

基于正交试验的 T 形接头焊接工艺优化

房元斌^{1,2}, 蹤雪梅^{1,2}, 张华清², 殷咸青³, 张林杰³

(1. 江苏徐州工程机械研究院,徐州 221004; 2. 徐工集团工程机械有限公司 高端工程机械智能制造国家重点实验室,徐州 221004; 3. 西安交通大学 材料科学与工程学院,西安 710049)

摘 要: 焊接变形可以直观地看到,控制变形手段也非常多. 焊接残余应力分布复杂,关键位置残余应力大小对产品有着很大的影响. 文中利用焊接数值模拟和试验相结合的手段,采用单因子和多因子正交试验相结合的设计方法,以焊接残余应力为评价指标,对 T 形接头焊接的工艺参数进行优化设计,获得了 T 形接头的残余应力分布状况. 结果表明,拼焊间隙为 2 mm 以下时,焊缝宏观形貌满足要求;焊接速度对焊接残余应力的影响最为显著,其次为送丝速度和拼焊间隙. 利用数值模拟和试验相结合的方法,优化了焊接工艺参数,降低了焊接残余应力的峰值,有效地减少了试验次数,节约了成本.

关键词: 工艺参数; 正交试验; 残余应力分布; 焊接数值模拟

中图分类号: TG 404 **文献标识码:** A **doi:**10.12073/j.hjxb.20150810001

0 序 言

随着工程机械领域竞争日益激烈,对产品的质量提出了越来越高的要求,工艺优化和仿真技术也受到更多的重视. 质量的提升,究其根本主要是对残余应力的有效控制^[1-2].

在产品寿命周期中,焊接残余应力作为初始应力对其影响至关重要. 在工程机械领域的焊接数值计算中,大型结构件复杂程度高、计算效率低、定量分析难等因素制约数值模拟技术的推广应用. 目前由于焊接工艺参数优化受到设备、试验周期、成本等因素制约,而更多的依靠经验,对于工艺参数是否最佳并不能确认. 正交试验设计方法^[3-5]逐步运用于焊接工艺的优化,但大多是以力学性能作为评价指标. 文中主要是从正交试验设计的角度入手,引入焊接数值模拟仿真和试验手段,以焊接残余应力作为评价指标,获得了满足实际生产应用的焊接工艺参数.

正交试验设计方法^[6-7]基于拉丁方理论和群论,能通过代表性较强的少数试验,权衡各个因素对试验指标的影响程度,获得了最佳参数组合^[8-10]. 文中对拼焊间隙进行单因子正交设计,分析焊缝宏观形貌. 在此基础上,选择送丝速度、焊接速度和拼

焊间隙三个因素进行了正交试验设计,以焊接残余应力为评价指标,利用有限元软件 MARC 仿真分析. 最后,再对各水平下获得残余应力值相对较小的情况,进行机器人自动焊接,通过盲孔法试验,验证了仿真优化结果,获得了应用生产的最佳工艺参数.

1 正交试验设计

1.1 焊接工艺参数

一般在保证焊丝伸出长度不变情况下,影响机器人自动焊接的参数主要是焊接速度和送丝速度. 而在保证 T 形接头不开坡口的前提下,拼焊间隙对焊缝成形影响较大. 故确定影响焊接工艺参数的因素为送丝速度、焊接速度和拼焊间隙.

试验用材料为 Q345 板材,尺寸为 200 mm × 150 mm × 10 mm,采用 CO₂ 气体保护焊,焊丝为 ER50-6 φ1.2,试板不开坡口,焊接工艺参数见表 1.

表 1 Q345 焊接工艺参数

Table 1 Welding process paramaters of Q345

送丝速度 $v_f/(mm \cdot s^{-1})$	焊接速度 $v/(mm \cdot s^{-1})$	拼焊间隙 l/mm
52 ~ 70	6 ~ 9	0 ~ 5

1.2 机器人焊接正交参数设计

按照产品设计要求,采用 FUNAC 机器人焊接,电流选用脉冲电流. 该系统不能直接设定电流、电压参数值,故需对正交参数进行配比控制试验.

收稿日期: 2015-08-10
基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2015BAF07B02); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20140229); 江苏省六大人才高峰资助项目(2016GDZB111)

在保证焊丝伸出长度不变情况下,文中配比控制试验焊接在拼焊间隙为 0;焊缝高度为 6 mm 时,对 T 形接头试板进行焊接. 焊接速度分别为 6,7,8,9 mm/s,对应电流平均值为 220 ,240 ,260 ,280 A,调节送丝速度,获得了机器人焊接正交参数,结果如表 2所示.

表 2 机器人焊接正交参数

Table 2 Orthogonal parameters of mechanical arm

组数	送丝速度 $v_f/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	焊接电流 I/A	焊接速度 $v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$
1	52	220	6
2	58	240	7
3	64	260	8
4	70	280	9

1.3 单因子试验设计

在现有工艺水平下,保证 T 形接头不开坡口,拼焊间隙对焊缝成形影响较大. 以拼焊间隙为控制因子,焊缝宏观形貌为评价指标,设计 0,1,2,3,4,5 mm 的 6 水平试验. 机器人焊接参数设置为焊丝伸出长度 18 mm,送丝速度 58 mm/s,焊接速度 7 mm/s. 焊缝宏观形貌试验结果如图 1 所示,单因子试验设计及结果见表 3.

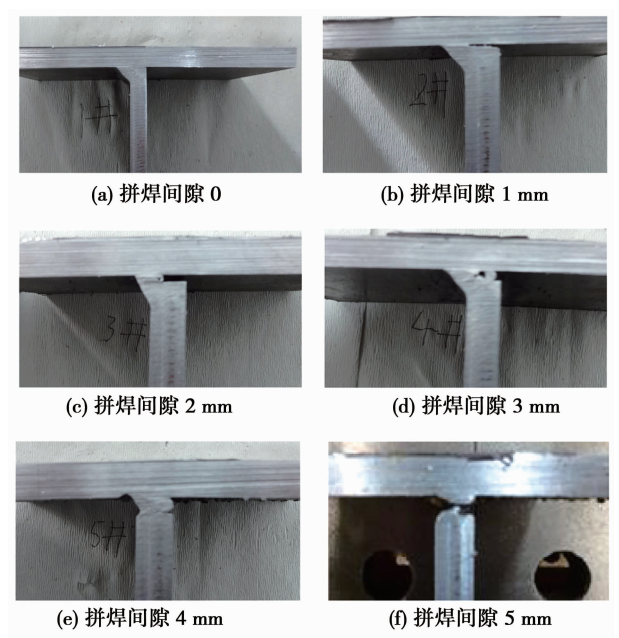


图 1 焊缝宏观形貌
Fig. 1 Weld bead macroscopic geometry

根据单因子试验的结果,拼焊间隙控制在 3 mm 以内才能保证焊缝成形质量不出现缺陷,故拼焊间隙的因素设计在 3 mm 以内.

表 3 单因子试验设计

Table 3 Design of a single-factor experiment

编号	拼焊间隙 l/mm	焊缝高度 h/mm	表面 成形	焊缝宏观 形貌
a	0	6.8	好	根部熔合
b	1	6.6	好	根部熔合,有间隙
c	2	6.2	较好	根部熔合,有间隙和小气孔
d	3	6	一般	根部熔合,有间隙、多气孔
e	4	3	较差	咬边,背部有焊瘤、飞溅大
f	5	0.5	很差	严重咬边,未形成焊缝

1.4 多因子试验设计

确定影响焊接工艺参数的因素为送丝速度、焊接速度和拼焊间隙. 结合单因子试验结果,拼焊间隙取 0,1,2,3 mm 四种水平,进行 3 因素 4 水平的正交试验设计,选用 $L_{16}(4^3)$ 正交试验设计方案,进行 16 组试验,见表 4.

表 4 正交试验设计方案

Table 4 Plan on orthogonal test design

水平	拼焊间隙 l/mm	送丝速度 $v_f/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	焊接速度 $v_t/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$
1	0	52	6
2	0	58	7
3	0	64	8
4	0	70	9
5	1	52	7
6	1	58	6
7	1	64	9
8	1	70	8
9	2	52	8
10	2	58	9
11	2	64	6
12	2	70	7
13	3	52	9
14	3	58	8
15	3	64	7
16	3	70	6

2 有限元模型建立

2.1 模型网格划分

为保证求解精度,兼顾计算效率,网格采用过渡方式,在焊缝及其热影响区附近网格加密,而在远离焊缝处网格稀疏,获得网格模型,如图 2 所示.

2.2 焊接热源及边界条件

焊接热源选用 Goldak 提出的双椭球热源模型,采用功率加载方式. 考虑焊接功率效率,同时,借鉴文献资料,功率系数设置为 0.7. 由于热交换方式热

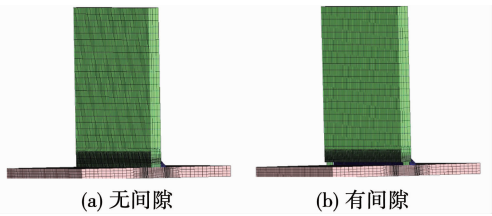


图 2 网格模型图 (mm)
Fig. 2 Mesh model

辐射影响程度较小,故只考虑工件表面的对流散热,散热系数为 0.02,环境温度为 20 ℃^[11]。

力学边界条件为宽度方向在对称面下表面选择两列节点,用来限制 y 向位移,不影响纵向收缩变形;焊缝背面沿焊缝长度方向节点来限制 z 向位移,不影响横向收缩;从而模拟自由焊接工况。

3 正交试验结果与试验验证分析

3.1 极差分析原理及结果

极差分析方法是利用数理统计方法,计算正交

表中 R 值来判断影响因素的主次关系,寻找较优的水平组合^[11]为

$$K_{ij} = \frac{T_{ij}}{r} \tag{1}$$

$$R_j = K_{ij\max} - K_{ij\min} \tag{2}$$

式中: i 为水平数; j 为列数; r 为每个因子水平总数; K_{ij} 为第 i 水平第 j 列的平均值; T_{ij} 为第 i 水平第 j 列的评定指标之和; $K_{ij\max}$ 为第 j 列中的最大的 K_{ij} 值; $K_{ij\min}$ 为第 j 列中的最小的 K_{ij} 值; R_j 为第 j 列的极差值。

3.2 仿真结果分析

通过模拟 T 形接头不同焊接热输入、拼焊间隙和焊接速度的焊接过程,获得温度场,如图 3 所示。

由图 3 可以看到,当焊接达到稳弧后,焊接热源呈现椭球形状,在前半轴温度梯度较大,等温线密集,而在后半轴温度梯度较小,等温线稀疏。随着焊接速度增大,后半轴沿焊缝方向长度增大。

温度场分布与线能量有直接的关系。送丝速度主要受电流、电压影响。根据线能量公式(3)可知,各水平下温度场峰值与线能量近似成正比。

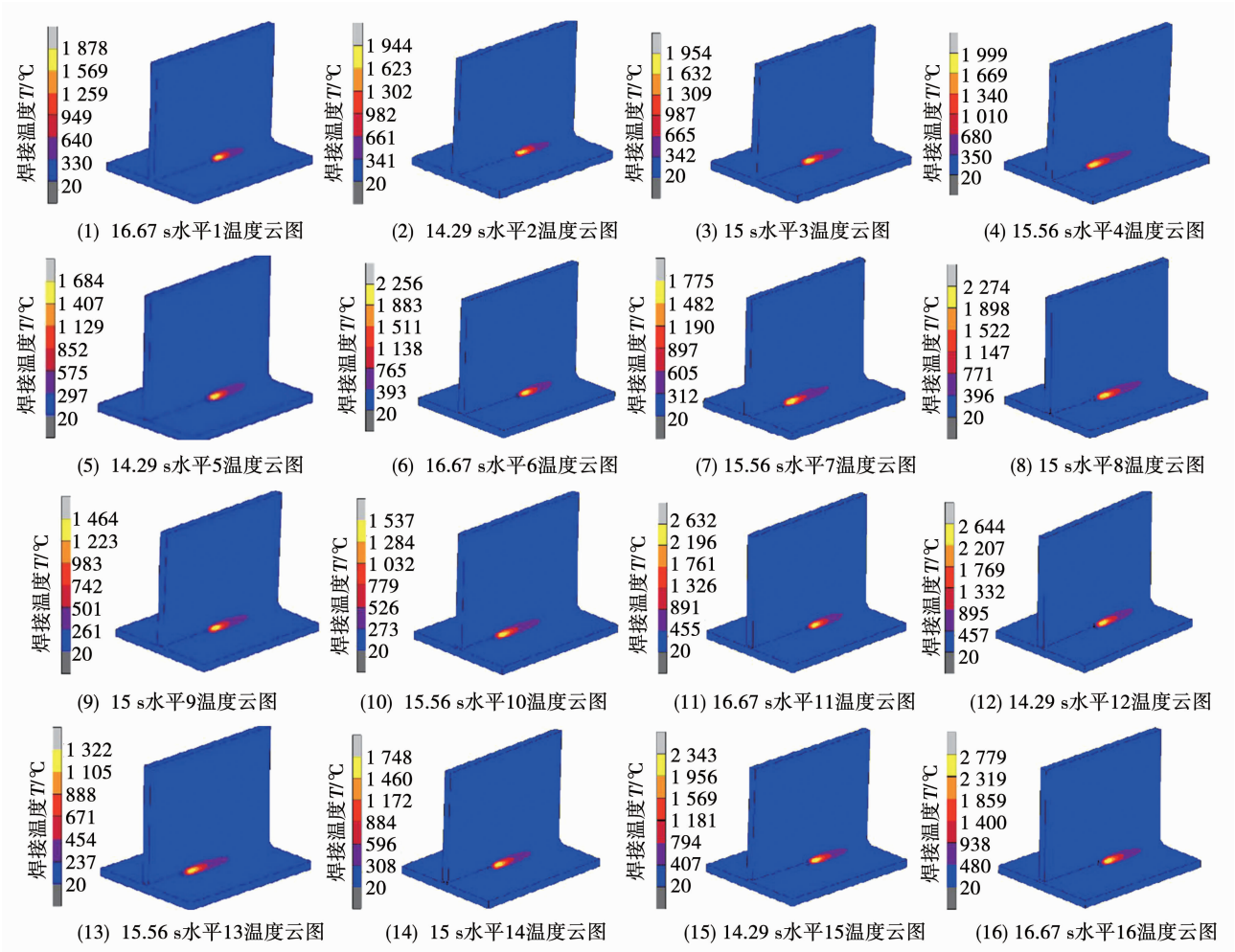


图 3 温度场云图
Fig. 3 Temperature distribution

$$E = \frac{UI\eta}{v}$$

(3)

式中: E 为线能量; U,I 分别为电压和电流值; η 为功率.

在分析温度场的基础上,研究分析纵向残余应力分布情况,如图 4 所示. 由图 4 可以看出,T 形接头整体纵向残余应力分布呈现近似正态分布^[12].

与收弧位置相比,起弧位置由于先焊,相当于增加了该处的刚度,同时其温度也最先冷却,因此起弧位置的变形量大,残余应力值得到释放. 纵向膨胀使得起弧和收弧位置翘曲,为保持平直,两端将出现压应力,而在中间位置受到纵向收缩作用,而产生较大的拉应力^[13].

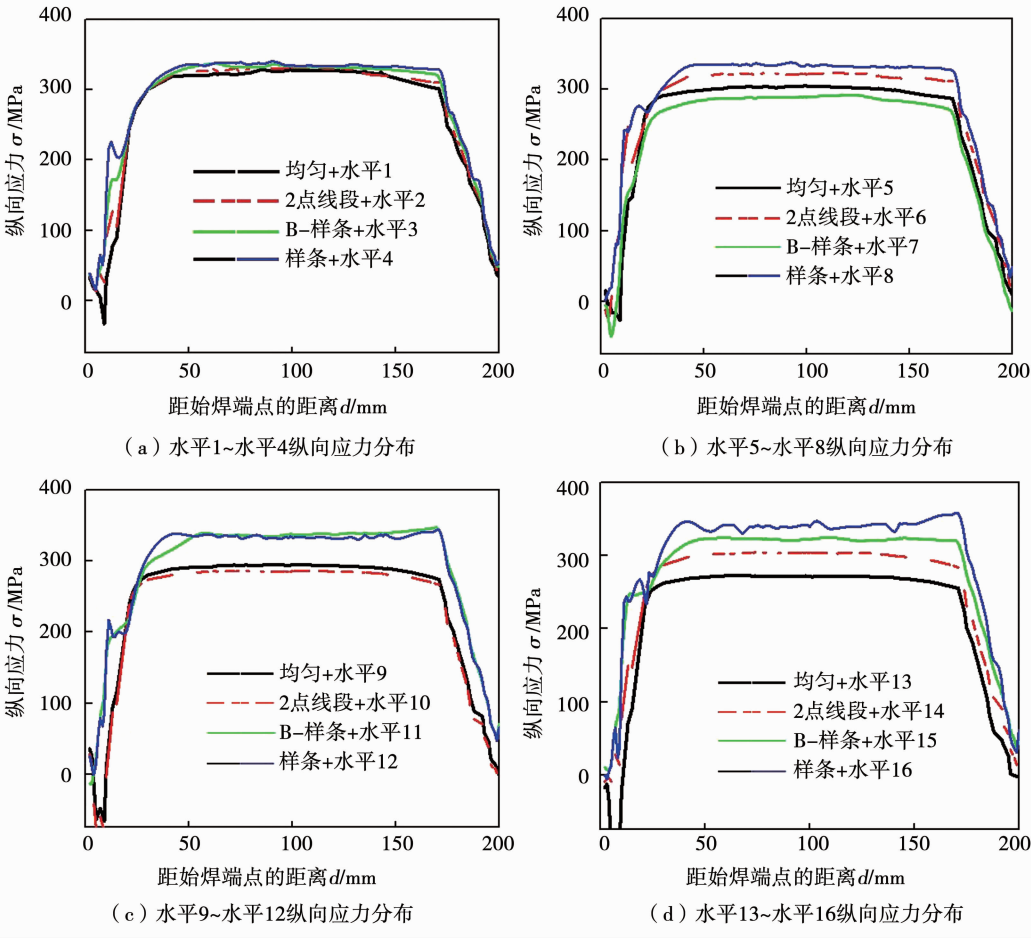


图 4 纵向残余应力分布
Fig. 4 Longitudinal residual stress distribution

通过对比发现,随着拼焊间隙的增加,在相同拼焊间隙下,各水平的纵向残余应力分布波动越来越大,受送丝速度和焊接速度配比不协调的影响. 同时,拼焊间隙减小,残余应力得不到释放,导致纵向残余应力增大. 因此拼焊间隙相同,送丝速度越大,焊接速度越小,纵向残余应力越大.

3.3 正交试验结果

通过提取仿真分析结果中的残余应力峰值,依据极差分析原理,获得极差分析结果见表 5. 根据式(1)、式(2)计算得知,影响该 T 形接头试样焊接残余应力的主次因素为焊接速度、送丝速度、拼焊间隙,获得最优组合对应的工艺参数为焊接速度 9 mm/s,送丝速度 52 mm/s,拼焊间隙 1 mm.

3.4 试验验证

极差分析获得的焊接工艺参数,是建立在一定假设条件下理论数学建模得出的结论,需要对仿真优化结果进行试验验证. 根据极差分析表,获得每种拼焊间隙下残余应力值最小的焊接参数. 通过极差分析得到的最佳焊接参数,采用盲孔法测量残余应力,获得纵向残余应力结果,如图 5 所示. 由图 5 可知,正交试验设计的结果纵向残余应力值 238.96 MPa 小于正交试验各水平结果,验证了正交试验的正确性. 同时,水平 7,10,13 仿真与试验的应力分布趋势相符,但存在一定差别,这与试验测量误差和有限元模型建立的前提假设(拼焊间隙尺寸精准、热输入参数稳定、等效实际工况的拘束条件等)有关.

表 5 极差分析表
Table 5 Range analysis table

水平	拼焊间隙 <i>l</i> /mm	送丝速度 <i>v_t</i> /(mm·s ⁻¹)	焊接速度 <i>v</i> /(mm·s ⁻¹)	残余应力 <i>σ</i> /MPa
1	0	52	6	330.301
2	0	58	7	333.728
3	0	64	8	337.709
4	0	70	9	339.039
5	1	52	7	305.885
6	1	58	6	323.739
7	1	64	9	295.482
8	1	70	8	331.796
9	2	52	8	295.003
10	2	58	9	286.469
11	2	64	6	347.987
12	2	70	7	338.183
13	3	52	9	273.234
14	3	58	8	304.543
15	3	64	7	325.007
16	3	70	6	358.217

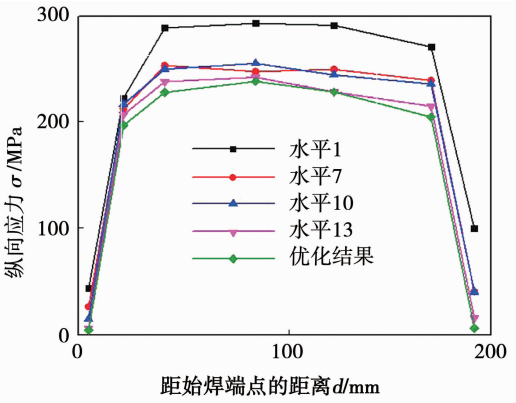


图 5 纵向残余应力分布

Fig. 5 Longitudinal residual stress distribution

4 结 论

(1) 通过正交试验单因子试验设计,观察宏观焊缝形貌,分析得出了 T 形接头不开坡口的情况下拼焊间隙的 4 个水平. 同时,通过试验方法,获得机器人焊接正交参数.

(2) 随着焊接速度增大,后半轴沿焊缝方向长度增大. 温度场分布与线能量有着直接的关系,且各水平下温度场峰值与线能量近似成正比.

(3) 选用 $L_{16}(4^3)$ 正交试验设计方案,得出并验证了不开坡口 T 形接头的最优焊接工艺方案. 其中焊接速度对焊接残余应力的影响最为显著,其次为送丝速度和拼焊间隙. 建议焊接速度为 9 mm/s,送丝速 52 mm/s,拼焊间隙 1 mm.

(4) 通过对比,随拼焊间隙减小,纵向残余应力

值增大. 拼焊间隙相同时,送丝速度越大,焊接速度越小,纵向残余应力也相应越大.

参考文献:

[1] 田锡唐. 焊接结构[M]. 北京:机械工业出版社,1982.

[2] 方洪渊. 焊接结构学[M]. 北京:机械工业出版社,2008.

[3] 许庆伟,曹 睿,陈剑虹,等. 汽车用镁/钢异种金属冷金属过渡点焊工艺特性[J]. 焊接学报,2014,35(5):43-46. Xu Qingwei, Cao Rui, Chen Jianhong, *et al.* Process characteristics of cold metal transfer spot welding for automotive dissimilar metals between magnesium and steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(5):43-46.

[4] Lou S M, Wang Y X, Lu S, *et al.* Optimization of a porthole die for an aluminum profile extrusion based on orthogonal test method[J]. International Journal of Engineering Research in Africa, 2015, 14:49-57.

[5] Zhang L, Lu J Z, Luo K Y, *et al.* Residual stress, micro-hardness and tensile properties of ANSI 304 stainless steel thick sheet by fiber laser welding[J]. Materials Science & Engineering A, 2013, 561(8):136-144.

[6] 张国栋,薛吉林,周昌玉. 基于正交试验设计的高温管道焊接工艺优化[J]. 焊接学报,2008,29(11):53-56. Zhang Guodong, Xue Jilin, Zhou Changyu. Optimization on welding procedure of high temperature pipeline based on orthogonal test design[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(11):53-56.

[7] 陶博浩,李 红,宋永伦,等. 电阻点焊冷轧 DP600 双相钢焊接接头性能的正交试验分析[J]. 焊接学报,2013,34(6):81-84. Tao Bohao, Li Hong, Song Yonglun, *et al.* Analysis of orthogonal test of properties of dual-phase DP600 steel resistance spot welded joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(6):81-84.

[8] Zhang L J, Zhang G F, Bai X Y, *et al.* Effect of the process parameters on the three-dimensional shape of molten pool during full-penetration laser welding process[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86(5-8):1273-1286.

[9] Zhan, X H, Wang Y B, Liu Y, *et al.* Investigation on parameter optimization for laser welded butt joint of TA15 alloy[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 84(9-12):2697-2706.

[10] Bai Y, Gao H M, WU L, *et al.* Influence of plasma-MIG welding parameters on aluminum weld porosity by orthogonal test[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(8):1392-1396.

[11] 张利国,姬书得,方洪渊,等. 焊接顺序对 T 形接头焊接残余应力场的影响[J]. 机械工程学报,2007,43(2):234-237. Zhang Ligu, Ji Shude, Fang Hongyuan, *et al.* Influence of welding sequence on welding stress of T joint[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(2):234-237.

[12] 德亚莎. T 型接头焊接温度场与应力场的数值仿真[D]. 内蒙古:内蒙古工业大学,2010.

[13] 杨建国,张学秋,刘雪松,等. 关于焊接残余应力与应变问题的分析与探讨[C]//中国机械工程学会焊接学会. 第十二次全国焊接会议论文集(1). 哈尔滨:黑龙江人民出版社,2008:7-10.

作者简介:房元斌,男,1985 年出生,硕士,工程师. 主要从事焊接数值模拟仿真及焊接工艺技术方面研究工作. 发表论文 10 余篇. Email:fyb1985@163.com