[研究・设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.02.006

夹持条件对铝钢薄板 CMT 点焊变形的影响

卞海玲,许 莎,邢彦峰

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院,上海 201620)

摘 要:夹持条件对焊接变形存在着突出影响,为了获得变形较小的焊接件,改善焊接质量,课题组利用 CMT 技术对异 种金属铝钢薄板搭接进行点焊试验,测出焊后板件变形;然后,在相同工艺下对铝钢薄板试样的点焊进行有限元仿真,得 到样件的变形规律,并与试验测量数据进行对比,验证了焊接仿真的可靠性;最后,采用响应面法建立夹持点位置、搭接 宽度与焊接变形的数学模型。研究结果表明:随着搭接宽度或者夹持点位置的改变,焊接变形均呈现出由小到大的变化 规律;不同搭接宽度下均存在最佳的夹持点位置使得焊接变形最小;当夹持点位置处于40~63 mm、搭接宽度在30~53 mm 范围时,焊接件的变形量较小。

关键 词:焊接变形;夹持点位置;搭接宽度;有限元法;响应面法
 中图分类号:TG404;TH140.7 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2020)02-0031-07

Effect of Clamping Conditions on CMT Spot Welding Deformation of Aluminum Steel Sheet

BIAN Hailing, XU Sha, XING Yanfeng

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract; Clamping conditions have a prominent effect on welding deformation. In order to obtain welding parts with less deformation and improve welding quality, the CMT welding technology was adopted to perform spot welding test on dissimilar metal aluminum steel sheet lap joints and the welding deformation was measured. The spot welding of aluminium steel sheet specimens was simulated by finite element method under the same process to obtain the deformation law of the specimens, and the reliability of welding simulation was verified by comparing with experimental results. Finally, the response surface method was used to establish the mathematical model of clamp position, lap width and welding deformation. The results show that welding deformation varies from small to large with the change of lap width or clamp position; the optimal clamp position can minimize the welding deformation under different lap widths; when setting clamp position between 40 ~63 mm and lap width between 30 ~53 mm, the welding deformation is relatively small. **Keywords**; welding deformation; clamp position; lap width; FEM(finite element method); response surface method

铝钢异种材料连接件具有高强度、耐腐蚀和质量 轻等优点,在交通运输等领域有着广阔的发展前 景^[1]。铝钢连接最为常用的方法是焊接,随着温度的 变化、固液相之间的转变以及热应力的产生,会导致焊 后材料的变形和承受静载荷能力的下降^{[2]12}。因此, 有效预测焊接变形及合理地选取方法来分析、控制乃 至消除焊接变形,成为提高焊接接头承载能力和保持

结构外形不变的重点。

国内外学者对金属材料焊后变形进行了大量的探索分析。Gao 等^[3]比较了激光焊接(laser beam welding, LBM)和非熔化极惰性气体钨极保护焊(tungsten inert gas welding, TIG)焊接接头的残余变形、焊缝几何形状、组织和力学性能,得出脉冲激光焊接更适合钛合金薄板的焊接。焊接次序对焊接变形存

收稿日期:2019-07-31;修回日期:2019-11-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51575335);上海工程技术大学研究生科研创新基金项目(0231-E3-0903-19-01220)。 第一作者简介:卞海玲(1994),女,江苏海安人,硕士研究生,主要研究方向为异种金属连接。通信作者:许莎(1977),女,河南 信阳人,博士,主要研究方向为车身结构数字化仿真及质量控制。E-mail:xytongxing376@ sina.com

在着影响, Tsai 等^[4]得出材料刚度由大到小的焊接次 序对变形的减小有显著效果。同样外部条件的变化, 如高低热输入量和有无约束亦能影响焊后连接件的变 形,在 Sirisatien 等^[5]的研究中得到验证。此外,国内 外学者将试验和有限元方法相互结合来探究影响焊件 变形的原因。Derakhshan 等^[6]和黄本生等^[7]均利用了 SYSWELD 有限元软件,前者比较激光焊和传统埋弧 焊的焊接结果,得出使用激光焊可减少热输入和焊接 变形:后者则分析 0345/316 L 的 2 种牌号钢熔接过程 的瞬态温度分布、焊后应力及变形。Fu 等^[8]基于顺序 耦合热-力学仿真对不同材料模型下的 T 型接头焊接 所引起的残余应力和变形进行了分析探索。焊件材料 形状和尺寸的变化是导致残余应力和变形的要素。蔡 建鹏等^[9-10]以 ABAQUS 软件为平台研究不同坡口形式 的异种钢对接接头性能;郑乔等[11]研究不同熔敷顺序 和管壁厚度的异种钢管-板焊接接头。而 Ordieres 等^[12]从另一个角度出发研究夹具设计对焊接变形的 影响,并通过有限元分析对夹具设计进行了优化。

根据国内外研究,大多数学者以试验辅以计算机 模拟的手段来探究不同焊接技术、焊接次序、焊接热输 入以及材料外形和尺寸等对焊接变形的影响。然而, 对夹持点位置、搭接宽度与焊接变形之间的关系探索 较少。课题组采用 CMT(cold metal transfer)焊接技术 对铝钢薄板进行点焊试验,并运用有限元软件对该试 验进行仿真,将试验变形数据与仿真结果进行对比以 验证仿真的有效性。在此基础上分别改变仿真模拟和 试验中的夹持点位置和搭接宽度,得出变形的变化规 律。最后,采用响应面法建立相关的数学模型,找到夹 持点位置和搭接宽度的合理范围从而得到较小的焊件 变形量。课题组主要研究夹持条件对铝钢薄板焊接变 形的影响,目的在于获得变形较小的焊接件,改善焊接 质量。

1 试验方法

1.1 试验材料

本试验所用材料为铝合金和镀锌钢板,材料的牌 号和尺寸如表1所示。2块试样有50mm的搭接重 叠,在铝板重叠位置中心处开有小孔,如图1所示。

表1 试样牌号及尺寸

Table 1 Grade and dimension of samples

材料	牌号	长度/mm	宽度/mm	厚度/mm
铝合金	6061-T6	125	50	1
镀锌钢板	DP590	125	50	1



图 1 试样搭接示意图 Figure 1 Overlap diagram of sample

1.2 焊接方法与变形测量

CMT 是一种不产生溅渣的新型工艺技术,它通过 数字化方式实现焊接过程中的冷热交替,大大减少了 热量输入,提高了焊件质量。本次试验选用 Fronius 公 司的 TPS4000CMT 机器进行焊接。由于焊接方法为边 沿塞焊,即焊枪绕着小孔边沿逆时针运动一周,最终在 孔圆心停止,此方法可以形成一个更加均匀的温度梯 度,从而获得更小的焊接变形^[13]。焊接前使用机器人 示教器调整焊枪使之垂直于铝板,并设置运动路线。 该试验使用直径为1.2 mm 的焊丝 ER4043(AlSi-5), 设置流量为20 L/min 的保护气(氩气)。调节 CMT 焊 接机上的控制器,设置焊接工艺参数。文中采用了前 期试验^[14]初步确定的最优焊接工艺参数:送丝速度为 5.6 m/min,焊接速度为1.2 m/min,弧长修正为0。

本试验焊枪围绕直径为7 mm 的小孔运动,焊接时间相对较短,铝钢薄板的温度发生了剧烈变化,容易导致焊接变形。铝合金的弹性模量低于钢,而铝合金的热传导系数、比热容和线膨胀系数均高于钢,所以焊接结束后铝合金变形较大,而钢几乎没有发生变形^[15]。由于铝板具有回弹性,当采用传统方法测量铝板变形量时,测量工具与铝板发生接触,会使得测量数值偏小而产生较大的误差。

课题组采用如图 2 所示的双目视觉测距设备,通 过非接触的方式对焊件进行测量。双目立体视觉是根 据视差基理,运用多图来获得实物空间几何信息^[16]。 一般采用 2 个位置且型号相同的 2 台摄像机来模仿实 现人眼,从 2 个角度拍摄同一实物取得 2 幅图像,并根 据视差基理来获得该实物的三维坐标值。因此该方法 能够提高测量变形的准确性。由于焊接时最大变形一 般出现在铝板的小孔处,按照图 3 所示标记测量位置, 焊接结束待薄板冷却后测出此处的变形为 0.107 mm。



图 2 CMT 焊接设备 Figure 2 CMT welding equipment



(a) 焊接前





图 3 标记点位置 Figure 3 Location of marker points

2 有限元仿真

2.1 模型建立

课题组创建的有限元模型与实际焊接试件尺寸完 全一致,铝板位于钢板的上方,且铝板重叠位置中心设 有7mm的小孔用于点焊模拟,模型如图4所示,其单 元数目为6762个,节点数目为32862个。为了确保 计算精度并节省计算时间,网格在靠近焊孔的区域密 集划分,在远离焊孔的区域则稀疏划分。模型选取热 实体单元 Solid90。焊接热源模型使用均匀体热源模 型,该模型假定焊接热量在一定的加热体积内均匀 分布。

点焊试验时,试验台上的夹具在距小孔中心45 mm 左右2边分别夹住铝钢薄板。对其进行仿真时, 在相应的夹持点位置处设置模型上节点,各个方向上



图 4 铝钢薄板搭接有限元模型 Figure 4 Finite element model of aluminum steel sheet

的自由度为0,保证焊接模拟过程中模型位置不变。 焊接在室温下进行,模型表面施加20℃的初始温度。 为模拟实际焊接时焊枪的运动路线,模型中铝板处的 小孔是由8个等分的扇形体和中心的1个圆柱体组 成。利用生死单元技术先将小孔处的单元全部杀死, 再复活边沿处的8个等分的扇形体单元,并将热源逐 一施加于每个扇形体单元上进行温度场计算,随后删 除作用于单元上的热源来模拟电弧的移动。最后激活 小孔中心部分的圆柱体上的单元,并将热源赋予其上, 计算之后再次进行删除,模拟电弧的熄灭。焊接主要 是通过温度场来影响结构场,课题组采用间接耦合法 分析热应力耦合问题,温度场计算完成后将节点温度 在应力分析中以体载荷形式施加^[17]。

2.2 焊接温度场和变形结果分析

此次仿真分为焊接阶段与冷却阶段,焊接阶段用 时约为1.24 s,冷却阶段用时100 s,整体用时约为 101.24 s,如图 5 所示。当 t = 0.14 s 时(图 5(a)),焊 接初始阶段,电弧高温传递给焊件使其温度急速上升, 热源附近的最高温度达到1637℃;此时焊件上的温 度扩散缓慢,随着焊接的进行温度扩散区域逐渐扩大; 焊接热输入相对其他时刻较小,小孔边沿与熔滴接触 区出现相对较大的变形。当焊接进入到中间时刻,熔 核温度已上升到1730℃,熔核逐渐变大,温度由小孔 向周围蔓延,温度梯度近似圆形分布(图5(b))。上 层铝板发生明显变形,变形量由 0.169 mm 增加到 0.204 mm,小孔周围变形区域也逐渐扩大(图5(f))。 t=1.24 s时焊接进行到最后一步,焊枪运动到小孔中 心,电弧熄灭,焊件温度下降(图5(c));此时熔滴在小 孔中心与熔化的铝板形成熔池,熔核达到最大。重叠区 的钢板上表面随着热输入的增加逐渐熔化,与熔核反应 生成金属化合物,冷却形成焊点连接钢板与铝板,焊件 变形量达到 0.287 mm(图 5(g))。经过 100 s 的室温冷 却,焊接件的最高温度下降至36℃。从图5(h)看出焊 件的最大变形量为0.125 mm,出现在小孔中心处,且 焊接变形主要集中在小孔周围和搭接区域。与试验所 测 0.107 mm 较为接近,验证了模拟的准确性。



图 5 焊件不同时刻温度和位移分布云图 Figure 5 Temperature and displacement nephograms of weldments at different times

3 夹持点位置、搭接宽度对焊接变形的影响

3.1 夹持点位置

工作台、支撑架或夹具是用来支撑和固定焊接件,

同时也起到防止焊接变形的效果。在焊接仿真时需要 考虑工作台、支撑架和夹具等对焊接件的约束作用,以 提高仿真结果的准确性^{[2]107}。为了研究夹持点位置对 铝钢薄板 CMT 点焊焊接变形的影响,课题组讨论了在 搭接宽度 W 为 50 mm 时小孔中心至夹持点距离 L 分 别为 30,45,60,75 和 90 mm 下搭接件的焊后变形情 况。夹持点位置和搭接宽度示意图如图 6 所示。



图6 夹持点位置和搭接宽度

Figure 6 Clamp position and lap width

通过有限元软件,改变夹持点位置进行仿真,结果 如图 7 所示。从图中的 5 个夹持点位置可以看出,随 着夹持点位置增大,焊接件最大变形量出现先变小后 增大的趋势,且当夹持点距离小孔中心愈远,变形量愈 大。当 *L* = 60 mm 时焊件的最大变形量约为 0.097 mm,相较于其他夹持点位置变形量最小,说明夹持点 位置的变化对焊件变形的影响较大。为了验证模拟的 正确性,课题组进行了与之相对应的试验,从图 7 可 知,试验所测变形以及变化趋势与仿真一致。



图7 不同夹持点位置焊件的最大变形

Figure 7 Maximum deformation of weldments at different clamp positions

为了进一步分析夹持点位置变化对变形带来的影响,课题组使用模拟结果的路径图来显示节点位移沿 所选路径的变化。由于铝板在焊接过程中变形相较于 钢板更为明显,所以在铝板宽度中心线上沿长度方向 (0~125 mm)选择若干个节点,通过数据处理软件,绘 制节点位移随节点在铝板上不同位置变化的折线图。

从图 8 可以看出:①当节点位置为 25 mm(即小孔 中心)以及 58 mm(即距离小孔中心 33 mm)时,出现 了节点位移的2个峰值。②当L为90和75mm时,铝 板焊后变形比其他夹持点位置大,节点最大位移分别 达到0.407和0.216mm,且均出现在节点位置为58 mm处。这是由于夹持点距离小孔中心较远,使得夹 具对焊接周围的塑性变形区起不到抑制作用,不能有 效控制变形;而焊孔中心位于搭接区域,焊接时铝钢薄 板之间形成金属间化合物过渡层并发生热传递,所以 焊孔中心及焊孔周围的变形会相对较小。③与其它L 值相比,L为60mm时获得最小的焊接变形;其节点最 大位移出现在小孔处,变形的另一个峰值也出现在节 点位置为58mm处。④当L为30和45mm时,节点 位移变化大体一致,其峰值出现在小孔中心处,且这2 处的焊接变形较其他夹持点位置较小。这是夹具点距 离焊接中心较近,焊接时搭接区域金属薄板受热膨胀, 冷却时又产生收缩的塑性变形,而夹持点的刚性约束





Figure 8 Node displacement path diagram of different clamp positions

3.2 搭接宽度

为进一步研究焊接变形的影响因素,课题组考虑 在小孔中心至夹持点距离 L = 60 mm 时,选取搭接宽 度 W 分别为 30,40,50,60 和 70 mm,讨论其对焊接变 形的影响。从图9中得出随着搭接宽度的增加,最大 变形先减小然后再增大,在W=50mm时,获得最大变 形量为0.097mm,比其他搭接宽度的变形量要小。这 是由于随着搭接宽度的增加,重叠区接触面积增加,从 而增大了铝板和钢板之间的热传递,焊接时铝板的高 温传给钢板减小了铝板的热应变;但是不断增加搭接宽 度,焊接时小孔较高的温度导致焊接局部温度过高,接 触区的铝板钢板不能较好地与外界进行热传递,温度梯 度大,出现较大的焊接变形,最终降低焊件质量。同样 课题组进行了试验验证,从图9中可以看出,试验所测 数据变化趋势与模拟大体一致。但依然存在着较大的 误差,由于模拟是在一个理想的环境中进行,而试验时 焊接电流和电压会在焊接过程上下波动,热输入不是一 个稳定值;其次,每次试验所设置的焊枪轨迹存在一定 的偏差,导致焊点形貌不相同,因而影响着焊接变形。



图 9 不同搭接宽度焊件的最大变形 Figure 9 Maximum deformation of weldments at different lap widths

3.3 搭接宽度与夹持点位置

表 2 为模拟不同搭接宽度下夹持点位置的变化对 焊接变形的影响。从表 2 可以看出:首先,不同搭接宽 度下夹持点位置的改变,最大变形均呈现出由小到大 的变化,且不同搭接宽度均对应一个最佳的夹持点位 置使得焊接件的变形最小(如表 2 中 * 号标记);其 次,不同搭接宽度下所得到的最优变形量都在 0.097 mm 范围内上下波动。

表2 各搭接宽度下不同夹持点位置焊件的最大变形

Table 2 Maximum deformation of weldments at different clamp positions under different lap widths

W/mm -	最大变形量/mm								
	L = 40 mm	L = 45 mm	L = 50 mm	L = 55 mm	L = 60 mm	L = 65 mm	L = 70 mm	L = 75 mm	L = 80 mm
30	0.114	0.108	0.097 *	0.114	0.141	0.190	0.232	0.301	0.378
40	0.121	0.117	0.107	0.094 *	0.104	0.150	0.192	0.259	0.340
50	0.128	0.124	0.117	0.110	0.097 *	0.118	0.153	0.216	0.289
60	0.134	0.133	0.128	0.119	0.112	0.096 *	0.115	0.172	0.240
70	0.144	0.141	0.138	0.132	0.126	0.112	0.099 *	0.127	0.170

注:*表示不同搭接宽度最优的焊件变形量。

由于夹持点位置和搭接宽度与焊件变形之间的关 系密切,课题组从表 2 中选取不同搭接宽度下的不同 夹持点位置建立 2 因素 5 水平的试验组合,如表 3 所示。

表 3 点焊仿真参数组合 Table 3 Combination of simulation parameters for spot welding

F						
水平	搭接宽度 W/mm	孔中心至夹持点距离 L/mm				
1	30	40				
2	40	50				
3	50	60				
4	60	70				
5	70	80				

采用 Central Composite Resign 的设计方法对铝合 金-钢焊接变形做响应面的分析,并建立多元二次回归 方程拟合出较为准确的数学模型,其中回归方程表达 式为

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^{2} a_i x_i + \sum_{i,j=1 \ (i \neq j)}^{2} a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^{2} a_{ii} x_i^2 \circ (1)$$

式中:Y为响应值; x_i , x_j 为相对应于响应值的考察因素; a_0 , a_i , a_{ij} , a_{ii} 为回归系数。

最终拟合出的方程表达式为

 $D = 0.511 + 4.183 \times 10^{-3} W - 0.019L - 2.42 \times 10^{-4} WL + 9.301 \times 10^{-5} W^2 + 2.797 \times 10^{-4} L^2_{\circ}$ (2) 式中 D 表示最大变形量。

响应面模型的方差分析如表 4 所示。当 P 值 < 0.05 时模型显著, P 值 < 0.01 时模型高度显著。而表 4 中 F 值为 54.26, P 值 < 0.000 1, 表明回归方程具有 极高的显著性, 此次拟合比较准确。

表4 响应面模型的方差分析

 Table 4
 Anovariance analysis of response surface modle

方差来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i> 值	<i>P</i> 值
模型	4.500E - 002	5	9.099E - 003	54.26	< 0.000 1
W	2.662 E - 003	1	2.662 E - 003	15.88	0.000 8
L	1.500E – 002	1	1.500 E - 002	91.92	< 0.000 1
WL	9.393E – 003	1	9.393E - 003	56.01	< 0.000 1
W^2	1.987E – 003	1	1.987E – 003	11.85	0.002 7
L^2	1.800E - 002	1	1.800E - 002	107.20	< 0.000 1
残差	3.186E - 003	19	1.677E – 004		
失拟项	3.186E - 003	3	1.062E - 003		

通过表 4 中 WL 的 P 值 < 0.000 1 可知搭接宽度 与夹持点位置的交互影响显著。从图 10(a)中的响应 面可以看出,当搭接宽度为 30 mm,小孔中心至夹持点 距离为 80 mm 时存在最大变形,这是由于夹具的约束 距离过大,在金属受热膨胀和冷却收缩阶段不能起到 抑制变形的作用。从图 10(b)的等高线图可以看出, 当夹持点位置处于 40~63 mm 的范围,搭接宽度处于 30~53 mm 的范围,可获得 0.15 mm 左右的变形,变 形较小。



图 10 搭接宽度和夹持点位置的 交互作用对焊接变形的影响

Figure 10 Effect of interaction between lap width and clamp position on welding deformation

4 结论

课题组通过有限元对铝钢薄板点焊进行模拟,分 别改变夹持点位置和搭接宽度,探究其对焊接变形的 影响。

1)当W=50mm时,分析5组不同夹持点位置对 焊接变形的影响。随着夹持点位置增大,铝板处焊接 变形出现由小到大的变化趋势,在L=60mm处获得 最小变形。通过对节点位移路径图分析,发现焊接变 形主要发生在焊孔中心和距离焊孔中心33mm处。

2)当L=60 mm时,分析5组不同搭接宽度对焊接变形的影响,在W=50 mm处获得最小变形。说明

在夹持点位置不变的情况下合理选择搭接宽度可以获 得较小的焊接变形。

3) 搭接宽度和夹持点位置的变化均对焊接变形 存在影响,且不同搭接宽度下均存在最佳夹持点位置, 可获得最小的焊接变形。最小变形量大约为 0.097 mm。另外,通过建立响应面模型,拟合出焊接变形与 搭接宽度、夹持点位置之间的二次回归方程;并且利用 响应面预测模型得出:当搭接宽度为 30~53 mm 和夹 持点位置为 40~63 mm 时,焊接件的变形较小。

参考文献:

- [1] 李妍,刘宁,黄健康,等.提高铝钢焊接接头力学性能的研究现状
 [J].电焊机,2017,47(2):102.
- [2] 张建勋,刘川著.焊接应力变形有限元计算及其工程应用[M].北 京:科学出版社,2015:107.
- [3] GAO Xiaolong, ZHANG Linjie, LIU Jing, et al. A comparative study of pulsed Nd: YAG laser welding and TIG welding of thin Ti6Al4V titanium alloy plate[J]. Materials Science & Engineering: A, 2013, 559:14-21.
- [4] TSAI C L, PARK S C, CHENG W T. Welding distortion of a thinplate panel structure [J]. Welding Research Supplement, 1999, 78 (5):156-165.
- [5] SIRISATIEN T, MAHABUNPHACHAI S, SOJIPHAN K. Effect of submerged arc welding process with one-side one-pass welding technique on distortion behavior of shipbuilding steel plate ASTM A131 grade A[J]. Materialstoday:proceedings,2018,5(3):9543 – 9551.
- [6] DERAKSHAN E D, YAZDIAN N, CRAFT B, et al. Numerical simulation and experimental validation of residual stress and welding distortion induced by laser-based welding processes of thin structural steel plates in butt joint configuration [J]. Optics & Laser Technology, 2018,104:170 - 182.

- [7] 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.
- [8] FU Guangming, ESTFEN S F, GUROVA T, et al. Effect of material model on residual stress and distortion in T-joint welding [J]. Ships and Offshore Structures, 2018, 13(1):56-64.
- [9] 蔡建鹏,邓德安,蒋小华,等.V形坡口和K形坡口Q345/SUS304 异种钢对接接头残余应力和变形[J].焊接学报,2016,37(4): 69-72.
- [10] 蔡建鹏,蒋小华,张彦杰,等.坡口形式对 SUS304 奥氏体不锈钢 对接接头残余应力和变形的影响[J].焊接学报,2016,37(2):
 63-66.
- [11] 郑乔, 逯世杰, 李索, 等. 熔敷顺序和管壁厚度对异种钢管板接头焊接残余应力与变形的影响[J]. 机械工程学报, 2019, 55(6): 46-53.
- [12] ORDIERES J, RODRIGUEZ E, BAYON A, et al. Improvement of manufacturing jigs design for reduction of welding distortion in vacuum vessel PS1 through finite element analysis [J]. Fusion Engineering and Design, 2019, 146:2168-2171.
- [13] LEI Haiyang, LI Yongbing, CARLSON B E, et al. Cold metal transfer spot Joining of AA6061-T6 to galvanized DP590 under different modes[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2015, 137(5):1028-1030.
- [14] 殷传亚,邢彦锋,金光灿,等. AA6061-T6 铝板和 DP590 镀锌钢板的 CMT 点塞焊工艺研究[J]. 热加工工艺,2017,46(15):49-52.
- [15] 李小龙,邢彦锋,许莎,等. 铅钢薄板件 CMT 点焊变形与应力研究[J]. 热加工工艺,2019,48(5):197.
- [16] 董丽霞.基于双目视觉的三维尺寸测量方法研究[D].广州:广东工业大学,2011:7.
- [17] 陈志明,伍斯杰,郭雷.基于 ANSYS 的钢板拼接焊接收缩量的数 值模拟[J].广东造船,2017,36(4):58.

(上接第30页)

- [8] LI Qinchuan, HERVE J M. Parallel mechanism with bifurcation of schoenflies motion[J]. IEEE Transaction on Robotics, 2009, 25(1): 158-164.
- [9] GALLETTI C, GIANNATTI E. Multiloop kinematotropic mechanisms [C]//International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Montreal, Quebec, Canada: ASME, 2002:455 – 460.
- [10] ZENG Qiang, EHMANN K F. Design of parallel hybrid-loop manipulators with kinematotropind deployability[J]. Mechanism and Machine Theory, 2014, 71:1-26.
- [11] LEE C C, HERVE J M. A novel discontinuously movable sixrevolute mechanism [C]//International Conference on Reconfigurable Mechanisms and Robots, London: KC Edizioni, 2009:

58 - 62.

- [12] 叶伟,方跃法,郭盛,等.基于运动限定机构的可重构并联机构设 计[J].机械工程学报,2015,51(13):137-143.
- [13] 叶伟,方跃法,郭盛,等.一种新型并联机构的运动分岔特性及运 动学分析[J].机械工程学报,2013,49(13):8-16.
- [14] 倪仕全,田大鹏,石磊.紧凑型 3-RRS 并联机构运动学仿真及控制研究[J].机电工程,2019,36(11):1172-1176.
- [15] 黄真,赵永生,赵铁石.高等空间机构学[M].北京:高等教育出版社,2006:2-84.
- [16] ZENG Qiang, EHMANN K F, CAO Jian. Design of general kinematotropic mechanisms [J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2016, 38:70.
- [17] 赵铁石,黄真.欠秩空间并联机器人输入选取的理论与应用[J]. 机械工程学报,2000,36(10):81-85.