

引文格式: 杨兴林, 肖裕华, 丁国娣, 等. 预拉伸对船用气阀等离子堆焊残余应力影响的有限元分析 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (8): 205-210. YANG Xinglin, XIAO Yuhua, DING Guodi, et al. Finite element analysis of influence of pretension on residual stress in plasma surfacing welding of marine valve [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (8): 205-210.

预拉伸对船用气阀等离子堆焊残余应力影响的有限元分析

杨兴林¹, 肖裕华¹, 丁国娣², 王方旋¹, 戴魏魏², 赵大忠²

(1. 江苏科技大学 能源与动力工程学院, 江苏 镇江 212003;

2. 南京中远海运船舶设备配件有限公司, 江苏 南京 211121)

摘要: 基于 ABAQUS 有限元分析软件模拟了大型船用气阀在有预拉伸力和无预拉伸力情况下的等离子堆焊过程, 通过二次开发热源模型, 建立了多个生死单元分析步, 实现焊料的逐步填充, 考虑了不同材料性能参数随温度的变化。结果表明: 预拉伸焊接法可以有效减小焊后残余应力, 当预拉伸应力 $\sigma_p = 20\% \sigma_s$ 时, 效果最明显, 焊缝区残余应力降低幅度达 43%, 同时, 整个焊接件残余应力分布更为合理, 应力梯度得到大幅改善, 但是, 在轴向焊缝处应力不减反增现象明显。最后对产生的缺陷进行分析, 得到了优化的工艺参数, 模拟结果与试验结果吻合较好。

关键词: 等离子堆焊; 预拉伸; 生死单元; 残余应力

中图分类号: TG404 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2012 (2020) 08-0205-06

doi: 10.3969/j.issn.1007-2012.2020.08.028

Finite element analysis of influence of pretension on residual stress in plasma surfacing welding of marine valve

YANG Xing-lin¹, XIAO Yu-hua¹, DING Guo-di², WANG Fang-xuan¹, DAI Wei-wei², ZHAO Da-zhong²

(1. School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China;

2. COSCO SHIPPING Marine Equipment & Spares (Nanjing) Co., Ltd., Nanjing 211121, China)

Abstract: Based on the ABAQUS finite element analysis software, the plasma surfacing welding process of large marine valves with and without pretension force was simulated. Through the secondary development of the heat source model, multiple birth-death element analysis steps were established to realize the gradual filling of solder, and the variation of different material performance parameters with temperature was considered. The results show that the pre-tensile welding method can effectively reduce the residual stress after welding. When the pre-tensile stress $\sigma_p = 20\% \sigma_s$, the effect is the most obvious, and the residual stress in weld area decreases by 43%. At the same time, the residual stress distribution of the whole solder joint is more reasonable and the stress gradient is greatly improved. However, at the axial welding, the stress does not reduce but increases obviously. Finally, the defects were analyzed and the process parameters were optimized, the simulation results are in good agreement with the test results.

Key words: plasma surfacing welding; pretension; birth-death element; residual stress

引言

焊接应力一直是国内外焊接工程界和学术界关注和研究的热点^[1]。焊接过程普遍存在焊接残余应力, 而残余应力的存在会对焊件结构的尺寸精度、

装配质量和使用性能产生显著影响^[2]; 同时, 还会导致热、冷裂纹, 甚至造成脆性断裂, 从而降低产品制造质量和使用过程中的可靠性。对于船用气阀来说, 对安装精度和残余应力分布的要求很高, 任何缺陷都有可能导导致一场巨大的灾难, 焊接焊缝区域又是残余应力最大的位置, 所以有必要而且必须

通信作者: 肖裕华, 男, 1994 年生, 硕士研究生, 主要从事船用气阀等离子堆焊残余应力控制及其消除的技术研究, E-mail: 1599798477@qq.com

第一作者: 杨兴林, 男, 1964 年生, 博士, 教授, 主要从事内燃机系统设计与船舶先进制造技术研究, E-mail: 2975553282@qq.com

收稿日期: 2020-02-12; **修订日期:** 2020-06-30

有效降低该区域焊接残余应力的大小。

预拉伸焊接法通过定量设置预加拉应力所形成的应力场与由温度场引起的应力场相叠加,改变试件内应力应变的分布状况,可以达到能动地控制焊接应力与变形的目的^[3]。该项技术研究报道相对较少,而且研究中建立的模型仍存在一些不完善之处^[2],主要包括以下几个方面:首先,目前的研究仅仅局限在薄壁铝合金上。由于薄壁铝合金高温塑性差,研究人员过多地关注了焊后失稳变形,忽略了残余应力的影响。李敬勇等^[4]通过对 5A05 铝合金板材焊接残余应力和变形的研究,指出预拉伸焊接法可以有效减小铝合金板材焊缝处的纵向绕曲变形量,进而减小了焊接区域的拉伸应力;其次,到目前为止所有的预拉伸焊接研究都是直焊道,针对环形焊道焊接件的研究鲜见,模型通用性不足。

本研究在对现有模型存在的问题进行深入分析的基础上,针对大型船用气阀环形焊道等离子堆焊残余应力进行模拟预测,重点探讨了预拉伸对焊接残余应力的影响并进行了分析,并与试验结果进行对比。利用经过验证的有限元模型深入分析预拉伸对于焊缝处残余应力的影响作用,从而为实际生产中残余应力的控制奠定基础。

1 焊接应力场的基本理论方程

焊接应力场的求解分析是一个涉及到物体相变、弹塑性和大应变等因素的热弹塑性问题,求解焊接热弹塑性问题通常采用增量理论,建立应力增量与应变增量之间的本构方程,并进行求解^[5]。

(1) 材料处于弹性区的应力应变关系为:

$$\{d_{\sigma}\} = D_e \{d_{\epsilon}\} - C_e dT \quad (1)$$

式中: $\{d_{\sigma}\}$ 为应力增量矩阵; D_e 为弹性矩阵; $\{d_{\epsilon}\}$ 为总应变增量矩阵; C_e 为弹性温度向量; T 为温度。

(2) 材料处于塑性区的应力应变关系为:

$$\{d_{\sigma}\} = D_{ep} \{d_{\epsilon}\} - C_{ep} dT \quad (2)$$

式中: D_{ep} 为弹塑性矩阵; C_{ep} 为弹塑性温度向量。

2 有限元分析模型

2.1 几何模型

由于气阀属于轴对称图形,为减少计算时间,根据实际焊件的尺寸建立 1/4 有限元模型。在焊接模拟之前着重考虑焊接过程中焊缝附近存在较大的温度梯度,在焊缝及热影响区划分较细的网格,而在距离焊缝较远的母材区均采用较稀疏的网格^[6],

具体网格划分如图 1 所示。为防止在有限元模型在计算过程中产生刚性位移,需要对焊件施加位移约束条件^[7]。最后,在底部母材上加载环形预拉伸力,当预拉伸力 $\sigma_p = 20\% \sigma_s$ 时 (σ_s 为屈服强度),效果最明显,在焊接完成后卸载预拉伸力。

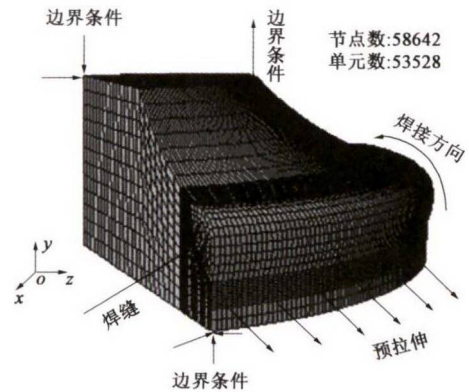


图 1 有限元模型网格划分

Fig. 1 Mesh division of finite element model

2.2 不同材料参数

在焊接过程中,焊缝及热影响区金属的热物性能参数在焊接热源的强烈热作用下发生剧烈的变化,因此,在数值模拟时必须考虑焊接过程中材料随温度的变化。由于高温状态下材料的热物性能参数极度匮乏,运用 Jmatpro 软件模拟得出不同温度下母材 4Cr10Si2Mo 和焊料 stellite 6 的热物性能参数,如图 2 和图 3 所示^[8]。其中, ρ 为密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); E 为弹性模量 ($\times 10^3 \text{ MPa}$); C_p 为比热 ($\times 10^7 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); k 为热导率 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); μ 为泊松比 ($\times 10^{-2}$); α 为热膨胀系数 ($\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)。

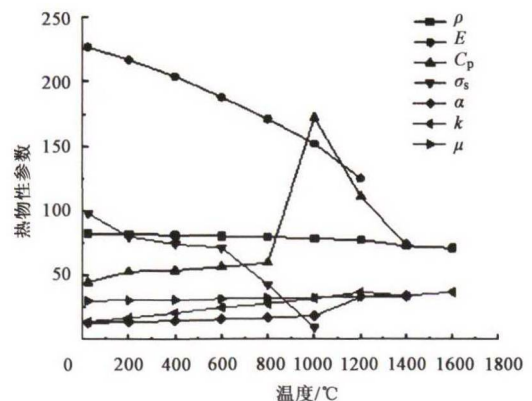


图 2 母材热物性参数

Fig. 2 Thermal property parameters of base material

2.3 焊接热源的处理

焊接采用等离子堆焊工艺,焊接坡口为深“U”

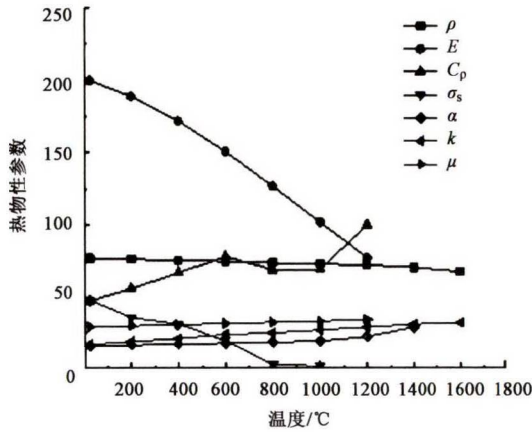


图 3 焊料热物性参数

Fig. 3 Thermal property parameters of solder

形，焊接速度 $4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ，电压 32 V，电流 135 A，热输入效率为 75%，焊接前预热温度 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 。由于其焊缝深宽比较大，通常认为焊缝表面及厚度方向材料均接收能量输入，故应将能量输入等效为焊件表面及内部均输入热流的体积分布热源。利用 Fortran 语言开发双椭球热源子程序，通过生死单元技术实现焊料的逐步填充^[9-10]，输入的热流密度分布为：

$$q = \begin{cases} \frac{6\sqrt[3]{f_f}Q_G}{abc_f\pi\sqrt{\pi}}\exp\left(-\frac{3x^2}{c_f^2}-\frac{3y^2}{a^2}-\frac{3z^2}{b^2}\right), \text{前端} \\ \frac{6\sqrt[3]{f_b}Q_G}{abc_b\pi\sqrt{\pi}}\exp\left(-\frac{3x^2}{c_b^2}-\frac{3y^2}{a^2}-\frac{3z^2}{b^2}\right), \text{后端} \end{cases} \quad (3)$$

式中： q 为点 (x, y, z) 处的热流密度； Q_G 为热源总功率； a 、 b 、 c_f 与 c_b 为模型的形状参数，如图 4 所示； f_f 与 f_b 分别为热源中心前后两个 1/4 椭球的能量分配系数^[11-12]， $f_f + f_b = 2$ 。

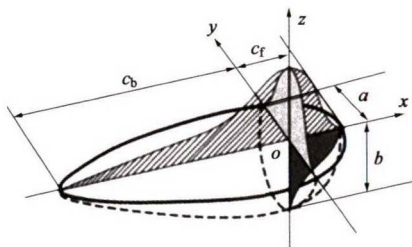


图 4 双椭球热源模型

Fig. 4 Double ellipsoidal heat source model

3 有限元计算结果与分析

3.1 焊接温度场分布

图 5 为大型船用气阀等离子堆焊加热过程中温

度场的分布情况。其中 5a ~ 图 5d 分别为焊接起弧时刻、焊接稳定、生死单元实现瞬间和焊接终了时的温度场云图。可以看出，在焊接起弧端，由于焊件表面保持常温，焊件的热传导、热输入和焊接热能的损失极不平衡，导致熔池的温度较低但变化梯度较大，随着焊接的进行，焊件温度持续升高，散失的热量和焊接热输入热量逐渐保持平衡，焊件的熔池温度达到了稳定状态。当热源移动接近某一位置时，此区域的温度会迅速增加，当热源离开某区域时，此区域的温度会迅速降低，这也与实际焊接过程中温度的变化情况一致。

3.2 预拉伸对焊接残余应力的影响

图 6 为大型船用气阀等离子堆焊过程中残余应力场的分布情况。其中，选取了等效应力、环向应力和轴向应力，由于附加预拉伸力和只选取 1/4 模型，使得焊件在厚度方向受附加力，并不能精确显示整个焊接残余应力的状态，所以忽略厚度方向的应力值。由图 6a 和图 6b 对比可以看出，施加预拉伸后，虽然峰值应力降低不明显，在 700 MPa 左右，但焊缝区和焊料区的残余应力值降低明显，梯度分布明显得到改善。两端由于选取了 1/4 模型，施加了附加的边界条件，使应力值偏高。从图 6c 和图 6d 对比可以看出预拉伸对焊缝区残余应力大小及梯度分布的改善效果，环向应力峰值降低近 62%，焊料、焊缝和母材区没有应力梯度，分布均匀。由图 6e 和图 6f 对比可以看出，轴向应力是引起焊接变形的主要原因，由于焊缝是“U”形的，在轴向受到预拉伸分力的影响，使得在焊缝附近的应力变大，呈现不减反增的趋势。

3.3 应力 - 路径结果

为了准确掌握焊接接头在焊缝及熔合线附近的残余应力分布规律及内部残余应力分布情况，制定了应力 - 路径分析方法，路径共有两条，分别位于外表面熔合线附近和侧面沿焊槽熔合线附近。

图 7 为预拉伸对外表面熔合线附近环向和轴向残余应力影响的对比图。可见，环向和轴向残余应力整体仍然表现为拉应力，但是大小均有降低。焊缝的两端由于附加边界条件的存在，残余应力值基本为零。随着离开端面的距离不断增加，轴向应力逐渐变大并趋于屈服强度 800 MPa，在到达另一端面时又迅速降低，整体降低明显，在焊接平稳期降低达 25%。环向应力在两端面波动较大，说明附加边界条件对环向应力的影响较大，但是

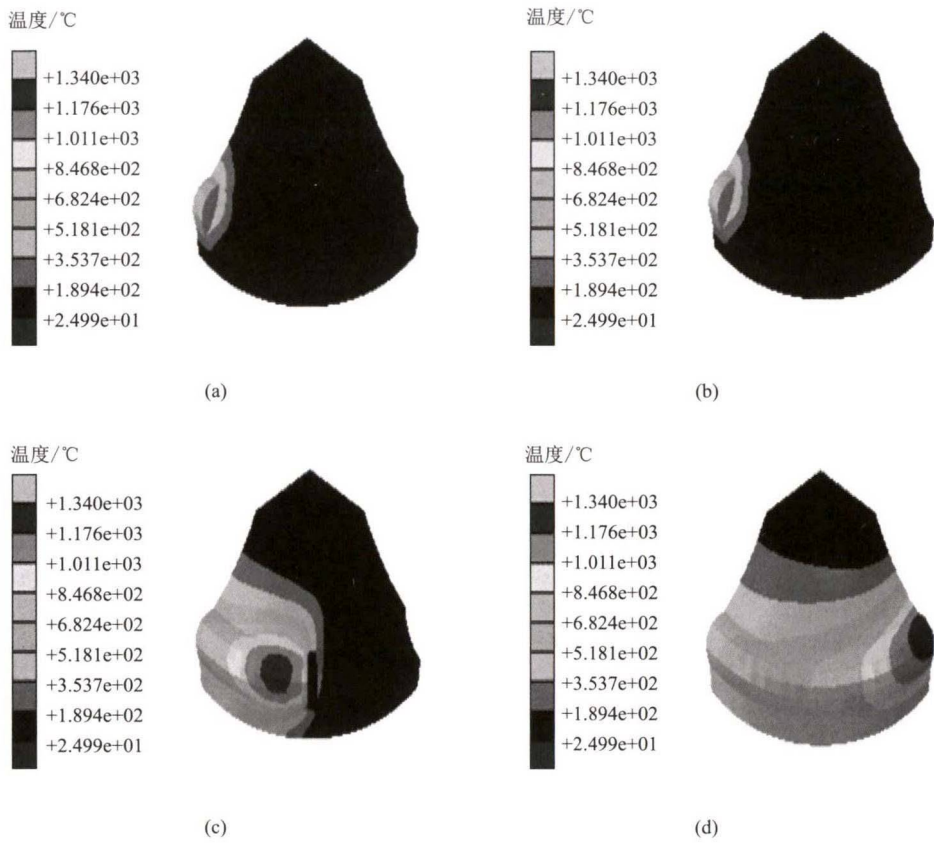


图 5 焊接温度场分布

(a) 焊接 1 s 时 (b) 焊接 8 s 时 (c) 焊接生死单元实现瞬间 (d) 焊接 17 s 时

Fig. 5 Distribution of welding temperature field

(a) Welding at 1 s (b) Welding at 8 s (c) Instant of welding birth-death element to achieve (d) Welding at 17 s

在焊接平稳期下降效果显著,下降了 43%,说明预拉伸在外表面熔合线附近圆周方向对环向应力的降低效果更好。

图 8 为预拉伸对侧面沿焊槽熔合线附近环向和轴向残余应力影响的对比图。可见,环向应力整体仍然表现为拉应力。在焊接稳定区,环向应力峰值从最大时的 400 MPa 减小到了 200 MPa,降低了 50%,在焊缝下端略有升高,但整体梯度不大,说明焊缝处环向应力分布合理。

3.4 试验验证

由于焊缝是“U”形的,在轴向受到预拉伸分力的影响,特别是在“U”形槽底部受力最大,使得在焊缝附近的应力变大,呈现不减反增的趋势。为验证模拟计算的可靠性,进行了 1:1 焊接试验,通过 X-衍射法对接头残余应力进行测定,并对比模拟值和试验值。

图 8b 为预拉伸焊接侧面沿焊槽熔合线附近轴向残余应力模拟值与试验值对比图。模拟值与试验值分布趋势吻合。经计算,两者相对误差在 10% 以

内,说明有限元模型是合理的,能够模拟预拉伸后残余应力的典型分布,符合实际情况。

4 结论

(1) 在焊接起弧端,由于焊件表面保持常温,热输入损失较大,导致熔池的温度较低但变化梯度较大,随着焊接的进行,温度场趋于稳定,与实际焊接过程相似。

(2) 预拉伸对焊接残余应力有明显的消除效果,当预拉伸力为 $\sigma_p = 20\% \sigma_s$ 时效果最明显,焊缝区降低幅度达 43%。

(3) 边界条件对预拉伸焊接的影响较大,在轴向焊缝处受到“U”形槽预拉伸分力的影响,应力不减反增。

(4) 试验过程中产生了附加应力,使其得到的残余应力值高于有限元仿真值。但总体试验结果和模拟结果吻合度较高,验证了计算模型和结果的可靠性,可为实际工艺加工提供指导。

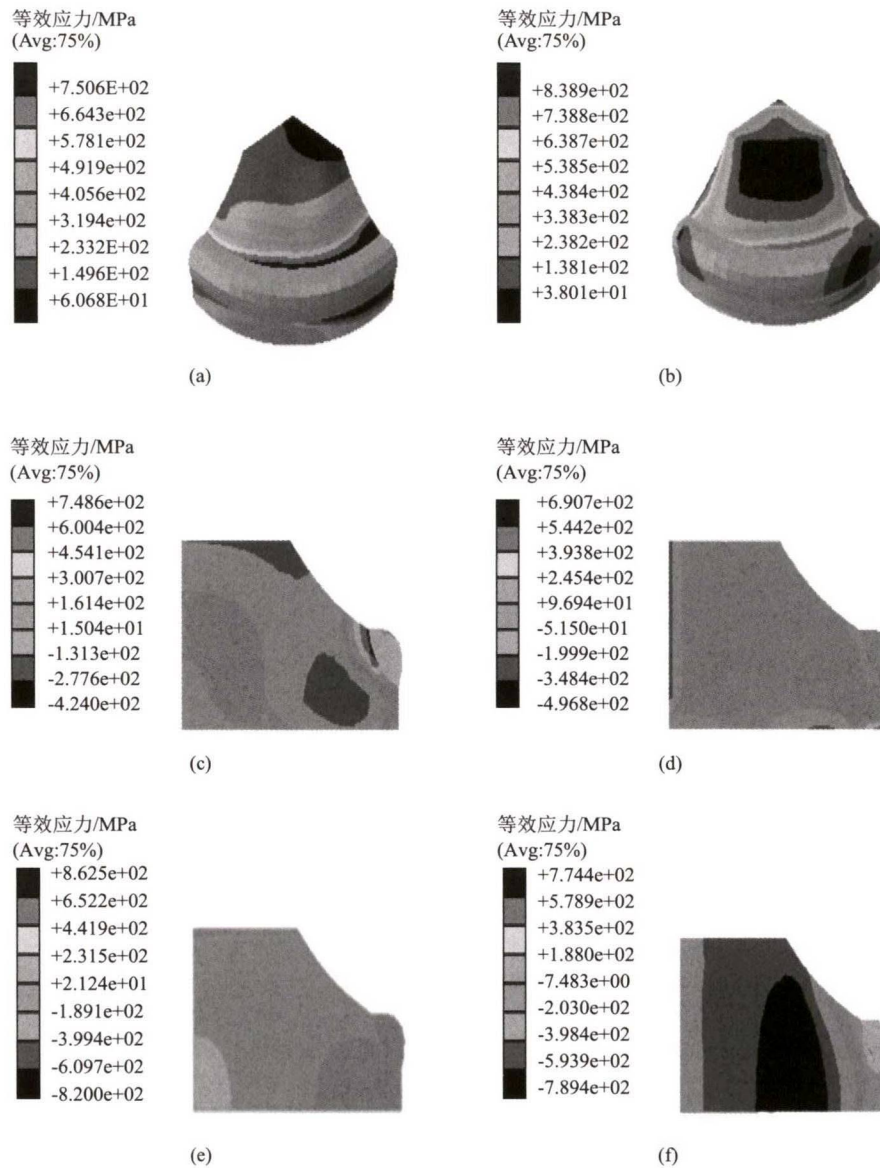


图 6 焊接应力场分布

(a) 常规焊接 (b) 预拉伸焊接 (c) 常规焊接环向 (d) 预拉伸焊接环向 (e) 常规焊接轴向 (f) 预拉伸焊接轴向

Fig.6 Distribution of welding stress field

(a) Conventional welding (b) Pre-tension welding (c) Conventional welding in hoop direction

(d) Pre-tension welding in hoop direction (e) Conventional welding in axial direction (f) Pre-tension welding in axial direction

参考文献:

[1] 李敬勇, 章明明, 李鹰. 预拉伸对铝合金焊接残余应力和变形的影响 [J]. 热加工工艺, 2005, 34 (12): 15-17.
LI Jingyong, ZHANG Mingming, LI Ying. Effect of pretension on welding residual stress and deformation of aluminum alloy [J]. Hot Working Technology, 2005, 34 (12): 15-17.

[2] 朱智, 王敏, 张会杰, 等. 高强铝合金薄板搅拌摩擦焊残余应力及变形的热耦合模拟 [J]. 塑性工程学报, 2017, 24 (2): 217-222.
ZHU Zhi, WANG Min, ZHANG Huijie, et al. Thermal coupling simulation of residual stress and deformation in friction stir welding of high strength aluminum alloy sheet [J]. Journal of Plasticity

Engineering, 2017, 24 (2): 217-222.

[3] YAN C Y, LI C, WU L C, et al. Welding residual stress and distortion in ZS100 motorcycle rear fork welded joints [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 452 (2): 022022.

[4] 李敬勇, 刘志鹏, 王虎, 等. 预拉伸条件下铝合金焊接残余应力的数值模拟 [J]. 航空材料学报, 2008, 28 (5): 59-63.
LI Jingyong, LIU Zhipeng, WANG Hu, et al. Numerical simulation of welding residual stress of aluminum alloy under pretension condition [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2008, 28 (5): 59-63.

[5] 傅建, 彭必友, 曹建国. 材料成形过程数值模拟 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
FU Jian, PENG Biyou, CAO Jianguo. Numerical simulation of mate-

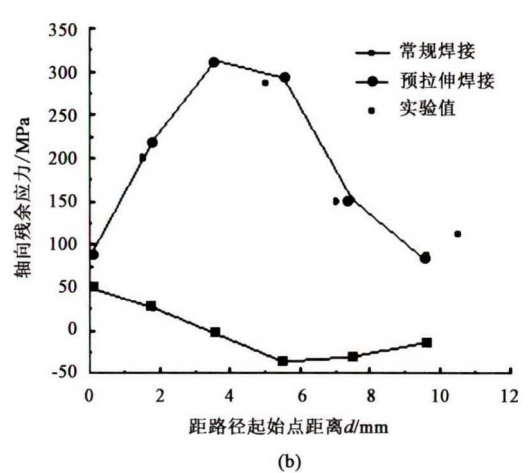
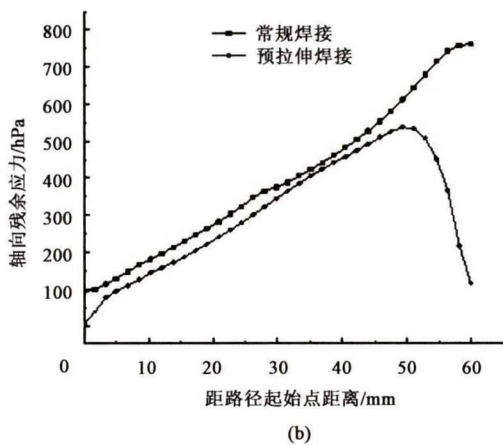
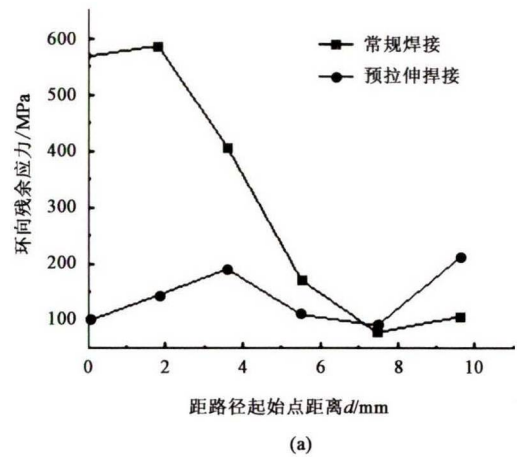
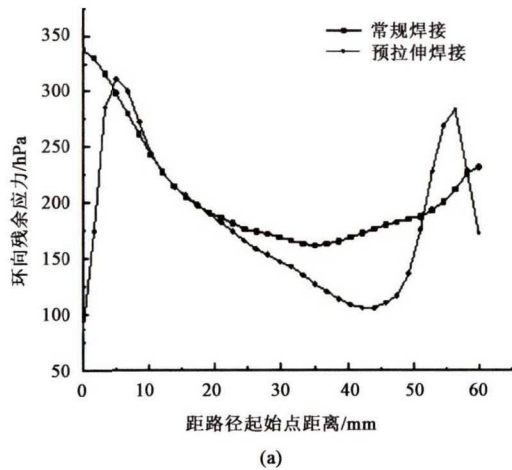


图 7 外表面熔合线附近环向 (a) 和轴向 (b) 残余应力分布

Fig. 7 Distribution of residual stress in hoop direction (a) and axial direction (b) on outer surface near fusion line

图 8 侧面沿焊槽熔合线附近环向 (a) 和轴向 (b) 残余应力分布

Fig. 8 Distribution of residual stress in hoop direction (a) and axial direction (b) along side of weld groove near fusion line

rial forming process [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.

- [6] 黄本生, 陈权, 杨江, 等. Q345/316L 异种钢焊接残余应力与变形数值模拟 [J]. 焊接学报, 2019, 40 (2): 138 - 144, 167.
- HUANG Bensheng, CHEN Quan, YANG Jiang, et al. Numerical simulation of welding residual stress and deformation of Q45/316L dissimilar steel [J]. Reactions of the China Welding Institution, 2019, 40 (2): 138 - 144, 167.
- [7] 孙岱. 低碳钢/低合金高强度钢板焊接变形的数值模拟 [D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- SUN Dai. Numerical simulation of welding deformation of low carbon steel/low alloy high strength steel sheet [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [8] 信稳. 大型筒节热成形的热-力-组织耦合分析研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2013.
- XIN Wen. Coupling thermo-mechanical and microstructure analysis of super diameter shell in hot forming process [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2013.
- [9] CHEN X, LU H S, CHEN G, et al. A comparison between fracture toughness at different locations of longitudinal submerged arc welded and spiral submerged arc welded joints of API X80 pipeline steels

- [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2015, 148: 110 - 121.
- [10] WU C B, KIM J W. Analysis of welding residual stress formation behavior during circumferential TIG welding of a pipe [J]. Thin-Walled Structures, 2018, 132: 421 - 430.
- [11] 李光耀, 陈侣侣, 耿辉辉, 等. 5182Al/HC340LA 异种金属件磁脉冲焊接数值模拟与试验验证 [J]. 塑性工程学报, 2018, 25 (3): 155 - 162.
- LI Guangyao, CHEN Lülü, GENG Huihui, et al. Numerical simulation and experimental verification of magnetic pulse welding for dissimilar metal parts 5182Al/HC340LA [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25 (3): 155 - 162.
- [12] 高远, 黄尚宇, 邓凌波, 等. 温度条件对铜管/铝管磁脉冲-半固态复合辅助钎焊接头微观组织的影响 [J]. 锻压技术, 2019, 44 (10): 169 - 175.
- GAO Yuan, HUANG Shangyu, DENG Lingbo, et al. Influence of temperature condition on microstructure of Cu tube/Al tube brazed joint produced by magnetic pulse and semi-solid composite auxiliary technology [J]. Forging & Stamping Technology, 2019, 44 (10): 169 - 175.