

# 基于组合热源模型焊剂片约束电弧焊 T 形接头温度场及应力场计算与试验研究

乔及森<sup>1,2</sup>✉, 芮正雷<sup>1,2</sup>, 王磊<sup>1,2</sup>, 陈振文<sup>1,2</sup>

1 兰州理工大学材料科学与工程学院, 兰州 730050

2 兰州理工大学省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 兰州 730050

本工作通过将高斯面热源与柱型体热源耦合的方式构建了一种组合热源, 并使用有限元技术对焊剂片约束电弧焊高强度 I 型三明治板 T 形接头焊接温度场及应力、变形场分布进行了计算, 同时采用红外热成像跟踪和轮廓扫描技术获得了焊接过程温度与变形场的试验数据。通过对比计算结果与试验结果, 发现二者所得焊缝形貌、焊接热循环分布与演化、焊后残余应力及残余变形分布吻合良好, 从而验证了使用该组合热源模型对焊剂片约束电弧焊温度场及应力场有限元分析的有效性和可行性。同时发现, 焊接过程中所产生的残余应力集中于焊缝及其附近区域, 在数值上小于材料的屈服应力。并且焊接导致的变形较小, 最大变形出现在面板边缘位置, 说明使用焊剂片约束电弧焊对高强度 T 形接头焊接时可有效控制残余变形, 为大板焊接提供参考。

关键词 焊剂片约束电弧焊 T 形接头 焊接温度场 焊接残余应力 焊接变形

中图分类号: TG404 文献标识码: A

## Temperature and Residual Stress Field of Flux Bands Constraining Arc Welding T-joint by FEA Based on Hybrid Welding Heat Source Model and Experimental Investigation

QIAO Jisen<sup>1,2</sup>✉, RUI Zhenglei<sup>1,2</sup>, WANG Lei<sup>1,2</sup>, CHEN Zhenwen<sup>1,2</sup>

1 School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

2 State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

A combined welding heat source model coupled by a flat gaussian and a cylindrical volume heat source was developed to analysis the evolution of welding-induced temperature, residual stress and distortion distribution during the processing of the flux band constraining arc (FBCA) welded T-joint of the I-core sandwich. The experiment statistics were obtained by the infrared thermal imager and the three-coordinate instrument. By comparing the results between the experiment and simulation, it is found that the weld cross section, thermal cycle curves, welding isothermal curves and welding distortion are basically consistence between experiment and simulation, which proves the validity and feasibility of the combined welding heat source model on the analysis of this method. At the same time, it is found that the residual stress generated during the welding process is concentrated on the weld and its vicinity, which is much lower than the yield stress of the material. And the residual deformation is acceptable, that the maximum distortion happened on the edge of the panels, according to the experimental measurements. This indicates that the FBCA can effectively control the residual deformation of high-strength steel T-joints, which improves the welding technology for the sandwich panels.

Key words flux band constraining arc welding, T-joint, welding temperature field, welding residual stress, welding distortion

### 0 引言

为实现轻量化和节能环保的要求, I 型高强度三明治板被广泛地应用于船舶制造行业。I 型高强度三明治板是由上下面板和中间芯板通过焊接制成。作为一种新型轻量化结构, 具有较高的比刚度和比强度, 并且相对于传统结构, 其减重幅度最高可到 50%<sup>[1]</sup>。目前主要采用激光焊对高强度三明治板进行焊接, 连接的形式主要为 T 形搭接接头<sup>[2-3]</sup>。在现有激光焊过程中, 会出现面板和芯板的未焊透问题, 对板结构整体力学性能影响较大<sup>[4]</sup>。本工作采用焊剂片约束电弧焊(FBCA)对三明治板进行焊接, 通过焊剂片的固壁约束作用<sup>[5]</sup>抑制电弧攀升<sup>[6]</sup>, 实现了电弧对焊缝根部的完全熔合。对于 FBCA 三明治板制造, 目前研究主要关注于焊接工

艺<sup>[7]</sup>、电弧形态及熔滴过渡<sup>[8]</sup>等方面, 尚无对焊接残余应力及变形的报道。然而, 残余应力及变形的出现会降低工件的疲劳强度和耐腐蚀性能<sup>[9]</sup>。因此, 在焊接生产中对变形的控制及预防是一项具有战略性的目标。为了完成这个目标, 发展和完善一个有效的可以预测由焊接导致变形的计算模型是非常必要的。黄逸飞<sup>[10]</sup>及张晓鸿<sup>[11]</sup>等使用组合热源模型成功对铝合金脉冲 MIG 焊及低合金深熔 TIG 焊温度场及应力场进行了模拟, 并通过实验验证了模拟结果的可行性, 还对焊接过程中温度及应力分布进行了深入研究。

本工作通过构建组合热源, 以更好地表征试验中出现的非线性焊缝形貌, 并对焊剂片约束电弧焊(FBCA) I 型三明治板 T 形接头焊接过程中温度场及应力场的分布进行了分析, 为 I 型三明治板整板的焊接热变形提供了理论支持。



请扫描二维码访问本文网络展示页面以获取补充信息(Supplementary Information)

基金项目: 国家自然科学基金(51665033); 甘肃省科学技术厅中小企业创新基金(18CX6JA025)

This work was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (51665033), Innovation and Enterprise Foundation of Gansu Provincial Science & Technology Department (18CX6JA025).

✉ qiaojisen@lut.cn

22142

DOI: 10.11896/cldb.19100032

### 1 实验

本实验母材为 BS960 高强度钢,焊丝为 ER120S(  $\phi = 1.2$  mm) 将工件装配在夹具之中,如图 1e 所示,母材和焊丝成分及力学性能如表 1、表 2 所示。焊接时,使用 OTC 弧焊机器人,焊接电压和电流分别为 25 V、280 A,并使用焊剂片约束电弧(无附加保护气体)对高强度 T 形接头进行焊接。焊缝成形良好情况下的 FBCA 焊接示意如图 1d 所示,其中焊剂片由大理石、萤石、钠水玻璃制成,由于焊剂片不导电,在开始焊接时,电弧被压缩于焊道底部充分燃烧熔化焊丝,实现了面板和芯板接触部位的完全熔透。当温度持续上升时,焊剂片底部率先达到熔点并开始熔化,电弧与焊道两侧接触,但是由于焊剂片上部被固定,未熔化部分依旧起到抑制电弧攀升的作用,最终获得了成形良好的 T 形接头,如图 1b 所示。在试验中通过 FLIR A655sc 红外热成像仪对焊接前后的温度分布进行了观测。在焊后,通过 DH3816N 静态应力应变测试分析系统及 HEXGON Romer Absolute 三坐标仪对焊接残余应力及变形进行了测量,并与模拟结果进行了对比研究。

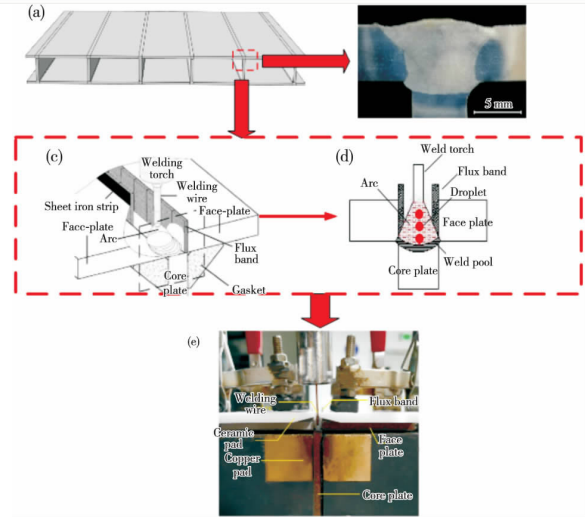


图 1 约束良好情形下 FBCA 所得三明治板接头: (a) I 型三明治板结构; (b) FBCA 焊接 T 形接头焊缝; (c) FBCA 焊接示意图; (d) 焊接时焊剂片约束示意图; (e) T 形接头装配方式

Fig. 1 Schematic of sandwich panels T-joint welded by FBCA: (a) I-core sandwich panels; (b) welding cross section welded by FBCA; (c) schematic of FBCA; (d) welding arc constrained by flux band; (e) the assemble of T-joint

表 1 BS960 高强度钢及 ER120S 焊丝化学成分

Table 1 Chemical composition of BS960 high strength steel and ER120S weld wire

材料	C	Mn	Si	Ni	P	S	Cu	Nb	Cr	V	Ti	Mo	Fe
BS960	0.08	1.24	0.20	—	—	—	0.06	0.14	0.6	0.002	0.15	0.29	余量
ER120S	0.06	1.59	0.5	3.56	0.005	0.005	0.23	—	—	—	—	0.78	余量

表 2 BS960 高强度钢及 ER120S 焊丝力学性能

Table 2 Mechanical properties of BS960 high strength steel and ER120S weld wire

材料	屈服强度 MPa	抗拉强度 MPa	延伸率 %	冲击功 J
BS960	1 040	1 100	11	75
ER120S	853	950	17	86

### 2 有限元模拟

#### 2.1 温度场分析

##### 2.1.1 模型的构建

本实验模型尺寸如图 2 所示,该模型由 T 形接头及夹具组成,传热网格单元采用 DC3D8 热传导单元,并且网格最小尺寸为 1 mm×1 mm×1 mm。网格总数分别为 11 794。

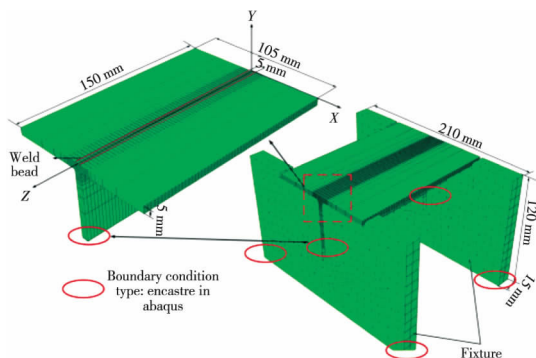


图 2 模型及网格划分  
Fig. 2 Model and mesh partition

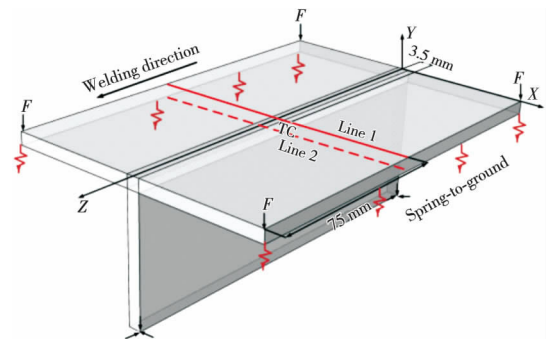


图 3 计算区域  
Fig. 3 Calculation regions

##### 2.1.2 热源模型的构建

本工作采用高斯热源与柱型热源耦合的方式对热源模型进行了构建,高斯面热源及柱型体热源在模拟时分别表示电弧热辐射以及焊丝熔化后的熔滴的热量并分别对焊道上表面及焊道两侧和根部进行加热。组合热源模型如图 4 所示,控制方程见式(1)、式(2):

$$Q_1 = \frac{3X_1 U I \eta}{\pi r_0^2} \exp\left\{ \frac{-3 [x^2 + (z - z_0 - ut)^2]}{r_0^2} \right\} \quad (1)$$

$$Q_2 = \frac{3X_2 U I \eta}{\pi r_1^2 H} \exp\left\{ \frac{-3 [x^2 + (z - z_0 - ut)^2]}{r_1^2} \right\} - 0.005 < y < -0.002 \quad (2)$$

式中:  $U$  和  $I$  为焊接电压及电流,本实验电流取 280 A,电压取 25 V;  $Q_1$  及  $Q_2$  分别为高斯热源与柱形热源;  $X_1$  和  $X_2$  分别为焊接热源分配系数,分别取 0.55 和 0.45;  $\eta$  为焊接热效率,本

实验取 0.8。\$r\_0, r\_1\$ 分别为高斯面热源和柱型体热源的热源集中系数; \$H\$ 为柱型体热源的作用高度; \$v\$ 为焊接速度, 取 7.5 mm/s; \$t\$ 为焊接加热时间, 模拟加热时间为 20 s; 热源在 \$xz\$ 平面运动, 且 \$z\$ 轴为运动方向, 初始坐标 \$(x\_0, y\_0, z\_0)\$ 为 \$(0, 0, 0)\$。

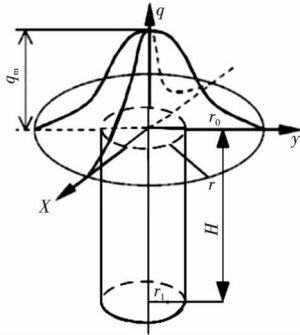


图4 组合热源模型示意图  
Fig. 4 Schematic of hybrid heat source

### 2.1.3 材料热物理性能、边界条件

本工作所使用的母材和焊丝的热物理性能如表 3 所示。李扬<sup>[12]</sup>和冀晴<sup>[13]</sup>等已详细研究了黄铜和 Q235 钢的热物理性能, 因此本工作在模拟过程中引用了 Q235 钢和黄铜的相

表3 计算材料性能  
Table 3 Materials properties of simulation

T/°C	$\lambda/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$		$C_p/(J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1})$		$\alpha/(10^{-5} \cdot K^{-1})$		E/GPa		$\mu$	
	母材	焊缝	母材	焊缝	母材	焊缝	母材	焊缝	母材	焊缝
25	41.59	28.42	0.44	0.44	0	0	211.4	208.56	0.289	0.291
100	42.45	30.27	0.47	0.47	1.28	1.43	208.0	204.78	0.292	0.294
200	42.50	32.04	0.51	0.51	1.31	1.47	202.1	198.56	0.296	0.298
400	39.46	32.89	0.61	0.60	1.39	1.53	184.2	180.82	0.304	0.30
600	34.56	31.15	0.80	0.91	1.46	1.60	158.9	156.85	0.312	0.315
1 000	29.00	27.73	0.63	0.62	1.3	1.52	106.7	108.15	0.351	0.35
1 200	31.44	30.25	0.65	0.65	1.51	1.69	85.95	87.95	0.36	0.374
1 600	35.15	34.72	0.825	0.818	2.76	2.89	0	0	0.50	0.499

注:  $\lambda$ —导热系数;  $C_p$ —热容;  $\alpha$ —热膨胀系数;  $E$ —杨氏模量;  $\mu$ —泊松比

通过试验与模拟验证得到铜与钢、钢与钢的界面传热系数分别为 260 W/(m<sup>2</sup>·K), 600 W/(m<sup>2</sup>·K), 两者的接触传热试验原理如图 5 所示。

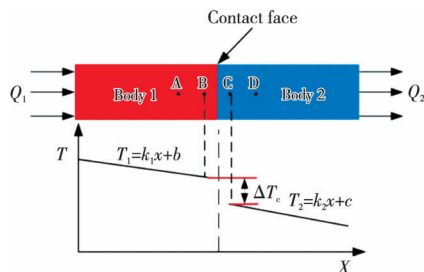


图5 界面接触传热试验原理  
Fig. 5 The schematic of solid surface contact conductance

应力场计算的边界条件如图 2 所示, 根据实际焊接条件, 对夹具底座及被夹具固定的芯板施加固定约束。面板由对称分布的四个快速夹具装夹固定, 模拟时在面板四个角上施加垂直向下的压力。为了表征底部夹具对工件的夹持情况, 在面板下部和夹具之间施加一定的地面-弹簧接触。

关热物理性能参数。对于热边界条件, 本研究除了考虑工件及夹具与空气环境之间的对流及辐射(其计算公式见式(3)、式(4))还考虑了工件与夹具之间的接触传热, 其计算公式见式(5)~式(8)<sup>[14]</sup>。

$$q_a = -h_a(T_s - T_a) \quad (3)$$

$$q_r = -\varepsilon\sigma [(T_s + 273.15)^4 - (T_a + 273.15)^4] \quad (4)$$

式中:  $q_a$  和  $q_r$  分别代表对流及辐射传热;  $h_a$  为对流换热系数, 设为 20 W/(m<sup>2</sup>·K);  $\varepsilon$  为辐射率, 钢的辐射系数设为 0.8, 铜的辐射系数设为 0.5;  $T_a$  为室温, 取 20 °C;  $T_s$  为焊接过程中试件及夹具温度; 玻尔兹曼常数  $\sigma = 5.68 \times 10^{-8}$  J/(m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>·s)。

$$h_c = \frac{Q}{\Delta T_c \cdot A_n} \quad (5)$$

$$Q = \frac{Q_3 + Q_4}{2} \quad (6)$$

$$Q_3 = \lambda_1 \cdot A_n \cdot K_1 \quad (7)$$

$$Q_4 = \lambda_2 \cdot A_n \cdot K_2 \quad (8)$$

式中:  $h_c$  为界面接触传热系数;  $Q$  通过接触界面的热量;  $Q_3$  为从加热端流入的热量;  $Q_4$  为从接触端流出的热量;  $\Delta T_c$  为测试点温度差;  $A_n$  为界面接触面积;  $\lambda_1, \lambda_2$  分别为铜和钢的导热率;  $K_1, K_2$  分别为铜和钢的温度梯度  $dT/dx$ 。

## 2.2 应力场分析

利用大型商业有限元软件 ABAQUS 通过顺序耦合的方式对焊接过程中的热应力、热变形及焊后残余应力和残余变形进行计算(本研究不考虑焊接过程中的熔池流动、固态相变及蠕变情况)。焊接过程中产生的总应变可由式(9)进行表述:

$$\varepsilon_{total} = \varepsilon_e + \varepsilon_p + \varepsilon_{th} \quad (9)$$

式中:  $\varepsilon_e, \varepsilon_p, \varepsilon_{th}$  分别代表弹性应变、塑性应变和热应变。

## 3 结果与分析

### 3.1 温度场模拟

#### 3.1.1 模拟与试验焊缝形貌及热循环曲线分析

图 6 是通过夹具散热模拟所得焊缝与真实焊缝的形貌对比图, 其中左半部分为试验所得焊缝形貌, 右半部分为模拟所得焊缝截面形貌图。模拟过程中认为 1 480 °C 为固液相界面温度, 并且经过测量发现, 模拟与试验所得焊缝形貌参数基本一致。图 7 为工件距焊缝中心 3.5 mm 的 TC 点模拟

与试验所得焊接热循环曲线,由图 7 可知,模拟与试验所得焊接热循环曲线基本一致,误差较小。

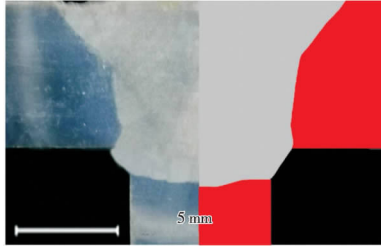


图 6 焊缝熔合线验证  
Fig. 6 Verification of fusion wire

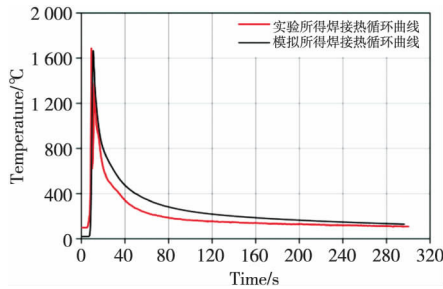


图 7 模拟与试验焊接热循环曲线  
Fig. 7 Thermal cycle curves of simulation and experiment

### 3.1.2 模拟与试验温度场分布

使用红外热成像仪对焊接过程的热量分布进行跟踪。通过试验测得 BS960 钢的热辐射率为 0.75。图 8a—c 分别为焊接开始、中期及结束三个时间点下工件表面的热分布图。其中,热像仪的最高记录温度为 2 100 °C,最低记录温度为 100 °C。由于焊剂片的装夹和面板上部快速夹具对焊接温度记录存在较大的影响,因此在红外热成像过程中仅对焊道两端点焊进行固定,而未对焊剂片进行外加固定。然而,焊剂片在没有外加固定的情况下会出现倒伏,导致温度观测过程中熔池区存在一个低温区,但其对整体温度分布的影响较小。此外,从图 8 中还可以看出,红外热成像观测所得等温线在熔池外分布较为规则且光滑,在焊道熔池区由于受到未熔化焊剂片的影响存在一定的不规则性。图 9 中黑实线为焊接等温线(先通过热像仪得到各温度点坐标,再通过 Origin 进行线性插值),彩色云图为模拟所得焊接温度场。通过对比发现,模拟与试验所得焊接温度场分布规律一致,试验高

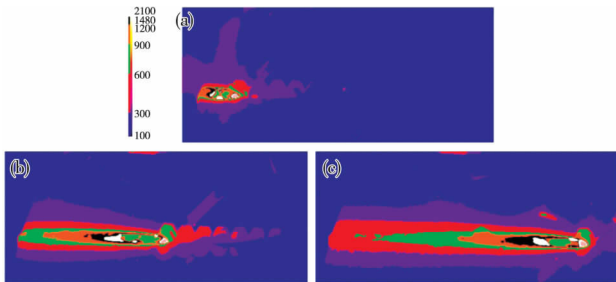


图 8 试验测焊接过程面板表面温度分布:(a) 焊接开始阶段温度分布;(b) 焊接  $t = 10$  s,工件表面温度分布;(c) 焊接结束阶段工件表面温度分布  
Fig. 8 Temperature distribution in the face-plates measured by experiment during the welding process:(a) temperature distribution at the beginning;(b) temperature distribution at  $t = 10$  s;(c) temperature distribution at the end of welding process

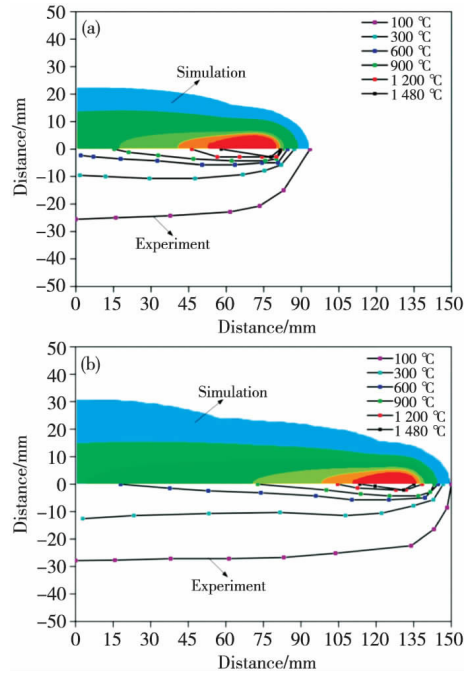


图 9 (a)  $t = 10$  s 及 (b)  $t = 20$  s 时模拟与试验焊接的等温线  
Fig. 9 Welding isotherm of experience and simulation at (a)  $t = 10$  s;(b)  $t = 20$  s

温区范围略小于模拟预测值,原因是实际焊接过程中存在一定波动,如飞溅等,因而工件热输入略小于模拟所用理想值。

### 3.2 应力场结果与分析

图 10 比较了模拟所得工件面板 Line 1、2 在不同方向上的残余应力分布情况,并对 Line 1 区域进行了试验测量,分析区域如图 3 所示。由图 10 可知,在横向、纵向及厚度方向上,残余应力主要集中于焊缝及其邻近区域。在远离焊缝区域,面板上下残余应力的数值接近于 0。在横向上,面板上下的残余应力变化趋势基本一致。拉、压残余应力分别出现在焊缝和热影响区,残余应力峰值为 182 MPa 出现在上表面焊缝中心位置。在厚度方向上,面板上下在焊缝和热影响区的残余应力分布变化较大,其中下面板出现较大的拉伸残余应力,且在焊缝中心附近转变为压应力。在纵向上,残余应力的分布规律与横向基本一致。但是纵向上的残余压应力数值上小于横向,峰值拉伸残余应力为 192 MPa,略大于横向上的拉伸残余应力。图 10d 为测试区域横截面 Mises 的残余应力分布云图,可以看出,在工件内部,残余应力主要分布在焊道及其邻近区域,并且在焊道中部以上,残余应力集中现象最为明显。在远离焊道方向上,不论是面板还是芯板,其残余应力数值都很小。并且在厚度方向上,面板上下和芯板左右残余应力数值基本相当,即残余应力在厚度方向上分布均匀。

在残余应力试验方面,本研究通过使用 120-3BA 应变片对 Line 1 区域横向和纵向上的残余应力进行测量,发现试验所得结果在数值及特征趋势上与模拟相当,从而验证了该模拟的准确性。同时,模拟和试验所得残余应力数值都较小,原因可能是:(1) 在焊接过程中残余应力已经通过塑性变形的方式释放;(2) 本研究采用单道焊的方式进行焊接,焊接热输入较小,因而焊后残余应力较小。

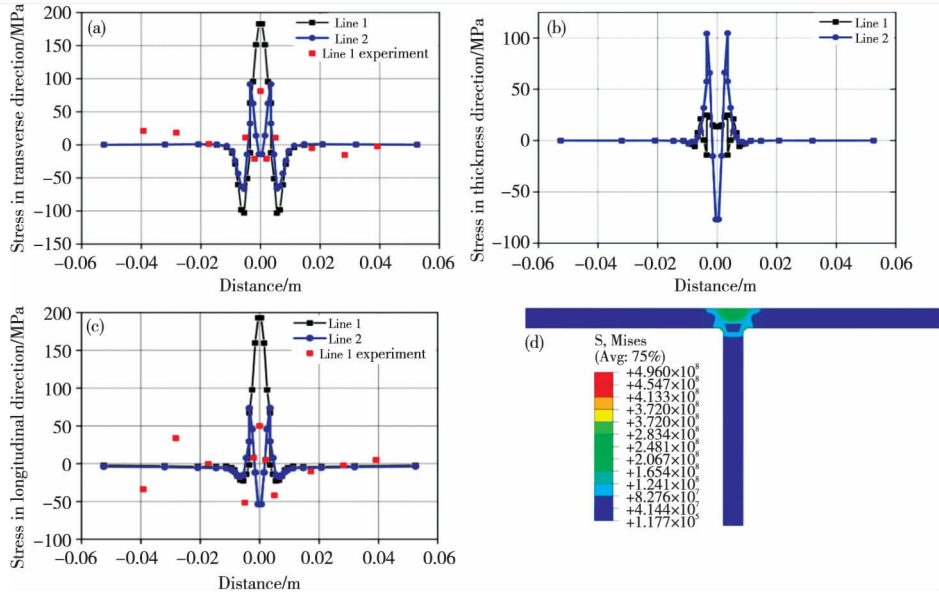


图 10 各区域残余应力分布: (a) x 方向残余应力沿着 Line 1、2 分布; (b) y 方向残余应力沿着 Line 1、2 分布; (c) z 方向残余应力沿着 Line 1、2 分布; (d) Von mises 残余应力沿着 Line 1、2 分布 (电子版为彩图)  
 Fig. 10 Residual stress distribution in different calculation regions: (a) residual stress distribution in x direction along Line 1, 2; (b) residual stress distribution in y direction along Line 1, 2; (c) residual stress distribution in z direction along Line 1, 2; (d) Von mises residual stress distribution along Line 1, 2

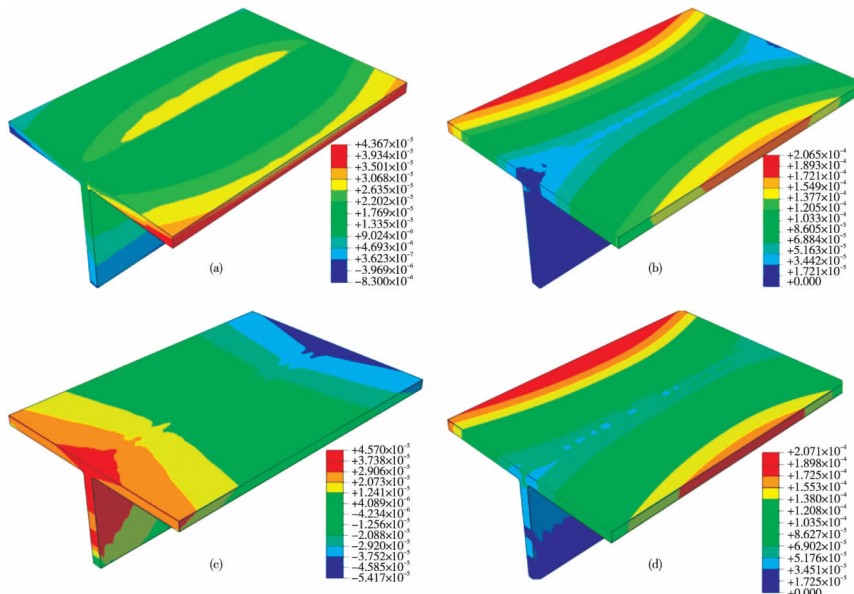


图 11 焊后变形: (a) x 方向位移; (b) y 方向位移; (c) z 方向位移; (d) 位移矢量和 (电子版为彩图)  
 Fig. 11 Welding distortion: (a) displacement of x direction; (b) displacement of y direction; (c) displacement of z direction; (d) vector sum displacement

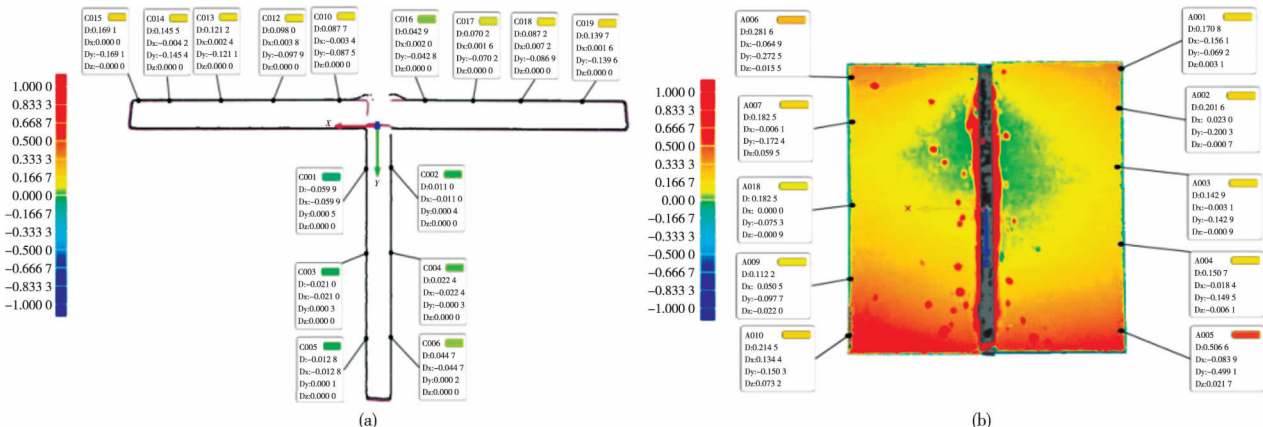


图 12 试验所得焊后变形: (a) 面板各点变形; (b) 截面变形图 (电子版为彩图)  
 Fig. 12 Weld distortion measured by experiment: (a) distortion in face plates; (b) distortion in the cross section

图 11 为使用焊剂片约束电弧焊对 T 形接头进行焊接后,工件在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向及其矢量和的变形云图。由图 11 可知,在工件不同方向上产生的焊接变形都很小,其中  $y$  方向上的变形数值最大,为 0.206 5 mm,出现在上面板。由于  $y$  方向上所得残余应变要远大于  $x$  及  $z$  方向上所得应变,因此所得位移矢量和云图与  $y$  方向所得应变云图分布基本一致。

### 3.3 焊接变形分析

图 12 为使用 HEXGON Romer Absolute 三坐标所测工件焊后上表面和中心横截面位移。对比图 11、图 12 可以发现,通过 HEXGON Romer Absolute 三坐标测量所得各区域的变形特征及数值与图 11d 基本一致,验证了模拟的准确性,误差存在的原因是模拟所构建的模型相对于实际工件是对称均匀的,未考虑装配与材料性能的细微差异。图 12 中  $D_x$ 、 $D_y$ 、 $D_z$  分别代表各测试点相对于原位置的位移,  $D$  为该点各方向的位移矢量和。图 13 为工件上表面中心垂直于焊缝横截面试验  $y$  方向上的位移模拟与试验测量结果对比,可以看出模拟与试验结果基本吻合。

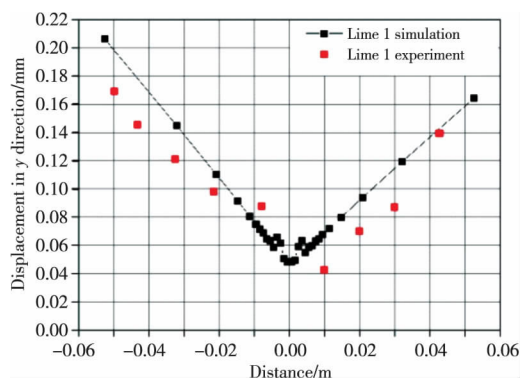


图 13 模拟与试验工件上表面中心  $y$  方向的位移  
Fig. 13 Displacement in the  $y$  direction on the milled of upper faceplate of simulation and experiment

## 4 结论

(1) 基于组合热源模型对焊剂片约束电弧焊温度场进行了模拟,获得了与试验匹配的焊缝形貌、热循环曲线、焊接等温曲线及变形,验证了该模型的正确性,其可用于温度场及应力场分析。

(2) 在此焊接方法下,模拟所得 T 形接头残余应力主要集中于焊缝及其邻近区域,且残余应力小于母材的屈服强度。



**Jisen Qiao** is a professor and Ph. D. supervisor at College of Material Science and Engineering, Lanzhou University of Technology. He received his Ph. D. degree in materials processing engineering from department of welding engineering, Lanzhou University of Technology. His group research topics are mainly focused on the design of welded joints and components of light alloys in automobile industry, damage and failure of the materials during large plastic deformation. He published more than 60 journal papers and applied 7 national invention patents. He once awarded the first prize of Technology Progress of Gansu Province, and second prize of Ministry of metallurgical nonferrous industry.

乔及森,兰州理工大学材料科学与工程学院教授,博士研究生导师。2007 年 12 月毕业于兰州理工大学焊接工程系,材料加工工程博士学位。同年加入兰州理工大学材料科学与工程学院工作至今,主要从事移动装置焊接结构轻量化设计与制造基础研究,金属材料塑性大变形力学

度。模拟焊后试板中心截面变形最大为 0.207 1 mm,且出现在面板边缘位置,与试验所测变形相当。

(3) 使用焊剂片约束电弧焊对 I 型高强度三明治板 T 形接头焊接时,可以获得面板及芯板熔合良好的焊接接头,并且变形程度较小。

### 参考文献

- Kujala P, Klanac A. *Rodogradnja*, 2005, 56(4), 305.
- Meng W, Li Z, Huang J, et al. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 69(5-8), 1105.
- Meng W, Li Z, Lu F, et al. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(8), 1658.
- Jiang X X, Zhu L, Qiao J S, et al. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 551(10), 42.
- Gong L, Zhu L, Zhang A H, et al. *Transaction of the China Welding Institution* 2017, 38(12), 57( in Chinese ).  
龚练,朱亮,张爱华,等. *焊接学报*, 2017, 38(12), 57.
- Gang Z, Yu S, Ming Z, et al. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 245, 15.
- Li Z H. Study onwelding process of high strength steel sandwich plate with restrained arc plug welding. Master's Thesis, Lanzhou University of Technology, China, 2018( in Chinese ).  
李政濂. 高强度钢三明治板约束电弧塞焊工艺基础研究. 硕士学位论文,兰州理工大学,2018.
- Chen Z W. Study on arc droplet transfer behavior of sandwich panels T-joints in flux band constricting arc welding. Master's Thesis, Lanzhou University of Technology, China, 2019( in Chinese ).  
陈振文. 三明治板 T 形接头焊剂片约束电弧焊电弧及熔滴过渡行为研究. 硕士学位论文,兰州理工大学,2019.
- Taljat B, Radhakrishnan B, Zacharia T. *Materials Science and Engineering A*, 1998, 246(1-2), 45.
- Zhang Xiaohong, Chen Jingqing, Chen Hui. *Transactions of the China Welding Institution*, 2018, 39(1), 17( in Chinese ).  
张晓鸿,陈静青,陈辉. *焊接学报*, 2018, 39(1), 17.
- Huang Y F, Luo Z, Wang Z M, et al. *Transactions of the China Welding Institution*, 2017, 38(11), 103( in Chinese ).  
黄逸飞,罗震,王证茗,等. *焊接学报*, 2017, 38(11), 103.
- Hu B, Hu S, Shen J, et al. *Computational Materials Science*, 2015, 97, 48.
- Ji Qing, Xing Yanfeng, Xu Can. *Hot Working Technology*, 2017, 46(21), 196( in Chinese ).  
冀晴,邢彦锋,徐岫. *热加工工艺*, 2017, 46(21), 196.
- Zhu Decai. Experiment research on solid interface thermal contact conductance coefficient. Doctor's Thesis, Dalian University of Technology, China, 2007( in Chinese ).  
朱德才. 固体界面接触换热系数的实验研究. 博士学位论文,大连理工大学,2007.

(责任编辑 荆秋叶)



**Zhenglei Rui**, has been a master degree candidate in the College of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology since September 2017. Mainly engaged in the research of welding manufacturing technology and structural mechanical properties of high-strength steel sandwich panels.

芮正雷,2017 年 9 月至今就读于兰州理工大学材料科学与工程学院,硕士研究生。主要从事高强度钢三明治板焊接制造工艺及结构力学性能研究。