

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2025.04.005

引用格式:袁淑霞,李嘉豪,林雅岚,等.热处理试板模拟大型过程设备现场热处理工艺[J].重庆大学学报, 2025,48(4): 54-66.



热处理试板模拟大型过程设备现场热处理工艺

袁淑霞¹,李嘉豪¹,林雅岚²,张耀祖²,李荫虎¹

(1. 西安石油大学 机械工程学院,西安 710065; 2. 陕西化建工程有限责任公司设备制造公司 西安 712100)

摘要:为确定设备局部热处理工艺,建立了可提供破坏性检测的热处理试板,通过边界条件分析,确定了热处理试板与过程设备等效的边界条件,采用经过实验验证的 ANSYS 热分析数值模拟方法对热处理试板和对应的过程设备热处理过程进行分析,发现二者加热和保温后的温度场分布基本一致,可通过对热处理试板进行热处理实验确定热处理工艺,进而得到过程设备的热处理工艺。热处理试板制作工艺复杂,利用范围窄,为提高其利用率,建立不同材料和不同厚度热处理试板热处理工艺的计算公式,经过等效,使得一种材料和厚度的热处理试板可模拟多种材料和厚度试板的热处理工艺。研究表明,热处理试板壁厚方向温差随壁厚的增加而增加,当壁厚超过 120 mm,若采用单面加热,内外壁温差过大,可能导致热处理失败;不同材料热处理试板存在比热容和导热系数差异,也存在热处理温度差异,比热容越大、热导率越低及热处理温度越高的材料需要越长的热处理时间,同时消耗更多能量。

关键词:热处理试板;现场热处理;过程设备;热处理工艺

中图分类号: TG156.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2025)04-054-13

Simulation of in situ heat treatment processes for large equipment using a heat treatment test plate

YUAN Shuxia¹, LI Jiahao¹, LIN Yalan², ZHANG Yaozu², LI Yinhu¹

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, P. R. China;

2. Equipment Manufacturing Branch of Shaanxi Petroleum Chemical Engineering and Construction Co., Ltd., Xi'an 712100, P. R. China)

Abstract: To establish a localized heat treatment technique, a heat treatment test plate capable of withstanding destructive testing was developed. Through boundary condition analysis, the equivalent boundary conditions for both the heat treatment test plate and the process equipment were determined. The numerical thermal simulation method, implemented by ANSYS software and validated through experiments, was employed to analyze the heat treatment process for the test plate and the corresponding equipment. The results demonstrate that the temperature

收稿日期: 2024-03-12

基金项目: 西安石油大学研究生创新与实践能力的培养计划(YCS22213130)。

Supported by the Postgraduate Innovation and Practice Ability Development Fund of Xi'an Shiyou University (YCS22213130).

作者简介: 袁淑霞(1977—), 女, 教授, 博士, 主要从事传质、传热、分离、化工机械及先进数值模拟方法等方向研究, (E-mail)flowingcloud269@163.com。

distribution and holding temperature of the test plate align closely with those of the equipment, confirming the feasibility of deriving the equipment's heat treatment technique from the test plate results. However, the complex manufacturing processes of the test plate make single-use applications economically unviable. To enhance its utility, thermodynamic and heat transfer calculations were used to formulate equations for test plates with varying materials and thicknesses. These formulas allow for the determination of heat treatment techniques for equipment of different materials and thicknesses using a single test plate. The results indicate that the temperature gradient across the plate thickness increases with thickness, and when the thickness exceeds 120 mm, single-sided heating may cause treatment failure due to excessive temperature differences between the two sides. Moreover, material properties such as specific heat capacity and thermal conductivity influence the heat treatment process: materials with higher specific heat capacity have lower thermal conductivity, and higher heat treatment temperatures require longer processing times and greater energy consumption.

Keywords: heat treatment test plate; in situ heat treatment; process equipment; heat treatment process

大型过程设备受限于热处理能力及运输能力,无法在厂内完成全部制造工作,需分段制造并热处理,最终在现场拼焊完成^[1-3]。焊接过程中,因加热和冷却的不均匀性,以及机械构件本身产生拘束或外加拘束引起的变形而产生的内部应力称为焊接应力^[4]。焊接应力分为瞬时应力和残余应力^[5-6],残余应力的存在会降低容器焊接接头区的实际承载能力,产生塑性变形,降低使用寿命,严重时会导致设备破坏,引发安全事故^[7-11]。消除设备中残余应力的方法有很多种^[12-17],对于现场完成安装的大型过程设备,其环焊缝热处理只能采用局部热处理工艺^[18-19]。局部热处理加热、控温及保温示意图见图1。热处理过程必须是无损过程^[20],无法在设备内部打孔测温,而大型厚壁过程设备升温速率慢,壁厚方向温度梯度较大,内部温度无从得知,易导致热处理失败,造成巨大损失^[21-23]。

目前热处理试板主要针对炉内热处理过程开发,热处理完成后对相应的试板进行性能检测,以验证热处理工艺,炉内热处理因整体加热无需考虑试板与设备边界条件等效问题^[24-25]。为更好地确定大型厚壁过程设备局部热处理工艺,通过对局部热处理试板进行热处理实验来模拟过程设备热处理工艺;分析局部热处理焊缝形状,根据边界条件等效原则设计热处理试板,通过实验模拟相结合的方法验证数值模拟方法的可行性,采用ANSYS有限元分析软件模拟热处理试板和厚壁过程设备筒体在相似传热模型下的热处理工艺,根据相同热处理工艺下温度场的一致性验证了热处理试板可以模拟过程设备热处理过程。不同材料和不同厚度的设备具有不同的热处理工艺,也应配备不同的热处理试板,当改变某个热处理参数时必须重新制作热处理试板进行加工,为降低热处理试板加工成本,拓展出使用一种材料和厚度的热处理试板等效替代多种材料和厚度的热处理试板的实验方法。

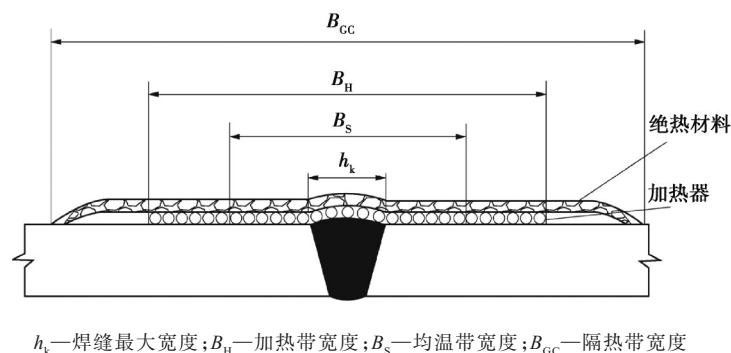


图1 局部热处理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of partial heat treatment

1 数值模拟模型及可行性验证

1.1 热分析模型

采用 ANSYS 软件进行热处理工艺分析,热处理过程属于非线性瞬态热分析,对于圆筒形过程设备内部热传导问题,可以等效为二维轴对称问题,其热传导微分方程为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (1)$$

式中: T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; ρ 为材料密度, kg/m^3 ; λ 为材料的导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$; c 为材料比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$; r 为柱坐标中的径向分量; z 为柱坐标中的轴向分量。考虑工件边界上的热流密度,

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\tau} = q_s(r, z, t), \quad (2)$$

式中: q_s 为外部热源在单位面积上的输入量; n 为工作表面的外法向。

工作表面的边界条件是对流和辐射,如下式所示,

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\tau} = -\alpha(T - T_a) - C_s \varepsilon (T^4 - T_a^4), \quad (3)$$

式中: T_a 为环境温度, $^{\circ}\text{C}$; α 为对流传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$; ε 为辐射换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$; C_s 为 Stefan-Boltzmann 常数。

上述热源模型通过在对对应加热器的表面施加热流密度实现。通过 ANSYS 参数化设计语言 APDL,开发了一套关于控温点温度自动控制热流密度的子程序控制系统,其设计思想为:厚壁板进行局部热处理时,对于控温热电偶出现不同的温度时,都会有加热器给定的一个相应的热流密度 q ,根据控温点调整热流密度,最终得到合适的热处理工艺^[26]。

1.2 实验及数值模拟模型

为验证数值模拟方法,在热处理试板关键位置打孔并放置热电偶测量热处理温度,与数值模拟结果对比,以验证方法的正确性。实验中采用一个圆形热处理试板,半径 R 为 900 mm,厚度 120 mm,焊缝宽度 60 mm,热电偶距离焊缝边缘 100 mm。根据 GB/T30583—2014,选择加热带宽度为 500 mm,隔热带宽度为 900 mm,正反面铺设 500 mm×500 mm 的加热片,正反面保温、隔热片厚度均为 60 mm。热处理试板表面及内部测温点如图 2 和图 3 所示。

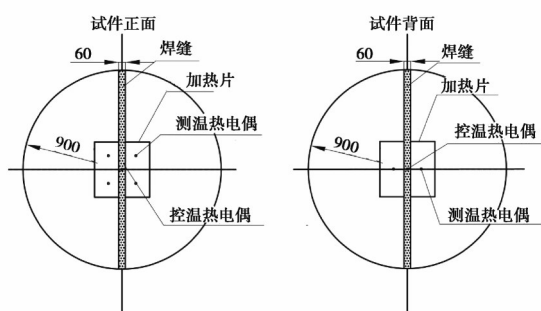


图2 表面测温点及控温点分布/mm

Fig. 2 Places of temperature measuring and controlling on surface

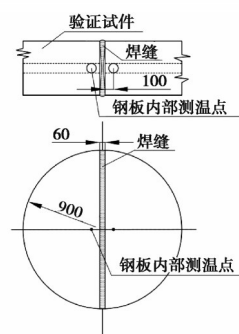


图3 中间测温点分布/mm

Fig. 3 Places of temperature measuring in middle

根据实验所用热处理试板,建立有限元模型如图 4 所示。模拟时在钢板上下表面以圆心为中心的 500 mm×500 mm 范围施加热流密度,热流密度大小需根据测温点温度反复调节,最终选择合适的热流密度。在裸露的钢板外表面及隔热层外表面施加自然对流边界条件。

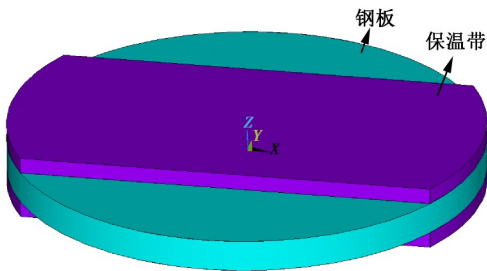


图 4 圆形试板模型
Fig. 4 Circular test plate model

1.3 圆形试板热处理工艺

根据实验的控温要求及预计时间(如表 1 所示)制定了焊接试板热局部热处理工艺(如表 2 所示)。

表 1 实验的控温要求及预计时间

Table 1 Temperature control requirements and estimated time of the experiment		
温度/℃	控温要求	预计持续时间/h
常温~300	不控制升温速度及加热区温度差	0.5
300~600	升温速度(单位:℃/h):45	7.2
	加热区内任意长度为 4 600 mm 内的温差不大于 120 ℃	
600~640	加热区内最高与最低温度之差 不大于 80 ℃	3.0
600~300	降温速度(单位:℃/h):55	5.8

表 2 圆形热处理试板局部热处理工艺

Table 2 Local heat treatment process of circular test plate				
阶段	处理时间/h	热流密度/(W·m ⁻²)	功率/W	
			上表面	下表面
快速升温阶段	1.0	15 000	3 750	3 750
慢速升温阶段	7.2	10 500	2 625	2 625
保温阶段	3.0	8 100	2 025	2 025

1.4 圆形试板模拟结果及分析

试板加热完成并保温 70 min 后的全局温度及加热片覆盖处的局部温度如图 5 和图 6 所示。

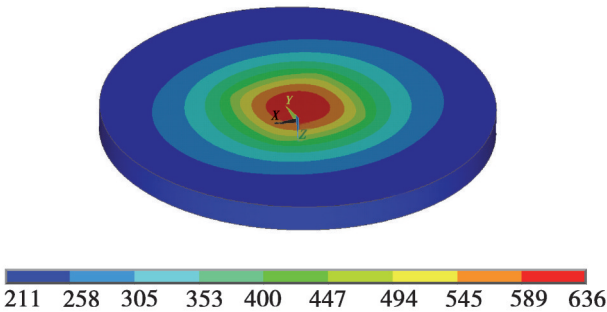


图 5 试板保温完成后全局温度/℃
Fig. 5 Temperature distribution of test plate after holding

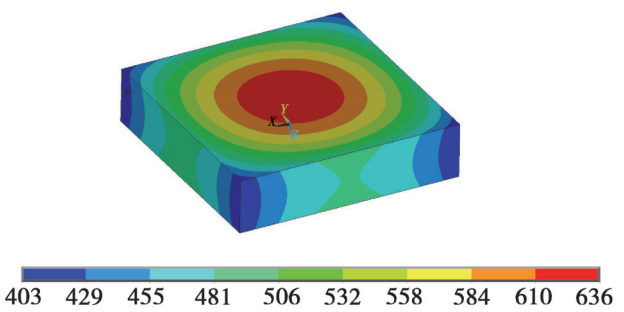


图 6 试板保温完成后 500 mm×500 mm 范围局部温度/℃
Fig. 6 Temperature distribution of central part after holding

从图 5 和图 6 可以看出,尽管加热片形状为方形,试板温度由中心向周围呈圆形梯度变化,由于隔热带并未覆盖整个表面,全局温度呈椭圆变化。计算时未考虑下表面放置于地上情况,按上下表面均与空气接触计算,因此,计算结果对称分布,测温点数据只对比了上表面温度与壁厚中间温度。

1.5 实验结果对比

采用表 1 和表 2 所示热处理工艺进行实验,试板的表面测温点和中间测温点分布如图 2 和图 3 所示。数值模拟温度是根据图 2 和图 3 所示的测温点位置,在有限元模型中提取相应位置的节点温度、两者的上表面、下表面和中心测温点温度取平均温度。热处理实验记录与数值模拟结果对比如表 3 所示,加热完成时最大温差为 16.0 ℃,最小温差为 6.0 ℃;保温后最大温差为 12.0 ℃,最小温差为 3.5 ℃。对比可知,两者的温度相差不大,说明采用的数值模拟方法可行。

表 3 热处理实验与数值模拟温度对比

Table 3 Comparison of experimental temperature and numerical temperature of the test plate °C				
测温电偶	加热完成		保温 70 min 后	
	实验	模拟	实验	模拟
控温热电偶	630.0	640.0	632.0	636.0
上表面测温热电偶	612.0	626.0	614.5	623.0
下表面测温热电偶	610.0	626.0	611.0	623.0
中心测温热电偶	572.0	578.0	586.5	580.0

2 矩形热处理试板模拟计算与分析

2.1 热处理试板模型

针对某一材料为 Q345R,壁厚 94 mm 的过程设备的环焊缝进行局部热处理,以一矩形热处理试板模拟环焊缝的热处理过程,建立的过程设备环焊缝热处理试板模型如图 7 所示。

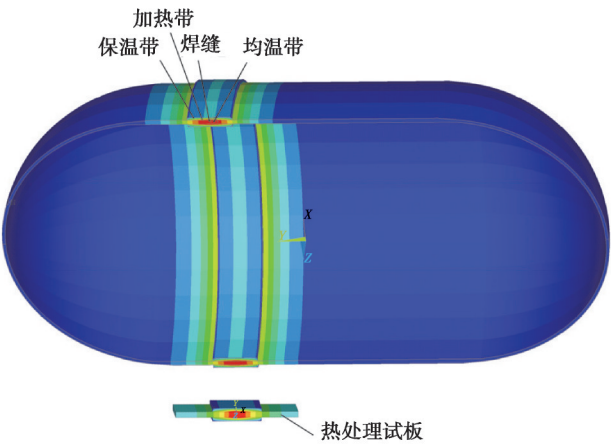


图 7 热处理试板及过程设备局部热处理模型

Fig. 7 Model of test plate and process equipment for local heat treatment

矩形热处理试板能够模拟过程设备热处理过程的前提是温度边界条件等效,为达到和原设备筒体相似的边界条件,热处理试板需在 3 个方向模拟该圆筒形过程设备。热处理试板的厚度为 94 mm,与过程设备相等。长度方向(即筒体轴向)选择距加热器两侧距离温度梯度较小位置;热处理试板的宽度方向模拟筒体的

周向,筒体周向方向为绝热边界条件,因此,热处理试板的宽度不限,但实验过程中需要进行保温,禁止宽度方向散热。热处理试板厚度方向模拟筒体径向,二者在厚度方向热边界条件自然等效。根据以上原则,确定的热处理试板模型如图 8 所示。根据 GB/T 985.2—2008 埋弧焊的推荐坡口标准计算得到焊缝宽度 36 mm;根据 GB/T 30583—2014,取均温带宽度为焊缝宽度+2×50 mm 和焊缝宽度+2×热处理厚度之较小值,对于热处理厚度为 94 mm 的等厚焊缝计算结果为 136 mm,计算时取均温带宽度为 140 mm;加热片宽度为 300 mm;保温长度与设备一致,取 800 mm,正反面采用普通型硅酸铝保温毡进行保温,隔热片厚度取 60 mm。

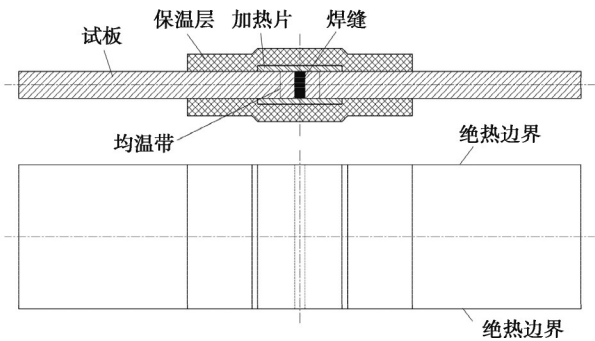


图 8 矩形热处理试板模型
Fig. 8 Rectangular heat treatment test plate

2.2 热处理试板及过程设备温度场分析

2.2.1 热处理试板及过程设备有限元模型

忽略接管等局部结构,图 7 所示过程设备筒体可简化为二维轴对称结构,建立其有限元模型,并进行网格划分(如图 9 所示),ANSYS 软件中二维轴对称模型必须以 Y 轴为对称轴(因空间所限将图 9 横向放置),并且所有模型必须位于 Y 轴右侧,对称轴处为绝热边界。筒体内外、内外保温层与空气接触侧为自然对流边界,取自然对流传热系数为 $5\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$,对流温度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 。忽略加热器的厚度,在图 7 中标注“加热带”的部分施加热流密度边界条件,其中热流密度的大小为:加热功率/加热面积,加热面积即分别与加热器接触的筒体内外表面面积。热处理时所需热流密度根据计算结果进行调整,最终得到满足热处理要求的热流密度和所需加热功率。

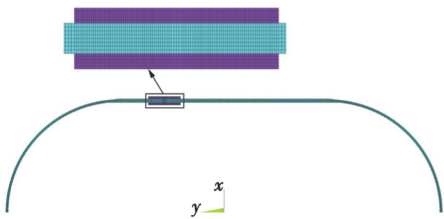


图 9 设备热处理模拟模型及网格
Fig. 9 Modelling and meshing of the equipment

根据图 8 所示热处理试板建立有限元模型,进行网格划分(如图 10)。该矩形热处理试板及过程设备的网格精度与 1.2 中实验验证中圆形试板的网格精度相同,圆形试板网格划分已经过实验验证。其计算边界条件如下:热处理试板厚度方向与筒体设置相同;在宽度方向进行保温,设置为绝热边界;在保温层内上下两侧宽度为 300 mm 的范围施加热流密度。

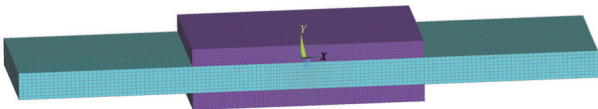


图 10 矩形热处理试板模型及网格

Fig. 10 Modelling and meshing of rectangular test plate

2.2.2 材料属性

热处理过程通过热量的传导达到温度的均匀稳定,需给出材料的热导率。热处理的加热过程所需热量与材料的比热容和质量有关,材料属性还需要给出比热容和密度。本节所涉及 2 种材料 Q345R 和硅酸铝保温毡的密度分别为 7 850 kg/m³和 128 kg/m³,其余属性见表 4。

表 4 材料热导率和比热容

Table 4 Thermal conductivity and specific heat capacity

温度/℃	热导率/(W·(m·℃) ⁻¹)		比热容/(J·(kg·℃) ⁻¹)	
	Q345R	Al ₂ SiO ₅	Q345R	Al ₂ SiO ₅
0	53.40	0.068 0	443.8	0.88
100	50.25	0.073 5	468.9	0.88
200	46.05	0.079 0	494.0	0.88
300	41.81	0.084 5	519.2	0.88
400	41.03	0.090 0	544.3	0.88
500	37.68	0.111 5	569.4	0.88
600	34.33	0.133 0	594.5	0.88
700	31.10	0.154 5	619.6	0.88

2.2.3 热处理试板及过程设备热处理工艺

以厚度为 94 mm、材料为 Q345R、内径为 5 500 mm 的圆筒形过程设备为例进行热处理试验,采用不同的升温速率进行加热。根据 GB/T 30583—2014,确定了各个阶段的热处理时间,根据模拟结果确定了热流密度和加热功率,最终确定的焊接局部热处理工艺见表 5。由于热处理试板和过程设备加热面积不同,导致其加热功率不同,但保证热流密度(单位面积的加热功率)相同,即可保证相同的热处理工艺。

表 5 矩形热处理试板及过程设备局部热处理工艺

Table 5 Local heat treatment process of rectangular heat treatment test plate

阶段	处理时间/h	热流密度/ (W·m ⁻²)	试板加热功率/W		过程设备加热功率/W	
			内侧	外侧	内侧	外侧
快速升温阶段	1.00	12 500	1 875	1 875	64 800	67 000
慢速升温阶段	5.20	8 500	1 275	1 275	44 100	45 600
保温阶段	2.44	6 100	915	915	31 600	32 700

2.3 矩形热处理试板及过程设备模拟结果分析

2.3.1 厚度方向温度变化分析

图 11 为矩形试板与过程设备保温结束后在不同位置壁厚方向温度变化对比图。热处理试板和过程设

备焊缝中心、焊缝熔合线和均温带温度依次降低;厚度方向从壁面到中间温度逐渐降低。热处理需要保证均温带中间温度达到最低热处理温度,同时焊缝中心壁面处不能高于最高热处理温度。图11所示试板和过程设备在相同的热处理工艺下,热处理温度曲线基本一致,说明厚度方向热处理试板可以模拟过程设备进行热处理。

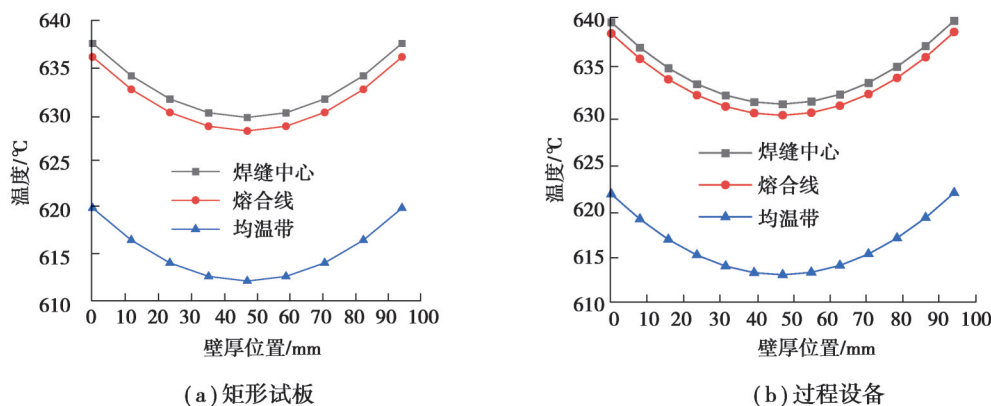


图11 保温结束后不同位置壁厚方向温度对比

Fig. 11 Comparison of temperature in thickness direction at different positions after holding

2.3.2 温度随时间变化分析

图12为矩形热处理试板和过程设备焊缝中心的内壁、外壁及壁厚中间温度随时间的变化曲线,由于采用双面加热,内壁和外壁的温度曲线基本重合,壁厚中间温度与壁面温度存在一定偏差,该偏差在快速升温阶段最大,慢速升温阶段有所降低,在保温阶段降至最低,热处理过程需保证保温阶段偏差不大于 40°C ,且均温带内部温度处于热处理温度 $\pm 20^{\circ}\text{C}$ 范围内。图12所示热处理试板和过程设备在相同加热功率下,整个热处理时间历程内温度曲线基本一致。说明热处理试板可以模拟过程设备的整个热处理过程。

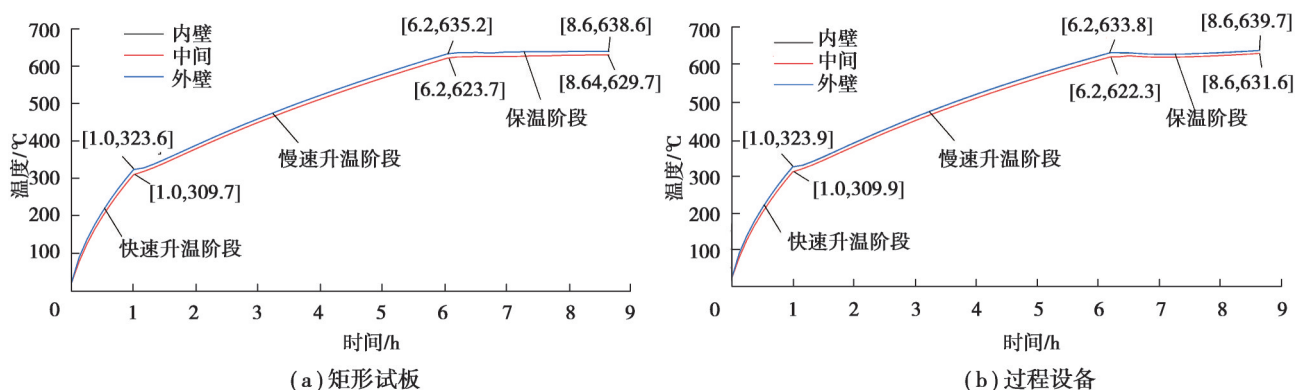


图12 热处理试板及过程设备热处理温度时间历程曲线

Fig. 12 Temperature of test plate and process equipment during heat treatment processes

2.3.3 轴向温度变化分析

图13显示矩形热处理试板和过程设备热处理加热完成后及保温完成后筒体轴向温度分布,在均温带两侧仍存在一定的低温区,离开足够远的距离后方可降至常温。当热处理试板长度为 2000 mm 时,其轴向温度分布已接近过程设备相关位置轴向温度分布,说明焊缝两侧各取 1000 mm 已满足等效条件。图中所示矩形热处理试板和过程设备在焊缝两侧各 1000 mm 范围内温度曲线基本一致,说明热处理试板可以在长度方向模拟过程设备热处理。

矩形热处理试板的有限元数值模拟结果表明,通过在宽度方向创造与圆筒形过程设备相同的边界条件,并采用与过程设备相同的方式进行热处理,包括相同的板厚、焊缝宽度、均温带宽度、加热宽度、单位面积加

热功率和保温宽度,可以得到与圆筒相似的温度分布及温度—时间曲线。因此,采用焊接热处理试板可以模拟圆筒形过程设备局部热处理的温度场,通过测量热处理试板内部温度可以间接评估过程设备热处理过程的温度,是一种新型实验方法。

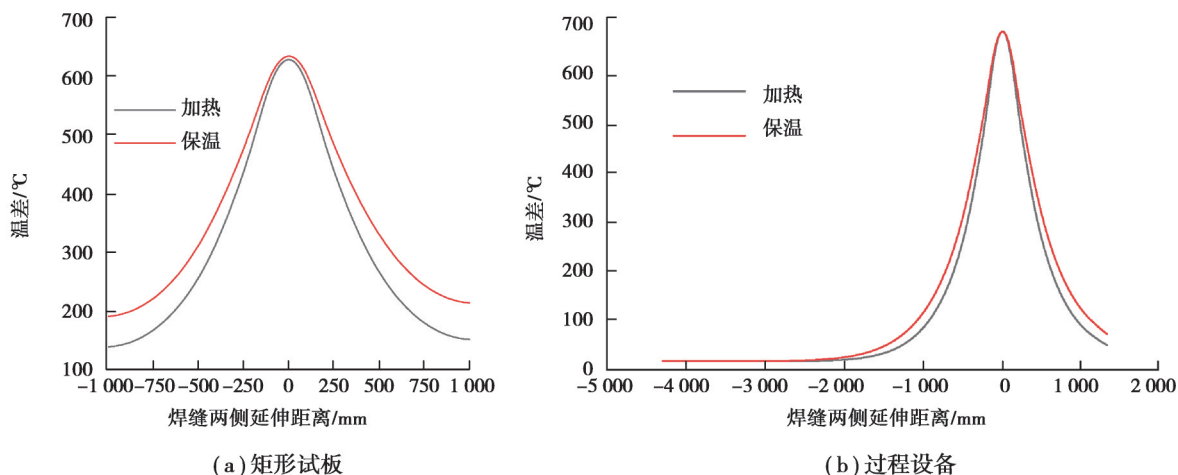


图13 轴向温度分布

Fig. 13 Axial temperature

3 热处理试板模拟不同厚度、材料过程设备拓展应用

不同材料与不同厚度的设备有着不同的热处理工艺,也应配备不同的热处理试板。热处理试板制作工艺复杂,不但包括原料成本,还包括加工、制作、打孔成本,针对每个设备加工热处理试板会带来巨大的经济成本和时间成本。不同的热处理试板材料价格相差很大,有些材料每吨价格高达几万元,其热处理试板成本更高。故提出以一种厚度和材料的热处理试板,等效模拟多种不同厚度、不同材料的热处理试板,大大节约热处理试板制作的经济成本和时间成本。

3.1 模拟不同厚度过程设备热处理工艺的方法

3.1.1 加热功率等效方法

单面加热时,对不同厚度热处理试板不同阶段加热功率的模拟方法如下(双面加热时,各个阶段上下表面的加热功率分别为单面加热时的1/2)。

1) 快速升温阶段

室温~300 °C范围可在1 h完成加热,即 $t=3\,600\text{ s}$,温差 $\Delta T=300\text{ °C}-T_a$,加热功率为

$$P = \frac{\Delta T \rho_T c_T A \delta_2}{3\,600} + 2\alpha A (T - T_a), \quad (4)$$

式中:右侧第1项为试板升温所需热量;第2项为试板与空气对流换热功率; P 为加热功率,W; ρ_T 为试板密度, kg/m^3 ; c_T 为试板材料比热容, $\text{J/(kg}\cdot\text{°C)}$; A 为加热面积, m^2 ; δ_2 为模拟的热处理试板厚度,m; ΔT 为温差,即加热温度与初始温度之差; α 为对流传热系数, $\text{W/(m}^2\cdot\text{°C)}$ 。

2) 慢速升温阶段

$$P = \frac{5\,500 \rho_T c_T A}{3\,600 \times 1\,000} + 2\alpha A (T - T_a). \quad (5)$$

3) 保温阶段

$$P = 2\alpha A (T - T_a). \quad (6)$$

由于不同厚度试板均温带宽度不同,对不同厚度热处理试板进行加热功率的模拟时,采用如下系数进行修正,

$$\begin{cases} \gamma = (1 + \frac{\delta_2}{\delta_1} \times \sin 5^\circ), & \delta_2 \geq \delta_1, \\ \gamma = (1 - \frac{\delta_1}{\delta_2} \times \sin 5^\circ), & \delta_2 < \delta_1, \end{cases} \quad (7)$$

式中: γ 为修正系数; δ_1 为试验热处理试板厚度,m。

因此,慢速升温阶段加热功率修正为

$$P = \left[\frac{5\,500\rho_T c_T A}{3\,600 \times 1\,000} + 2\alpha A(T - T_a) \right] \gamma \quad (8)$$

保温阶段的加热功率修正为

$$P = 2\gamma\alpha A(T - T_a) \quad (9)$$

3.1.2 壁厚温差等效方法

单面加热时,对不同厚度的热处理试板厚度方向温差 T_δ 的模拟方法如下(双面加热时厚度方向温差分别为单面加热时厚度方向温差的1/4)

1) 快速升温阶段

$$T_\delta = \frac{\frac{\Delta T \rho_T c_T \delta_2}{3\,600} + 2\alpha(T - T_a)}{\lambda_T} \delta_{20} \quad (10)$$

2) 慢速升温阶段

$$T_\delta = \frac{\gamma \left[\frac{5\,500\rho_T c_T}{3\,600 \times 1\,000} + 2\alpha(T - T_a) \right]}{\lambda_T} \delta_{20} \quad (11)$$

3) 保温阶段

$$T_\delta = \frac{2\alpha(T - T_a)}{\lambda_T} \delta_{20} \quad (12)$$

为验证上述方法的可行性,采用经过实验验证的数值模拟方法对不同厚度的试板加热功率及壁厚温差进行模拟,与公式计算结果进行对比。假设试板厚度为120 mm,材料为Q345R,根据模拟得到的加热功率以及材料的物理性能计算对流传热系数,根据对流传热系数及壁厚采用公式(4)~(12)对94和62 mm厚度试板的加热功率及壁厚温差进行计算,并与数值模拟结果进行对比。

不同厚度下热处理试板加热功率及壁厚温差见图14。根据120 mm试板加热功率计算的94和62 mm结果与数值模拟结果非常接近,说明通过本文所给出的公式,仅采用一种厚度试板进行试验时可以对其他厚度试板的加热功率修正以及壁厚方向温差进行较为准确的模拟,节约了试板制作的经济成本和时间成本。

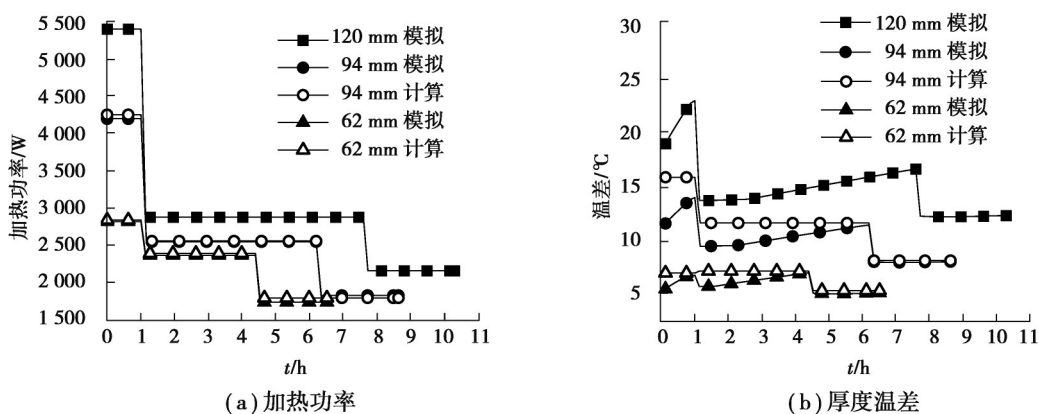


图14 模拟不同厚度试板热处理过程

Fig. 14 Simulating heat treatment process of test plates with different thickness

3.2 模拟不同材料过程设备热处理工艺的方法

不同材料设备热处理试板热处理过程所需时间可通过标准进行计算,但不同材料试板的加热功率以及厚度方向温差需要根据不同的试板进行试验方可确定。针对不同材料热处理试板,提出以下通用计算方法,用于确定不同材料试板的热处理加热功率以及厚度方向温差,使一种材料试板可代替多种材料试板。

3.2.1 加热功率等效方法

1) 快速升温阶段

室温~300 °C范围内在1 h完成加热,即 $t=3\ 600\text{ s}$,温差 $\Delta T=300\text{ °C}-T_a$;加热功率为

$$P = \frac{\Delta T \rho_T c_T A \delta}{3\ 600} + 2\alpha A (T - T_a) \quad (13)$$

快速升温阶段加热终温相同,因此,不同材料试板散热(P_1)部分基本相同,且不同材料板材的面积 A 相同,当厚度相同时,加热功率的差别主要取决于试板密度和比热容,密度与比热容的乘积越大加热功率越大。

2) 慢速升温阶段

加热功率为

$$P = \frac{Q}{t} + P_1 = \frac{5\ 500 \rho_T c_T A}{3\ 600 \times 1\ 000} + 2\alpha A (T - T_a) \quad (14)$$

3) 保温阶段

保温阶段的加热功率是为了平衡试板向周围的散热,即试板与空气对流换热 P_1 ,此阶段 P 与 P_1 相等,因此,

$$P = 2\alpha A (T - T_a) \quad (15)$$

该项与试板材料无关,可见保温阶段加热功率与试板材料无关,但不同材料热处理试板加热终温不同,加热终温越高,加热功率越大。

3.2.2 壁厚温差等效方法

壁厚方向的温差按照热传导公式计算。

1) 快速升温阶段

$$T_\delta = \frac{P\delta}{\lambda_T A} = \frac{\frac{\Delta T \rho_T c_T \delta}{3\ 600} + 2\alpha (T - T_a)}{\lambda_T} \delta, \quad (16)$$

式中, δ 为壁厚,m。

2) 慢速升温阶段

$$T_\delta = \frac{P\delta}{\lambda_T A} = \frac{\frac{5\ 500 \rho_T c_T}{3\ 600 \times 1\ 000} + 2\alpha (T - T_a)}{\lambda_T} \delta \quad (17)$$

3) 保温阶段

$$T_\delta = \frac{P\delta}{\lambda_T A} = \frac{2\alpha (T - T_a)}{\lambda_T} \delta \quad (18)$$

上述中所给出的温度是每一阶段的加热终了温度,而非过程中间温度。

为验证上述方法的可行性,采用15CrMoR材料热处理试板进行试验,计算对流传热系数,并对Q345R试板进行模拟,15CrMoR的密度为 $7\ 850\text{ kg/m}^3$,其余属性见表6。

表6 15CrMoR材料属性

Table 6 Material properties of 15CrMoR

温度/°C	热导率/($\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$)	比热容/($\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$)
0	44.4	450
100	44.4	500
200	44.4	500
300	41.9	540
400	39.4	540
500	37.3	630
600	34.8	800
700	32.3	970

采用120 mm厚的15CrMoR试板的加热功率及壁厚温差结果通过公式(13)~(18)对Q345R材料试板的热处理工艺进行确定,同样采用经过实验验证的ANSYS热分析模拟结果和公式计算结果进行对比,结果见

图15。说明通过公式计算,采用一种材料试板代替不同材料试板得到的加热功率非常精确,壁厚温差与模拟结果略有差别,但温差在 2°C 之内,对热处理过程无影响。

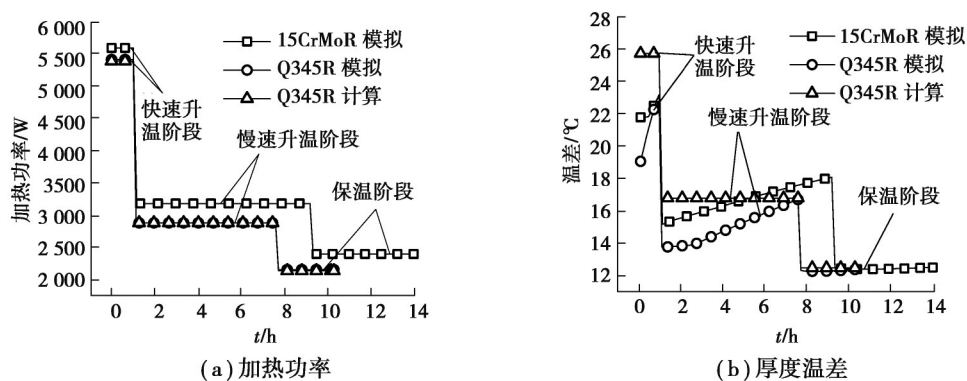


图15 模拟不同材料试板热处理过程

Fig. 15 Simulating heat treatment process of test plates with different materials

4 结 论

建立了一种采用热处理试板模拟过程设备的热处理工艺,采用实验及数值模拟方法验证了其可行性,并根据热力学计算及传热计算,拓展出采用一种材料和厚度热处理试板可模拟多种材料和厚度试板确定热处理工艺。得到以下主要结论:

1)通过3个方向的边界条件等效建立的热处理试板与过程设备在相同加热工艺下,焊缝中心、熔合线和均温带壁厚方向温度一致,加热时间历程中温度一致,热处理试板长度范围内温度一致,证明可以利用热处理试板内部温度的测量结果间接评估过程设备热处理过程的工艺。

2)基于热力学计算和传热计算得到的结果与仿真模拟结果对比可知,建立的功率和壁厚方向温差计算公式可以模拟不同材料和不同厚度热处理试板的热处理工艺。

参考文献

- [1] 杨秀凤,段占军,杨丽娜,等.大型设备的焊后热处理[J].化工装备技术,2009,30(4):41-43.
Yang X F, Duan Z J, Yang L N, et al. Heat treatment after welding for large scale equipment[J]. Chemical Equipment Technology, 2009, 30(4): 41-43. (in Chinese)
- [2] 陈铸山,冯芷平,常城,等.超大型压力容器的现场组焊技术初探[J].中国化工装备,2011,13(4):34-38.
Chen Z S, Feng Z P, Chang C, et al. Discuss on the technique of field manufacture about ultra large-scale pressure vessel[J]. China Chemical Industry Equipment, 2011, 13(4): 34-38. (in Chinese)
- [3] 李佳林,王峰,李华.大型水轮发电机组座环电站现场加工工艺[J].水电站机电技术,2023,46(3):14-17.
Li J L, Wang F, Li H. On-site processing technology of stay ring power station of large hydro-generator unit[J]. Mechanical & Electrical Technique of Hydropower Station, 2023, 46(3): 14-17. (in Chinese)
- [4] 黄华强,李柏松,魏守盼,等.焊接残余应力产生原因分析及消除方法[J].机电信息,2018(18):115-116.
Huang H Q, Li B S, Wei S P, et al. Cause analysis and elimination method of welding residual stress[J]. Mechanical and Electrical Information, 2018(18): 115-116. (in Chinese)
- [5] Yaghoubi S, Shishesaz M. A novel approach to investigate transient stress distribution caused by fiber breakage in simple and hybrid composite materials[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2023, 23(1): 325-338.
- [6] 余昌莲.焊接结构的残余应力研究[D].武汉:武汉理工大学,2006.
She C L. Research on residual stress of welded structure[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [7] 赵剑,卞冰.浅析焊接残余应力的产生及影响[J].山东工业技术,2016,(6):9.
Zhao J, Bian B. Analysis on the generation and influence of welding residual stress[J]. Shandong Industrial Technology, 2016, (6): 9. (in Chinese)

- [8] Zhang M, Gao C Q, Wang C H, et al. Fracture failure analysis of a lightning rod on a substation frame considering residual thermal stress[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2023, 154: 107679.
- [9] Padasale B, Rakshan Kumar J K, Sondar P R, et al. Failure analysis of cooling tower fan-arm[J]. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2020, 20(4): 1417-1425.
- [10] Thomas D J. Analyzing the failure of welded steel components in construction systems[J]. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2018, 18(2): 304-314.
- [11] Kasl J. Failure analysis of a cracked tram axle[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, 2572(1): 012002.
- [12] Chen S G, Zhang Y D, Wu Q, et al. Residual stress relief for 2219 aluminum alloy weldments: a comparative study on three stress relief methods[J]. *Metals*, 2019, 9(4): 419.
- [13] Lv T, Zhang Y D. A combined method of thermal and vibratory stress relief[J]. *Journal of Vibroengineering*, 2015, 17: 2837-2845.
- [14] Li F, Chen G, Dong T L, et al. Microplastic deformation activating residual stress relief for Al alloy[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, 254: 108446.
- [15] 韩冬, 谭明华, 王伟明, 等. 振动时效技术的研究及发展[J]. *机床与液压*, 2007, 35(7): 225-228, 244.
Han D, Tan M H, Wang W M, et al. Research and development of vibratory stress relief[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2007, 35(7): 225-228, 244. (in Chinese)
- [16] Xiu L, Liu Z H, Lv G, et al. Remove welding residual stress for CFETR vacuum vessel by trailing ultrasonic impact treatment [J]. *Journal of Fusion Energy*, 2018, 37(4): 193-199.
- [17] 王昊天. 超大容器环焊缝残余应力计算与调控[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2020.
Wang H T, Calculation and control of residual stress in hoop weld joint of super large pressure vessel[D]. Dongying: China University of Petroleum (East China), 2020. (in Chinese)
- [18] Krishnan K N. The effect of post weld heat treatment on the properties of 6061 friction stir welded joints[J]. *Journal of Materials Science*, 2002, 37(3): 473-480.
- [19] 倪建东. 大型容器设备的现场组焊分析[J]. *装备维修技术*, 2020, (1): 195.
Ni J D. On-site assembly welding analysis of large container equipment[J]. *Equipment Technology*, 2020, (1): 195. (in Chinese)
- [20] 于步江, 黄梦叶. 压力容器焊接质量分析及控制建议[J]. *中国设备工程*, 2023, (7): 128-130.
Yu B J, Huang M Y. Welding quality analysis and control suggestions of pressure vessel[J]. *China Plant Engineering*, 2023, (7): 128-130. (in Chinese)
- [21] 马毓姝, 张晓兰, 刘博, 等. 压力容器焊后热处理热平衡计算[J]. *化学工程与装备*, 2017, (2): 51-54.
Ma Y S, Zhang X L, Liu Bo, et al. Heat balance calculation for post weld heat treatment of pressure vessels[J]. *Chemical Engineering & Equipment*, 2017, (2): 51-54. (in Chinese)
- [22] 王拥军, 陈永志. 关于地下污油罐设备热处理事故的分析[J]. *化工装备技术*, 2013, 34(4): 40-41.
Wang Y J, Chen Y Z. Analysis on heat-treatment accident of underground waste oil tank[J]. *Chemical Equipment Technology*, 2013, 34(4): 40-41. (in Chinese)
- [23] Neidel A, Giller M, Riesenbeck S. How inadequate heat treatment or complete lack thereof can cause component failures[J]. *Practical Metallography*, 2023, 60(7): 461-475.
- [24] Liu X Y, Zhang D, Su H, et al. Numerical simulation and experimental study on heat treatment process of U20Mn bainite rail [J]. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 2022, 11(1): 119-131.
- [25] 王新利. 球罐焊接试板热处理不同加热方法分析及比较[J]. *化工建设工程*, 2003, 25(6): 23-24.
Wang X L. Comparison of the different heating methods in the heat-treated spherical tank welded plates[J]. *Chemical Engineering Construction*, 2003, 25(6): 23-24. (in Chinese)
- [26] 张建林, 鲁立, 朱平, 等. A335P92钢管局部热处理温度场有限元模拟研究[J]. *热加工工艺*, 2018, 47(16): 208-211.
Zhang J L, Lu L, Zhu P, et al. Finite element simulation of temperature field of A335P92 steel pipe during local heat treatment [J]. *Hot Working Technology*, 2018, 47(16): 208-211. (in Chinese)

(编辑 吕建斌)