

基于动态拘束的法兰片焊接变形数值模拟

王晨曦， 汤文成

(东南大学, 先进制造国家重点实验室, 南京, 211189)

摘要: 外拘束对焊接变形的影响较大, 是影响焊接变形的重要因素之一。相比于传统的刚性拘束, 动态拘束能够实时的反映外拘束力在焊接过程中的变化效果。在两条焊缝多层多道交叉焊的情况下, 建立多场耦合分析模型, 利用弹簧单元模拟较低刚度夹具的变形所带来的动态拘束力效果, 考虑了变形量对于拘束力的反馈。从拘束刚度、拘束距离、初始拘束力以及拘束宽度 4 个因素来探讨焊件的变形情况, 得出各因素下的变形规律, 并利用回归分析对 4 个因素进行综合评价。结果表明, 4 个拘束因素的增加都能不同程度的减小变形量, 拘束刚度、拘束初始力、拘束宽度的影响趋势较为相似, 且拘束初始力影响最大, 拘束距离在其范围内影响趋势为线性, 且影响性最小。

关键词: 焊接变形; 多层多道焊; 动态拘束; 回归分析

中图分类号: TG 404 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hjxb.20200716003

0 序言

法兰圆片是旋片阀中主要的真空部件。在装配过程中, 上下法兰圆片与围壁之间的安装很容易受到法兰径向弯曲的影响, 从而降低了旋片阀的真空性能。而法兰与水冷圈之间的焊接过程是导致径向变形的主要原因, 所以如何有效降低焊接变形具有研究意义。

焊接过程是一个复杂的物理化学过程。在焊接加热过程中, 焊缝及附近区域因受热膨胀而受到周围温度较低区域金属的约束, 产生压缩塑性应变, 冷却后残余压缩塑性应变就决定了残余应力和变形^[1-2]。焊接变形会直接导致焊件的制造精度、装配精度和结构性能的降低。传统的对于变形的预测方法都是基于试验和经验公式法, 不仅耗时耗力, 而且预测精度也不高。随着弹塑性理论的提出以及计算机软硬件的飞速发展, 基于热力耦合的热弹塑性数值模拟方法已经成为研究焊接过程的最普遍方法。

众多学者通过建立合理的计算模型以及试验测试方法来研究外拘束对焊件变形的影响, 并且绝大部分结果表明外加拘束对焊接变形影响显著。Liu 等人^[3]研究了外拘束对薄板坯连铸节点变形的

影响, 分析得出在屈曲变形之前, 拘束可一定程度上减小变形量。Liang 等人^[4]通过固有应变和界面元法研究曲线加筋板的变形, 并指出热输入、外部拘束、焊接顺序对其最终变形有显著影响。马国等人^[5]对比四种拘束状态下焊件的变形情况, 发现弹簧拘束和接触拘束与试验较为吻合, 且弹簧拘束误差最小。Wahab 等人^[6]通过试验提出施加在焊件上的拘束力是动态变化的, 在此基础上, Liu 等人^[7]对不同初始拘束力以及拘束位置进行了研究, 得出了不同拘束条件释放前后的变形规律。Mao 等人^[8]采用两种不同的约束方式控制焊件的变形, 对比可得三维多场耦合模型更加贴近试验结果, 且应变范围较小。然而目前关于外拘束的研究较少, 且只对个别因素进行了探究, 所以为更全面探究法兰的径向变形情况, 文中从拘束刚度、初始拘束力、拘束距离以及拘束宽度 4 个方面来对焊件交叉多层多道焊进行研究, 分析 4 个因素对变形量影响的规律。

1 试验过程

试验材料为 SUS304 钢, 采用氩气为保护气体的非熔化极气体保护焊 (TIG) 对两条焊缝进行填充, 焊接方式为交互多层多道焊, 两条焊缝的相应焊道焊接参数相同。焊件分别为内外圈直径分别为 393, 520 mm 的环形法兰以及直径为 450 mm 的环形水冷圈, 内外环向焊缝的直径分别为 408,

419 mm。分三组进行试验：第一组测量自由状态下 A 点厚度方向的位移变化；第二组在第一组的基础上限制了焊件底部沿厚度方向的位移；第三组在第一组的基础上添加了沿法兰外边缘的环向夹具，且沿径向的宽度为 10 mm。焊接顺序以及 1/12 焊件示意图如图 1 所示。

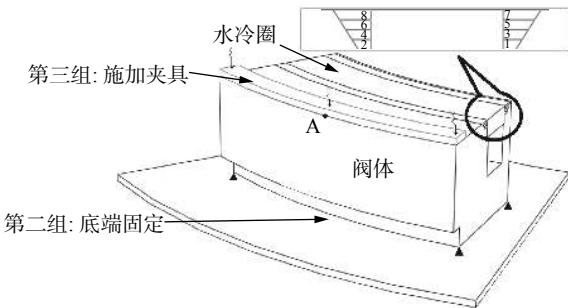


图 1 焊件试验示意图

Fig. 1 Diagram of welding parts experiments

焊丝的型号为 ER308，依据不同焊道分别采用直径 1.2, 1.6 和 2.0 mm，焊接所采用的电弧电压、焊接电流、焊接速度如表 1 所示。

表 1 焊接工艺参数

Table 1 Welding parameters

道次	电弧电压 U/V	焊接电流 I/A	焊接速度 v/(m·s ⁻¹)	焊丝直径 φ/mm
第一道	11	176	0.003	1.2
第二道	12	178	0.003	1.2
第三道	14	182	0.003	1.6
第四道	14	182	0.003	2.0

由于焊接过程是准热稳态过程，除起焊和止焊端，各个横截面沿焊件厚度方向的变形应该相一

$$\left\{ \begin{array}{l} q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{a_f b c \pi^{3/2}} \exp\left[\frac{-3(y \cos \alpha - x \sin \alpha)^2}{a_f^2}\right] \exp\left[\frac{-3(x \cos \alpha + y \sin \alpha)^2}{b^2}\right] \exp\left[\frac{-3(z - z_0)^2}{c^2}\right] \\ q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{a_r b c \pi^{3/2}} \exp\left[\frac{-3(y \cos \alpha - x \sin \alpha)^2}{a_r^2}\right] \exp\left[\frac{-3(x \cos \alpha + y \sin \alpha)^2}{b^2}\right] \exp\left[\frac{-3(z - z_0)^2}{c^2}\right] \end{array} \right. \quad (1)$$

式中： q_f, q_r 分别为前半椭球和后半椭球的热生成率； Q 为焊接热输入； f_f, f_r 为热源模型前后半球的能量分配系数； a_f, a_r, b, c 为双椭球热源形状参数； z_0 为焊道距离工作台的高度； α 为焊点与法兰中心轴连线扫过的角度。

考虑焊件与空气的对流换热以及辐射换热，并且在真空通道区域降低换热系数，不考虑母材与工作台、夹具之间的传热。

致，所以通过测量 A 点在厚度方向的变形量来表征焊件外边缘沿厚度方向的变形情况。每次焊接总历时约为 5723 s，共 8 道焊，每道之间冷却时间为 10 min。图 2 显示了施加压板夹具的试验现场。



图 2 施加夹具焊件实体图

Fig. 2 Experiment of applying fixture

2 有限元数值模型分析

采用基于热力耦合的热-弹-塑有限元法对焊件进行分析。首先通过对焊接热输入的模拟计算获得多道焊瞬态温度场，其次在弹-塑性分析中，考虑材料的高温物理性能以及力学性能为非线性。温度场计算忽略相变的影响，并假设熔敷金属与母材的高温材料性能相同。

2.1 温度场计算模型

焊接热输入探究中，有学者对 TIG 的热源模型适用性进行研究^[9]，结果表明双椭球热源模型的效果最好，故采用该热源模型进行研究，各焊道的椭球尺寸参数通过试验测得。由于实际焊缝形状是环向，所以经过变换可得环向双椭球热源模型为

2.2 动态拘束有限元模型

由于大型焊件数值模拟耗时耗力，考虑到焊件为中心对称模型且焊接的准热稳态特性，为节约计算成本，分别选取 1/16, 1/12, 1/8, 1/4 的原焊件模型进行仿真试算。结果显示 1/12, 1/8, 1/4 模型的模拟结果具有准热稳态过程且该过程中变形大小一致，为了节约计算成本，采用 1/12 原焊件模型作为仿真模型。在焊接过程中，焊件局部材料不均匀的膨胀

收缩会导致焊件产生变形, 较低刚度的夹具也会随之发生变形从而导致其施加到焊件上的力发生变化, 但由于变形量微小, 所以在小范围内将夹具夹紧力的变化视为线性变化。刘川等人^[10]通过弹簧单元模拟夹具的动态拘束并成功得出了焊件在外拘束情况下的变形趋势, 验证了弹簧单元模拟的可行性。所以文中采用弹簧单元来模拟夹具的刚度效果, 弹簧的一端与压板通过位移耦合连接在一起, 另一端施加初始位移来模拟初始夹紧力。

在多场耦合分析过程中, 建立尺寸比例为 1:1 的多场耦合模型, 考虑焊件与工作台为柔性-刚性面接触, 焊件和夹具之间采用柔性-柔性面接触。由于变形量较小, 所以不考虑焊件与夹具之间相对位移带来的摩擦影响。限制焊件内圈的周向自由度, 以及完全约束工作台的自由度。建立的动态拘束有限元模型如图 3 所示, 共 7215 个网格。

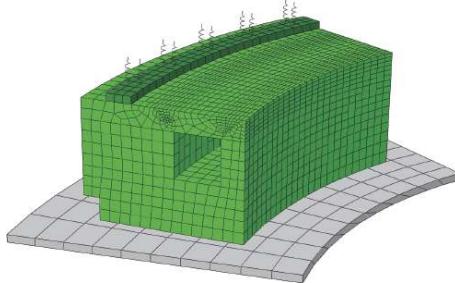


图 3 多场耦合有限元模型
Fig. 3 Multi-body coupled finite element model

图 4 表示 4 个动态拘束的因素中, 弹簧单元的弹性模量表示为拘束刚度; 弹簧单元的初始位移表示为初始拘束力; 压板与外侧焊缝的径向距离表示为拘束距离; 压板沿径向方向的长度表示为拘束宽度。

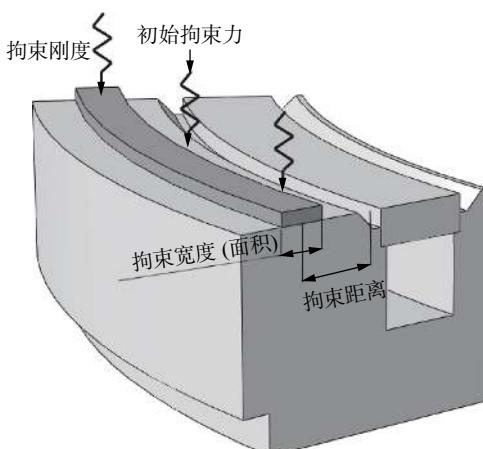


图 4 拘束示意图
Fig. 4 Constraint diagram

2.3 回归分析

为了分析影响焊接变形的 4 个动态拘束因素的主次程度, 文中采用基于最小二乘法模型的多元线性回归分析, 位移量作为因变量, 4 个动态拘束因素作为自变量。

$$Y = w^T X + b \quad (2)$$

式中: $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ 表示共有的样本量, 其中 $x = (x^1, x^2, x^3, x^4)^T$ 中 x^i 代表该样本的第 i 个特征; $w = (w^1, w^2, w^3, w^4)^T$ 表示各特征因素的权重; b 代表 Y 不受 X 影响的部分; Y 表示位移量。为了消除不同量纲带来的影响, 故在回归之前对各因素进行标准化处理。

回归分析的作用主要体现在 3 个方面: 识别 4 个拘束因素中的重要变量; 判别拘束变量与位移量之间的相关方向; 在各变量表现显著的条件下估计自变量的权重。其作用倾向于解释型回归而不是预测型回归, 所以更加关注各变量的显著程度以及 w 的大小, 而不关注拟合优度 R^2 的大小。故目标函数表示为

$$g(w, b) = \sum_{i=1}^n (w^T x_i + b - y_i)^2 \quad (3)$$

矩阵的求解公式由此推导为

$$w^T = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (4)$$

3 数值模拟及试验结果

3.1 焊件试验结果

图 5 表示三组试验法兰上表面中心线沿厚度方向的变形情况, 其横坐标代表测量点离焊件内环的径向距离。三组试验的变形量趋势相一致, 第二组为刚性拘束, 在释放拘束之后, 焊件的回弹量较大。而通过施加夹具对沿厚度方向变形的抑制效果

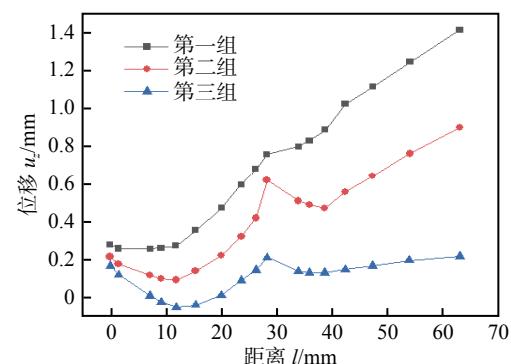


图 5 上表面中心线沿厚度方向变形
Fig. 5 Deformation of central axis of upper surface along the thickness direction

最好, 边缘变形量为 0.22 mm.

图 6 表示中截面 A 点沿厚度方向在整个焊接过程的位移曲线, 可见焊接过程中第 5, 7 道焊后变形量最大, 主要由于最后四道焊的热输入量增加, 加上其靠近内圈, 截面沿厚度方向的变形反馈至外圈导致变形量较大. 其最终变形量对比试验获取的数据, 可见模拟效果较好, 并体现了利用弹簧单元模拟夹具动态拘束的可行性.

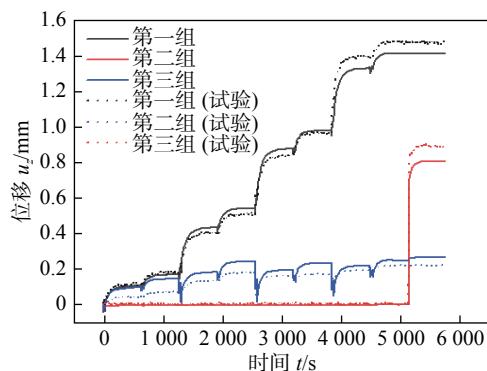


图 6 点 A 处沿厚度方向的位移曲线

Fig. 6 Displacement curve along the thickness direction at point A

3.2 各拘束因素对焊接变形的影响

3.2.1 拘束刚度对焊接变形的影响

基于弹簧单元模拟夹具的拘束行为, 利用弹簧单元的弹性模量来表示拘束刚度, 下文均以 A 点沿厚度方向的位移为表述对象, 即横截面外边缘沿厚度方向的变形情况. 图 7 表示拘束位置距离外圈焊缝为 27 mm、拘束长度沿径向为 10 mm 情况下的三条曲线. 由图可见, 较小刚度区域内位移量降低迅速, 随着弹性模量不断增加, 其变化率逐渐降低并趋于平缓, 当刚度达到 20 kN/mm 时, 释放后的变形量仅有 0.06 mm.

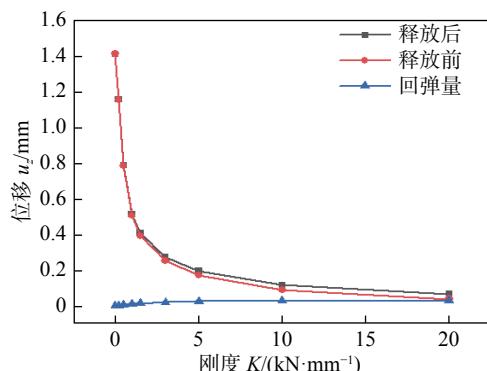


图 7 A 点在不同拘束刚度的位移量

Fig. 7 Displacement of point A under different constraint stiffness

焊接遵循着变形越小应力越大的规律, 较高的刚度拘束导致较大内应力, 外拘束的释放带来应力的释放, 从而导致回弹量的产生. 随着刚度的增加, 回弹量也逐渐增加且趋于平缓, 当刚度为 20 kN/mm 时, 回弹量为 0.028 8 mm.

3.2.2 初始夹紧力对焊接变形的影响

在夹具固定过程中如果施加一定的夹紧力, 焊件的变形量会进一步减小. 图 8 在图 7 的基础上选定 0.2, 0.5 和 1 kN/mm 3 个不同刚度情况下探讨初始力大小对于变形量的影响. 曲线趋势表现一致, 均为位移量随着初始力的增加而降低且降低速率由快到慢. 当初始力达到 1 kN 时, 三种刚度下对应的位移分别只有 0.016, 0.014 和 0.013 mm.

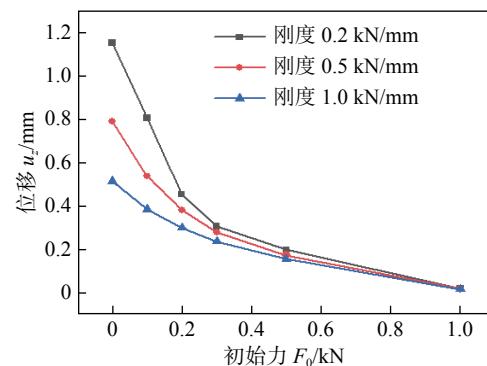


图 8 A 点在不同初始力作用下的位移量

Fig. 8 Displacement of point A under different initial constraint

对比图中的三条曲线, 可知在较低刚度条件下, 同等初始力的拘束效果明显于较高的刚度条件, 且随着刚度的不断增加而初始力的效果不断减弱.

3.2.3 拘束距离对焊接变形的影响

考虑到拘束远离焊缝中心的位置会对最终的变形量产生影响, 结合生产实际, 夹具的拘束最小的施加距离为远离外侧焊缝 12 mm, 并且以 2.5 mm 为间隔作为计算样本, 最远距离不超过 27 mm.

从图 9 可见零初始力不同刚度拘束的作用下, 位移量几乎都随着距离的增加呈现线性减小的趋势. 且变化率在低刚度以及高刚度范围下较小, 中间区域略大, 呈现先增后减并趋于稳定的趋势, 如图 10 所示. 这是由于在低刚度条件下拘束能力较弱, 能够拘束的变形量较小, 拘束位置的变动所带来的影响也就很小. 但随着刚度的增加, 其效果会迅速增加, 并在刚度约为 0.6 kN/mm 时位移变化率达到最高为 0.017 56. 而较高刚度的拘束使得位移

控制在很小的范围, 同样也会减弱拘束位置对其影响作用。

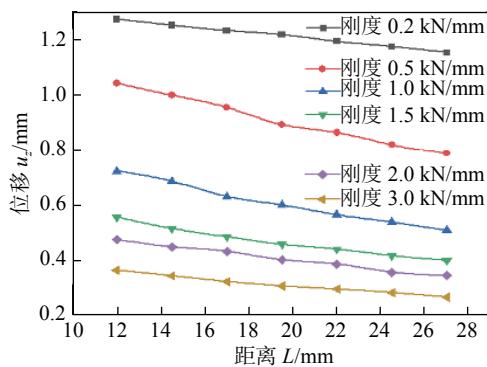


图 9 A 点在不同拘束距离的位移量

Fig. 9 Displacement of point A under different constraint position

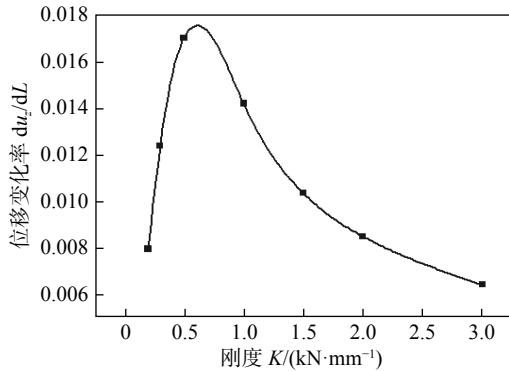


图 10 不同刚度的拘束位置位移变化率

Fig. 10 Gradient of displacement under different constraint stiffness

3.2.4 拘束宽度对焊接变形的影响

拘束宽度和其它的因素具有相关性, 结合实际

情况, 在同一拘束条件下, 总刚度以及初始拘束力随着拘束宽度的增减而等比增减。由于尺寸限制, 最大拘束宽度不超过 20 mm。拘束宽度和拘束距离之和小于等于外侧边缘与外侧焊缝之间的距离。

图 11 表示四种刚度零初始力拘束下的位移曲线, 小刚度拘束条件下位移的变化更趋向于线性, 随着刚度增加, 其非线性趋势愈加明显, 但都表现为位移降低速率由快到慢, 并在一定的拘束宽度后趋于平缓。同时, 对比图中 4 条曲线, 刚度条件越大, 位移曲线随着拘束宽度的增加就越快趋于平缓。

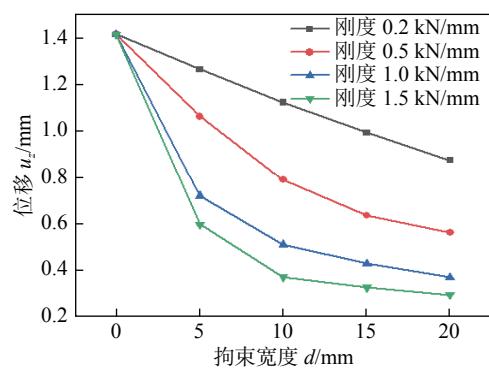


图 11 A 点在拘束宽度作用下的位移量

Fig. 11 Displacement of point A under different constraint width

3.3 回归分析结果

在实际焊件允许的自变量取值范围内, 经过共 69 组的数值模拟, 部分结果如表 2 所示。通过对上表中的样本进行基于最小二乘法的回归分析, 得到

表 2 部分数值模拟结果
Table 2 Part of numerical simulation results

拘束刚度 $K/(kN \cdot mm^{-1})$	初始力 F_0/kN	拘束宽度 d/mm	拘束距离 L/mm	位移 u_z/mm
0	0	10	27	1.406 69
0.2	0	10	27	1.152 2
0.5	0	10	27	0.787 503
1	0	10	27	0.510 7
3	0	10	27	0.270 974
0.2	0.2	10	27	0.478 729
0.2	0.5	10	27	0.194 276
0.2	1	15	27	0.015 8
.....				
3	0.5	5	12	0.251 768
3	0	10	12	0.367 724

拘束刚度、初始力、拘束宽度比、拘束距离 4 个变量对位移量的影响情况。表 3 为各自变量的标准化回归系数, 结果可见无论各因素是否经过标准化处理, 其回归系数皆为负数, 表明各因素数值的增加都会导致变形量的减小, 验证了上文的数值模拟结

果。在 95% 的置信区间下, 只有拘束刚度、初始力、拘束宽度比的 P 值小于 0.05, 代表其回归系数显著的异于 0, 代表这 3 个因素对变形量的影响较为显著。而拘束距离的 P 值 0.557 无法拒绝原假设, 所以不具备显著性。

表 3 回归分析结果
Table 3 Regression analysis results

位移	系数	标准误差	t值	$P > t $	标准化系数
拘束刚度	-0.055 4	0.012 31	-4.5	0	-0.457 68
初始力	-0.815 8	0.129 51	-6.3	0	-0.640 5
拘束宽度比	-0.239 6	0.113 28	-2.12	0.04	-0.213 83
拘束距离	-0.003 8	0.006 41	-0.59	0.557	-0.059 95
常量	1.093 1	0.198 14	5.52	0	.

标准回归系数可知初始力的影响最显著, 达到了 -0.640 5, 而拘束位置只有 -0.059 95, 其影响性较其它 3 个因素小很多。所以在研究各因素与位移量的相关关系时, 可忽略拘束距离对位移带来的影响。

3.4 试验验证

针对拘束初始力对焊接变形的影响最为显著, 分别选取初始力大小为 0.1, 0.5, 1.0 kN, 拘束刚度为 1.0 kN/mm, 拘束宽度为 10 mm, 拘束距离为 27 mm 情况下焊件上表面中心线处沿厚度方向的变形量进行验证。由图 12 可见模拟效果较好, 与试验结果吻合度较高。拘束初始力越大, 外拘束对焊件变形量的限制越强, 数值模拟和试验之间的精度就越高。在 0.5 kN 的初始力下, 焊件边缘沿厚度方向的变形量能够控制在 0.15 mm 左右, 而在 1.0 kN 的初始力下, 几乎可以忽略变形量的大小。

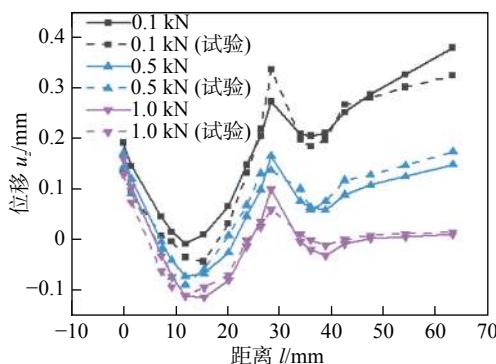


图 12 变形试验结果对比

Fig. 12 Experimental comparison of deformation

4 结论

(1) 动态拘束相较于刚性拘束能够更好的减小法兰片焊后的变形量。

(2) 拘束的释放导致法兰片发生回弹, 且回弹量随着拘束刚度的增加而增加。在刚性拘束下, 回弹量接近 1.0 mm。

(3) 随着拘束刚度、拘束初始力、拘束宽度、拘束距离的任一因素的增加, 法兰片的沿厚度方向的变形量都会减小。其中前 3 个因素下变形量的减小呈现由快到慢的趋势, 并最终趋于平缓。

(4) 拘束刚度、拘束初始力、拘束宽度对于法兰片变形量的影响比较显著, 且其影响程度由大到小分别为拘束初始力、拘束刚度、拘束宽度。所以在焊接过程中, 施加较大的初始夹紧力以及采用较高刚度的夹具能够更加有效的控制其沿厚度方向的变形。

(5) 拘束初始力超过 0.5 kN 时, 法兰片边缘沿厚度方向变形量能控制在 0.15 mm 之内, 而在超过 1.0 kN 时, 可忽略焊接带来的变形影响。

参考文献

- [1] Zhao L, Xu L Y, Nikbin K. Predicting failures modes in creep and creep-fatigue crack growth using a random grain/grain boundary idealized microstructure meshing system[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 704: 274–286.

- [2] 汪建华, 陆皓. 焊接残余应力形成机制与消除原理若干问题的讨论 [J]. *焊接学报*, 2002, 23(3): 75 – 79.
Wang Jianhua, Lu Hao. Some discussions on principle of causing and relieving welding residual stress[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2002, 23(3): 75 – 79.
- [3] Liu J, Li Z, Ren S, Liang W, Deng D. Investigating the mechanism of out-of-plane deformation in Q345 steel single-pass based-on welded joint with external restraint[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(14): 90 – 97.
- [4] Liang Wei, Deng Dean. Influences of heat input welding sequence and external restraint on twisting distortion in an asymmetrical curved stiffened panel[J]. *Advances in Engineering Software*, 2018, 115(8): 439 – 451.
- [5] 马国, 蹤雪梅, 田艳峰, 等. 不同拘束条件下坡口间隙对焊接变形的影响 [J]. *焊接学报*, 2017, 38(9): 19 – 22.
Ma Guo, Zong Xuemei, Tian Yanfeng, et al. Influence of groove clearance on welding deformation under different constraint conditions[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(9): 19 – 22.
- [6] Wahab M A, Alam M S, Painter M J, et al. Experimental and numerical simulation of restraining forces in gas metal arc welded joints[J]. *Welding Journal*, 2006, 85(2): 35s – 43s.
- [7] Liu C, Zhang J X. Numerical simulation of transient welding angular distortion with external restraints[J]. *Science and Technology of Welding & Joining*, 2009, 14(1): 26 – 31.
- [8] 毛志伟, 黄涛, 徐伟. 外拘束角接头旋转电弧焊接应力-应变分析 [J]. *焊接学报*, 2019, 40(3): 15 – 20.
Mao Zhiwei, Huang Tao, Xu Wei. Stress-strain analysis of rotary arc welding of corner joint based on external restraint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(3): 15 – 20.
- [9] 李萌盛, 王传标. 关于钨极氩弧焊热源模型适用性的探讨 [J]. *热加工工艺*, 2007, 36(15): 70 – 72.
Li Mengsheng, Wang Chuanbiao. Exploration of applicability on heat source model in TIG welding[J]. Hot Working Technology, 2007, 36(15): 70 – 72.
- [10] 刘川, 张建勋, 牛靖. 焊接动态拘束变形三维多体耦合数值模拟 [J]. *机械工程学报*, 2010, 46(6): 83 – 92.
Liu Chuan, Zhang Jianxun, Niu Jing. 3D multi-body coupling numerical simulation of welding dynamic distortion with restraints[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(6): 83 – 92.

第一作者简介: 王晨曦, 1996 年出生, 硕士; 主要研究方向为外拘束下焊件的焊接应力变形; Email: 453805086@qq.com.

通信作者简介: 汤文成, 教授; Email: 101000185@seu.edu.cn.

(编辑: 朱艳)