DOI: 10.3901/JME.2019.06.046

熔敷顺序和管壁厚度对异种钢管板接头焊接残余应力与变形的影响*

郑 乔¹ 逯世杰¹ 李 索¹ 林旭东² 王义峰¹ 邓德安¹

(1. 重庆大学材料科学与工程学院 重庆 400044;

2. 重庆科技发展战略研究院 重庆 401123)

摘要: 异种钢焊接接头广泛应用于机械、化工、电力和交通等领域的装备制造中, 由于异种钢接头的材料不同, 焊接过程中产生的残余应力分布十分复杂, 但关于异种钢焊接接头残余应力的研究还很不充分。以 SYSWELD 有限元软件为平台, 开发用于模拟异种钢焊接接头残余应力与变形的热-弹-塑性有限元计算方法。基于此方法, 以异种钢管-板焊接接头为对象, 研究不同熔敷顺序和管壁厚度对接头焊接残余应力与变形的影响。在数值模拟过程中, 针对不同类型的材料采用不同的本构模型来模拟材料的力学行为。采用接触式三维坐标测量仪测量焊接接头特征位置的变形量, 验证有限元计算方法的有效性。研究表明, 管板接头的残余应力分布受熔敷顺序的影响十分显著, 变形分布形态也在一定程度上受到了熔敷顺序的影响。随着管壁厚度的增加, 圆管径向变形量反而减小, 周向残余应力的峰值有所增加, 同时圆管与焊缝异材界面处的周向残余应力梯度也明显增大。开发的数值模拟方法将是预测异种钢焊接接头残余应力与变形的有力工具, 模拟结果将为焊接结构的健全性评价供理论支撑。

关键词: 异种钢; 数值模拟; 残余应力; 焊接变形

中图分类号: TG404

Influence of Deposition Sequence and Thickness of Tube on Welding Residual Stress and Deformation in Dissimilar Steel Tube-block Welded Joint

ZHENG Qiao¹ LU Shijie¹ LI Suo¹ LIN Xudong² WANG Yifeng¹ DENG Dean¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044;

2. Chongqing Academy of S&T For Development, Chongqing 401123)

Abstract: Dissimilar metal welded (DMW) joint is widely used in machinery, chemical industry, electricity and transportation. Due to different material properties of DMW joint, the residual stress distribution induced by welding is very complex. So far, the research on welding residual stress of DMW joints is still inadequate. Based on SYSWELD software, a thermal elastic plastic finite element method is developed to simulate residual stress and deformation for DMW joints. Based on the developed computational approach, the influence of deposition sequence and wall thickness of pipe on welding residual stress and deformation in a tube-plate joint is investigated. In the numerical simulations, different constitutive models are used to simulate the mechanical behavior of different types of steel. Meanwhile, the deformations of welding joint at characteristic positions are measured by using 3D contact coordinate measuring instrument, which verifies the validity of the computational approach. The results show that the residual stress distribution of the tube-plate joint is significantly affected by the deposition sequence, and the deformation distribution pattern is also affected by the deposition sequence to some extent. As the thickness of tube increases, the deformation in the radial direction decreases, and the peak value of the hoop residual stress increases. The numerical simulation method developed is a powerful tool for predicting residual stress and deformation of welding joints of different types of steel and the simulated results obtained by numerical simulation can provide theoretical support for the performance evaluation of welded structure.

Key words: dissimilar steel; numerical simulation; residual stress; welding deformation

* 国家自然科学基金(51275544)和重庆市研究生科研创新(CYB18003)资助项目。20180706 收到初稿, 20181012 收到修改稿

0 前言

低碳钢或者低合金钢与不锈钢异种材料的焊接接头,近年来在实际焊接结构中得到了广泛应用^[1-4]。低合金钢和奥氏体不锈钢焊接时,由于热物理性质和力学性能存在较大的差异,焊接接头形成焊接残余应力与变形与同材质的接头有显著差异^[5]。因此,针对低合金钢和奥氏体不锈钢异种钢接头的残余应力和变形的研究,不仅在焊接学科上具有重要的理论意义,而且也有较高的工程应用价值。

自20世纪70年代UEDA等^[6]提出用热-弹-塑性有限元模型计算焊接残余应力与变形以来,焊接数值模拟得到飞速发展。近年来,采用数值模拟方法对异种钢接头的焊接残余应力与变形也进行了一些探索和研究。KIYOSHIMA等^[7]研究了低合金高强钢与奥氏体不锈钢组成的异种钢接头的焊接残余应力。YE等^[8]基于有限元模型和试验结果讨论了Q345/SUS304平板对接接头在不同坡口形式下产生的残余应力分布特征。DENG等^[9]考虑焊前的表面层熔敷堆焊、熔敷后热处理及焊接等多加工工序,采用有限元方法研究了SFVQ1A/SUSF316异种钢管焊接接头的残余应力分布特征。MURANSKY等^[10]采用试验法研究熔敷层对SA508/AISI316异种钢安全泄压阀喷嘴焊接残余应力分布的影响。

作为基础研究,本文以Q235/SUS304不锈钢管-板接头为研究对象,采用试验手段和数值模拟技术来研究管板接头的焊接残余应力分布和变形特征。基于SYSWELD软件,开发了“热-弹-塑性非线性有限元方法”,利用开发的数值方法计算了SUS304/Q235异种钢管板接头的焊接温度场、残余应力和焊接变形。采用三坐标测量仪测量了两种管壁厚度(6 mm、12.7 mm)圆管的内壁特征位置的径向变形量,并把计算得到的变形量与测量结果进行比较。此外,基于数值模拟得到的结果,研究了熔敷顺序、管壁厚度对焊接残余应力和变形的影响,并进一步探究焊接起始位置的残余应力分布特征。

1 试验方法

本研究采用TIG焊打底,MIG填充和盖面的焊接工艺针对不同壁厚的圆管进行焊接。焊接接头、焊道布置及试验采用的熔敷顺序如图1a所示。圆管、圆板的材料分别为奥氏体不锈钢SUS304和

Q235,填充焊丝材料为镍基合金82。在两个焊接接头中,只有圆管壁厚不同,它们分别为6 mm和12.7 mm。管的外径为125 mm、长度为200 mm;圆板外径为230 mm,厚度为70 mm。焊前圆管和圆板装配后,两者之间存在一定的间隙,如图1b所示。焊接过程中,电流为170~220 A,电压为9~11 V,焊接速度为1.5~2.5 mm/s,每道焊道的线能量为0.8~1.5 kJ/mm,层间温度为50~100 °C,熔敷顺序如图1c所示。焊接完成后,采用接触式三坐标仪来测量90°和270°位置的管内壁的径向变形量。

图1 焊接实物图、焊接件尺寸和熔敷顺序

2 有限元数值模拟

2.1 有限元模型

基于SYSWELD软件平台,开发了顺序耦合的“热-弹-塑性有限元计算方法”来研究熔敷顺序和管壁厚度对异种钢管-板接头焊接残余应力与变形的影响。根据不同的熔敷顺序和圆管壁厚,设计了四种不同的计算方案,见表1。不同计算方案的熔敷顺序,如图2所示。其中,图2a中的熔敷顺序与试验中的实际熔敷顺序完全一致,即采用先从0°→90°→180°,随后再从0°→270°→180°的两段熔敷方式来实施焊接。而图2b则采用0°→90°→180°→270°→0°的一周连续熔敷的方式来完成焊接。

用方案A、B计算采用相同的有限元模型,如图3a所示。该模型中的单元类型为八节点六面体单元,单元总数为65 024,节点数为70 492。方案C、D的有限元模型见图3b,单元数为68 160,节点数为74 397。焊缝截面焊道布置如图4所示。为了防止数值模拟过程中有限元模型发生刚体位移,在圆

管下表面 0° 、 90° 、 180° 的位置采用三点六自由度拘束方式。计算时, 奥氏体不锈钢 SUS304、Alloy82 镍基合金以及低合金钢 Q235 的高温热物理性能力学性能参数, 如图 5 所示^[11-13]。

表 1 模拟方案

方案	圆管壁厚/mm	熔敷顺序
A	6	$0^\circ \rightarrow 90^\circ \rightarrow 180^\circ$, $0^\circ \rightarrow 270^\circ \rightarrow 180^\circ$ (两段式)
B	6	$0^\circ \rightarrow 90^\circ \rightarrow 180^\circ \rightarrow 270^\circ \rightarrow 0^\circ$ (连续式)
C	12.7	$0^\circ \rightarrow 90^\circ \rightarrow 180^\circ$, $0^\circ \rightarrow 270^\circ \rightarrow 180^\circ$ (两段式)
D	12.7	$0^\circ \rightarrow 90^\circ \rightarrow 180^\circ \rightarrow 270^\circ \rightarrow 0^\circ$ (连续式)

(a) 方案 A、C 熔敷顺序

(b) 方案 B、D 熔敷顺序

图 2 熔敷顺序示意图

图 3 有限元模型

图 4 焊缝截面焊道布置

(a) SUS304 热物理性能参数

(b) SUS304 力学性能参数

(c) 镍基合金 82 热物理性能

(d) 镍基合金 82 力学性能

(e) Q235 热物理性能

图5 材料热物理-力学性能参数

2.2 温度场的计算

温度场的计算过程中, 采用 SYSWELD 软件中提供的双椭球移动热源模型来模拟焊接热量输入。本研究采用的模型中, 将热流分布参数进行了归一化处理, 计算过程中收敛性更好。移动热源的前、后 1/4 椭球的热流密度

$$q_f(x, y, z) =$$

$$Q_f \exp(-x^2/a_f^2) \exp(-y^2/b^2) \exp(-z^2/c^2) \quad (1)$$

$$q_r(x, y, z) =$$

$$Q_r \exp(-x^2/a_r^2) \exp(-y^2/b^2) \exp(-z^2/c^2) \quad (2)$$

式中, Q_f 、 Q_r 为前、后 1/4 椭球热输入 ($Q_f/Q_r=1.2$), a_f 、 a_r 、 b 、 c 为椭球的形状参数 ($a_f/a_r=0.6$)。

焊接过程中, 电弧热在工件中热传导控制方程

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = \nabla (\lambda \nabla T) + \frac{\partial q_{arc}}{\partial t} \quad (3)$$

式中, ρ 为材料的密度, c_p 为比热容, T 为温度, t 为时间, ∇ 为拉普拉斯算子, q_{arc} 为焊接热源热流密度。

焊接件在加热和冷却过程中, 材料通过对流和辐射的方式与周围的环境进行热量交换, 其中, 焊接件与环境的对流传热遵循 Newton 定律

$$q_a = -h_a(T_s - T_a) \quad (4)$$

式中, q_a 为焊接件与环境之间的热量交换, h_a ($25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$) 为对流交换系数, T_s 为焊接件表面温度, T_a 为环境温度。

辐射所损失的热量可通过以下控制方程计算

$$q_h = -\varepsilon \sigma \left[(T_s + 273)^4 - (T_a + 273)^4 \right] \quad (5)$$

式中, ε 为热辐射系数 (计算中取值为 0.8), σ ($56.7 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$) 为 Stefan-Boltzmann 常数。

2.3 应力与变形的计算

数值模拟过程中, 首先将温度场的结果加载到热-弹-塑性有限元模块中, 同时采用随温度变化的力学性能参数来计算焊接残余应力与变形。计算时, 材料的总应变包括弹性应变、热应变、塑性应变、相变塑性应变和蠕变应变。总应变增量可以采用如下方程表示

$$\Delta \varepsilon_{\text{total}} = \Delta \varepsilon^e + \Delta \varepsilon^{\text{th}} + \Delta \varepsilon^{\text{pc}} + \Delta \varepsilon^{\text{tp}} + \Delta \varepsilon^c \quad (6)$$

式中, $\Delta \varepsilon^e$ 弹性应变增量, $\Delta \varepsilon^{\text{pc}}$ 为塑性应变增量, $\Delta \varepsilon^{\text{th}}$ 为热应变增量, $\Delta \varepsilon^{\text{tp}}$ 为相变塑性应变增量, $\Delta \varepsilon^c$ 蠕变应变增量

由于试验所用材料分别为低合金钢^[14]、奥氏体不锈钢以及镍基合金, 固态相变对应力与变形的影响不够明显或者完全没有影响, 因此计算时不考虑相变应变的影响。同时, 焊接是短时间的加热和冷却过程, 在高温停留时间较短, 可忽略蠕变应变的影响。忽略相变应变和蠕变应变成分后, 材料的总应变增量只包含弹性应变、热应变、塑性应变。总应变增量可以表示如下

$$\Delta \varepsilon_{\text{total}} = \Delta \varepsilon^e + \Delta \varepsilon^{\text{th}} + \Delta \varepsilon^{\text{pc}} \quad (7)$$

计算时, 弹性行为遵守各向同性 Hooke 定律, 屈服准则服从 Von Mises 准则。由于低合金钢的加工硬化倾向不明显, 采用理想弹塑性模型; 而奥氏体不锈钢 SUS304 和 Alloy82 镍基合金加工硬化相对显著, 计算中采用各向同性硬化准则考虑加工硬化^[15]。在考虑加工硬化同时, 也考虑了退火软化效应, 在本研究中退火温度设定为 1 200 °C。

3 结果与讨论

3.1 焊接变形

试验过程中, 分别沿 L1、L2 路径测量了圆管内壁 90° 和 270° 位置的径向变形量。且定义 P1、P2 分别为 L1、L2 所在路径的中点位置, 如图 6 所示。

图6 定义路径

图7、8分别为6 mm壁厚的模型在不同熔敷顺序条件下L1、L2路径上的径向变形分布。由图7可知,数值模拟得到的径向变形分布与测量结果基本吻合。根据计算结果可知,距P1 $\pm$ 10 mm、P2 $\pm$ 10 mm左右的位置存在径向变形的两个波峰。在+10 mm处的波峰值要显著大于-10 mm处的峰值。而图8中,+10 mm处的峰值与-10 mm处的峰值差异较小。比较图7、8可知,L1的径向变形量略小于L2的径向变形量,而且熔敷顺序对径向变形的影响并不显著。需要说明的是,由于试验测量仪器的测量误差在 $\pm 50\text{ }\mu\text{m}$ 的范围,且焊接接头径向变形相对较小(小于 $500\text{ }\mu\text{m}$),因此测量结果与计算结果不可避免地会存在一定的偏差。总体而言,计算结果能够较好地反映实际焊接接头的变形。

图7 壁厚6 mm不同熔敷顺序L1径向变形量

图8 壁厚6 mm不同熔敷顺序L2径向变形量

图9、10是壁厚为12.7 mm模型采用两种不同熔敷顺序焊接后L1、L2路径上的径向位移分布图。由图9、10可知,方案C、D在L1、L2路径上的径向位移分布与方案A、B的分布特征类似,但是数值大小不同。由于方案C、D的管壁厚度约为方案A、B的两倍,结构刚度与壁厚是正向相关关系,方案C、D抵抗变形的能力也就越大,因此,方案C、D的变形量较方案A、B要小。对比图9、10可知,整体而言,方案C的变形量略大于方案D。此外,从图7、9可知,随着管壁厚度的增加,圆管内壁径向变形量明显减小。

图9 壁厚12.7 mm不同熔敷顺序L1径向变形量

图10 壁厚12.7 mm不同熔敷顺序L2径向变形量

为了便于清晰观察焊接前后试件的变形模式,将有限元三维模型沿截面A-A剖开,四个计算案例的变形如图11~14所示。由于焊接变形相对较小,如果不放大变形量很难看到显著的焊接变形,在SYSWELD软件后处理时,人为将变形量放大20倍,由图可以很清晰地看到管-板模型在焊接后的变形形态。

图11 方案A焊接变形

图12 方案B焊接变形

图 13 方案 C 焊接变形

图 14 方案 D 焊接变形

图 11 为方案 A 的焊接变形图。由图 11 可知, 焊后试件在 180° 位置产生较大的角变形, 主要是因为方案 A 的焊接顺序为两段式熔敷, 焊接过程中 180° 位置为焊接结束点, 焊缝金属最后冷却。该位置受自身结构的拘束大于 0° 位置, 因而产生了比 0° 位置更大的角变形。

由方案 B 可知, 0° 和 180° 位置都存在一定的角变形, 不过这两个位置的角变形差别不十分明显。方案 B 的焊接顺序为连续式熔敷, 尽管 0° 位置的每道焊都经历两次热循环, 但是与 180° 位置相比, 它们之间的角变形差别并不显著。比较图 11 和 12 发现, 由于熔敷顺序不同, 方案 A、B 焊接后的变形形态(角变形)有所不同, 方案 A 的变形形态对称性差, 而方案 B 的变形形态对称性相对较好。

图 13 为方案 C 的焊接变形图。比较方案 A、C 的焊接变形, 发现方案 C 的变形模式与 A 相似, 而方案 C 的变形量比方案 A 的小。方案 C、A 具有相同的熔敷顺序, 是拥有相同变形模式的主要原因, 管壁板厚是支配焊接变形量大小的主要因素。从图 14、12 中可知, 方案 D 的变形模式与方案 B 相似, 而方案 B 的变形量相比方案 D 要大。

综上所述, 熔敷顺序是影响焊接变形形态的关键因素, 而壁厚是影响焊接变形量大小的主要因素。

3.2 焊接残余应力

图 15 为管厚 6 mm 不同截面位置的周向残余应力分布云图。在方案 A 中, 0° 和 180° 位置圆管母

材与焊缝界面处拉应力区域小于 90° 和 270° 位置的拉应力区域。而方案 B 中, 只有 0° 位置的圆管母材与焊缝界面处拉应力区域的大小有别于其他位置。对比方案 A、B 发现, 方案 A 中 180° 位置圆管与焊缝界面处拉应力区域小于方案 B 中该位置的拉应力区域。主要是因为方案 A 的焊接顺序是两段式熔敷, 因而每条焊道在 180° 位置经历两次焊接热循环, 导致有不同的应力分布。而方案 B 采用了连续式熔敷的方式焊接, 该位置位于整条焊道的中央位置, 每条焊缝只经历了一次热循环, 除了与焊道的始终端位置不同外, 与其他地方经历的热循环完全相同。因此方案 B 中 180° 界面位置的应力分布仅仅有别于焊道始终端附近的应力分布, 与其他位置并没有显著的不同。

图 15 管厚 6 mm 不同角度焊缝截面的周向残余应力云图

图 16 为管厚 12.7 mm 不同截面周向残余应力分布云图。由图 16 可知, 方案 C、D 不同圆心角对应的截面位置处的周向残余应力分布分别与方案 A、B 的对应位置的应力分布相似。比较方案 A、C 可知, 由于方案 A 中圆管壁厚薄, 圆管母材、焊缝及其附近处的拉应力区域小于方案 C, 而方案 A 焊缝中心的拉应力峰值明显大于方案 C。

图 16 管厚 12.7 mm 不同角度焊缝截面的周向残余应力云图

为了定量研究熔敷顺序和管壁厚度对焊接残余应力分布的影响, 针对不同的计算案例(方案)提取了 Path 1、L3(图 6)路径上的周向残余应力分布。Path 1、L3 的周向残余应力分别图 17、18 所示。

由图 17 可知, 方案 A 在 $345^\circ \sim 45^\circ$ 以及 $135^\circ \sim 195^\circ$ 的范围内周向焊接残余应力有显著的波动。因为方案 A 的熔敷顺序为两段式熔敷; 即在 0° 和 180° 位置上每条焊道经历了两次热循环, 应

力的波动正是由于这种“热端部效应”引起的。方案B则只是在 $345^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 范围内即 0° 位置附近的周向残余应力值有明显的起伏变化。因为方案B的熔敷顺序为连续式熔敷,每条焊缝只有 0° 附近经历了两次加热和冷却,而 180° 位置正是焊道中央部位,因此周向焊接残余应力没有明显的变化,而 0° 位置附近区域残余应力分布有显著不均匀的特征。比较方案A、B可知,熔敷顺序对焊接残余应力的分布有显著的影响,这种影响是由于“热端部效应”所致。

图17 管板接头周向残余应力分布(Path1)

图18为四个计算方案沿L3路径上的周向残余应力分布图。在图18中,方案A与B周向残余应力分布非常一致,应力峰值出现在圆管母材与焊缝的交界处附近。需要指出的是,尽管圆管材料(母材)的屈服强度不高,但在焊接过程中由于发生了塑性变形而产生加工硬化,因此屈服极限或大幅升高。在有限元模型中,详细考虑圆管母材与焊缝金属(镍基合金)的加工硬化,就不难理解圆管与焊道处的周向应力显著高于材料常温时的屈服极限。

图18 管板接头周向残余应力分布(L3线)

图18中,方案C、D周向残余应力分布与方案A、B相似,但前两者(方案C、D)的周向残余应力值峰值增大,而焊缝与圆板界面处附近区域的拉应力降低。值得注意的是,圆管与焊缝异种材料界面处方案C的周向残余应力梯度明显大于方案A,而焊缝与圆板异种材料界面处两者的周向残余应力梯度差异较小。在焊接过程中,异种材料线膨胀性能的差异以及屈服强度的差异是造成材料界面处产生较大应力梯度的主要原因。此外,当圆管壁的厚度增加时,其内部的拘束度也随着增加,因此与壁厚6 mm圆管相比,在壁厚为12.7 mm的圆管上会产生更高的周向拉伸应力。

4 结论

(1) 圆管内壁 90° 和 270° 位置径向变形量的数值模拟结果与实测值吻合良好且分布趋势一致,证明了本文所开发的热-弹-塑性有限元模型的有效性。

(2) 熔敷顺序是影响焊接变形形态的关键因素,而壁厚是焊接变形量大小的主要影响因素。其中,连续式熔敷顺序的焊接变形的对称性比两段式熔敷顺序的焊接变形形态的对称性好。此外,随着管壁厚度的增加,管内壁的径向变形量明显减小。

(3) 采用不同熔敷顺序获得的焊接残余应力分布均存在明显的始终端效应。随着管壁厚度的增加,圆管与焊缝异种材料界面处周向残余应力梯度增大;圆管内拉应力区域增大;且焊缝中心周向拉应力峰值有一定程度的降低。

参考文献

- [1] JANG C H, LEE J H, KIM J S, et al. Mechanical property variation within Inconel 82/182 dissimilar metal weld between low alloy steel and 316 stainless steel [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2008, 85: 635-646.
- [2] SONG T K, BAE H R, KIM Y J, et al. Numerical investigation on welding residual stresses in a PWR pressurizer safety/relief nozzle[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2010, 33: 689-702.
- [3] MARLETTE S, FREYER P, SIMITH M C, et al. Simulation and measurement of through-wall residual stresses in a structural weld overlaid pressurizer nozzle[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2014, 136: 1-8.
- [4] 明洪亮, 张志明, 王俭秋, 等. 国产核电安全端异种金属焊接件的微观结构及局部性能研究[J]. 金属学报, 2017(1): 57-69.

MING Hongliang, ZHANG Zhiming, WANG Jianqiu,

- et al. Microstructure and local properties of a domestic safe-end dissimilar metal weld joint by using hot-wire GTAW [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2017(1): 57-69.
- [5] DENG Dean, MURAKAWA H, LIANG Wei. Numerical and experimental investigations on welding residual stress in multi-pass butt-welded austenitic stainless steel pipe[J]. *Computational Materials Science*, 2008, 42: 234-244.
- [6] UEDA Y, YAMAKAWA T. Analysis of thermal elastic-plastic stress and strain during welding by finite element method[J]. *Japan Welding Society Transactions*, 1971, 2(2): 186-196.
- [7] KIYOSHIMA S, DENG D, OGAWA K, et al. Influences of heat source model on welding residual stress and distortion in a multi-pass J-groove joint[J]. *Computational Materials Science*, 2009, 46: 987-995.
- [8] YE Yanhong, CAI Jianpeng, JIANG Xiaohua, et al. Influence of groove type on welding-induced residual stress, deformation and width of sensitization region in a SUS304 steel butt welded joint[J]. *Advances in Engineering Software*, 2015, 86: 39-48.
- [9] DENG D, OGAWA K, KIYOSHIMA S, et al. Prediction of residual stresses in a dissimilar metal welded pipe with considering cladding, buttering and post weld heat treatment[J]. *Computational Materials Science*, 2009, 47: 398-408.
- [10] MURANSKY O, SIMITH M C, BENDEICH P J, et al. Validated numerical analysis of residual stresses in safety relief valve (SRV) nozzle mock-ups[J]. *Computational Materials Science*, 2011, 50: 2203-2215.
- [11] DENG D, KIYOSHIMA S. FEM prediction of welding residual stresses in a SUS304 girth-welded pipe with emphasis on stress distribution near weld start/end location[J]. *Computational Materials Science*, 2010, 50: 612-621.
- [12] Inconel-alloy-600. [2018-05-20]. www.specialmetals.com/tech-center/alloy.html.
- [13] SUN Jiamin, LIU Xiaozhan, TONG Yangang, et al. A comparative study on welding temperature fields, residual stress distributions and deformations induced by laser beam welding and CO₂ gas arc welding[J]. *Materials and Design*, 2014, 63: 519-530.
- [14] DENG D. FEM prediction of welding residual stress and distortion in carbon steel considering phase transformation effects[J]. *Materials and Design*, 2009, 30: 359-366.
- [15] 邓德安, KIYOSHIMA S. 退火温度对 SUS304 不锈钢焊接残余应力计算精度的影响[J]. *金属学报*, 2014, 50(5): 626-632.
- DENG Dean, KIYOSHIMA S. Influence of annealing temperature on calculation accuracy of welding residual stress in a SUS304 stainless steel joint[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2014, 50(5): 626-632.

作者简介: 郑乔, 男, 1993 年出生。主要研究方向为高强度焊接数值模拟等。

E-mail: ZhengQiao_cq@outlook.com

邓德安(通信作者), 男, 1968 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为焊接残余应力理论预测、焊接变形的数值模拟和焊接过程中热-冶金-力学耦合行为。

E-mail: deandeng@cqu.edu.cn