DOI: 10.12442/j.issn.1002-185X.20240373

拨叉轴等离子焊接数值模拟与实验研究

杨建光[1]，纪宏超[1]，裴未迟[1]，何 雷[2]，黄晓敏[1]，王珊珊[3]

（1. 华北理工大学 机械工程学院，河北 唐山 063200）

（2. 唐山龙润机械有限公司，河北 唐山 063000）

（3. 中国二十二冶集团有限公司，河北 唐山 063000）

摘 要：拨叉轴是手动变速箱、自动化手动变速箱和双离合变速箱中连接拨叉，调整齿轮啮合的重要零件。为研究拨叉轴等离子焊接过程中焊接变形、残余应力与焊接工艺参数的关系，基于ABAQUS仿真软件，采用温度-位移耦合的有限元计算方法并选取双椭球热源模型，对焊板与叉轴焊接的应力场、变形及温度场进行了数值模拟，完成了拨叉轴焊接工艺方案的优化，通过仿真和实验验证了优化模型的可靠性。结果表明：焊接变形随着焊接速度的增大有所减小，焊接速度在2.5~3.0 mm/s区间时焊接变形量较小；变形随着焊接电流的增大而增大。焊接残余应力同焊接电流、焊接速度没有表现出明显的变化规律，但峰值均分布在560 MPa左右，小于叉轴650 MPa的抗拉强度，存在局部的应力集中现象。整体看，残余应力主要分布在焊缝两端，变形主要发生在焊板，经过优化的模型两道焊缝热源温度峰值更加均衡，局部焊接残余应力与变形略有下降。因此，模拟与实验结果可以为生产过程焊接质量的控制提供理论指导。

关键词：拨叉轴；等离子弧焊；数值模拟；工艺优化；实验研究

中图法分类号：TG456.2；U463.212 **文献标识码**：A **文章编号**：1002-185X（2025）01-0156-15

随着国民生活质量的不断提高，人们对汽车的可靠性及操控性提出了更高的要求。换档机构作为变速箱的核心机构，对汽车的换档性能、舒适性以及经济性有着非常重要的影响[1]。其中，拨叉轴（如图1）作为换档机构必不可少的零件，从产品设计到制造工艺都必须满足装配精度和力学性能。（1）变形超差会导致换档不顺畅、顿挫或卡死，影响变速箱性能；（2）拨叉轴的强度未达到综合力学性能的要求，可能导致断裂，影响变速箱安全和耐用性。

根据拨叉轴生产制造遇到的质量问题和实际应用的诸多经验，本工作重在研发和实施拨叉轴等离子焊接工艺的关键技术，采用数值模拟与实验相结合的方法进行研究。结合现场焊接工艺参数的范围，通过ABAQUS有限元软件对焊接过程进行数值模拟，总结焊接工艺参数对焊后残余应力和变形的影响，获得较好的焊接工艺参数组，进行对比分析后，确定理想的焊接模型。在此基础上，针对模型两面焊接存在道间温度的现象，结合模拟得到的一般规律，提出了一种优化焊接工艺的方案，从而获得最佳的焊接工艺方法[2]。再利用优化模型的工艺参数进行实体焊接实验，对比特征路径的变形和残余应力分布，已验证模型的准确性。应用有限元模拟的主要优点是节省成本、提高原型制作质量，并减少实验次数和母材消耗，有效计算焊接接头的变形和残余应力[3]。

等离子弧焊（PAM）的温度高，能量密度大，熔透能力强，生产效率高，而且可减小熔宽、增大熔深，所以能够提高焊接强度。等离子弧焊有3种焊接方法：穿透型等离子弧焊、熔透型等离子弧焊、微束等离子弧焊（MPAM）[4–5]。Li[6]和Wu[7]等建立了一种新的传热模型来模拟熔池中小孔穿透等离子弧焊接过程中的能量传递，计算出的熔池几何形状与实验结果基本一致；Liu[8]和Wu[9]等介绍了等离子弧焊的基本原理，并对该领域的最新研究和应用进行了综述，解释了PAM的2种操作模式，即溶入和锁孔；阮敬平[10]和周俊杰[11]等建立穿孔型等离子弧焊接三维有限元模型，采用双椭球体+锥体热源模拟等离子弧的加热及穿孔效应，模拟得到的熔池形状与实验结果吻合良好。在王福全等[12]的研究中，熔透型等离子焊接技术被用于轨道交通车辆，他们通过优化焊接电流、焊接电压和等离子气流量等工艺参数来获得表面成型良好的焊缝；汪建新等[13]运用双椭球热源模拟钛合金叶片等离子弧焊温度场的分布，ANSYS分析结果与实际焊接基本相符。Prasad等[14]采用MPAM工艺连接薄钢板，研究了热输入和工艺参数对焊缝质量的影响，并开发了回归模型来表示MPAM过程的输入和输出关系；Baruah等[15]对Ti6Al4V合金与500 μm薄板对接结构的

收稿日期：2024-06-23

基金项目：河北省教育厅产学研专项（CXY2024054）；中国五矿集团有限公司科技专项计划（2021ZXA06）

作者简介：杨建光，男，1988年生，硕士生，华北理工大学机械工程学院，河北 唐山 063200，E-mail：18332911063@163.com

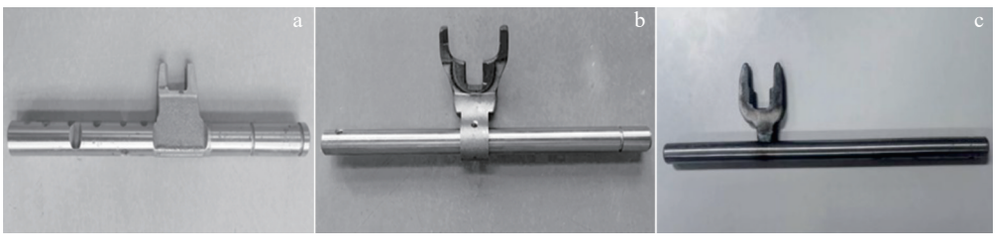


图 1　拨叉轴制造类型

Fig.1　Manufacturing types of shift fork shaft: (a) machining; (b) assembling; (c) welding

微焊接进行了研究，建立了一个三维有限元模型来模拟接头的温度分布和焊接变形，分析了焊接速度和焊接电流的影响，计算的宏观图的形状和大小与实验测量值非常一致。武汉理工大学的周浪等[16]进行了一项研究，目的是探讨 0.5 mm 厚的 Ta-10W 合金微束等离子弧焊中温度对焊接接头质量的影响。他们使用高斯热源模型来模拟温度场的分布，并发现所得的焊缝形状和尺寸与实验结果非常相符。综上，等离子弧焊接的热源模型分为 3 类：组合体热源模型、双椭球热源模型、高斯面热源模型，应根据实际焊接的熔池形貌选择相应的热源模型。

拨叉轴传统制造方法依赖机械加工和组装。为降低成本、减少新制模具，并满足市场小批量需求，研发了等离子焊接制造工艺。该工艺能够控制焊接变形，提高强度，可生成表面光滑、焊缝均匀且无缺陷的优质零件，实现拨叉轴等离子弧焊的优质化生产。

1　实 验

拨叉轴由槽板和叉轴焊接而成，均属于 45 钢[17]，其化学成分如表 1 所示。该类型钢是中碳钢的代表，工业应用十分广泛，焊接性良好，但含碳量增加会导致焊接性能逐渐下降。在焊接过程中，大量母材会熔化并进入焊缝，这提高了热裂纹敏感性。为了防止热裂纹的产生，考虑使用低碳焊丝[18]。ER70S-6 焊丝适用于碳钢焊接，其优点包括电弧稳定、飞溅少、焊缝成形美观以及焊缝金属气孔敏感性低。综合考虑，本实验选用 ER70S-6 低合金钢焊丝作为填充材料，规格为 Φ1.2 mm。为简化计算，材料模型做了 2 个假设：材料是各向同性且均匀；温度高于熔点时，屈服强度和杨氏模量理论上为零。为了保证有限元计算的收敛性，这 2 个参数被设置为较小值，分别是 1 和 1000 MPa[19]。

在进行焊接有限元模拟过程中，材料的热物理性能参数随着温度场的变化而急剧变化[20]，通过查阅《机械工程材料实用手册》[21]中的数据，结合表 1 的化学成分，通过 Jmatpro 软件进行计算，得到了图 2 中显示的 45 钢在不同温度下的比热容、密度、热导率、杨氏模量、屈服强度、热膨胀系数和泊松比。

表 1　45 钢的化学成分

Table 1　Chemical composition of 45 steel (ω/%)

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu
0.42–0.50	0.17–0.37	0.50–0.80	≤0.035	≤0.035	≤0.25	≤0.25	≤0.25

本次研究提供一种双工位三维等离子焊接专机，该机器包括一个数字焊接电源、一个等离子体模块、一个 PAM 焊炬、一个 PC 控制系统和双工位焊接平台。控制 PC 用于调整工艺参数和焊枪移动，具有精准、稳定的特点[22]，焊接电源是 Thermal Arc 等离子焊机，离子气和保护气均为氩气，主动翻转台安装夹具，调整焊枪与焊缝的角度，焊件采用双面焊，需设置双工位，进行不间断焊接，整个焊接系统如图 3 所示。

2　焊接模型

2.1　几何模型构建

模型由焊板（30 mm×16 mm×5 mm）、叉轴（Φ14 mm×100 mm）和焊缝组成的焊件，其中模拟使用的尺寸与实际焊接的尺寸一致[23]。轴由 V 型块支撑，上部配有压紧块，焊板通过定位块保证位置精度，上面施加夹紧力，防止焊件在焊接过程中产生变形，几何模型和施加的夹紧方式如图 4 所示。

2.2　有限元模型

应用 ABAQUS 切分技术，划分实体为六面体网格，网格模型如图 5 所示。为了取得精确且收敛的分析结果，并优化计算效率，网格划分遵循了“近处细密、远处稀疏”的原则。焊缝及附近区域网格密集，尺寸为 1 mm；沿着轴线，焊缝两侧区域采用渐变网格划分，最大尺寸达到 5 mm；焊缝与板的连接处采用过渡网格划分，较远端尺寸为 3 mm，共 10 188 个体单元，单元属性被定义为 C3D8T，八结点热耦合六面体单元，允许进行热分析和结构分析[24–25]。

焊接温度场计算属于瞬态热分析，根据实际焊接情况，设定焊接的初始温度为室温 20 ℃。为了准确反映边界条件并保证有限元计算的准确性，建立了如图 5 所示的载荷约束。轴两侧端面施加固定约束表示夹具在 Z 方向对轴的压紧，焊板前端面施加固定约束代替夹具对板 Z 方向的压力[26]。

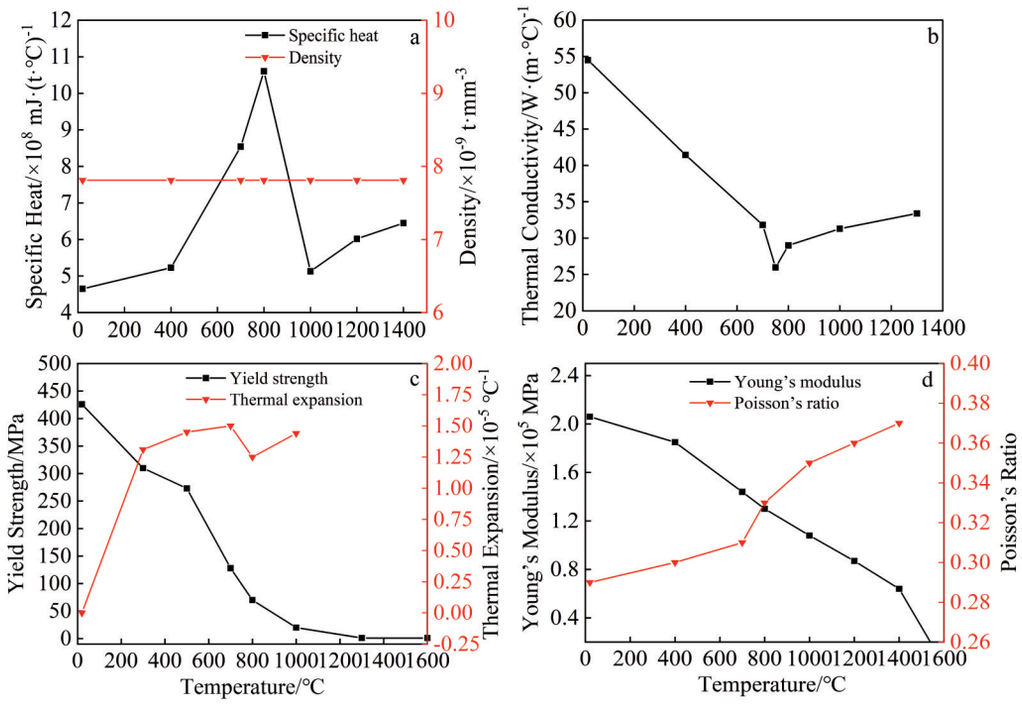


图2　45钢热物理参数随温度的变化曲线

Fig.2　Variation curves of thermo-physical parameters with temperature of 45 steel: (a) specific heat and density; (b) thermal conductivity; (c) yield strength and thermal expansion; (d) Young's modulus and Poisson's ratio

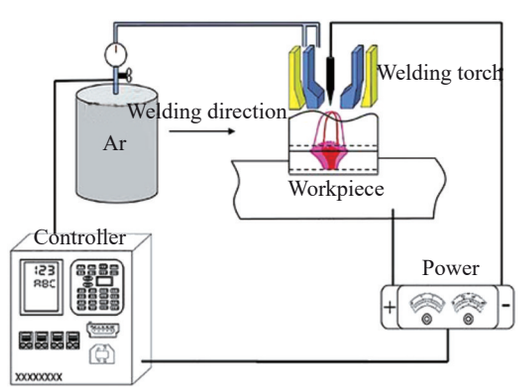


图3　实验设备系统示意图

Fig.3　Schematic diagram of experimental equipment system

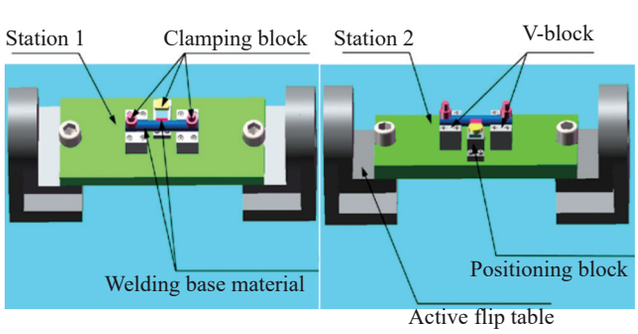


图4　几何模型和夹具模型

Fig.4　Geometric model and fixture model

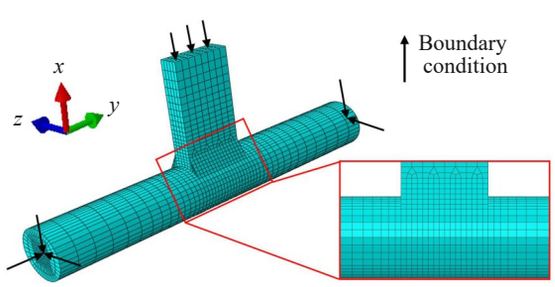


图5　网格划分示意图

Fig.5　Diagram of mesh generation

2.3　热源模型

2.3.1　建立热源模型

焊接温度场的仿真准确性受到热源模型的显著影响。在仿真过程中，通常根据具体的焊接方法建立适当的热源模型类型，并依据实际熔池形状对热源参数进行调整，以匹配实际焊缝边界[27–28]。此次拨叉轴的焊接使用了低电流的熔透型等离子弧焊，这种焊接方法与钨极氩弧焊类似。双椭球热源模型被广泛应用于浅熔透和高熔透焊缝的热模拟中[29]。在实际焊接过程中，焊接热源的移动导致熔池前后部分的能量密度分布不对称，焊缝纵切面的熔池形态呈现碗状[30]，因此双椭球热源模型更符合实际焊接条件。

双椭球热源模型分为前后两半部分椭球[31]，如图6所示。

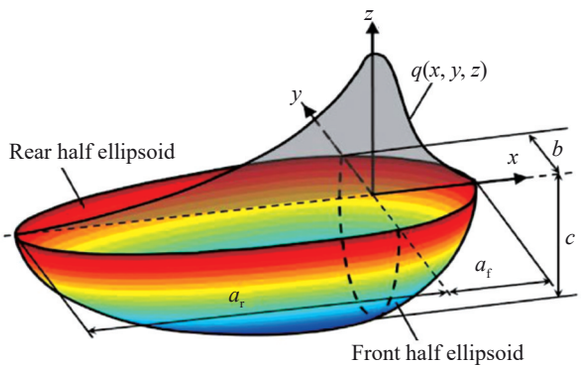


图6 双椭球热源模型

Fig.6 Double ellipsoid heat source model

前半椭球体和后半椭球体的热通量可以分别用方程(1)和(2)来描述：

$$q_f(x,y,z)=\frac{6\sqrt{3}\,f_f q_0}{bca_f\pi\sqrt{\pi}}\exp\left(-\frac{3x^2}{a_f^2}-\frac{3y^2}{b^2}-\frac{3z^2}{c^2}\right) \quad (1)$$

$$q_r(x,y,z)=\frac{6\sqrt{3}\,f_r q_0}{bca_r\pi\sqrt{\pi}}\exp\left(-\frac{3x^2}{a_r^2}-\frac{3y^2}{b^2}-\frac{3z^2}{c^2}\right) \quad (2)$$

式中：q_0为热输入，且$q_0=\eta UI$，η为热效率；U，I为电弧电压和焊接电流；f_r，f_r为热流密度分布系数，$f_f+f_r=2$，f_f和f_r分别设置为0.6和1.4；a_f，a_r，b，c为热源形状参数[28,31]。

2.3.2　校核热源模型

调整双椭球热源参数(见表2)创建合适的熔合区，比较仿真的熔池形貌与实际接头横截面焊缝轮廓，涉及熔宽、熔深和余高等尺寸。表3为焊接实验工艺参数，图7为仿真熔池形貌与相同工况下实验熔池形貌。可以看出，在相同尺度下两者吻合良好，误差在可以接受的范围内，验证了本研究所选等离子弧焊接热源模型的准确性[32–33]。

3　仿真结果与分析

3.1　设定工况

合理的焊接工艺参数能够有效减少焊接残余应力和变形。因此，分析不同影响因素下焊接残余应力和变形的分布特点，对焊接工艺参数的选择和优化有重要的指导价值。叉轴与板的焊接对残余应力和变形特别敏感，因此需要对焊接电流和焊接速度等参数进行深入研究[34]。熔弧型等离子焊接一般采用焊接电流100 A左右，焊接速度2~3 mm/s[4]，考虑到本次是填充焊丝焊接，为保证焊缝金属的熔透性，并结合现场经验，设计不同仿真工况，如表4所示。

表2 双椭球热源参数

Table 2 Parameters of double ellipsoid heat source

q_f/q_r	a_f	a_r	b	c
0.5	5	10	6	2

表3 焊接实验工艺参数

Table 3 Process parameters of welding test

Welding speed/mm·s^{-1}	Welding current/A	Welding voltage/V
2.5	105	26

3.2　焊接速度对焊接残余应力和变形的影响

仿真结果图8展示了残余应力与变形随焊接速度变化的趋势。可以观察到，随着焊接速度的增加，焊件的变形量逐渐减小。当焊接速度小于2.5 mm/s时，变形量随焊接速度变化较为显著；而当焊接速度大于2.5 mm/s时，变形量的变化趋势逐渐趋于缓和。焊接速度在2.5~3.0 mm/s区间时焊接变形量较小。从焊接残余应力方面看，未表现出明显的变化趋势，但峰值均集中在560 MPa左右。与45钢、Φ14 mm标准拉伸试件的抗拉强度(650 MPa)[21]相比，这一数值较低。

3.3　焊接电流对焊接残余应力和变形的影响

图9表示了焊接电流对残余应力和变形的影响规律，随着焊接电流的增大，焊件的变形量呈现变大的趋势，在焊速为2.5和3 mm/s时，变形量随焊接电流并没有出现急剧的增长，相较焊速为1.5和2 mm/s的情况有着明显的区别。等效残余应力随焊接电流的变大有增加的

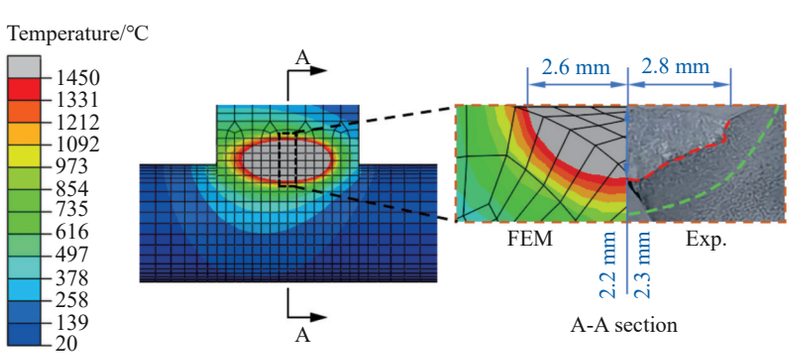


图7 有限元模拟和实验熔池形状的比较

Fig.7 Comparison of molten pool shapes by finite element simulation (FEM) and experiment

表4 不同工况下焊接工艺参数

Table 4 Welding process parameters under different working conditions

Welding speed/mm·s^{-1}	Welding current/A	Welding voltage/V
1.5, 2, 2.5, 3	90, 95, 100, 105, 110	26

趋势，整体表现得并不突出，而且焊速为2 mm/s时，焊接电流与残余应力的变化出现了负相关。

分析焊接速度和焊接电流对残余应力及变形的变化趋势：随着焊接速度的提高，焊接的线能量会减少，这将导致温度梯度的降低，从而使焊后的变形量相对减少[35]。反之，随着焊接电流的增大，电弧热功率会增大，相应的温度梯度会增加，导致焊后变形的增大。关于残余应力的变化，第1道焊缝对第2道焊缝有预热作用，第2道焊缝对第1道焊缝有二次加热的现象[36]，并且两道焊缝存在先后顺序和冷却的时间差，造成了焊后残余应力的不规律性变化。综合考虑，选定以下4组工况做进一步比较，如表5。

3.4　选定工况的焊接变形

3.4.1　焊接变形云图

从图10可以看出，焊接件的变形主要集中在焊缝中部和焊板前端，并且沿着焊板远离焊缝的方向，板的变形量越来越大，表现出明显的变形趋势。比较云图椭圆形部分的焊缝区域，图10a焊缝区域的变形最小；比较云图实线矩形部分的焊板区域，图10d焊板的变形最小；比较云图虚线矩形部分的图例数据，图10c等效变形最小，整体焊件的变形差异在0.01~0.03 mm之间，非常相近。

3.4.2　焊接变形矢量图

由于焊板的变形对拨叉轴的装配性能和使用性能有重要影响，所以进一步探究了焊板的变形矢量，如图11所示。焊板在Y和Z方向上发生主要变形，且变形方向一致，这是由于两边焊缝都填充了大量高温液态金属，与熔化的母材相互融合，随着液态金属再冷却结晶，膨胀的液态金属会经历液态和固态收缩过程，加之两道焊缝具有先后顺序，焊道间温度传递与间断冷却相互交错，使得焊板和轴在收缩应力的作用下，产生这样的角变形。相较于图11a~11c，图11d的变形量最小。

3.5　焊接残余应力云图

从图12等效应力的分布云图中，可以看出焊接后的残余应力分布在两道焊缝周边区域，云图右侧为第1道

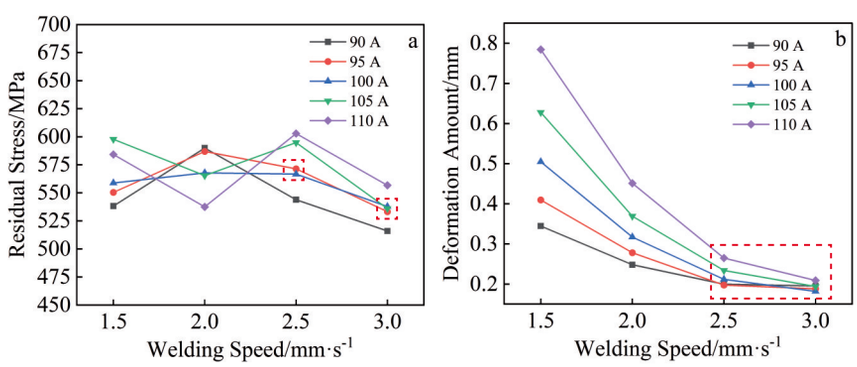


图8 残余应力与变形随焊接速度变化曲线

Fig.8 Variation curves of residual stress (a) and deformation amount (b) with welding speed

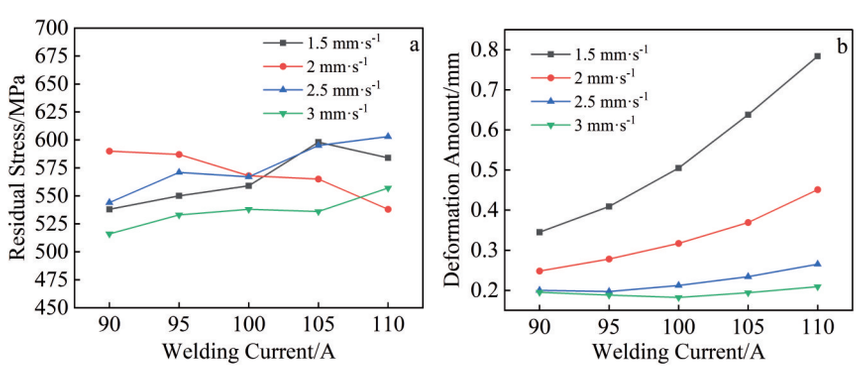


图9 残余应力与变形随焊接电流变化曲线

Fig.9 Variation curves of residual stress (a) and deformation amount (b) with welding current

表5 选定工况的焊接工艺参数

Table 5 Welding process parameters of selected working conditions

No.	Welding speed/ mm·s^{-1}	Welding current/A	Welding voltage/V
a	2.5	95	26
b	2.5	100	26
c	3	100	26
d	3	105	26

焊缝区域，左侧为第2道焊缝区域，焊缝两端附近残余应力表现得过于集中，尤其是第2道焊缝两端出现了残余应力的最大值（云图中灰色部分）。说明第2道焊缝的焊接过程温度高于第1道焊缝，第1道焊缝的焊接是没有预热的焊接过程，而且焊缝两端没有焊料的填充，热源的突然进入和离开，升温速度和冷却速度发生得较快，造成此应力分布的特点。可是在第2道焊缝焊接过程中，第1道焊缝的预热发挥了明显作用，未出现狭长的残余应力分布带。相比较4种工况的残余应力大小，图12c和图12d代表的2种工况是值得推荐的，数值分别为537.8和537.6 MPa。

综合以上分析焊接残余应力和变形的分布、大小，引起残余应力和变形变化的原因，初选工况d（焊接电流105 A、焊接速度3 mm/s）的焊接工艺参数模型。

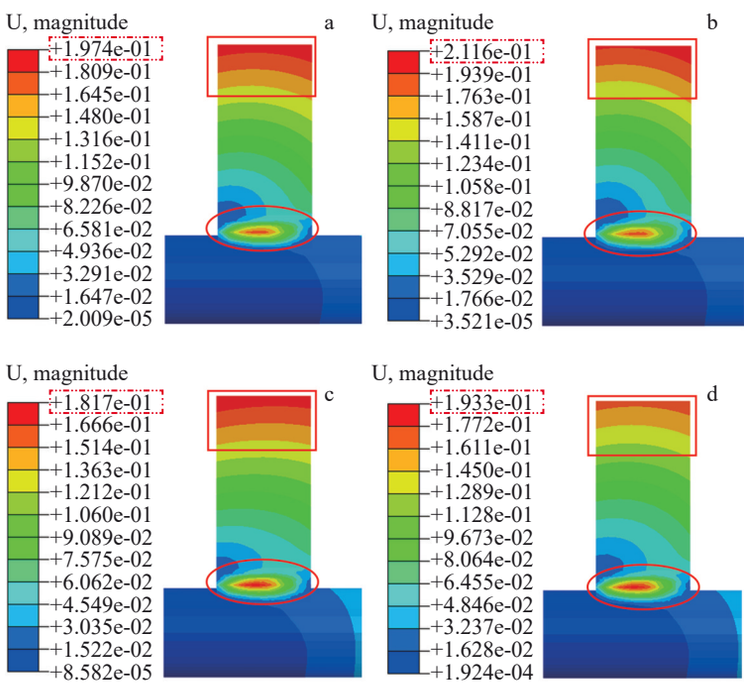


图10 不同工况的变形云图

Fig.10 Deformation cloud maps under different working conditions: (a) 2.5 mm·s^{-1}/95 A; (b) 2.5 mm·s^{-1}/100 A; (c) 3 mm·s^{-1}/100 A; (d) 3 mm·s^{-1}/105 A

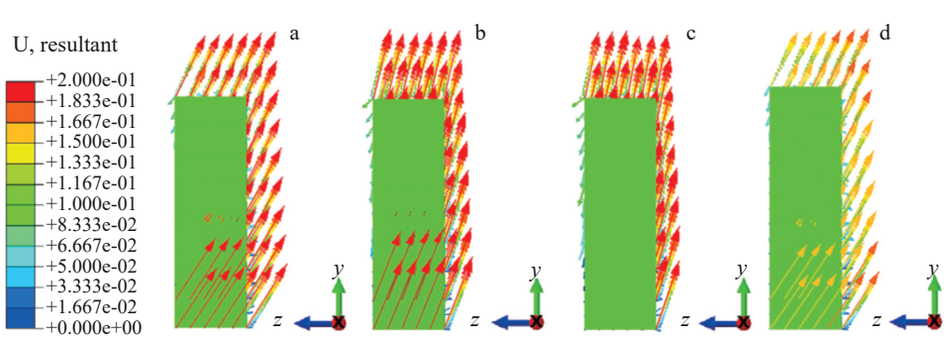


图11 不同工况下板的变形矢量图

Fig.11 Deformation vector diagrams of plates under different working conditions: (a) 2.5 mm·s^{-1}/95 A; (b) 2.5 mm·s^{-1}/100 A; (c) 3 mm·s^{-1}/100 A; (d) 3 mm·s^{-1}/105 A

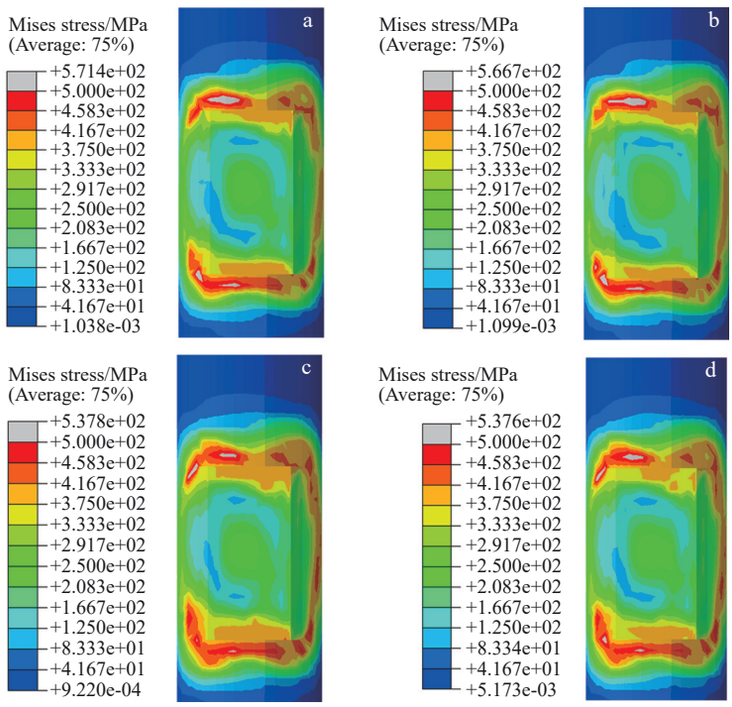


图 12　不同工况的残余应力云图

Fig.12 Residual stress cloud maps under different working conditions: (a) 2.5 mm·s^{-1}/95 A; (b) 2.5 mm·s^{-1}/100 A; (c) 3 mm·s^{-1}/100 A; (d) 3 mm·s^{-1}/105 A

4　焊接工艺的优化

4.1　焊接温度场分布特征

焊接温度场的瞬态分析有助于理解焊缝缺陷的形成机理，是焊接应力分析、变形分析和焊接质量控制的前提[37]。图 13 为焊接过程中不同阶段的温度场云图。在热源的作用下，焊缝金属温度急剧升高，超过材料熔点，此时熔池较小，如图 13a 所示。随着热源移动，电弧作用区域附近的温度场逐渐达到一个相对稳定的状态，进入准稳态，如图 13b，熔池的最高温度高达 2714 ℃。进行第 2 道焊接时，受到道间温度的影响，起弧阶段和稳态阶段热源中心温度都有所提高，热影响区域的范围进一步扩大，表现出明显的温度梯度[22]，可以看出，两道焊缝的起弧阶段温差达到 426 ℃，相当于第 2 道焊缝是在高温预热后进行的焊接[38]，充分说明了前文对焊接残余应力与变形改变的原因。

4.2　焊接热循环曲线

焊接过程中，高度集中的局部瞬态热输入会导致焊件产生不均匀的温度场分布，这是引起焊接应力与变形的根本原因[22]，因此降低第 2 道焊缝的热源功率，使得两道焊缝的热源温度更加平衡，如图 14，蓝色、红色曲线分别为第 1 道焊缝和第 2 道焊缝表面中心特征点的热循环曲线 80 s 内的温度变化。随着第 2 道焊缝焊接电流的降低，特征点的热循环曲线峰值温度逐渐降低，两道焊缝热源最高温度的差值越来越小。在图 14d 中，保持焊接速度一定，当第 2 道焊缝热源采用 90 A 的电流输入时，特征点的热循环曲线峰值达到相近的状态。

通过分析道间温度差值随电流的变化规律，提出焊接工艺优化的可行方案，如表 6。

4.3　优化方案的焊接变形趋势

完成不同优化模型的模拟计算，得到包含未变形和已变形部分的变形云图。为更清晰地观察焊板的变形，将焊接变形量放大 10 倍，获得图 15 所示的焊板变形云图，其中黑色框线为焊接前模型[39]。比较优化方案焊接件的等效变形和焊板的变形，图例数据中的最大值和焊板前端红色区域对应值，两者并没有随着第 2 道焊缝电流的降低发生明显的变化，整体差异为 0.01 mm，可以忽略不计，说明焊接工艺参数对变形的控制已经达到了极限。

4.4　优化方案的焊接残余应力

4.4.1　焊缝两端面的残余应力

4 种情况下等效残余应力的分布和数值非常相近，如图 16，相较方案 a 与方案 b，方案 c 和方案 d 的高应力分布区域有所减小。对焊缝两端面叉轴内部应力进行观察发现，应力分布区域自上而下呈现明显的分配特征，最大值靠近焊接接头，远离焊缝应力值逐渐减小，数值较低。仔细比较这 4 种情况，方案 a 同方案 b 非常相似，方案 c 同方案 d 非常接近，但在方案 a 和方案 b 中，处于高应力状

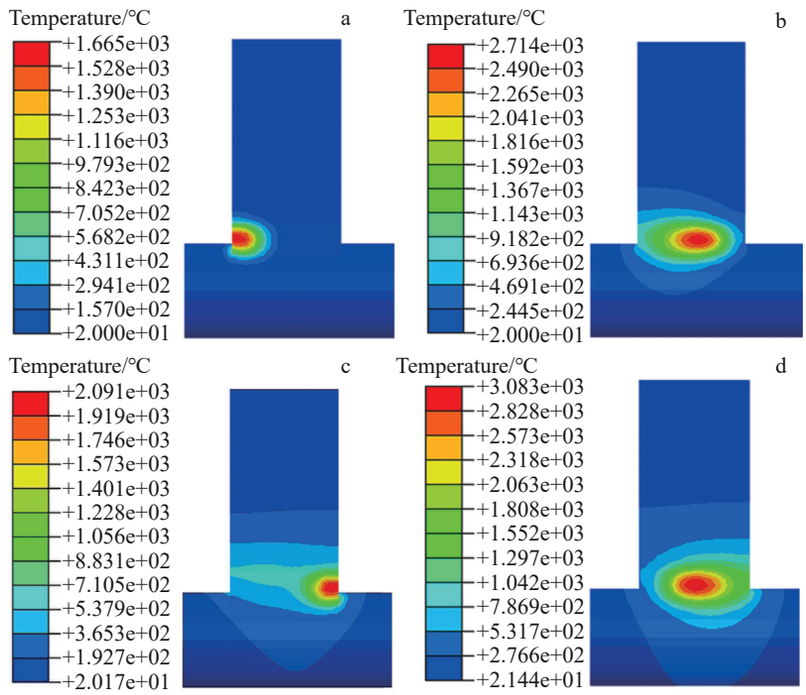


图 13　焊接过程中不同阶段的温度场分布

Fig.13　Temperature distributions in different stages during welding process: (a) initial arc stage of the first weld; (b) steady-state stage of the first weld; (c) initial arc stage of the second weld; (d) steady-state stage of the second weld

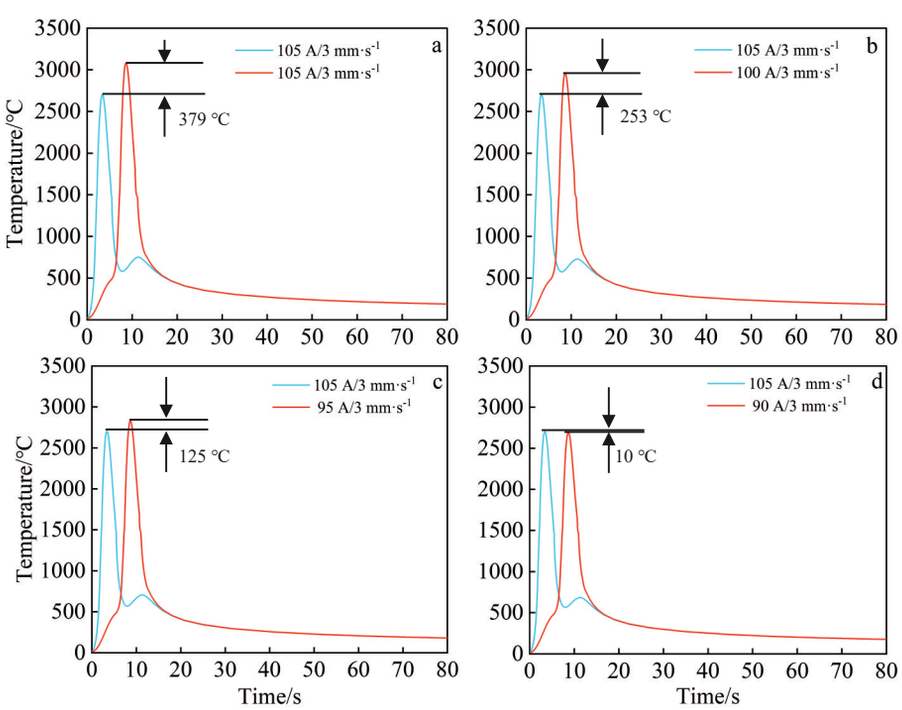


图 14　两道焊缝表面中心点处随第 2 道焊缝焊接电流变化的热循环曲线

Fig.14　Thermal cycle curves at the midpoint on the surface of two weld seams varying with the welding current of the second weld seam: (a) 105 A; (b) 100 A; (c) 95 A; (d) 90 A

态的纵向区域范围比方案 c 和方案 d 中同等位置要大，如图中红色虚线矩形区域所示。这些信息表明，每个接头中的残余应力分布可能受到相邻焊接接头的温度循环影响，尤其是当相邻接头之间的距离足够近时，但是这种温

表6 优化方案的焊接工艺参数

Table 6 Welding process parameters of optimizing schemes

No.	Welding speed/mm·s^{-1}	Welding current of the first weld seam/A	Welding current of the second weld seam/A	Welding voltage/V
a	3	105	105	26
b	3	105	100	26
c	3	105	95	26
d	3	105	90	26

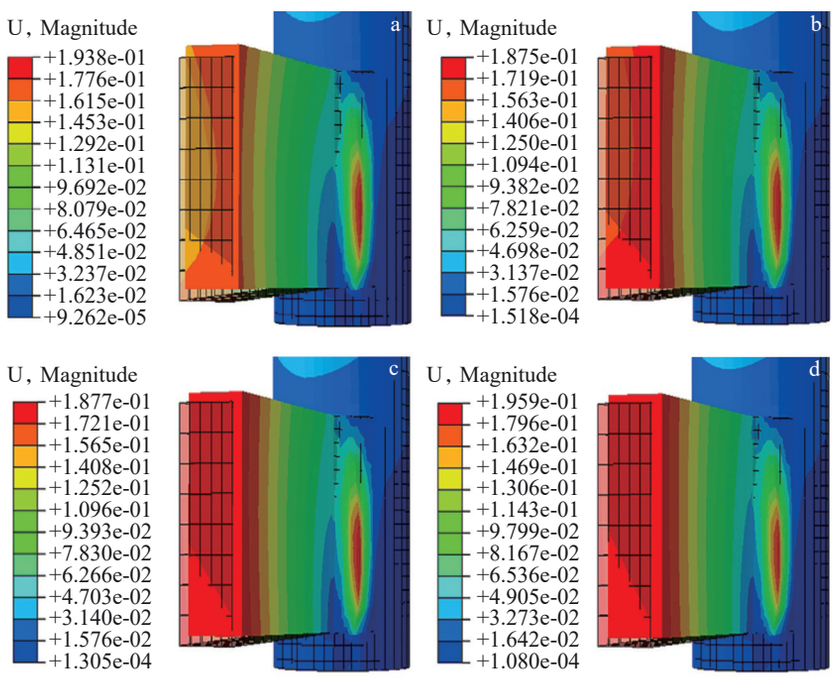


图15 不同优化方案板的焊接变形云图

Fig.15 Deformation cloud maps of plates with different optimization schemes: (a) No.a; (b) No.b; (c) No.c; (d) No.d

度的差距在一定范围内不足以改变残余应力和变形的峰值和分布规律(发挥决定性的作用)[40]。幸运的是,针对本次研究的焊接结构特点,主动降低第2道焊缝的热源功率,发现了焊接区及其附近内部残余应力的改变,为焊接工艺的优化提供准确的理论。

4.4.2 焊缝两侧的残余应力

图17定量比较了以上4种模拟情况焊缝两侧沿线L1和L2的残余应力分布,特征线L1位于第1道焊缝一侧,特征线L2位于第2道焊缝一侧。结果显示,焊接区残余应力的数值曲线非常相似,拥有一个相对均匀的区域;焊缝两端残余应力表现出明显的双峰,进一步观察发现,图中矩形区域2条曲线的峰值逐渐靠近,即第2道焊缝一侧的残余应力峰值随着焊接电流的降低发生了正相关,这也证明了前文结论的准确性。

4.5 优化方案的实体焊接实验

采用表6中优化方案的焊接工艺参数进行焊接实验,第2道焊缝的表面成型结果和焊缝截面如图18所示,焊缝表面成型良好,都具有连续、平整、均匀的鱼鳞状波纹[41–42]。测量焊缝表面的宽度及截面的熔深,发现随着焊接电流和送丝速度的降低,焊缝宽度由6.58 mm逐渐缩小到6.03 mm,熔深由2.2 mm降低到1.8 mm。

考虑到焊缝宽度和熔深直接影响焊接接头的强度和稳定性[43],结合模拟得到的变形和残余应力结论,确定优化后最佳的工艺参数,如表7所示,第2道焊缝的焊接电流为100 A,焊接速度为3 mm/s。

5 优化结果和实验结果的对比分析

5.1 特征路径的焊后变形模拟与实测

获得优化模型的焊接零件后,分别在焊板的顶面、侧面和正面设置路径,测量路径区域沿X、Y、Z 3个方向的位移值,同数值模拟结果作对比,验证拨叉轴焊接仿真变形的准确性。图19~21可以看出,焊板在不同方向的变形测量结果与数值模拟结果变化趋势是一致的,数值上存在一定误差,测量值略大于模拟值,整体处在允许的误差范围内,说明焊接模拟与实验结果是吻合的[44]。但在焊板Z方向、特殊点位出现的差值是比较大的,最大位移

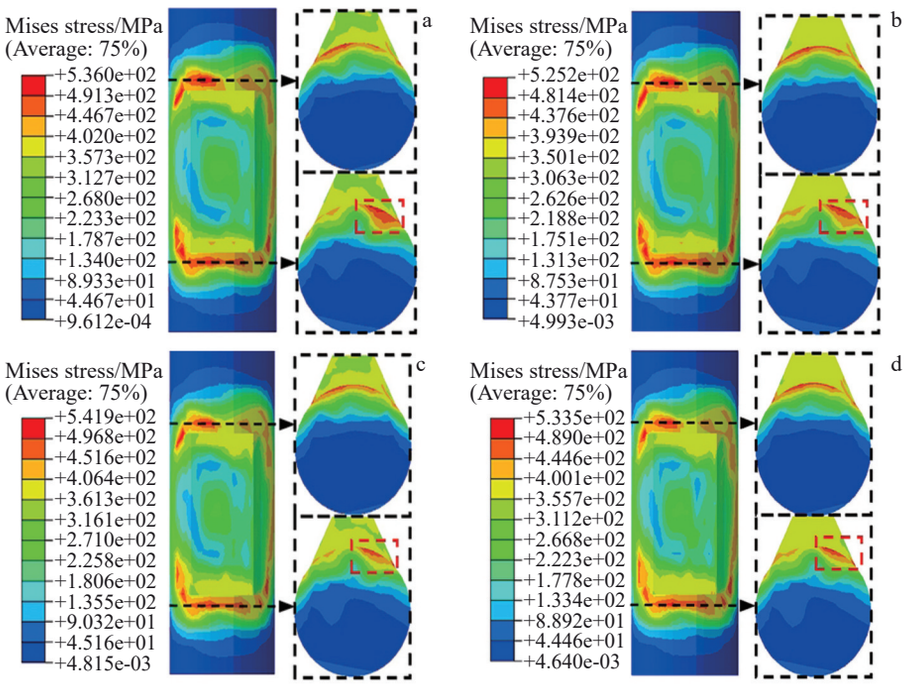


图16 不同优化方案焊缝两端面的残余应力分布图

Fig.16 Residual stress distribution maps of two end faces of weld seams with different optimization schemes: (a) No. a; (b) No. b; (c) No. c; (d) No.d

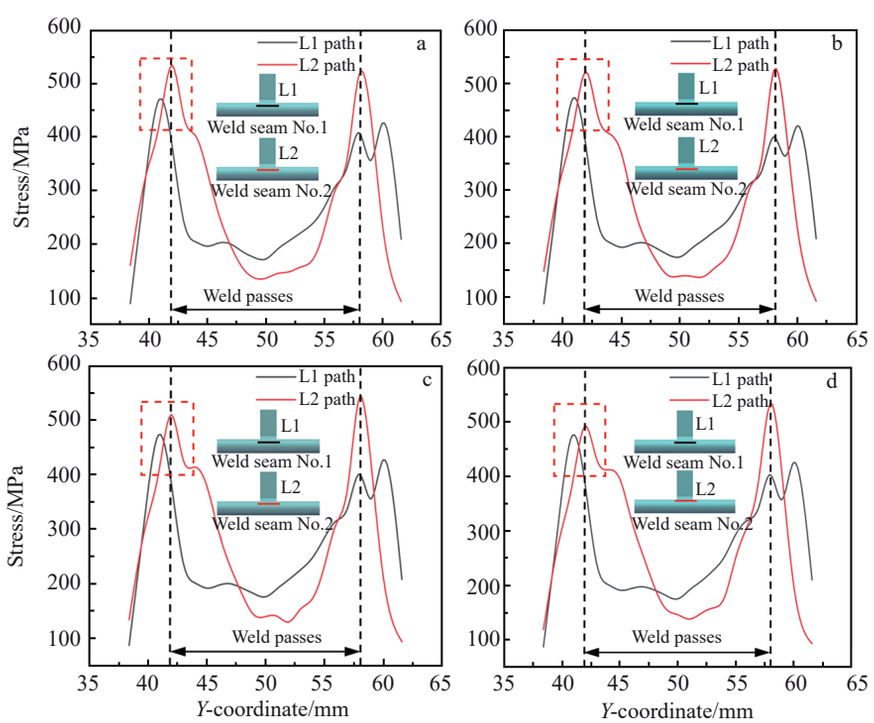


图17 不同优化方案焊缝两侧的残余应力分布曲线

Fig.17 Residual stress distribution curves on sides of the weld seams under different optimization schemes: (a) No.a; (b) No.b; (c) No.c; (d) No.d

测量值为 0.22 mm，同数值模拟结果相比，差值为 0.09 mm，这不否认模拟过程简化模型带来的缺陷，同时焊板自身的平面度也是需要考虑的。

5.2　特征路径的残余应力模拟与实测

图 22~23 比较了工件表面横向残余应力（*S*11）、纵向残余应力（*S*22）模拟[45]与实验测量的分布情况。由图 22a

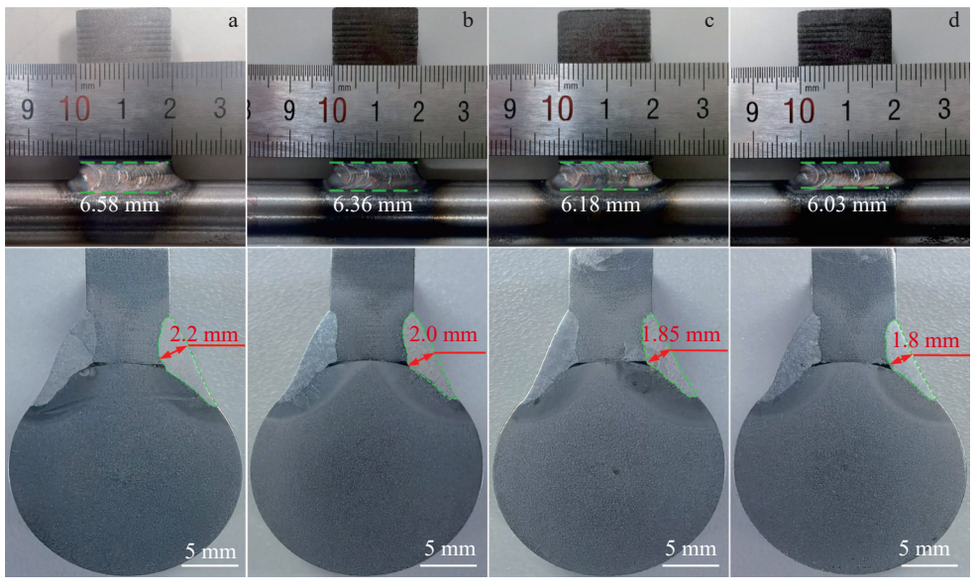


图 18　不同优化方案第 2 道焊缝的宏观形貌及接头截面形状

Fig.18　Macro-morphologies and joint cross-sectional shapes of the second weld seams under different optimization schemes: (a) No.a; (b) No.b; (c) No.c; (d) No.d

表 7　最佳焊接工艺参数

Table 7　Optimal welding process parameters

Welding speed/mm·s^{-1}	Welding current of the first weld seam/A	Welding current of the second weld seam/A	Welding voltage/V
3	105	100	26

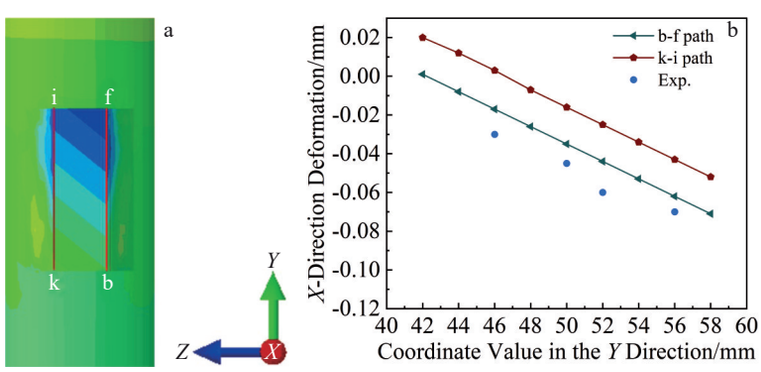


图 19　焊板 *X* 方向变形模拟值与测量值

Fig.19　Simulated and measured values of deformation in the *X*-direction of the welding plate: (a) *X*-direction path; (b) deformation values of b-f and k-i paths

可知，横向残余应力主要集中在焊缝两端及其中间区域，偏向于焊板一侧。残余应力由焊缝和附近热影响区的横向收缩引起，形成焊缝两端集中压缩应力、拉伸应力出现在中间的分布，两道焊缝横向残余应力变化趋势基本一致，L1 为第 1 道焊缝一侧特征线，L2 为第 2 道焊缝一侧特征线，如图 22b，拉、压残余应力的最大值都接近 350 MPa。对比云图 23a 和云图 22a，中间红色区域代表拉伸应力，两端蓝色区域代表压缩应力，纵向残余应力与横向残余应力分布相似，拉、压残余应力均出现在附近热影响区，呈现对称分布。叉轴两侧的残余应力呈对称分布，主要表现为压缩残余应力，数值较小，如图 23b 所示，而拉伸残余应力峰值为 449.6 MPa 出现在轴的内部，靠近轴中心，偏向于第 2 道焊缝一侧[46]。

在残余应力实验中，本研究采用 X 射线应力衍射仪

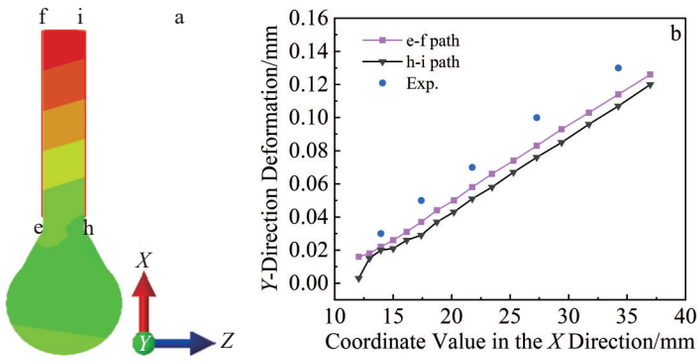


图20 焊板 *Y*方向变形模拟值与测量值

Fig.20 Simulated and measured deformation values in the *Y*-direction of the welding plate: (a) *Y*-direction path; (b) deformation values of e-f and h-i paths

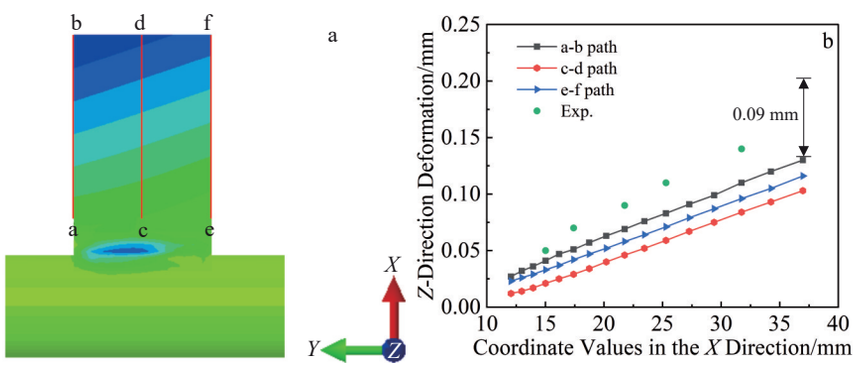


图21 焊板 *Z*方向变形模拟值与测量值

Fig.21 Simulated and measured deformation values in the *Z*-direction of the welding plate: (a) *Z*-direction path; (b) deformation values of a-b, c-d and e-f paths

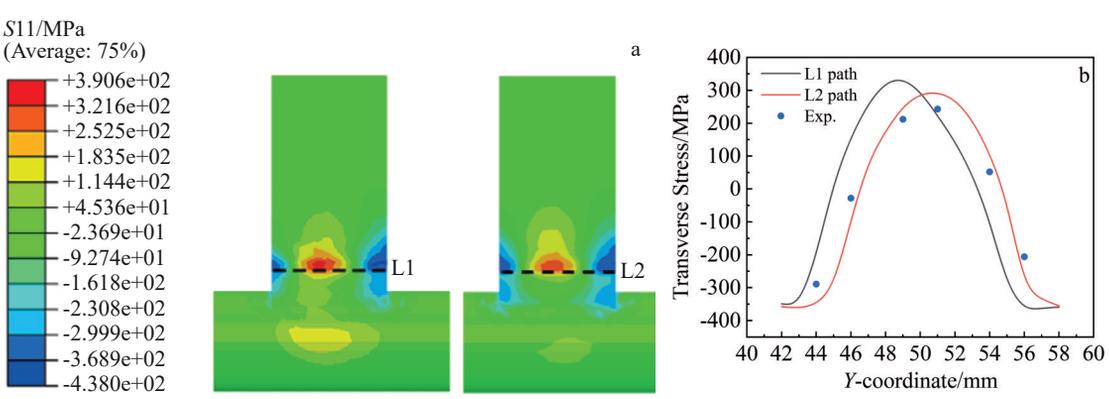


图22 横向应力模拟与实测值的比较

Fig.22 Comparison between simulated and measured transverse stress values: (a) transverse stress cloud map; (b) transverse stress along the L1 and L2 lines

测量了图22a和图23a中特征路径L1和L2区域的横向和纵向残余应力。结果显示，实验数据在数值和趋势特征上与模拟结果基本一致，均差在20%以内。此外，观察到模拟和实验得到的残余应力值普遍较高，且模拟值大于实验测量值，原因可能是：(1)在焊接过程中，焊缝两端没有焊丝的填充，而且是热源起始和结束的位置，温度变化比较剧烈，残余应力由焊缝和附近热影响区的横向收缩未通过塑性变形的方式完全释放，形成一定的应力

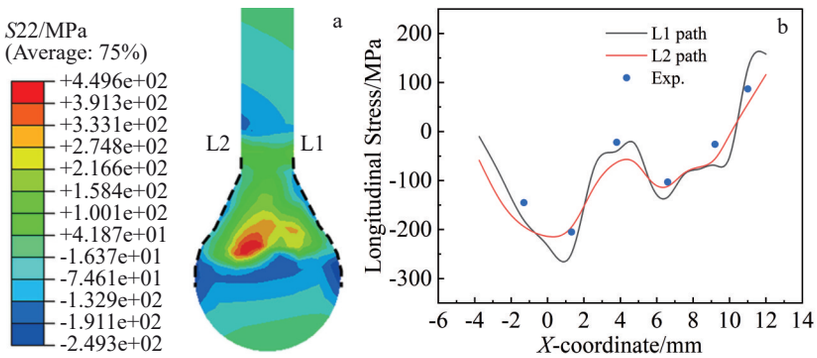


图 23　纵向应力模拟与实测值的比较

Fig.23　Comparison between simulated and measured longitudinal stress values: (a) longitudinal stress cloud map; (b) longitudinal stress along the L1 and L2 lines

集中区域；(2)本研究采用双道焊的方式进行焊接，等离子弧焊的熔透性强，焊接热输入大，因而焊后残余应力较大[47]。(3)模拟过程与实验焊接过程存在一定差别，模拟过程设定的边界条件是理想化的，没有焊接工位的转换；另外焊枪与工件的距离，即离焦量和送丝速度等焊接工艺同样值得关注。

6　结　论

1)基于双椭球热源模型对拨叉轴等离子弧焊进行了模拟，获得了与实验匹配的熔池形貌、焊接变形和焊后残余应力分布，验证了该模型对于熔透型等离子弧焊的正确性，其可用于温度场、变形场及应力场的分析。

2)焊接残余应力峰值主要集中在 560 MPa 左右，当焊速为 3 mm/s 时，应力值较小；变形随着焊接速度的增大有减小的趋势，在小于 2.5 mm/s 时变化较明显，大于 2.5 mm/s 之后变化趋于平缓。随着焊接电流的增加，焊接残余应力和变形均有增大的趋势，但残余应力变化幅度较小，其中焊速为 2 mm/s 时，焊接电流与残余应力的变化出现了负相关。由此依据，比较了 4 种工况下变形、残余应力的数值和分布，确定焊接电流 105 A，焊接速度 3 mm/s 为较好的焊接工艺参数。

3)本工作提出焊接工艺参数优化模型，进行有限元模拟计算，将优化后的 3 种模型参数与初选工艺参数对应的模拟对比，加之实验发现，适量降低第 2 道焊接热输入功率，在焊接速度不变的基础上，确保焊缝的宽度、填充金属的熔化和生产效率，以保证焊接接头的强度，确定第 2 道焊缝的焊接电流为 100 A，焊接速度为 3 mm/s。

4)通过优化后的模型获得的变形和残余应力分布与实验测量数据趋势一致，数值相近，说明模拟和优化方法预测拨叉轴等离子焊接变形与残余应力的可靠性。

参考文献　　References

[1] Li Wenlin(李文林). *Optimization and Improvement of Key Parts of Internal Shift Mechanism of Double Clutch Transmission*(双离合变速器内部换档机构关键零部件优化与改进) [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2020

[2] Zhu Shuai(朱　帅). *Research and Application of Welding Process Parameters Optimization and Deformation Control Technology for Hydraulic Cylinder Bottom*(液压油缸缸底焊接工艺参数优化及变形控制技术研究与应用)[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022

[3] Marques E S V, Silva F J G, Pereira A B. *Metals*[J], 2020, 10(1): 75

[4] Lei Shiming(雷世明). *Welding Methods and Equipment*(焊接方法与设备)[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2014

[5] Qiu Tao(邱　涛), Li Tianqing(李天庆), Chen Changxin(陈长新) *et al*. *Journal of Netshape Forming Engineering*(精密成形工程)[J], 2023, 15(8): 178

[6] Li Yan, Wang Ling, Wu Chuansong *et al*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*[J], 2019, 133: 885

[7] Wu Dongsheng, Tashiro Shinichi, Hua Xueming *et al*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*[J], 2019, 141: 604

[8] Liu Zuming, Cui Shuanglin, Luo Zhen *et al*. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2016, 23: 315

[9] Wu C S, Wang L, Ren W J *et al*. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2014, 16(1): 74

[10] Ruan Jingping(阮敬平), Sun Junhua(孙俊华), Liu Peng(刘　鹏). *Electric Welding Machine*(电焊机)[J], 2021, 51(5): 56

[11] Zhou Junjie(周俊杰), Feng Yanhui(冯妍卉), Cai Junjie(蔡峻杰) *et al*. *Journal of Engineering Thermophysics*(工程热物理学报)[J], 2019, 40(2): 442

[12] Wang Fuquan(王福全), Wang Suhuan(王素环), Li Gangqing(李刚卿) *et al*. *Material Protection*(材料保护)[J], 2022, 55(6): 182

[13] Wang Jianxin(汪建新), Mi Xiaochen(秘啸晨), Dai Shijie(戴士杰) *et al*. *Welding Technology*(焊接技术)[J], 2015, 44(8): 17

[14] Prasad S, Pal S, Robi P S. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2020, 57: 957

[15] Baruah M, Bag S. *Journal of Materials Processing Technology* [J], 2016, 231: 100

[16] Zhou Lang(周 浪). *Numerical Simulation and Experimental Investigation of Micro Plasma Arc Welding of Tantalum Tungsten Alloy Thin Sheets*(钽钨合金薄板微束等离子弧焊数值模拟与实验研究)[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017

[17] Zhang Maoguo(张茂国). *Heat Treatment Technology and Equipment*(热处理技术与装备)[J], 2018, 39(4): 43

[18] Zhang Lei(张 磊). *Study on Microstructure and High Cycle Fatigue of Welded Joint for 45# Steel Ingot*(45 号钢锭焊接接头组织与高周疲劳性能研究) [D]. Shenyang: Northeastern University, 2013

[19] Wang Bin, Zhou Li, Du Jigong *et al*. *Journal of Materials Research and Technology*[J], 2023, 23: 985

[20] Jin Hongxi, Chen Zhenlin, Liu Xiangbo *et al*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2023, 126: 1329

[21] Fang Kunfan(方昆凡). *Practical Handbook of Mechanical Engineering Materials*(机械工程材料实用手册)[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2021

[22] Cai Junjie, Feng Yanhui, Zhou Junjie *et al*. *International Journal of Thermal Sciences*[J], 2018, 124: 447

[23] Jia Qiang(贾 强), Guo Wei(郭 伟), Peng Peng(彭 鹏) *et al*. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(7): 1905

[24] Zhang Dongxiang(张东祥), Guo Lixin(郭立新). *Journal of Northeastern University* (*Natural Science*)(东北大学学报自然科学版)[J], 2021, 42(5): 700

[25] Zhang Chaohua, Li Suo, Sun Jiamin *et al*. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2019, 267: 257

[26] Jin Qingmian(金庆勉), Kong Xiangwei(孔祥伟), Jin Zhibo(金志博) *et al*. *Hot Working Technology*(热加工工艺) [J], 2018, 47(9): 180

[27] Liu Guoning(刘国宁), Li Nannan(李楠楠), Song Xiaohui(宋晓辉) *et al*. *Hot Working Technology*(热加工工艺) [J], 2019, 48(13): 142

[28] Zhang Hongwei(张红卫), Gui Liangjin(桂良进), Fan Zijie(范子杰) *et al*. *Journal of Tsinghua University*(清华大学学报) [J], 2022, 62(2): 367

[29] Nezamdost M R, Esfahani M R N, Hashemi S H *et al*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2016, 87: 615

[30] Qiao Chenrong(乔琛嵘). *Numerical Simulation of Variable Polarity Plasma Arc Welding of Aluminum Alloy Based on Fluent* (基于 Fluent 的铝合金变极性等离子弧焊接数值模拟)[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2018

[31] Wang Yifeng, Feng Guangjie, Pu Xiaowei *et al*. *Journal of Materials Research and Technology*[J], 2021, 13: 144

[32] Wang Meng, Guo Kai, Wei Yanhong *et al*. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2023, 85: 52

[33] Huang Hui, Ma Ninshu, Rashed Sherif *et al*. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2024, 110: 101

[34] Chen Bing(陈 兵), Zhang Haitao(张海涛), Wang He(王 鹤) *et al*. *Hot Working Technology*(热加工工艺) [J], 2022, 51(1): 140

[35] Wu Guodong, Shen Jingfang, Zhang Wenjing *et al*. *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2023, 52(3): 798

[36] Zhu Aihua(朱爱华), Yao Peng(姚 鹏), Li Nannan(李楠楠) *et al*. *Foundry Technology*(铸造技术)[J], 2017, 38(1): 193

[37] Wang Shijun(王士军), Sun Zengguang(孙增光), Zhou Yongxin (周永鑫) *et al*. *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2020, 49(9): 120

[38] Wei Lei(魏 雷), Wei Chun(魏 淳). *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2019, 48(7): 244

[39] Zou Zhenxing(邹振兴). *Simulation Analysis and Process Optimization of Aluminum Alloy Anti-collision Beam Welding Based on ABAQUS*(基于 ABAQUS 的铝合金防撞梁焊接仿真分析及工艺优化)[D]. Changsha: Hunan University, 2020

[40] Zhang Chaohua, Sun Jiamin, Li Yulong *et al*. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2022, 83: 458

[41] Cao Xiaobing, Zhou Xiongfeng, Wang Haoran *et al*. *Journal of Materials Research and Technology*[J], 2020, 9(3): 5378

[42] Yang Biao, Zhao Hongyun, Wu Laijun *et al*. *Journal of Materials Research and Technology*[J], 2020, 9(6): 14630

[43] Wang Zhimin(王志敏). *Study on the Process and Joint Performance of Laser Welding TC31 Titanium Alloy*(TC31 高温钛合金激光焊接工艺与接头性能研究)[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021

[44] Chen Meifeng(陈梅峰), Guo Yulong(郭玉龙), Zhou Guangtao (周广涛) *et al*. *Materials for Mechanical Engineering*(机械工程材料)[J], 2019, 43(7): 74

[45] Sepe Raffaele, Giannella Venanzio, Greco Alessandro *et al*. *Metals*[J], 2021, 11(7): 1016

[46] Lu Yaohui, Zhu Shengchang, Zhao Zhitang *et al*. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2020, 50: 380

[47] Qiao Jisen(乔及森), Rui Zhenglei(芮正雷), Wang Lei(王 磊) *et al*. *Material Reports*(材料导报)[J], 2020, 34(22): 22142

Numerical Simulation and Experimental Research on Plasma Welding of Shift Fork Shaft

Yang Jianguang[1], Ji Hongchao[1], Pei Weichi[1], He Lei[2], Huang Xiaomin[1], Wang Shanshan[3]

(1. College of Mechanical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063200, China)

(2. Tangshan Long-run Machinery Co. , Ltd, Tangshan 063000, China)

(3. China MCC22 Group Corporation Ltd, Tangshan 063000, China)

Abstract: The shift fork shaft is an important component in manual transmission, automatic manual transmission and dual-clutch transmission to connect the fork and adjust gear engagement. To study the relationship among welding deformation, residual stress and welding process parameters during plasma welding of shift fork shaft, based on ABAQUS simulation software, the temperature-displacement coupled finite element calculation method was adopted and double ellipsoidal heat source model was selected to numerically simulate the stress field, deformation and temperature field of the welded plate and shift fork shaft. The optimization of the welding process of shift fork shaft was completed, and the reliability of the optimized model was verified through simulation and experiments. The results show that welding deformation is decreased with the increase in welding speed. The welding deformation is relatively small at welding speed of 2.5–3.0 mm/s and is increased with the increase in welding current. The welding residual stress does not show a significant variation law with welding current and welding speed, but the peak values are distributed around 560 MPa, which is smaller than the tensile strength of the fork shaft (650 MPa), and there is a local stress concentration phenomenon. Overall, residual stress is mainly distributed at both ends of the weld seam, and deformation mainly occurs at the weld plate. The optimized model has a more balanced peak temperature of the two weld heat sources, and local welding residual stress and deformation slightly decrease. Therefore, simulation and experimental results can provide theoretical guidance for the control of welding quality in actual production process.

Key words: shift fork shaft; plasma arc welding; numerical simulation; process optimization; experimental research

---

Corresponding author: Ji Hongchao, Ph. D., Professor, College of Mechanical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063200, P. R. China, Tel: 0086-315-8805446, E-mail: jihongchao@ncst.edu.cn