $p_t=4.5 \text{ MPa}$ 。热应力耦合分析: 工况 IV, 壳程+管程+温度载荷, $p_s=1.6 \text{ MPa}$, $p_t=4.5 \text{ MPa}$, 管材温度为 170°C , 板材温度载荷为 190°C 。

4 有限元计算结果

4.1 结构应力分析

先对工况 I—III 进行管板的受力分析, 分析结果如图 5 和图 6 所示。由应力强度分布云图 6 可以看出, 在没有温度场的作用下, 管板和筒体的结构应力值较小, 易评定合格, 且 3 种工况下的最大应力值为 306.02 MPa , 出现在筒体和管板的外接触边缘及部分管板非布管区内部, 并向管板中心区迅速减小, 在中心处应力值达到最小; 筒体应力自与管板接触处向远离管板方向均匀递减, 其值偏小, 亦符合 JB/T 4732^[11] 的设计要求。由变形云图 5 可以得出, 筒体变形明显比管板变形大, 所受弯曲应力更大, 但整体变形符合要求, 最大变形出现在远离管板的筒体外缘, 且沿轴向方向均匀减小。管板变形最小区域出现在管板半径的 $1/2 \sim 2/3$ 形状处, 且分别沿径向向管板边缘和中心区域递增, 管板沿轴向方向的变形均匀, 说明轴向方向弯曲变形较小。

4.2 热应力分析

对工况 IV 进行机械载荷和温度载荷的热应力耦合分析, 分析结果如图 7 和图 8 所示。由图 7 可以得出, 靠近壳程低温侧的布管区沿轴向的温度梯度变化最为剧烈, 靠近管程高温侧的布管区沿轴向的温度梯度变化比较舒缓, 高温侧布管区的管板沿径向的温度梯度变化也不大, 且管桥区域温度基本处于恒定, 管板非布管区沿轴向的温度数值变化较大, 但温度梯度

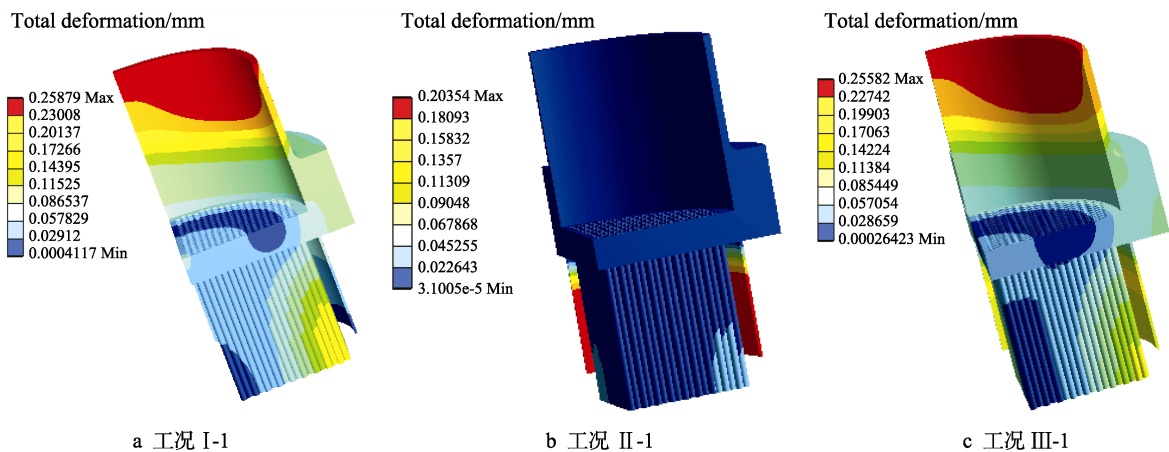


图 5 变形云图

Fig.5 Deformation nephogram

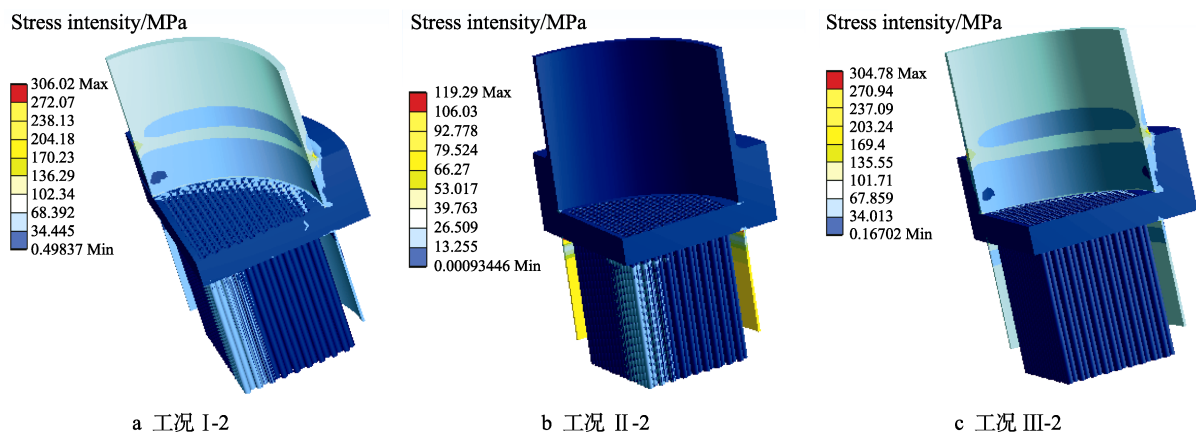


图 6 应力强度云图

Fig.6 Stress intensity nephogram

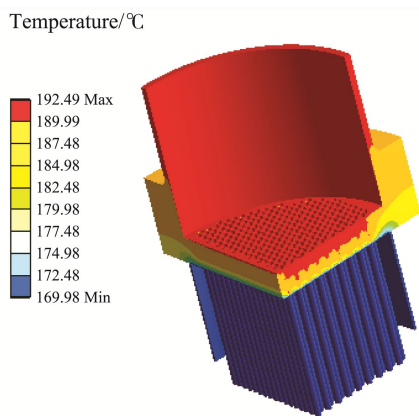


图 7 工况 IV-1 温度场分布云图

Fig.7 Temperature field distribution nephogram of working condition IV-1

相对不大。远离布管区的管板边缘及筒体部分的温度梯度变化相对都不是很明显,可见管板温度沿不同路径^[12]的分布形态有所异同。

由图 8 可以看出,在考虑温度场的热应力耦合工况 IV 时,其管板及筒体的变形都相对工况 I, II, III 有所增大,因其所受的二次应力数值比较大,且薄膜

应力和弯曲应力均为二次应力,按照相关标准进行评定达到合格要求^[13]。

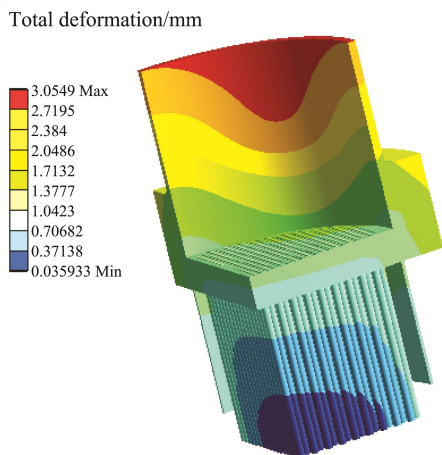


图 8 工况 IV-2 变形云图

Fig.8 Deformation nephogram of working condition IV-2

4.3 换热管应力分析

4.3.1 换热管轴向应力分布

上述 4 种设计工况下,分别对有限元模型进行

计算，得到整体换热管的轴向应力分布云图，换热管最大轴向拉应力出现在换热管进气口胀接处且靠近管板及管板中心处，最小轴向拉应力出现在管板半径的 1/2~2/3 区域。在远离管板的区域里，换热管的轴向拉应力逐渐递减，呈现处明显的“表面热效应”^[14-15]。

4.3.2 换热管的应力评定

由以上 4 种设计工况下的应力计算结果，根据对称性来求得各换热管轴截面上拉应力的最大平均值，用以评定管板与换热管的拉脱力以及筒体与换热管的稳定性。换热管的应力可根据表 4 中换热管的应力种类及许用极限值来评定，其中， σ 代表应力， $[\sigma]$ 是许用应力， $[\sigma]_t$ 是拉应力许用极限， $[\sigma]_{cr}$ 是稳定（临界）拉应力许用极限， q 是拉脱力， $[q]$ 是许用拉脱力，

σ_t 是轴向拉应力， σ_t' 是轴向压应力。

表 4 换热管应力种类及许用极限
Tab.4 Stress type and allowable limit of heat exchange tube

应力种类	应力许用极限	
	不计热应力	计入热应力
轴向拉应力 σ_t	$\leq [\sigma]_t$	$\leq 3[\sigma]_t$
轴向压应力 σ_t'	$\leq [\sigma]_{cr}$ ，且 $\leq [\sigma]_t$	$\leq 1.2[\sigma]_{cr}$
拉脱力 q	$\leq [q]$	$\leq 3[q]$

对 4 种工况下换热管的应力评定结果见表 5，可见 4 种工况下的应力评定都合格，只是工况 IV 在温度载荷的耦合作用下应力略大，通过采用增加换热管根数、增设膨胀节的方法，有效降低了轴向应力值，改善管板的受力状态^[16]。

表 5 换热管的应力评定
Tab.5 Stress evaluation of heat exchanger tube

工况	应力种类	应力强度	结果/MPa	应力许用极限/MPa	备注
工况 I	轴向应力	轴向拉应力 σ_t	73.789	$[\sigma]_t=110$	$\sigma_t \leq [\sigma]_t$ 合格
	拉脱力	拉脱力 q	0.005	$[q]=75$	$q \leq [q]$ 合格
工况 II	轴向应力	轴向拉应力 σ_t	18.693	$[\sigma]_t=110$	$\sigma_t \leq [\sigma]_t$ 合格
	拉脱力	拉脱力 q	0.042	$[q]=75$	$q \leq [q]$ 合格
工况 III	轴向应力	轴向拉应力 σ_t	65.806	$[\sigma]_t=110$	$\sigma_t \leq [\sigma]_t$ 合格
	拉脱力	拉脱力 q	0.057	$[q]=75$	$q \leq [q]$ 合格
工况 IV	轴向应力	轴向拉应力 σ_t	326.05	$[\sigma]_t=110$	$\sigma_t \leq 3[\sigma]_t$ 合格
	拉脱力	拉脱力 q	6.34	$[q]=75$	$q \leq 3[q]$ 合格

5 结语

根据 ANSYS 软件模拟分析预热器的结果可得出以下结论。

- 1) 不同于大直径挠性薄管板，设计的预热器管板弯曲应力更小，管板边缘剪切应力也更小。
- 2) 在设计工况下，管板、筒体应力以及换热管的轴向拉应力、拉脱力均评定合格。
- 3) 预热器设计过程中，当换热管的轴向应力略大时，可通过增加换热管根数、增设膨胀节的方法降低换热管应力，这为该设计就如何改善管板的受力状态提高方法和依据。
- 4) 设计的锅炉给水预热器满足强度要求。采用的设计方法为锅炉给水预热器管板的结构性能优化提供了理论依据和判定标准。

参考文献：

[1] 杨小辉, 张贵锋, 张建勋. 两种铝/钢组合(1060/Q235 和 1060/SUS304)的搅拌摩擦钎焊组织与性能对比研究[J]. 精密成形工程, 2020, 12(1): 38—44.
YANG Xiao-hui, ZHANG Gui-feng, ZHANG Jian-xun.

Comparative Study of Aluminum/Steel Dissimilar Couples (1060/Q235 and 1060/SUS304) Friction Stir Brazing Microstructure and Properties[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12(1): 38—44.

[2] 许光第, 周幅彦, 朱东生, 等. 管壳式换热器设计及软件开发[J]. 流体机械, 2013(4): 38—42.
XU Guang-di, ZHOU Guo-yan, ZHU Dong-sheng, et al. Development of the Design Software for Shell and Tube Heat Exchanger[J]. Fluid Machinery, 2013(4): 38—42.

[3] 李盛, 牛靖, 殷咸青, 等. 冷速对厚壁 X80 三通焊缝组织及性能的影响[J]. 精密成形工程, 2020, 12(1): 132—137.
LI Sheng, NIU Jing, YIN Xian-qing, et al. Effects of Quenching Cooling Rates on Microstructure and Properties of X80 Pipe Fitting Welds[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12(1): 132—137.

[4] 关婷, 李雪斌, 范学群. 基于 Solidworks 的 U 型管式换热器管板的结构设计及有限元分析[J]. 化学工程与装备, 2012(10): 65—67.
GUAN Ting, LI Xue-bin, FAN Xue-qun. Structure Design And Finite Element Analysis of U-Tube Heat Exchanger Tube Sheet Based on SolidWorks[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2012(10): 65—67.

- [5] 杨连红, 王强, 尹权. 基于 Ansys 的固定管板换热器有限元分析[J]. 石油和化工设备, 2016, 19(5): 5—10.
YANG Lian-hong, WANG Qiang, YIN Quan. Finite Element Analysis of Fixed Tubesheet Heat Exchanger Based on ANSYS[J]. Petroleum and Chemical Equipment, 2016, 19(5): 10—13.
- [6] 占双林, 冯义浩, 李肖蔚. 绕管式换热器管板有限元应力分析[J]. 石油和化工设备, 2016, 19(8): 10—13.
ZHAN Shuang-lin, FENG Yi-hao, LI Xiao-wei. Finite Element Stress Analysis of Tube Plate of Tube Heat Exchanger[J]. Petroleum and Chemical Equipment, 2016, 19(8): 10—13.
- [7] GB/T 151—2014, 热交换器[S].
GB/T 151—2014, Heat Exchanger[S].
- [8] GB 150.1~150.4—2011, 压力容器[S].
GB 150.1~150.4—2011, Pressure Vessel[S].
- [9] 陈嘉伟, 欧阳柳, 文字, 等. 表面织构与复合板联合轧制成形的数值模拟研究[J]. 精密成形工程, 2019, 11(4): 134—139.
CHEN Jia-wei, OUYANG Liu, WEN Yu, et al. Numerical Simulation of Microstructure and Composite Plate Forming[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019, 11(4): 134—139.
- [10] 张贤福, 刘丰, 孙志刚, 等. 固定管板管壳式换热器瞬态热应力分析[J]. 压力容器, 2016, 33(5): 34—38.
ZHANG Xian-fu, LIU Feng, SUN Zhi-gang, et al. Transient Thermal Stress Analysis of Fixed Tubesheet Heat Exchanger[J]. Pressure Vessel, 2016, 33(5): 34—38.
- [11] JB 4732—2005, 钢制压力容器—分析设计标准[S].
JB 4732—2005, Steel Pressure Vessels: Analysis and Design Criteria[S].
- [12] 姜楠, 李京龙, 熊江涛, 等. 2524 同质铝合金回填式搅拌摩擦点焊耐蚀性研究[J]. 精密成形工程, 2019, 11(6): 53—58.
JIANG Nan, LI Jing-long, XIONG Jiang-tao, et al. Corrosion Resistance of 2524 Similar Aluminum Alloy Welded by Refilling Friction Stir Spot Welding[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019, 11(6): 53—58.
- [13] 蔡虎, 王嘉诚, 付文笙, 等. 基于计算机模拟的支架铸钢件铸造工艺设计及优化[J]. 精密成形工程, 2019, 11(4): 153—161.
CAI Hu, WANG Jia-cheng, FU Wen-sheng, et al. Design and Optimization of Steel Casting Process for Bracket Based on Computer Simulation[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019, 11(4): 153—161.
- [14] 侯军, 杨会武, 周显荣, 等. 煤矿机械用 Q690 高强钢激光-MAG 复合焊可行性分析[J]. 精密成形工程, 2020, 12(1): 117—122.
HOU Jun, YANG Hui-wu, ZHOU Xian-rong, et al. Feasibility Analysis of Laser-MAG Hybrid Welding of Q690 High Strength Steel for Coal Mining Machinery[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12(1): 117—122.
- [15] 许志鹏, 杨峻. 应用 ANSYS 对热管换热器管板应力的有限元分析[J]. 信息技术, 2016, 45(6): 127—129.
XU Zhi-peng, YANG Jun. Application of ANSYS to Finite Element Analysis of Tube Plate Stress of Heat Pipe Heat Exchanger[J]. Machine Building & Automation, 2016, 45(6): 127—129.
- [16] 肖旋, 秦鼎强, 倪昱, 等. 铝合金薄板搭接高速FSW缺陷及断裂行为[J]. 精密成形工程, 2019, 11(6): 135—140.
XIAO Xuan, QIN Ding-qiang, NI Yu, et al. Defects of High Speed Friction Stir Welding and Fracture Behavior of Aluminum Alloy Thin Plate Lap Joints[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019, 11(6): 135—140.