

# 10mm厚Q1100E超高强钢板对接焊残余应力演变研究

程浩轩<sup>1, 2</sup>, 邱福祥<sup>1, 2</sup>, 易忠奇<sup>2, 3</sup>, 赵幼芳<sup>2, 3</sup>, 张勇伟<sup>1, 2</sup>

1. 湘潭钢铁集团有限公司 湖南湘潭 411101

2. 焊接工艺技术湖南省重点实验室 湖南湘潭 411101

3. 湖南机电职业技术学院 湖南长沙 410151

**摘要:** 为研究10mm厚Q1100E超高强钢板对接焊焊接时的残余应力及演变, 利用有限元模拟软件进行焊接残余应力变化规律的模拟。同时, 结合对接接头形式, 根据GMAW焊接过程中Q1100E钢板焊接残余应力的变化趋势, 进行模拟结果的验证, 两者相互印证, 以获得可靠的焊接接头残余应力分布。试验结果表明: 多道焊时的焊缝往往会经历多次焊接热循环; 每道的焊缝中心受热源影响较大, 温度冷却快, 焊缝收缩剧烈, 残余应力较大, 部分位置可以达到屈服强度, 远离焊缝处受热源影响较小, 残余应力相对较小。

**关键词:** Q1100E; 对接焊; 残余应力

## Study on the evolution of residual stress of 10mm thickness Q1100E ultra-high strength steel plate in butt welding

CHENG Haoxuan<sup>1, 2</sup>, QIU Fuxiang<sup>1, 2</sup>, YI Zhongqi<sup>2, 3</sup>, ZHAO Youfang<sup>2, 3</sup>, ZHANG Yongwei<sup>1, 2</sup>

1. Xiangtan Iron and Steel Co., Ltd., Xiangtan 411101, Hunan, China

2. Hunan Key Laboratory of Welding Technology, Xiangtan 411101, Hunan, China

3. Hunan Mechanical & Electrical Polytechnic, Changsha 410151, Hunan, China

**Abstract:** In order to study the residual stress and evolution of 10mm thickness Q1100E ultra-high strength steel plate in butt welding. The finite element simulation software was used to simulate the change rule of welding residual stress, and the change trend of welding residual stress of Q1100E steel plate was combined with the welding form of butt joint by GMAW method to verify the simulation results. The two means verified each other to obtain reliable residual stress distribution of welded joints. The results show that during multi-pass welding, the weld seam underwent multiple welding thermal cycles; the weld center of each pass was greatly influenced by heat source. With temperature cooling fast, the weld shrank sharply, substantial residual stress varied greatly, and partial position could reach yield strength. Far away from the weld seam, it was less affected by heat source, and the residual stress was relatively smaller.

**Keywords:** Q1100E; butt joint; residual stress

第一作者: 程浩轩, 工程师, 主要研究方向为板材焊接工艺技术, E-mail: 117173@mail.hnxcg.com。

## 1 序言

低合金高强度钢通常是指抗拉强度在500~1200MPa（或屈服强度 $>350\text{MPa}$ ）并考虑焊接性而生产制造的钢材。Q1100E钢为屈服强度 $\geq 1100\text{MPa}$ 的超高强度钢，是目前我国应用在工程机械领域中强度级别最高的钢种，因其具有优良的成形性、良好的焊接性和好的低温冲击韧度，得到了各大工程机械厂商的重视，近年来其需求量逐年增长<sup>[1]</sup>。目前，工程机械产品中焊接结构件占到了整机重量的50%~70%，焊接结构件的质量优劣直接影响产品的质量、性能与使用可靠性。随着工程机械结构件大型化、大跨度化和轻量化制造的需求不断增强，工程机械应用所需求的超高强度钢板强度级别也在不断提高，对材料的规格和使用性能提出了更加苛刻的要求，也同步对材料的焊接性提出了更高要求。

在焊接过程中，因局部热输入不均匀而导致结构件不可避免地产生焊接变形和残余应力。焊接变形和残余应力的存在会严重影响结构的安装精度，过大的变形和残余应力会显著降低结构承载能力<sup>[2]</sup>。焊接残余应力会降低结构的局部强度和稳定性，焊接变形会影响工件的尺寸精度，这些都会给现场安装带来很大的困难，而且一旦出现公差，还要花费精力处理焊接变形<sup>[3]</sup>。这些因素的存在直接影响构件的服役与使用。在Q1100E钢板焊接过程中，因本身强度较高而易产生过大或分布不均匀的焊接残余应力，这些是焊件产生变形和开裂等工艺缺陷的主要原因，而焊接残余应力的存在还会严重影响焊接结构的使用性能。因此，控制焊接残余应力与变形对于工业产品结构设计及生产制造有着至关重要的作用。若在焊接生产加工前能较为准确地预测焊接残余应力的大小及其分布，将对有效控制焊接残余应力起到有益的作用。因此，控制或消除焊接残余应力和焊接变形，可降低产品焊接生产加工成本，提高结构件使用寿命及使用安全性，而选择合理的焊接工艺是减少焊接残余应力和变形的有效方法。

## 2 10mm厚Q1100E超高强度钢对接焊试验

为研究10mm厚Q1100E超高强度钢板对接焊时的残余应力演变规律，焊接试验选用两块尺寸为 $500\text{mm} \times 300\text{mm}$ （见图1）、厚度为10mm的Q1100E超高强度钢，以 $60^\circ$  V形坡口焊接。试验采

用气体保护焊，具体焊接参数见表1。试样采取两端定位焊固定，4道焊缝的焊接方向相同。

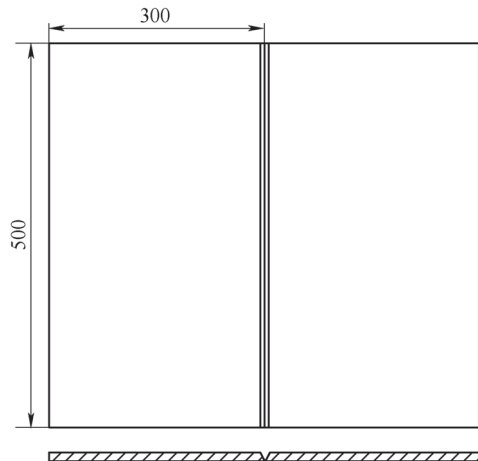


图1 试样几何尺寸

表1 气体保护焊焊接参数

| 道次 | 预热温度<br>/℃ | 焊接电流<br>/A | 电弧电压<br>/V | 焊接速度<br>/ (mm/s) |
|----|------------|------------|------------|------------------|
| 1  | 160        | 125        | 14.7       | 3.5              |
| 2  | 165        | 260        | 22.7       | 7.9              |
| 3  | 165        | 255        | 22.7       | 6.4              |
| 4  | 153        | 260        | 22.7       | 5.3              |

焊接完成后，根据ASTM E837-20：2020《通过钻孔应变计测量残余应力的标准试验方法》，采用小孔法测量残余应力，测试设备为SRSS3-1型应力仪。试验过程中分别进行试样表面打磨、酒精擦拭表面、粘贴应变片、焊接导线、安装钻具、钻孔和输出结果等几个步骤。之后通过测温仪对焊接过程中的温度进行测量，测试点编号TC-01、TC-02、TC-03。热电偶（K形）放置深度5mm，距离焊缝中心15mm，分别位于距离钢板上端面100mm、250mm、400mm，如图2所示。

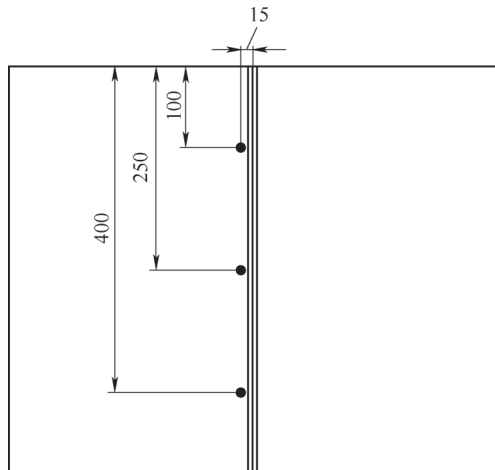


图2 温度测量位置

### 3 10mm厚Q1100E超高强度钢对接焊残余应力分析

理论上,焊接导致的残余应力峰值与材料屈服强度呈正相关关系,即材料的屈服强度越高,焊后产生的残余应力峰值越大,该峰值可以达到甚至超过材料的常温屈服强度<sup>[4]</sup>。一般焊接结构制造所用材料的厚度相对于长和宽都很小,在板厚 $<20\text{mm}$ 的薄板和中厚板制造的焊接结构中,厚度方向上的焊接应力很小,残余应力基本上是双轴的,即为平面应力状态。只有在大型结构厚截面焊缝中,在厚度方向上才有较大的残余应力<sup>[5]</sup>。为此,本例中仅讨论10mm厚Q1100E超高强度钢板平面纵向、横向的残余应力,其厚度方向的应力不计。Q1100E超高强度钢几何与网格模型如图3所示。

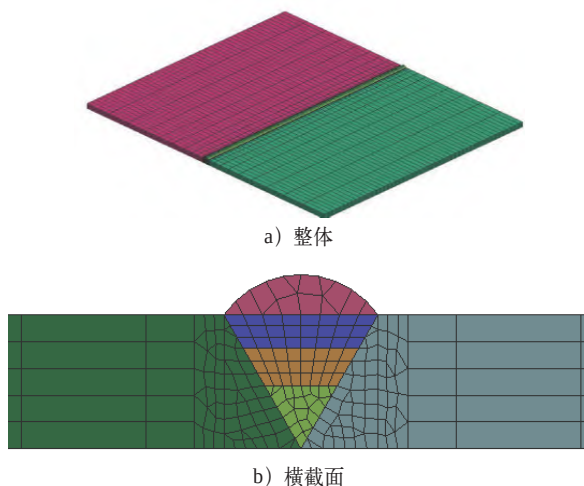


图3 Q1100E钢对接焊几何模型

#### 3.1 焊接过程中纵向残余应力演变

图4所示为不同时刻的Q1100E超高强度钢中心

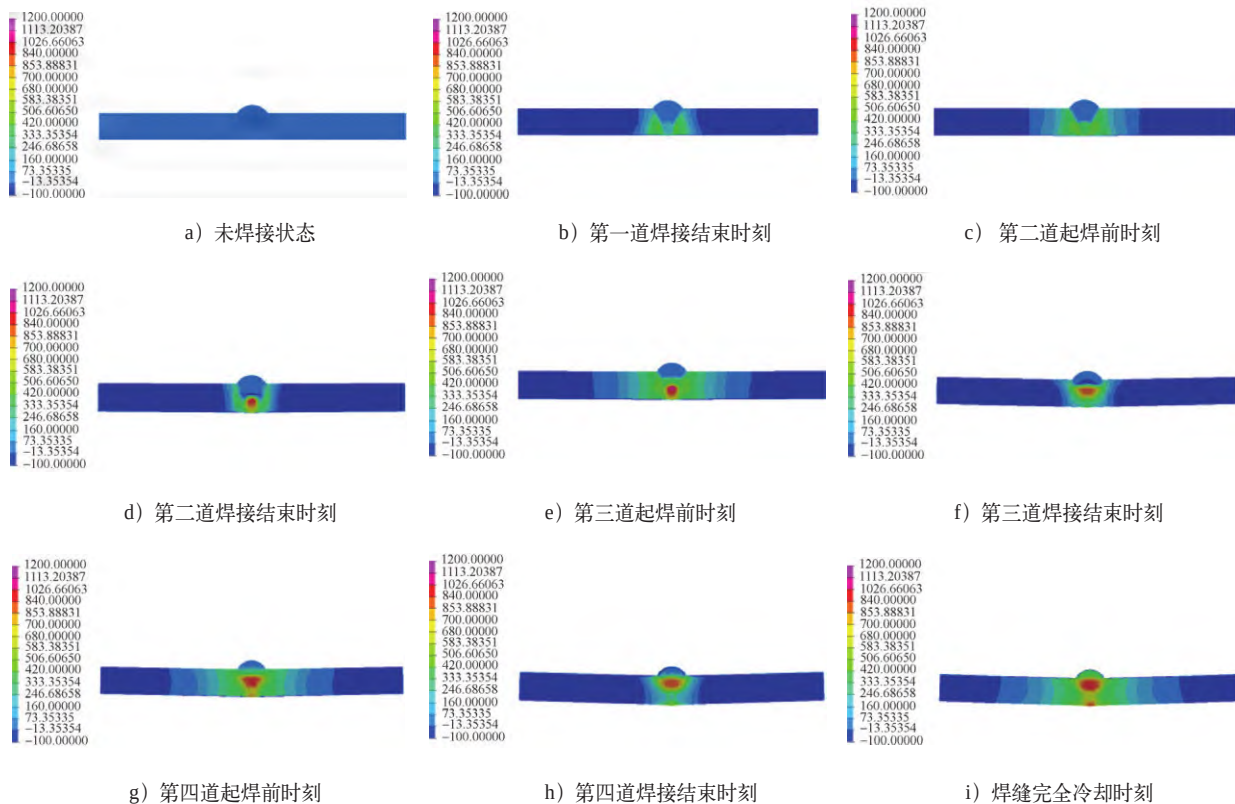


图4 中心截面纵向应力分布云图

截面纵向应力分布云图,图5所示为整体纵向应力分布云图。图4a~c为根部焊接时中心截面纵向应力分布云图,未焊接时刻,试样残余应力为0;焊接结束后开始冷却时,第一道焊缝处逐渐产生拉应力,在第二道起焊前,第一道纵向残余应力达到最大,为456MPa;图4d、e为填充层时应力分布云图,第

二道焊接结束,焊缝开始冷却,两块板开始出现角变形,第一道受拉,在第一道和第二道处均出现较大拉应力,随着冷却时间的推移,拉应力区逐渐扩大,峰值应力为930MPa,存在于第一道焊缝处;图4f、g为盖面层时应力分布云图,第三道焊接完成时,第一道和第二道受到第三道温度升高的作用,

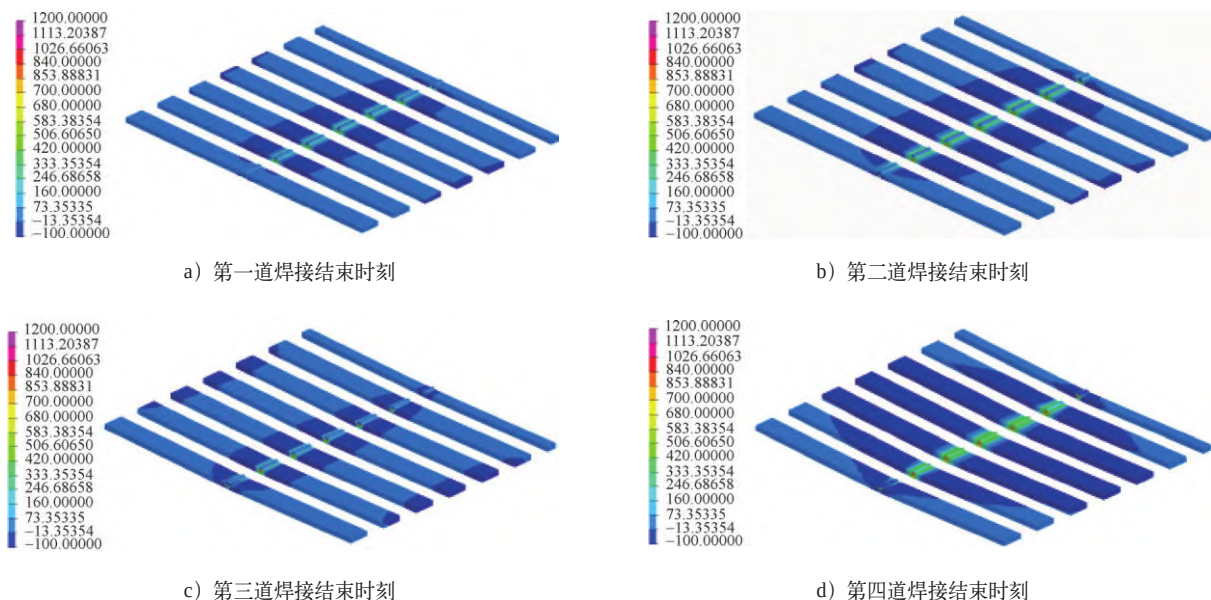


图5 整体纵向应力分布云图

残余应力被消减,焊缝逐渐冷却,两块钢板继续向上发生角变形,第一道焊缝继续受到拉应力作用,在第四道起焊前,在第一道和第三道均出现较高的焊接残余拉应力,峰值应力为940MPa;图4h、i为焊接结束时应力分布云图,焊缝最终冷却到室温后,在第一道焊缝根部和第三道焊缝处出现较高残余应力,最终峰值应力为960MPa。

### 3.2 焊接过程中横向残余应力演变

图6所示为不同时刻的Q1100E钢中心截面横向应力分布云图,图7所示为整体横向应力分布云图。图6a~c为根部中心截面横向应力分布云图,第一道焊接完成,横向残余应力变化很小。图6d、e为填充层中心截面横向应力分布云图,第二道焊完,在第一道焊缝根位置出现压应力区,峰值应力存在于第二

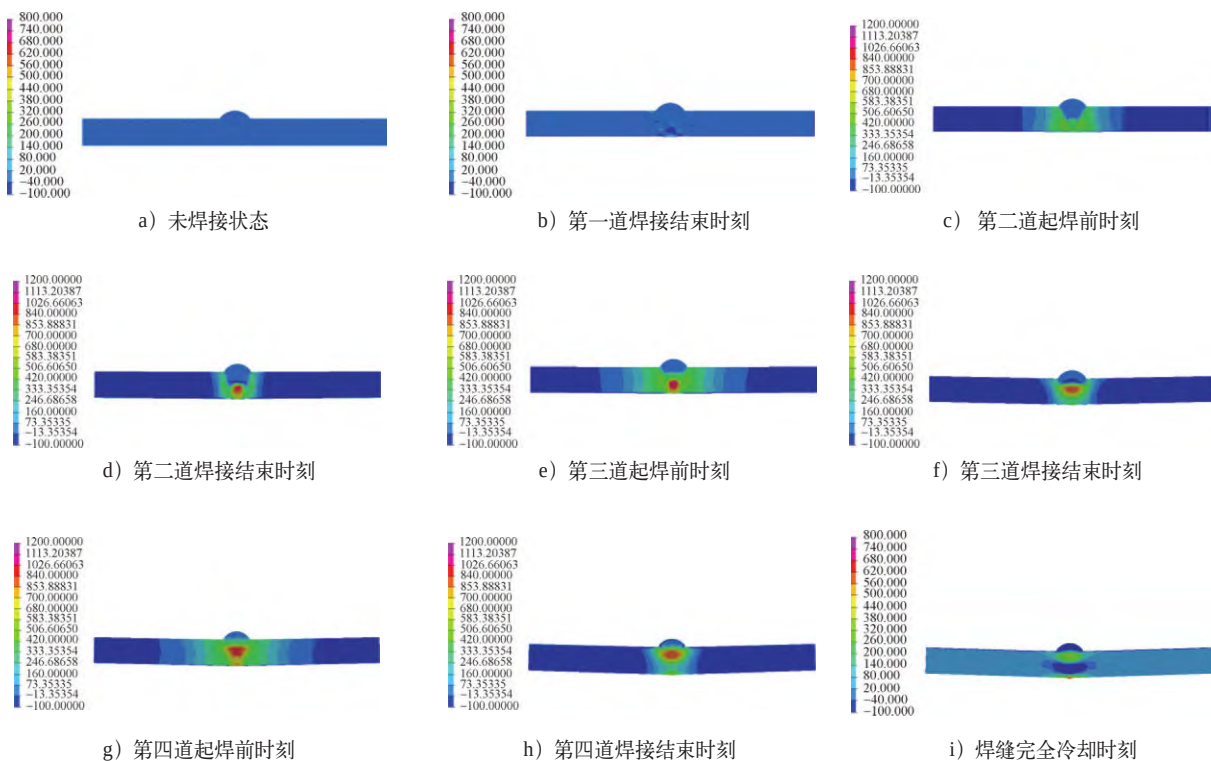


图6 中心截面横向应力分布云图

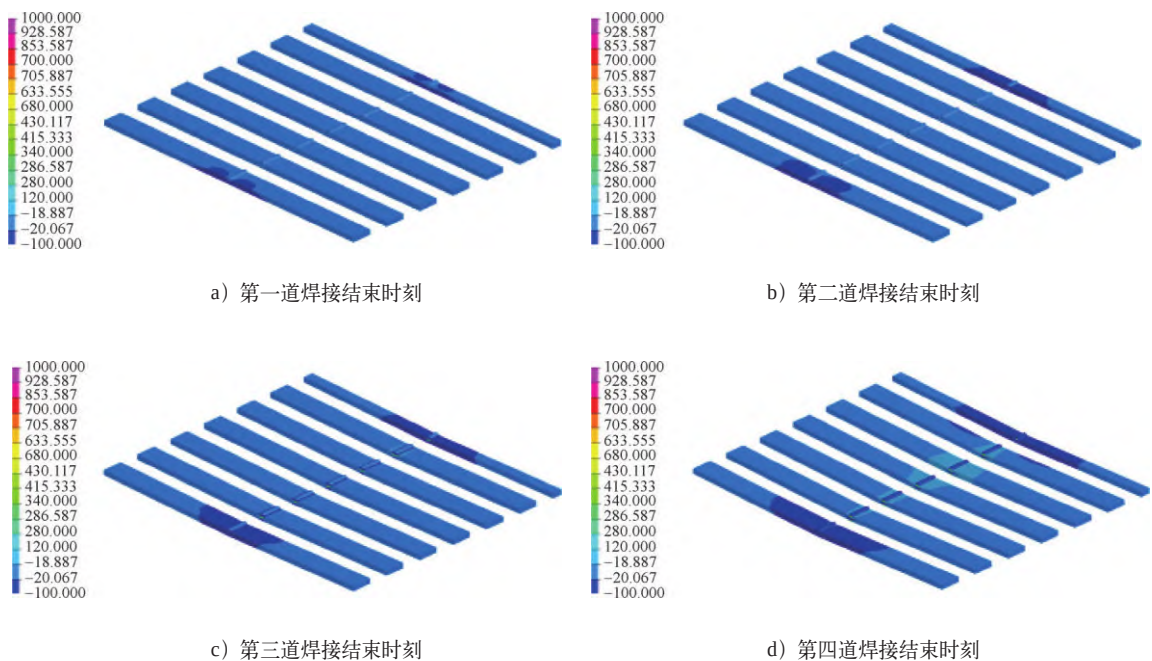


图7 整体横向应力分布云图

道焊缝中心；图6f、g为盖面层中心截面横向应力分布云图，第三道焊完冷却，第一道焊根位置出现的压应力区逐渐扩大，第二、第三道位置的残余拉应力区随着冷却的进行也逐渐扩大；图6h、i为焊接结束中心截面横向应力分布云图，试样完全冷却，在焊缝根部位置出现拉应力区，第一、第二道位置出现较大范围压应力区，第三道中心位置出现高拉应力区，最终峰值应力存在于焊缝根部，为680MPa。

3.3 焊接应力场验证

通过小孔法对残余应力进行验证，测试点分布如图8所示，采用残余应力测试仪对A~E位置的残余应力进行测量。

在相同焊接参数下模拟了十字接头焊接过程中的残余应力，将两种结果进行对比，结果见表2。

表2 小孔法测定与软件模拟残余应力大小

| 位置 | 试验值/MPa | 模拟值/MPa | 误差率 (%) |
|----|---------|---------|---------|
| A  | 67.3    | 60      | 12.2    |
| B  | 346     | 360     | 3.9     |
| C  | 416     | 386     | 7.8     |
| D  | 313     | 342     | 8.5     |
| E  | 226     | 223     | 1.3     |

残余应力软件模拟与试验结果对比如图9所示。由图9可知，试验结果的大小和模拟结果变化趋势吻合。

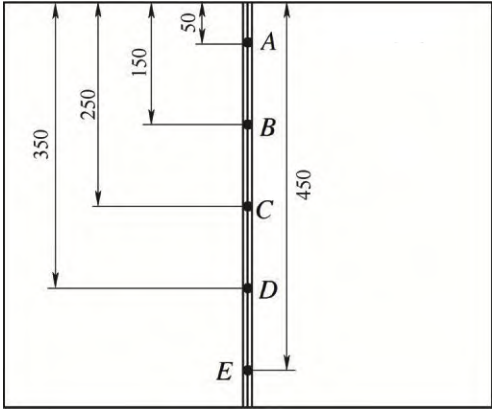


图8 残余应力测试点

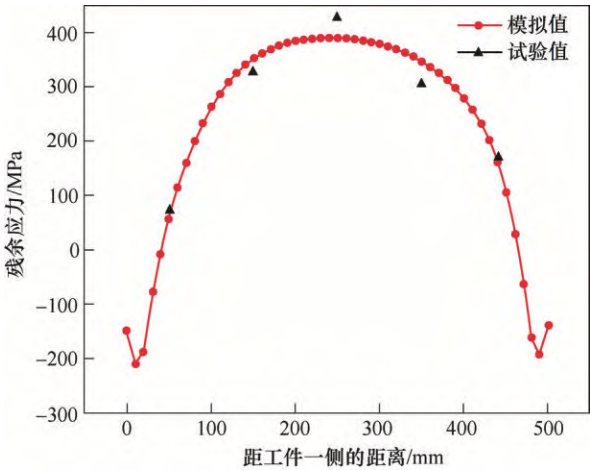


图9 残余应力软件模拟与试验结果对比

(下转第37页)

却迅速。焊缝中心处为细小均匀的等轴晶组织，而在焊缝的边缘，由于受到母材的冷却作用，因此有利于生成柱状晶。

焊接后的集束钯合金管组件经检测，在压力1.0MPa、保压60s的条件下，焊缝无漏气，氦质谱检测得到的漏率 $\leq 1.0 \times 10^{-10} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ，可以满足氢纯化分离用钯扩散装置的使用要求。

#### 4 结束语

1) 通过预先钎焊钯合金管过渡接头，再使用脉冲激光焊的方法，可以实现钯合金扩散室中密集阵列管束的焊接区的精准焊接。

2) 采用150W的Nd:YAG脉冲激光器可准确地控制钯合金薄壁细管与不锈钢法兰焊接接头的熔化深度与焊缝宽度，通过精确控制激光功率、离焦量、脉冲频率、脉冲宽度及焊接速度等主要焊接参数，得到了焊缝宽度一致、表面成形美观、气密性优良的焊接接头。

3) 激光脉冲焊接时能量密度高，热输入较小，热影响区范围很窄。焊缝中心处为细小均匀的等轴晶组织，而在焊缝的边缘，因受到母材的冷却作用而有利于生成柱状晶。

#### 参考文献:

[1] 孙强, 贺玉刚, 严大洲, 等. 高纯氢制备工艺研究

进展[J]. 精细石油化工进展, 2020 (3): 42-44, 57.

[2] GALLUCCI F, FERNANDEZ E, CORENGIA P, et al. Recent advances on membranes and membrane reactors for hydrogen production[J]. Chemical Engineering Science, 2013, 92: 40-66.

[3] 吴彦敏. 气体的纯化[M]. 北京: 国防工业出版社, 1983.

[4] 张启运, 庄鸿寿. 钎焊手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.

[5] OH D K, LEE K Y, PARK J S. Hydrogen purification from compact palladium membrane module using a low temperature diffusion bonding technology[J]. Membranes, 2020, 10 (11): 338.

[6] LYUSHINSKIY A V, FEDOROVA E S, ROSHAN N P. Contact welding of palladium foil with stainless steel[J]. Welding International, 2021, 35 (1-3): 81-84.

[7] 邹家寿. 膜盒波纹管的微束等离子焊接[J]. 航空制造技术, 1978 (7): 20-23.

[8] 王多明, 马翔, 苏勇, 等. 钯管净化器钎焊技术[J]. 金属加工 (热加工), 2021 (4): 51-58.

[9] 喻立川. 脉冲激光在多层超薄材料密封焊接中的应用[J]. 电子技术与软件工程, 2020 (12): 85-88.

MW 20240424

(上接第33页)

#### 4 结束语

通过软件残余应力模拟过程应力演变的情况，结合小孔法试验实测残余应力的结果与软件模拟数据进行分析，可得出如下结论。

1) 在超高强度钢的焊接过程中，残余应力主要集中在焊缝根部。

2) 焊接温度场结果表明，离焊缝热源近，温度升高；远离热源，温度下降，焊接结束，焊件冷却至室温；多道焊时的焊缝往往会经历多次焊接热循环。

3) 超高强度钢的焊接过程，每道的焊缝中心受热源影响较大，部分位置残余应力达到960MPa；远离焊缝处受热源影响较小，温度冷却较慢，残余应力相对较小。

#### 参考文献:

[1] 汪贺模, 罗登, 高擎, 等. 1100MPa级别超高强度工程机械用钢的开发[J]. 南方金属, 2019 (6): 1-4.

[2] 苗玉刚, 王林, 王子然, 等. DH36高强度船板钢对接焊残余应力与变形数值模拟与试验分析[J]. 武汉理工大学学报, 2023, 45 (10): 104-111.

[3] 马雪鹤. 基于残余应力控制的Q370qE桥梁钢焊接工艺优化研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2022.

[4] 骆文泽, 成慧梅, 刘红艳, 等. 超高强钢Q960E对接接头残余应力与焊接变形的数值模拟[J]. 中国机械工程, 2023, 34 (17): 2095-2105.

[5] 方洪渊. 焊接结构学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.

MW 20240505