

# 平板堆焊时平面外变形的形态及产生机制

唐慕尧 崔培祥 裴 怡

(西安交通大学)

**摘要** 本文从引入虚元的热弹性板元有限元计算和试验测定两方面分析研究了平板堆焊时平面外变形的形态及产生机制。从量级和趋势上看,计算和试验结果吻合良好。结果表明:一端固定的焊缝平面外变形是由横向收缩引起的角变形和纵向收缩引起的纵向弯曲共同作用的结果。纵向拘束的焊缝平面外变形主要是横向收缩引起的角变形。两端固定的焊缝,由于横向收缩和纵向收缩一定程度上都受到拘束,因而降低了整个板的挠度值。

**关键词** 虚元;平板堆焊;平面外变形;有限元分析

## 0序言

平面外变形的存在,可降低构件压曲强度,造成结构损坏<sup>[1]</sup>。国内外对焊接变形的研究主要集中在横向收缩和横向收缩引起的角变形及梁的弯曲和板边一侧堆焊变形,对平板堆焊的平面外变形报道很少。文献[2,3]曾用引入虚元的热弹性法计算了平板堆焊时的平面外变形,结果表明纵向拘束时平板堆焊的变形,计算和试验的结果吻合良好。但一端固定时平板堆焊的变形计算值很不理想。引入虚元的热弹性板元法的精度主要取决于虚元的处理和板的模型两个因素,本文主要从板的模型入手,试着寻找提高一端固定时平板堆焊变形计算精度的方法。薄板的弯曲小挠度理论是最基本、最常用的一种板理论,这种理论的基本假定即克希荷夫-勒夫假定。板在横向载荷作用下将产生弯曲变形,当板的最大挠度远小于板的厚度时,板中面内的薄膜应力将远小于板的弯曲应力,可以忽略不计,这类问题称为薄板的小挠度问题。当板在板边界上直接作用有平面力,或者他们是由温度变化所引起的,那么板中面作用力的影响将不能忽略。在焊接时,由于温度的急剧变化产生面外变形的同时,还会产生面内变形。而平面内变形对平面外变形的影响也是不可忽略的。这样的板为同时挠曲及拉伸板,文献[2,3]采用的是小挠度板单元,本文以后两种板单元为基础,编制了有限元程序并进行了数值试验。结果表明,平板堆焊时,平面内变形对平面外变形有很大的影响<sup>[4]</sup>。

# 1 平板堆焊时，平面外变形的形态及产生机制

## 1.1 一端固定时平板堆焊的平面外变形机制

图1(a)是一端固定时平板堆焊的计算模型简图。通过计算不同截面在各个时刻的挠度变化来分析它的变形机制。焊接开始时,金属受热膨胀,板有下降的趋势,由于板的刚度很大,这种趋势表现并不十分明显。随着焊接的进行,电弧后面的金属冷却,发生横向收缩和纵向收缩。图1(b)是焊接开始后16.5s时焊件的变形立体图,可以看出离开固定端距离不同的各横截面的变形形态互不相同,在焊缝两侧离焊缝距离不同的各纵截面的变形形态也互不相同。各横截面的变形以焊缝为对称轴,左右对称。在16.5s时,电弧处于Ⅰ,Ⅲ截面之间,Ⅰ截面的冷却收缩较大一些,Ⅱ截面的冷却较小,Ⅲ截面并没有受到加热,所以角变形的大小呈现出Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ截面依次减小的趋势,但这种趋势是暂时的,随着电弧的移动,后面金属的冷却,这种趋势会越来越小,以至于焊接结束后,离开固定边越远的横截面角变形越大(图1c),这种结果主要由两个原因造成的:一是靠近固定边的横截面的角变形受到固定端的拘束,二是电弧后的焊缝的收缩对电弧前的金属产生影响,使高温区金属的热膨胀受到阻碍,使压缩塑性变形量增大。横向收缩的同时,会发生焊缝方向的纵向收缩,这种纵向收缩势必引起整个板件的下挠(图1b),随着焊接的进

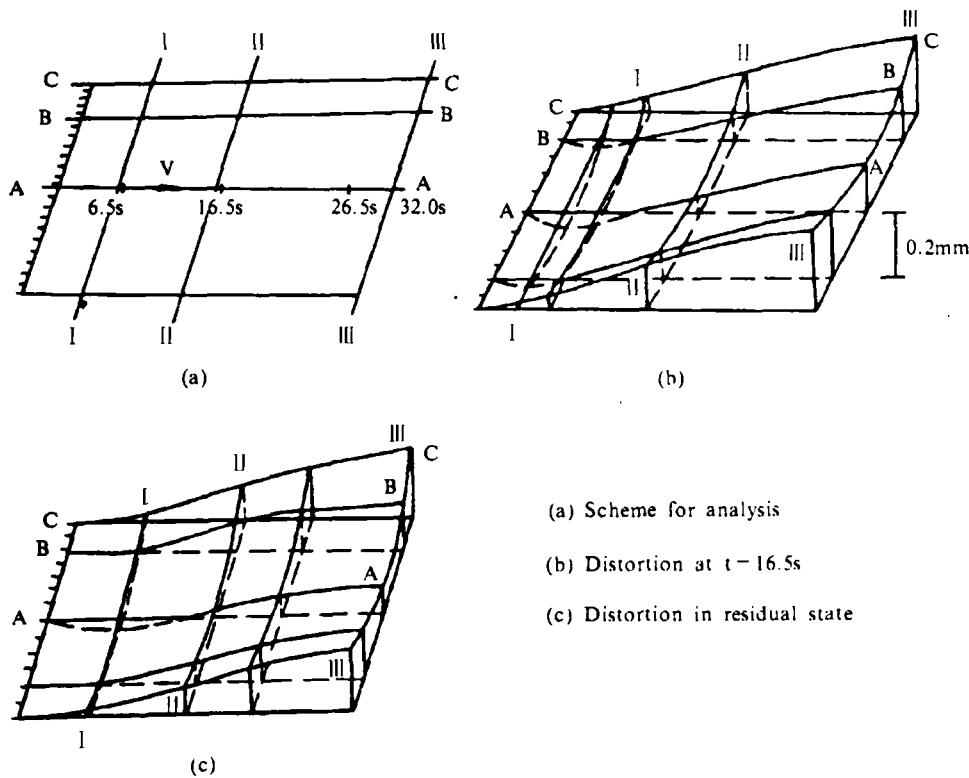


图1 一端固定时平板堆焊的变形

Fig.1 Distortion during bead-on-plate welding with one end fixed

行,金属的冷却,整个板件的下挠度逐渐增大(图1c)。可以看出,一端固定的平板堆焊的平面外变形是由横向收缩引起板件的角变形和纵向收缩引起板的纵向弯曲共同作用的结果。最终的变形形态如图1c所示。一端固定的平板堆焊时的变形形态,是平板堆焊时的最一般化的形态,以前还没有见过报道。

## 1.2 纵向拘束的变形机制

图2(a)为受纵向拘束的平板堆焊示意图。图2(b)、(c)为纵向拘束的平板堆焊时平面外变形在 $t=19s$ 以及残态时的变形立体图。图上清楚地将受纵向拘束的平板堆焊的变形形态表示出来。焊接开始时由于电弧附近的金属材料受热膨胀,致使自由边A-D有下降的趋势,但由于焊接板刚度较大这种趋势表现并不十分明显,电弧移动时,电弧后面的焊缝金属冷却,发生横向收缩,致使A-D边上翘,挠度值沿焊接方向逐渐减小,而板件终端几乎没有挠度,如图2(b)。随着焊接的继续进行,电弧后面金属的进一步冷却,使A-D边的挠度值逐渐增大。在残态时,如图2(c),各横截面挠度变化趋于一致。从整个板件在焊接冷却过程中的变形趋势来看,主要是由横向收缩引起的角变形。这一点由图2(c)可以清楚地表现出来,图中各横截面的变化曲线相一致,各纵向截面在焊缝方向上的挠度值几乎相同。与一端固定的平板变形机制相比,纵向拘束的平板堆焊的变形是由横向收缩引起的角变形,纵向拘束约束了沿焊缝方向的纵向收缩。

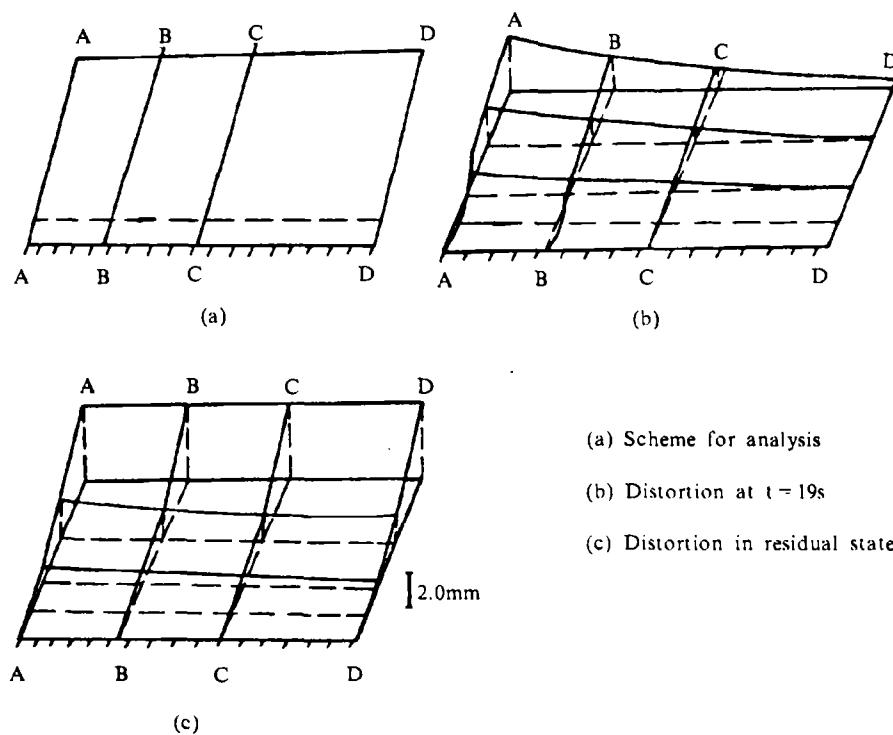


图2 纵向拘束时平板堆焊的变形

Fig.2 Distortion during bead-on-plate welding with longitudinal restraint

### 1.3 两端固定的变形机制

图3(a)为两端固定的平板堆焊示意图,图3(b)为1、2点的动态挠度曲线,图3(c)为两端固定的平板堆焊的残态立体图。可以看出,两端固定不仅约束了靠近两端的各横截面的角变形,同时对纵向收缩有一定的约束作用,两端固定的焊缝降低了板件的挠度,试验实测也证实了这个分析及预测。

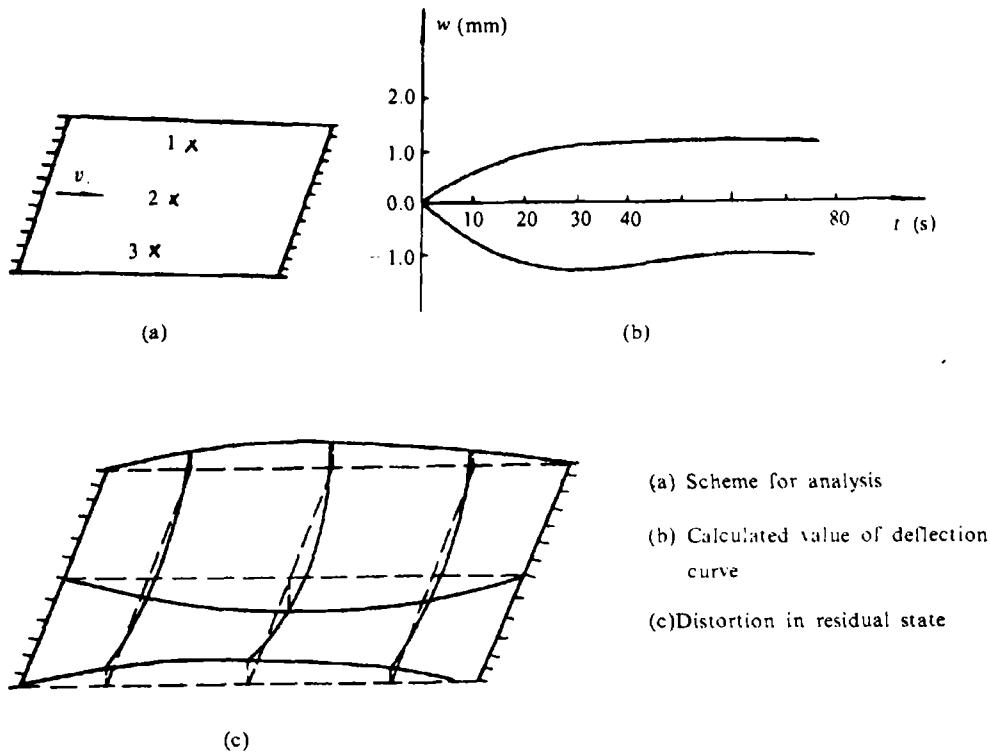


图3 两端固定时平板堆焊的变形

Fig.3 Distortion during bead-on-plate welding with both end fixed

## 2 平板堆焊时平面外变形的试验测定

试验用交流埋弧焊机沿拘束方向或垂直拘束方向进行焊接,焊接条件为  $I=580A$ ,  $U=37V$ ,  $v=10.0\text{mm/s}$ , 在Q235钢板的背面装置6~8个位移传感器,被测对象的挠度值经过位移传感器变成电信号,A/D板将模拟量转换成数字量。

### 2.1 一端固定的平板堆焊

一端固定的平板堆焊的试验板如图4(a)所示。板边一侧拘束,垂直拘束方向施焊。由表1可看出1、3两点如果除去焊缝不垂直度的影响,可以认为变化形态是完全相同的。

这里只给出 1 点和 2 点的动态变化曲线。焊缝背面测点的动态挠度曲线, 反映了纵向收缩引起的纵向变曲变形。由图 4(b)2 点的动态挠度曲线可知, 这一变形形态与板边一侧堆焊相似。金属熔化膨胀, 使焊缝上挠, 随着焊接的进行, 焊缝冷却, 纵向收缩, 使焊缝下挠。焊件的边沿不仅受横向收缩的影响而且受纵向收缩的影响。图 4(c) 表示整个焊板的残余变化形态, 从残态图上看, 与前面计算结果是一致的。

表 1 1、3 两点的检测值

Table 1 Measured deflection value of point 1 and 3

w1 (mm)	0.0	0.13	0.19	0.32	0.45	0.58	0.65	0.78	0.84
w3 (mm)	0.0	0.13	0.19	0.32	0.46	0.59	0.65	0.71	0.78

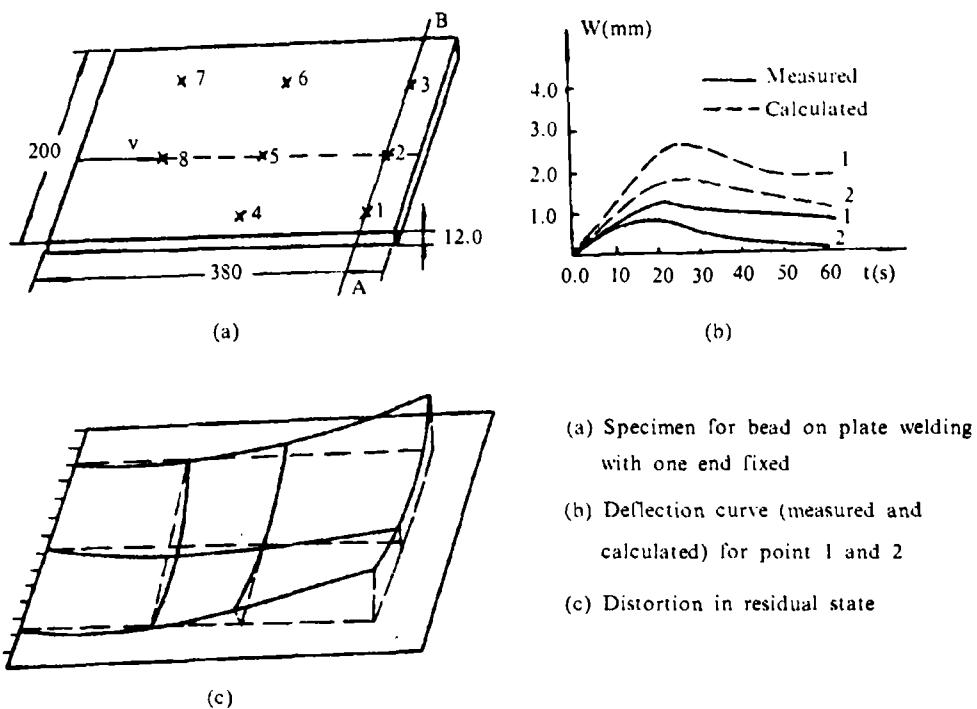


图 4 一端固定的平板堆焊的变形实测

Fig.4 Measured distortion during bead-on-plate welding with one end fixed

## 2.2 纵向拘束的平板堆焊

图 5(a) 为纵向拘束的平板堆焊示意图。1、2、3 三点, 4、5、6 三点的动态挠度线对应相似。因此纵向拘束条件下, 可以认为纵向收缩引起的平面外变形被限制, 而变形主要是由横向收缩在厚度方向的分布不均造成的角变形。图 5(b) 为 6 点的动态挠度曲线与计算值的比较, 可以看出二者吻合程度相当好。

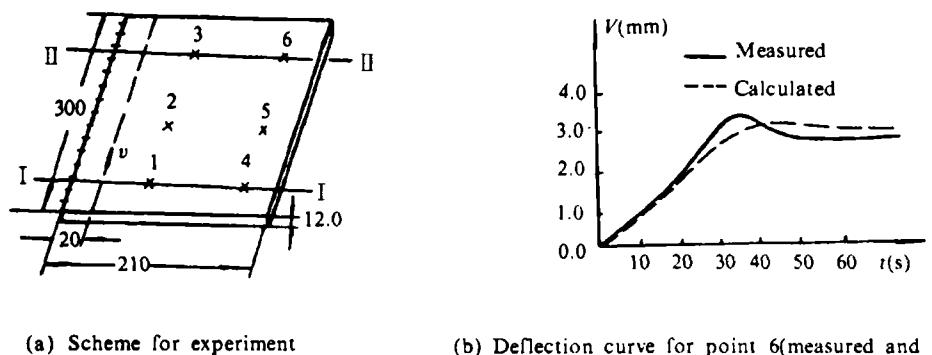


图5 纵向拘束平板堆焊的变形与实测

Fig.5 Measured distortion during bead-on-plate welding with longitudinal restraint

### 3 结 论

(1) 引入虚元的热弹性板元方法对平板堆焊的平面外变形机制的分析是可行的,从量级与变化动态趋势来看,分析结果与试验结果相吻合。

(2) 一端固定平板堆焊的变形是同时受横向收缩和纵向收缩的影响。这种相互作用的结果造成的残态是焊缝两侧以焊缝为中心下挠,同时挠度在焊缝长度上逐渐增大。

(3) 纵向拘束的平板堆焊的变形是由于板厚方向上横向收缩不均而引起的角变形,角变形的大小沿焊缝方向有增长的趋势。

(4) 两端固定不仅拘束了板的纵向弯曲,同时对靠近两端的各横向截面的角变形也起到一定的拘束作用,两端固定的平板堆焊能够降低整个板件的挠度。

(5) 边界拘束条件对平板堆焊的面外变形形态及量值有很大的影响。

(1992年7月20日收到初稿)

### 参 考 文 献

- 1 Masubichi著, 张伟昌译, 焊接结构分析, 北京: 机械工业出版社, 1985.
- 2 马胜远, 平板堆焊时平面外变形的动态模拟, 西安交通大学硕士论文, 1988.
- 3 麻宁雄, 平板弯曲有限元法在研究拘束条件与焊接角变形中的应用, 第六届全国焊接学术会议论文集, H-XV III - 004-09 P223-227, 1990, 西安.
- 4 崔培祥, 平板堆焊时面外变形的形态及产生机制, 西安交通大学硕士论文, 1992.

**Form and mechanism of formation of out-of-plane distortion  
during bead-on-plate welding**

Tang Muyao , Cui Peixiang and Pei Yi

(Xi'an Jiaotong University)

**Abstract** In present paper, the form and mechanism of formation of out-of-plane distortion during bead-on-plate welding was studied by thermal elastic analysis with introduction of dummy element and experiment. Calculation result is fairly well agreed with experiment both in tendency and quantity order. Analysis shows that the out-of-plane distortion of weld fixed at one end is produced by angular distortion caused by transverse shrinkage and longitudinal bending caused by longitudinal contraction jointly, and that of longitudinal restrained weld is mainly produced by angular distortion caused by transverse shrinkage. For the weld fixed at both end, the deflection value of the whole plate is cut down. It is because that both transverse shrinkage and longitudinal contraction are restrained to a certain extent.

**Key words** dummy element; bead-on-plate welding; out-of-plane distortion; finite element analysis