

# 结构刚度对薄壁箱型梁焊接变形的影响

李娅娜 张帆 谢素明

(大连交通大学 交通运输工程学院, 辽宁 大连 116028)

**摘要** 目前基于工艺参数、焊接顺序和拘束度对焊接变形影响的研究虽多,但有关焊接结构刚度对焊接变形影响的研究仍较少。利用T形接头进行三维热弹塑性有限元分析,在试验验证其合理的基础上,利用逆解析法在瞬态焊结果中提取四成分固有应变数据,并基于固有应变理论的弹性有限元方法对薄壁箱型梁结构进行焊接变形预测,定量研究腹板间距和高度对焊接变形的影响。研究表明,腹板间距的增大在一定范围内使结构整体焊接变形减小,两者之间呈现一次函数关系;腹板高度的增加在一定范围内也使结构整体焊接变形减小,两者之间呈现二次函数关系。

**关键词:** 固有应变 薄壁箱型梁 结构刚度 焊接变形

**中图分类号:** TG404

## 0 前言

焊接过程中高温、高压、动态、瞬时的特殊性决定了焊接结构必然会产生焊接变形。长期以来,对于焊接工艺的改进主要依靠经验和试验,一直缺乏一套专业的、有效的方法和手段。模拟是控制设计、制造过程并预测产品早期服役可能出现问题的最好解决方法。随着计算机和计算技术的发展,关于焊接变形预测方法也取得了不少研究成果。这些方法归纳起来可分为三类:经验法(试验法)、解析法和数值模拟法<sup>[1-5]</sup>。

目前,常用的数值模拟方法有两种:一是热弹塑性有限元方法;另一是基于固有应变理论的弹性有限元方法<sup>[6]</sup>。热弹塑性有限元方法由于存在单元数目大、计算量大、非线性度高、求解收敛困难等难点,故一般用来计算典型焊接接头或局部结构。基于固有应变理论的弹性有限元方法通过一次弹性有限元可以快速、高效的预测结构的焊接变形。周宏等人<sup>[7]</sup>采用纵向收缩、横向收缩和角变形等三成分的固有应变成功地预测了船体总段船台合拢的焊接变形。梁伟等人<sup>[8]</sup>运用固有应变逆解析方法开发出四成分的固有应变数据并成功地预测了T形接头的焊接变形,从刚开始的只考虑横向收缩、纵向收缩和横向弯曲(角变形)三成分的固有应变法预测焊接变形,到综合考虑四成分(横向收

缩、纵向收缩、横向弯曲和纵向弯曲)的固有应变法预测焊接变形,基于固有应变理论的弹性有限元方法也在不断完善和发展。

文中在薄壁箱型梁T形接头算例验证的基础上,利用逆解析法提取具有更高精度的四成分固有应变,并基于固有应变理论的弹性有限元方法研究结构刚度对焊接变形的影响,最后根据变形规律建立腹板间距和腹板高度与焊接变形之间的数学关系,为薄壁箱型梁工艺设计、制定和优化工艺方法、提高焊接质量提供科学依据。

## 1 基于固有应变理论的弹性有限元方法

### 1.1 基本思想

焊接所产生的问题主要是局部应力和应变的改变导致构件的整体变形。高温及其导致的材料机械属性和热属性的非线性变化均出现在焊缝周围很小区域内,塑性应变主要集中在这个相对小的范围<sup>[9]</sup>。因此,可以将焊接结构的接头类型进行分类,建立接头的三维实体模型,在考虑到温度、材料、热传递的非线性等因素的情况下,首先对接头焊缝区三维实体有限元模型进行瞬态热弹塑性有限元计算,通过与试验结果对比验证其正确性,然后利用逆解析法提取四成分固有应变数据,并运用到接头壳单元模型中,通过对比弹性有限元方法和热弹塑性有限元法的结果,在验证了固有应变四成分数据的准确性的基础上,最后对焊接结构整体变形做出预测,这就是基于固有应变理论的弹性有限元方法的主要思想。

收稿日期: 2017-12-14

基金项目: 辽宁省科学技术基金项目(201602122); 国家重点研发计划项目(2017YFB1201302-11)。

### 1.2 计算流程

基于固有应变理论的弹性有限元方法分3步进行焊接变形的数值模拟仿真。

(1) 接头熔化焊瞬态模拟: 在考虑所有焊接耦合现象的条件下,对接头三维实体模型进行热弹塑性有限元计算。

(2) 四成分固有应变数据的提取: 在接头瞬态模拟计算基础上,选取足够多的样本点并设置接头数据的识别,运用固有应变逆解析方法,从熔化焊瞬态模拟的变形结果中提取固有应变四成分数据。

(3) 弹性模拟决定最终变形: 运用提取的四成分固有应变数据对整体结构进行弹性计算,得到整体结构焊接变形结果。

图1给出整体结构焊接变形模拟计算流程图。

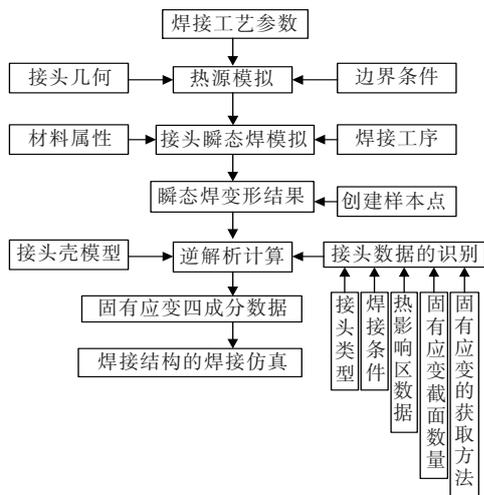


图1 整体结构焊接变形计算流程图

## 2 T形接头算例验证

### 2.1 热源计算模型及结果分析

薄壁箱型梁的焊接由四条T形接头组成,建立T形接头的几何模型:底板尺寸为200 mm × 200 mm × 6 mm,立板尺寸为200 mm × 50 mm × 6 mm,焊缝高度为6 mm。三维实体有限元模型如图2所示,整体模型采用八节点六面体单元进行模拟,焊缝及其热影响区的网格划分精细单元,保证模型具有足够的精度。该有限元模型共计53 379个节点和44 712个网格。

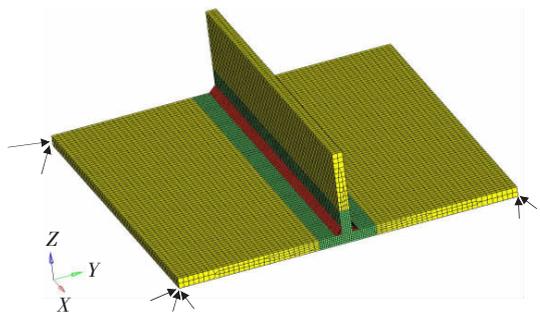


图2 有限元网格及约束条件

文中利用Goldak提出的双椭球热源模型对T形接头进行模拟时,熔敷金属与母材取同种材料中碳钢,材料的热物理性能参数随温度的变化而变化。为防止模型的刚体移动,采用了如图2所示的自由约束。热对流系数取 $20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,环境温度设置为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,冷却时间为3 600 s。焊缝金属填充时采用生死单元法,焊接工艺参数及双椭球热源模型参数见表1。

表1  $\text{CO}_2$  气保焊工艺及双椭球热源模型参数

焊接电流	电弧电压	焊接速度	效率	熔深	熔宽	熔池前半轴长度	熔池后半轴长度
$I/\text{A}$	$U/\text{V}$	$v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	$\eta(\%)$	$b/\text{mm}$	$a/\text{mm}$	$c_f/\text{mm}$	$c_r/\text{mm}$
180	24	5	80	3	2	3	4.5

参考文献[10]中的相关试验数据,仿真计算的热影响区和试验结果的整体宏观截面是一致的(图3),验证了热源模型的准确性。

T形接头的变形结果如图4和表2所示,仿真变形结果与试验结果的相对误差在7%之内,进一步证明了数值模拟结果的准确性。

同时从图4中可以看出,除了横向收缩、纵向收缩和横向弯曲的作用,纵向弯曲对焊接变形也有贡献。为了更精确、真实地再现热弹塑性有限元的计算结果,

提取四成分固有应变就显得非常重要。

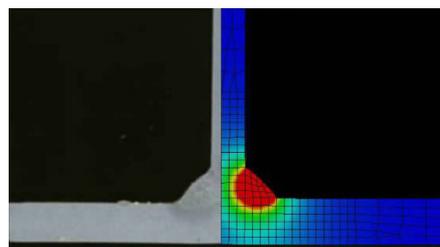


图3 T形接头融合边界试验与计算结果的比较

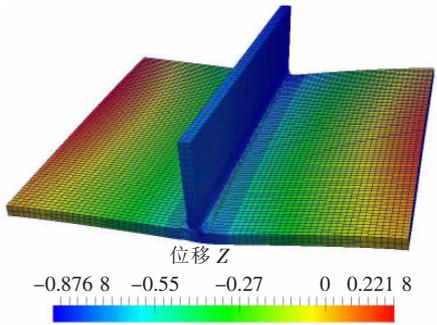


图4 热弹性有限元焊接变形结果

表2 焊接变形结果数据对比

类别	纵向收缩/mm	横向收缩/mm	角变形/rad
文献[10]	0.080	0.245	1.10
文中	0.086	0.254	1.03
误差	6.98%	3.54%	6.80%

### 2.2 四成分固有应变的提取

焊接结构的焊接变形是由四个固有的变形成分组成<sup>[10]</sup>,即纵向收缩 $\delta_x^i$ ,横向收缩 $\delta_y^i$ ,纵向弯曲 $\theta_x^i$ 和横向弯曲 $\theta_y^i$ 。这4个成分的固有应变可由以下方程式定义:

$$\begin{aligned} \delta_x^i &= \int \varepsilon_x^i \, dydz/h \\ \delta_y^i &= \int \varepsilon_y^i \, dydz/h \\ \theta_x^i &= \int \varepsilon_x^i(z-h/2) \, (h^3/12) \, dydz \\ \theta_y^i &= \int \varepsilon_y^i(z-h/2) \, (h^3/12) \, dydz \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $x$  是焊接方向;  $y$  是垂直焊缝方向;  $h$  是板厚;  $\varepsilon_x^i$  是固有应变在  $X$  方向上的固有应变;  $\varepsilon_y^i$  是固有应变在  $Y$  方向上的固有应变。

对 T 形接头而言,固有应变分布在图 5 所示独立的三大区域,即底板上焊接线两端附近的两个区域 A 和 B,立板上焊接线附近的一个区域 C。通过公式(1)的逆解析方法,利用专用软件即可得到上述三大区域四成分的固有应变见表 3。

### 2.3 结果与分析

为了与热弹性有限元结果比较验证固有应变数值计算结果的准确度,文中对 T 形接头壳单元模型(尺寸与 2.1 节中实体模型相同)的焊接变形进行预测。取图 6 所示垂直于焊缝中间位置的路径  $L_1$  上的垂向变形计算结果进行对比。由图 7 可知,路径  $L_1$  上垂向变形的计算结果在数值和分布上均与热弹性有限元结

果相吻合。这说明利用逆解析方法求得的四成分数据是正确的,同时利用该固有应变值,通过一次弹性有限元法得到的焊接变形也是正确的,并且具有足够高的精度。

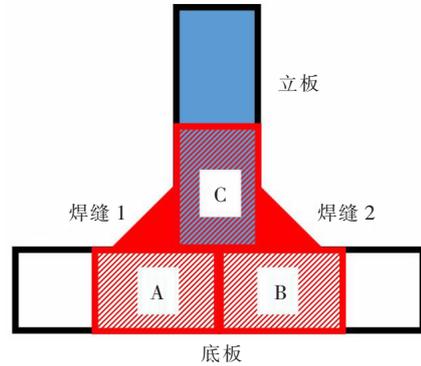


图5 固有应变分布区域示意图

表3 四成分固有应变

分布区域	沿焊缝距离/mm	纵向收缩/mm	横向收缩/mm	纵向弯曲/rad	横向弯曲/rad
A	20	0.116	0.030	0.297	-0.040
B	20	0.142	-0.079	0.038	-0.040
C	20	-0.034	0.127	0.111	-0.073
A	60	0.113	0.204	0.240	-0.025
B	60	0.166	0.190	0.002	-0.025
C	60	-0.100	0.066	0.035	-0.040
A	100	0.065	0.130	0.187	-0.018
B	100	0.282	0.101	-0.005	-0.018
C	100	-0.234	0.090	0.018	-0.033
A	140	0.036	0.237	0.227	-0.018
B	140	0.448	0.087	-0.019	-0.018
C	140	-0.307	0.127	0.079	-0.052
A	180	0.032	-0.039	0.181	-0.019
B	180	0.570	-0.111	-0.033	-0.019
C	180	-0.342	0.138	0.076	-0.035

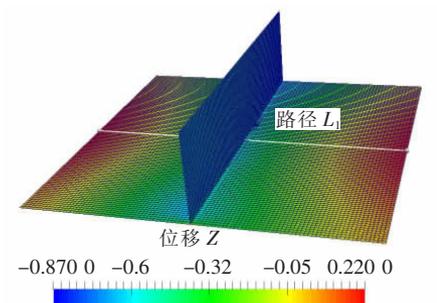


图6 采用四成分固有应变法的焊接变形结果

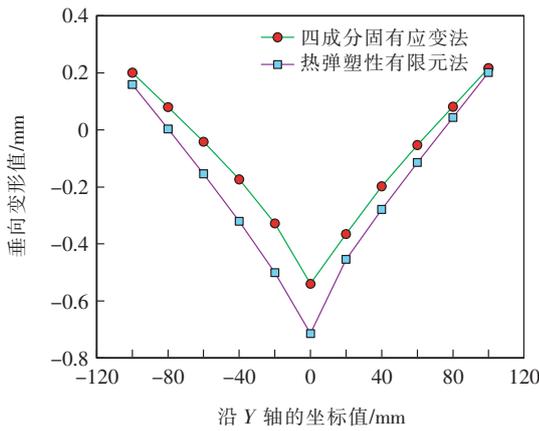


图7 T形接头的挠曲变形对比

### 3 结构刚度对薄壁箱型梁焊接变形影响的研究

#### 3.1 几何模型

薄壁箱型结构尺寸: 腹板和盖板厚度均为 6 mm, 长度 2 000 mm, 间距  $L$  从 170 ~ 410 mm 变化, 高度  $H$  从 300 ~ 700 mm 变化, 取各个面的中心点 A, B, C, D 作为参考点, 具体位置如图 8 所示。运用提取的四成分固

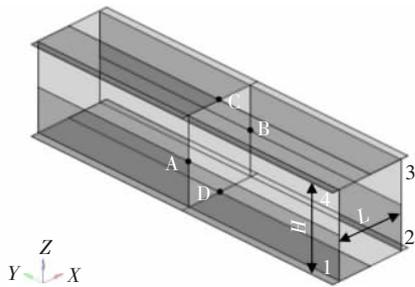


图8 几何模型示意图

有应变数据对薄壁箱型梁结构进行焊接变形模拟时, 先进行点焊固定再对四条焊缝进行连续焊接, 选取最优的交叉焊接顺序(2→4→1→3), 模型网格尺寸为 20 mm。

#### 3.2 结构刚度与变形的关系

薄板焊接变形具有一定的复杂性、多元性, 结构刚度是焊接变形的一个主要影响因素。针对薄壁箱型梁的结构形式把结构刚度的变化细化为腹板间距和高度的改变, 研究其对焊接变形的影响。

为了方便比较, 在边界条件、焊接顺序和网格尺寸一致的前提下, 运用表 3 的固有应变数据对薄壁箱型梁的四条焊缝进行焊接变形模拟。通过改变腹板的间距和高度进行焊接变形计算, 对比得到的 11 组焊接变形结果, 为了更全面的展示焊接变形结果, 利用腹板和盖板的变化量来表征箱型梁的变化, 选取每个模型的 A, B 点的垂向焊接变形值表示腹板的变化, C, D 点的垂向焊接变形值表示盖板的变化, 最后取 A, B, C, D 四个点的平均值表示薄壁箱型梁的焊接变形结果。研究结构刚度与焊接变形的关系, 分别取腹板间距和高度为自变量, 结构的整体变形结果为因变量。通过比较焊接变形的变化趋势, 对腹板间距和高度与焊接变形的关系进行最小二乘法曲线拟合并建立数学关系式。

表 4 和表 5 分别列出了不同腹板间距和高度下薄壁箱型梁的垂向焊接变形值和拟合值以及两者的误差。由表 4 和表 5 可知, 随着腹板间距或高度的增加, 腹板和盖板的焊接变形都呈现降低的趋势, 并且左右腹板的变形值基本相等。

表4 腹板间距变化对焊接变形的影响

序号	$L/mm$	A 点/mm	B 点/mm	C 点/mm	D 点/mm	平均计算值/mm	拟合值/mm	误差(%)
1	110	-3.21	-3.18	-3.41	-3.00	-3.20	-3.20	-0.21
2	140	-2.97	-2.93	-3.16	-2.76	-2.96	-2.94	-0.47
3	170	-2.72	-2.67	-2.94	-2.48	-2.70	-2.69	-0.54
4	200	-2.47	-2.40	-2.70	-2.21	-2.45	-2.43	-0.56
5	230	-2.20	-2.12	-2.45	-1.91	-2.17	-2.18	0.34
6	260	-1.94	-1.85	-2.22	-1.62	-1.91	-1.92	0.95
7	290	-1.69	-1.59	-2.00	-1.33	-1.65	-1.67	1.22
8	320	-1.42	-1.29	-1.75	-1.01	-1.37	-1.42	3.55
9	350	-1.15	-1.06	-1.54	-0.72	-1.12	-1.16	3.83
10	380	-0.92	-0.83	-1.35	-0.45	-0.89	-0.91	2.17
11	410	-0.78	-0.70	-1.25	-0.27	-0.75	-0.65	-12.72

表5 腹板高度变化对焊接变形的影响

序号	H/mm	A 点/mm	B 点/mm	C 点/mm	D 点/mm	平均计算值/mm	拟合值/mm	误差(%)
1	300	-0.91	-0.73	-1.45	-0.23	-0.83	-0.83	-0.13
2	340	-0.87	-0.72	-1.39	-0.24	-0.81	-0.81	0.35
3	380	-0.84	-0.72	-1.35	-0.25	-0.79	-0.79	0.23
4	420	-0.81	-0.71	-1.31	-0.26	-0.77	-0.78	0.13
5	460	-0.79	-0.70	-1.28	-0.27	-0.76	-0.76	0.12
6	500	-0.78	-0.70	-1.26	-0.27	-0.75	-0.75	-0.30
7	540	-0.76	-0.69	-1.23	-0.28	-0.74	-0.74	-0.28
8	580	-0.75	-0.69	-1.21	-0.28	-0.73	-0.73	-0.37
9	620	-0.74	-0.69	-1.19	-0.29	-0.73	-0.72	-0.35
10	660	-0.73	-0.68	-1.17	-0.29	-0.72	-0.72	-0.17
11	700	-0.73	-0.68	-1.16	-0.29	-0.71	-0.72	0.11

图9和图10分别给出在不同腹板间距和高度下,薄壁箱型梁焊接变形计算值和拟合值的变化曲线。

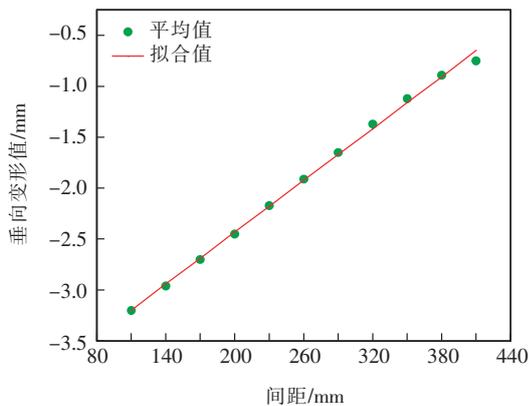


图9 腹板间距与整体结构焊接变形的关系图

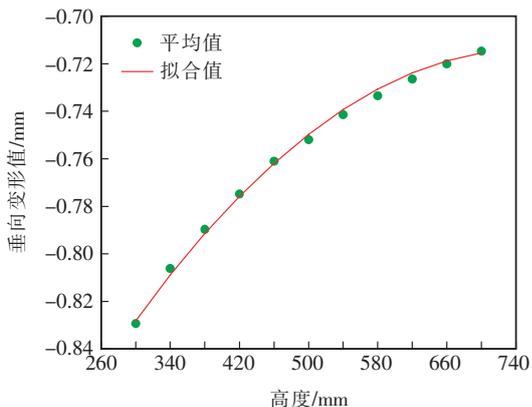


图10 腹板高度与整体结构焊接变形的关系图

根据图9和图10所示曲线拟合出结构刚度与焊接变形的数学关系公式:

$$f_1 = 8.47e^{-3} \times L - 4.127$$

$$f_2 = -5.536e^{-7} \times H^2 + 8.354e^{-4} \times H - 1.029 \quad (2)$$

式中,  $f_1$  为不同腹板间距下拟合的整体结构垂向变形值;  $f_2$  为不同腹板高度下拟合的整体结构垂向变形值。

### 3.3 结果分析

从图9的曲线可以看出,随着腹板间距的增加,平均值从3.2 mm减小到0.65 mm;当腹板间距在110~380 mm变化时,拟合值与计算值的误差在3.8%以内,间距为410 mm时,两者的误差最大,其值为12.7%。

从图10的曲线可以看出,随着腹板高度的增加,平均计算值从0.83 mm减小到0.71 mm;当腹板高度在300~700 mm变化的时候,平均计算值与平均拟合值的曲线十分吻合,两者误差在0.4%以内。

### 4 结论

文中基于固有应变理论的弹性有限元方法,采用逆解析方法提取四成分固有应变,并将其作为初始载荷加载到薄壁箱型梁的焊缝处进行一次弹性计算,快速求解出薄壁箱型梁的焊接变形,并分别研究了腹板间距和高度的不同对结构焊接变形的影响,主要结论有:

- (1) 通过热弹塑性有限元法、固有应变法、试验法等三种方法的比较,验证了通过逆解析法求得的四类固有应变数据的准确性。 [下转第56页]

点熔核图,由图可知,熔核直径为 0.82 mm,拉伸强度为 250.06 N,这说明文中设计的焊接电源所获得的焊点具有较高的可靠性。

## 5 结论

(1) 采用高频半桥逆变电路在额定充电电流(100 A)下,对 0.282 F 电容组进行完全充电时,充电时间小于 100 ms。

(2) 电容组充电电压可达 30 V,极大提高了电流上升速度,电流上升率可达 50 A/ $\mu$ s;利用电容组存储的能量进行焊接,能有效抑制网压扰动,进一步提升了电流输出精度。

(3) 利用 MOSFET 高频斩波技术,可将电流(电压或功率)调节频率提升到 100 kHz,提高了电源的控制精度和响应速度,可实现 1 ms 内平稳输出 1 000 A 的电流,热量集中,实现快速焊接,适合微型件的超精密焊接。

[上接第 46 页]

(2) 薄壁箱型梁的腹板间距在 110 ~ 410 mm 变化时,随着腹板间距的增加,结构刚度增大,焊接变形呈现明显的降低趋势,变化曲线为一次线性函数数学关系。

(3) 薄壁箱型梁的腹板高度在 300 ~ 700 mm 变化时,随着腹板高度的增加,结构刚度增大,焊接变形呈现出降低趋势,变化曲线为二次函数数学关系。

## 参考文献

[1] Rong Y, Huang Y, Zhang G, et al. Prediction of angular distortion in no gap butt joint using bpnn and inherent strain considering the actual bead geometry [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 86 (1-4): 59-69.

[2] Kim M, Kang M, Chung H. Simplified welding distortion analysis for fillet welding using composite shell elements [J]. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2015, 7(3): 452-465.

[3] 顾颖. U 肋加劲钢桥面板焊接残余应力与变形研究 [D]. 成都: 西南交通大学博士学位论文, 2016: 5-7.

[4] 田有刚. 铝合金地铁牵枕缓焊接变形控制及组焊工艺研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2015:

## 参考文献

[1] 朱正行, 严向明, 王敏. 电阻焊技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 93-95.

[2] 杨景卫, 曹彪. 微型零件精密电阻点焊技术及其应用 [J]. *焊接*, 2009(6): 43-47.

[3] 余文捷. 波控晶体管式电阻点焊电源的研制 [D]. 广州: 华南理工大学硕士学位论文, 2012.

[4] 李西恭, 杨录东, 张亮. 20 kHz 电阻焊逆变电源的研制 [J]. *焊接学报*, 2006, 27(2): 105-107.

[5] 曹彪, 王晓东, 范丰欣, 等. 高频晶体管式电阻点焊电源的研制 [J]. *焊接学报*, 2009, 30(7): 73-76.

[6] 曾敏, 魏良红, 马成, 等. 基于 DSP 的高频逆变电阻点焊电源的研究 [J]. *机械工程学报*, 2011, 47(6): 80-85.

作者简介: 王新, 1992 年出生, 硕士研究生。研究方向为数字化电源及智能控制。

8-9.

[5] 陆皓, 陈俊梅, 刘俊龔, 等. 薄板焊接失稳变形的简化模型及其应用 [J]. *焊接*, 2007 (5): 16-18.

[6] 梁伟, 邓德安, MURAKAWA Hidekazu. 铝合金薄板固有变形逆解析方法的研究与开发 [J]. *中国有色金属学报*, 2015 (11): 3011-3018.

[7] 周宏, 罗宇, 蒋志勇. 基于固有应变的船体总段船台合拢焊接变形预测研究 [J]. *船舶力学*, 2013, 17(10): 1153-1160.

[8] 梁伟, 村川英一. T 形焊接接头固有变形逆解析方法的开发 [J]. *焊接学报*, 2013, 34(10): 79-82.

[9] 李娅娜, 谢素明, 李晓峰, 等. 集装箱平车中梁焊接变形的数值仿真 [J]. *铁道学报*, 2010, 32(5): 36-40.

[10] Wang R, Rashed S, Serizawa H, et al. Study on welding inherent deformations in welded structural materials [J]. *Transactions of JWRI*, 2008, 37(1): 91-100.

作者简介: 李娅娜, 1977 年出生, 博士, 副教授, 硕士生导师。主要研究方向车辆工程 CAD/CAE 技术、结构焊接变形和残余应力研究, 已发表论文 26 篇, 其中 EI 10 篇。