

## 电弧熔丝增材随动锤击精整-消应力过程对装置 结构变形的影响

蒋立鹤<sup>1,2,3</sup>, 刘仁培<sup>1</sup>, 蒋 倩<sup>2,3</sup>

(1. 南京航空航天大学 材料科学与技术学院, 江苏 南京 210016;

2. 江苏省船舶动力系统零件先进制造工程技术研究中心, 江苏 南京 211121;

3. 南京中远海运船舶设备配件有限公司, 江苏 南京 211121)

**摘要:** 电弧熔丝增材随动锤击精整-消应力过程对增材装置整体结构变形存在一定的影响, 为保证增材设备的使用精度, 分析了不同锤击气压、锤击位置对设备结构变形的影响。解析计算出锤击气压与锤击速度的关系, 建立了大型电弧增材设备框架结构承载有限元分析模型, 分析、确立了锤击过程中横梁受到的锤击反力, 并根据工作位置、锤击气压的不同设计了 15 种工况, 对各工况进行了瞬态动力学分析。分析结果显示, 在各锤击气压下, 锤击对横梁重力方向的变形影响最大, 最大变形区域出现在横梁中央部位。该研究为设备后续的优化提供了依据, 具有一定的工程应用价值。

**关键词:** 电弧熔丝增材制造; 随动锤击; 锤击气压; 梁结构; 瞬态动力学

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.12.016

**中图分类号:** TG439.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2022) 12-0109-07

## Influence of wire-arc additive on device structure deformation follow-up hammering finishing-stress relief process

Jiang Lihe<sup>1,2,3</sup>, Liu Renpei<sup>1</sup>, Jiang Qian<sup>2,3</sup>

(1. College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Jiangsu Engineering Research Center for Advanced Manufacturing of Ship Power System Components, Nanjing 211121, China;

3. COSCO SHIPPING Marine Equipment & Spares (Nanjing) Co., Ltd., Nanjing 211121, China)

**Abstract:** The wire-arc additive follow-up hammering finishing-stress relief process has a crucial influence on the overall structural deformation of additive device. Therefore, in order to ensure the use accuracy of additive device, the influences of different hammering air pressures and hammering positions on the deformation of device structure were analyzed. Then, the relationship between hammering air pressure and hammering velocity was calculated analytically, and the finite element analysis model for the bearing capacity of frame-beam structure for large wire-arc additive device was established to analyze and determine the hammering reaction force on the beam during the hammering process. Furthermore, based on the different working positions and hammering air pressures, fifteen working conditions were designed, and the transient dynamic analysis was carried out for each working condition. The analysis results show that under each hammering air pressure, the impact of hammering on the deformation of beam along the gravity direction is the greatest, and the largest deformation region appears in the center of beam. Thus, the research provides a basis for the subsequent optimization of device and has certain engineering application value.

**Key words:** wire-arc additive manufacture; follow-up hammering; hammering pressure; beam structure; transient dynamics

电弧熔丝增材制造技术因具有硬件环境开放、效率高、成本低等优势而被广泛应用于构件的修复

及表面强化等方面<sup>[1-5]</sup>。在增材过程中局部快速高热输入易生成高的残余应力而最终产生热裂<sup>[6-10]</sup>。田锡唐等<sup>[11]</sup>提出了一种新型随焊锤击工艺, 依靠强制塑性变形产生的残余拉应力可有效地降低焊接的热裂纹倾向, 明显细化焊接接头部位的晶粒, 改善焊接接头的显微组织。但是锤击易引起增材设备运动部件的结构振动变形, 进而影响增材的水平精度及焊缝高度, 其中, 锤击反力频率是振动的主要激

收稿日期: 2022-01-13; 修订日期: 2022-04-21

基金项目: 江苏省工程技术研究中心项目 (BM2021214)

作者简介: 蒋立鹤 (1991-), 男, 硕士研究生, 工程师

E-mail: 516032103@qq.com

通信作者: 刘仁培 (1962-), 男, 硕士, 教授

E-mail: lrp\_msc@nuaa.edu.cn

励因素。因此,正确理解固定锤击装置的横梁变形与锤击参数的响应关系,对增材设备部件的排布及结构形式优化具有重要意义。

本文借助有限元法对电弧熔丝增材随动锤击变形及结构震动过程分别进行了建模,计算获取了锤击对横梁产生的反力,并将其加载于整个横梁,而后进行了不同的锤击气压及锤击位置下横梁变形情况的瞬态动力学分析。相关结论为增材设备的后续优化提供了重要依据。

## 1 有限元模型的建立

上述随动锤击过程分析及横梁瞬态动力学分析分别涉及到弹塑性有限元和弹性有限元两种建模。首先进行随动锤击过程分析以获取锤击反力,这是开展横梁瞬态动力学分析的先决条件。

### 1.1 随动锤击模型的建立

如图 1 所示,电弧增材的关键横梁主要由气动锤、焊枪、横梁这 3 部分组成。在电弧熔丝增材随动锤击精整-消应力过程中,横梁所受载荷主要由各部件的重力及气动锤的锤击反力组成。其中,气动锤的锤击反力由锤头气压决定。

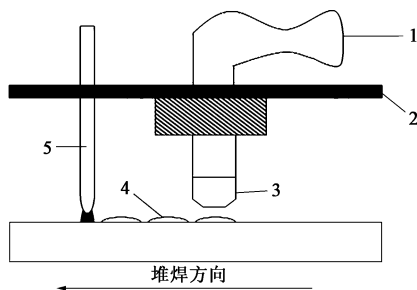


图 1 简化横梁装配模型

1. 气动锤 2. 横梁 3. 锤头 4. 焊道 5. 焊枪

Fig. 1 Simplified assembly model of beam

在实际锤击过程中,接触面的形状和锤头的质量、速度对锤击效果存在较大的影响。因此,本文在几何建模时,锤头的几何尺寸与实际锤头的几何尺寸保持一致,可更加真实地反应出锤击过程的实际情况。本文中的锤击模型基于 ABAQUS 6.13 进行建模,增材平板与锤头的单元网格类型选择 C3D8R 八节点六面体单元。图 2 为随焊锤击过程中锤头与平板的有限元模型。

锤击过程中的锤头选用刚性体,增材试板的材料性能参数根据实际使用的 45 钢的材料参数进行赋值。增材试板底部存在刚性的支撑平台,因此,在

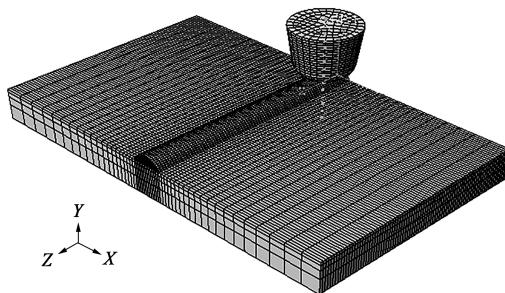


图 2 随焊锤击有限元模型

Fig. 2 Finite element model of hammering with welding

模拟过程中对平板底部节点施加 Y 向约束,同时对试板底面的数个节点施加全约束,以防止试板在锤击过程中发生整体刚性移动。

本文研究的大型电弧增材设备通过施加气压来控制锤击速度。因此,采用通过对锤头定义垂直于试板向下的初始速度来模拟锤击过程。

### 1.2 横梁有限元模型的建立

为研究电弧熔丝增材随动锤击精整-消应力过程对横梁结构变形的影响,需要对关键横梁建立有限元模型,分析其所受载荷。如图 3 所示,基于 MSC. MARC 2017 建立一个长度为 2800 mm、宽度为 150 mm、高度为 250 mm 的横梁模型。设定单元网格类型为四面体,最小单元尺寸为 0.2 mm,弦偏差为 0.1 mm,进行网格划分。

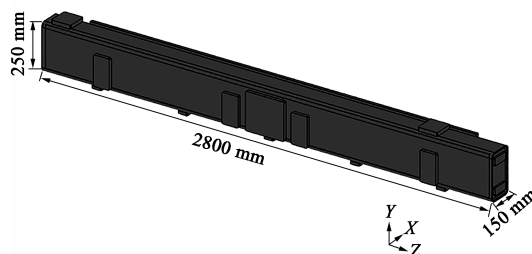


图 3 横梁有限元模型

Fig. 3 Finite element model of beam

#### (1) 材料性能参数的定义

横梁材料选择 Q235 普通碳素结构钢,定义材料密度为  $7.85 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,杨氏模量为  $2.1 \times 10^9 \text{ Pa}$ ,泊松比为 0.3。

#### (2) 边界条件的设置

位移边界条件中,无约束将会使平板模型产生刚性位移,进而导致计算不收敛,无法完成模拟,所以需对其施加约束,同时不能过度约束,否则将会影响模型变形的误差,导致模拟结果的失真。

通过分析横梁装配模型,可知横梁下平面左右两端由其他部件进行了固定,被限制了 6 个自由度。

因此, 根据实际约束情况, 在横梁模型上施加相应的位移约束, 如图 4 所示。

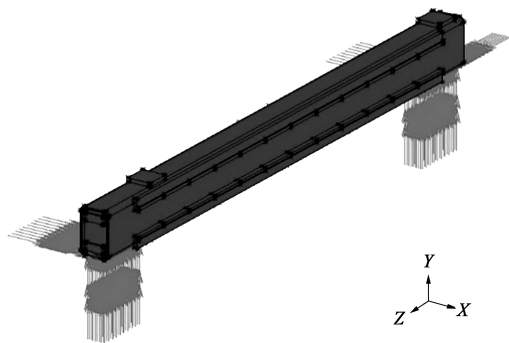


图 4 横梁模型约束示意图

Fig. 4 Schematic diagram of constraints on beam model

### (3) 载荷的施加

对于本文所研究的大型电弧增材设备横梁结构而言, 在锤击精整-消应力过程中, 其所受载荷主要为设备重力载荷及锤击载荷。其中, 重力载荷可以由设备质量计算得到, 而锤击载荷需要通过随动锤击模型对其进行计算来获取。

设备重力载荷的主要来源为横梁装配结构、横梁自重、焊枪及锤击设备的自重。其中, 横梁装配结构由横梁与防护罩、转接盒、溜板、减速机等零件相装配。各部件的总质量约为 404.81 kg, 其中直接施加于横梁、对横梁产生载荷的部件质量约为 134.73 kg, 且分布于如图 5 所示的横梁的 1~5 号平面, 共计 5 个接触面上。取重力加速度  $g = 9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ , 则 1~5 号平面所受载荷分别约为 113.7、122.1、205.7、104.4 和 113.7 N, 将各平面所受载荷施加于横梁有限元模型的相应接触面上。

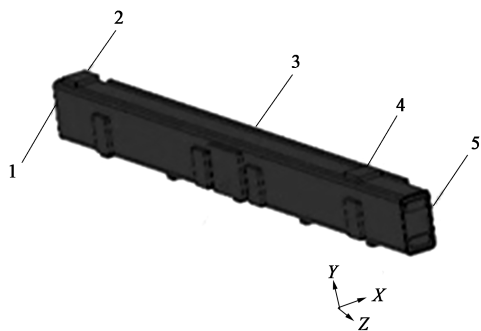


图 5 横梁承载平面位置

Fig. 5 Positions of load planes on beam

已知横梁的体积  $V_m = 28653 \text{ cm}^3$ , 密度  $\rho = 7.85 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 可得其质量为 224.93 kg。取  $g = 9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ , 计算可得横梁自重产生的载荷约为 2204.33 N, 并代入横梁有限元模型。

焊枪及锤击设备的自重根据焊枪及锤击模型提取计算。根据实际装配情况, 将焊枪设备分为焊枪结构与焊枪传动结构两部分, 且焊枪结构的质量为 9.87 kg, 焊枪传动结构的质量为 57.56 kg, 取  $g = 9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ , 计算可得焊枪设备对横梁的载荷为 660.81 N。锤击设备自重分为锤击结构与锤击传动结构两部分, 其中锤击结构的质量为 38.99 kg, 锤击传动结构的质量为 57.56 kg, 取  $g = 9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ , 可得锤击设备自重产生的载荷约为 946.19 N, 分别将其施加于横梁有限元模型的相应接触面上。

锤击载荷借助随动锤击模型计算、获取并施加于有限元模型, 具体的计算获取过程如下文所示。

## 2 锤击载荷计算

锤击载荷即锤击过程中横梁受到的锤击反力, 其来自锤头锤击增材试板时的反作用力。

由气体做功及能量守恒定理可知:

$$W = P \times S \times H \quad (1)$$

$$V = \sqrt{\left( \frac{2W - kH^2}{m} \right)} \quad (2)$$

式中:  $W$  为气动锤气压做功;  $V$  为锤头速度;  $P$  为锤击设备工作气压;  $S$  为锤头截面积, 取为  $113 \text{ mm}^2$ ;  $H$  为锤头距离增材试板的高度, 取为  $5 \text{ mm}$ ;  $m$  为锤头质量, 为  $0.24 \text{ kg}$ ;  $k$  为弹簧弹性系数, 取为  $0.5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

根据计算, 不同气压下锤头的速度如表 1 所示。

表 1 3 种气压下的锤头速度

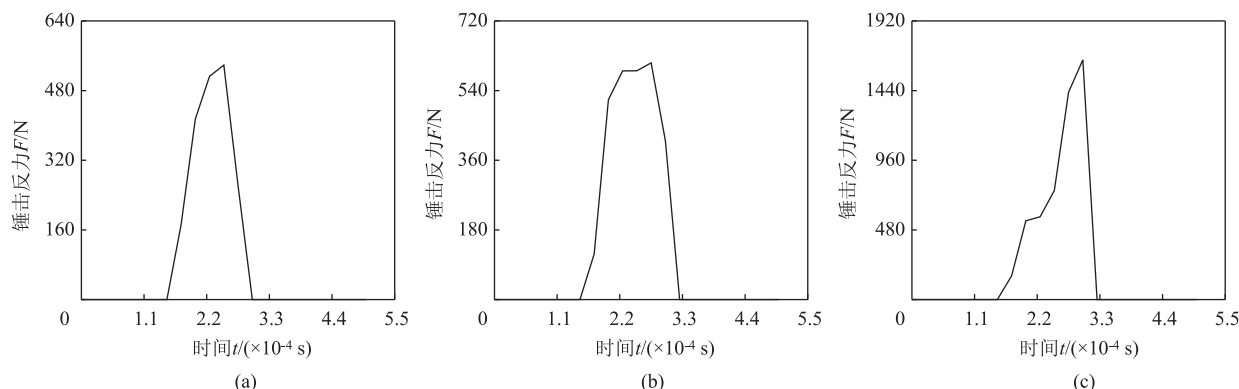
Table 1 Speeds of hammer head under three air pressures

气压/MPa	锤头速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
0.1	6.86
0.3	11.88
0.5	15.34

针对不同锤头速度的锤击过程, 在 ABAQUS 中利用随动锤击模型进行有限元模拟, 获取锤击反力随时间的变化情况。根据模拟结果, 在  $650 \text{ }^{\circ}\text{C}$  的工作温度和 0.1、0.3 和 0.5 MPa 的气压下, 锤头受到的锤击反力数据如图 6 所示, 将获得的各气压下的锤击反力以过程量的形式施加于横梁有限元模型。

## 3 瞬态动力学分析

由于本文研究的是锤击消应力对装置结构变形

图 6 温度为 650 °C 时 3 种气压下锤击反力的  $F-t$  折线图

(a) 0.1 MPa (b) 0.3 MPa (c) 0.5 MPa

Fig. 6  $F-t$  line charts of hammer reaction forces under three air pressures at temperature of 650 °C

的影响,因此,需要对前文基于 MSC. MARC 建立的横梁有限元模型进行力学分析,此处选择 MSC. MARC 动力学分析模块完成此部分工作。常见的力学分析有静力学分析与动力学分析,此处,在设备梁结构的工作过程中,焊枪和锤击设备的动载荷属于时变载荷,无法使用静力学分析,故本文对锤击消应力过程采取瞬态动力学分析。

瞬态动力学分析,也可以称作时间历程分析,在机械结构的冲击仿真分析领域的应用较为广泛<sup>[12-13]</sup>,其主要用于分析结构对随时间变化的载荷的响应<sup>[14]</sup>。它的输入数据是作为时间函数的载荷,可以是静载荷、瞬态载荷和简谐载荷的随意组合。输出数据是随时间变化的位移及其他导出量,如:应变、应力及力。

本文利用有限元软件进行瞬态动力学分析,迭代方法选择全牛顿-拉夫森方法。通过模拟计算,在后处理模块中读取各工步的运算结果,进而可详细分析梁结构的各向位移分布云图,得知载荷变化对梁结构形变的具体影响。

### 3.1 设备工作过程的简化

焊枪与锤击设备在横梁导轨上的移动是一个较为复杂的过程,其运动速度不同,动载荷作用位置的变化速率也不同。但焊枪与锤击设备的运动速度对装置变形情况无明显影响,故此处对其运动过程进行简化,即不考虑设备在横梁上的移动速度,仅考虑其移动到各个部位时的实际载荷情况,将随动锤击过程产生的动载荷视为固定位置、加载情况随时间变化的动载荷。根据实际情况,将横梁导轨平均划分为 6 段,分段编号情况如图 7 所示。由分析可知,当焊枪与锤击设备位于横梁两侧及横梁中央时,横梁受载荷的影响情况具有较高的代表性,因



图 7 横梁导轨分段编号示意图

Fig. 7 Schematic diagram of segmentation numbering for beam guide rail

此,设计了如表 2 所示的 5 组固定位置,在后文中对焊枪与锤击设备在这 5 组位置上工作时横梁的变形情况进行模拟分析。

表 2 设备位置设置

Table 2 Setting of equipment locations

序号	锤击设备位置	焊枪设备位置
1	①	②
2	②	③
3	③	④
4	④	⑤
5	⑤	⑥

### 3.2 工况的设置

由于本文主要研究的是锤击气压与锤击位置对横梁变形情况的影响,故此处选择 0.1、0.3 与 0.5 MPa 这 3 种锤击气压及表 2 中的 5 组不同的锤击位置进行动力学瞬态模拟。所以,根据锤击气压和锤击位置的不同,设计如表 3 所示的 15 种工况,并对各工况进行瞬态动力学分析,得到瞬态动力学位移云图。

### 3.3 瞬态动力学位移云图分析

在 MSC. MARC 后处理模块中,对整个工作过程中梁结构位移的分布云图进行读取分析。本文对编号 1~15 共计 15 种工况的  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  的 3 个方向的位移云图进行了分析。

表 3 各工况参数设置

工况	锤击设备位置	锤击气压/MPa
1	①	0.1
2	②	0.1
3	③	0.1
4	④	0.1
5	⑤	0.1
6	①	0.3
7	②	0.3
8	③	0.3
9	④	0.3
10	⑤	0.3
11	①	0.5
12	②	0.5
13	③	0.5
14	④	0.5
15	⑤	0.5

3.3.1 X 向与 Z 向位移

分析其瞬态位移云图，发现横梁沿 X 向和 Z 向的最大变形量相对于 Y 向（重力方向）的变形量较小，选取工况 1~5 进行研究，结果如图 8 所示。X 向和 Z 向的变形量仅为 Y 向变形量的 1/5 左右，对装置的影响较小，故不将其作为主要研究对象。因此，选择 Y 向位移为主要研究对象，对不同锤击气压和锤击位置下横梁的变形情况进行分析。

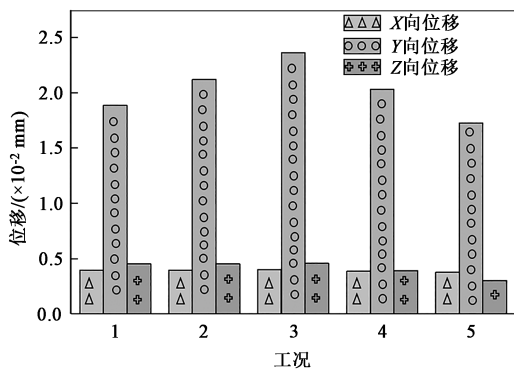


图 8 各工况下的位移（绝对值）情况

Fig. 8 Displacement (absolute value) conditions in each working condition

3.3.2 Y 向（重力方向）位移

分析各工况下的瞬态位移云图，可知在无锤击的情况下，设备在各位置下的 Y 向位移恒定，最小 Y 向位移即为最大 Y 向位移。在各锤击气压下，横梁 Y 向位移随锤击频率发生周期性的变化，最大值

即为无锤击时该位置的 Y 向位移，最小值如图 9 所示，且随锤击位置的变化而变化。分析可知，锤击气压越大，梁结构 Y 向最小位移的绝对值越小，即梁结构 Y 向形变的波动性越大，这是由于锤击反力与重力作用方向相反，抵消了一部分横梁重力引起的 Y 向位移所导致的。

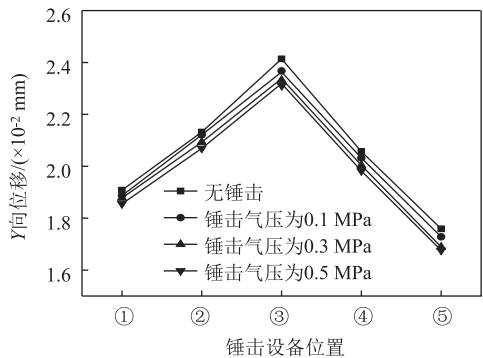


图 9 各设备位置下梁结构 Y 向最小位移（绝对值）情况

Fig. 9 Minimum displacement (absolute value) conditions in Y-direction of beam structure at each equipment position

选择工况 6、8、10 来研究锤击位置对横梁变形情况的影响；选择工况 3、8、13 来研究锤击气压对横梁变形情况的影响，其 Y 向位移云图如图 10 所示。

对 6、8、10 这 3 种工况下的 Y 向位移云图进行分析，当气动锤由 +Z 轴向 -Z 轴移动时，横梁的形变情况也随之发生变化，其最大形变区域同样由 +Z 轴向 -Z 轴移动，但始终在横梁中部附近移动，移动距离较气动锤的移动距离更小。

对 3、8、13 这 3 种工况下的 Y 向位移云图进行分析，当锤击气压由 0.1 MPa 增至 0.5 MPa 的过程中，横梁 Y 向变形量的变化程度也不断增大，最大变形区域始终在横梁中央区域。

4 结论

(1) 当锤击位置一定时，气动锤的锤击气压越大，其对横梁造成的反力越大，即横梁 Y 向变形量的波动越大；当锤击气压一定时，气动锤的锤击位置越靠近横梁中央，横梁变形量越大，反之，横梁变形量越小。

(2) 锤击力对横梁 X、Y、Z 这 3 个方向的形变均存在影响，且均随锤击气压的增大而增大，但对 Y 向（重力方向）形变的影响程度始终最大。

(3) 横梁的最大变形区域出现在横梁的中央部

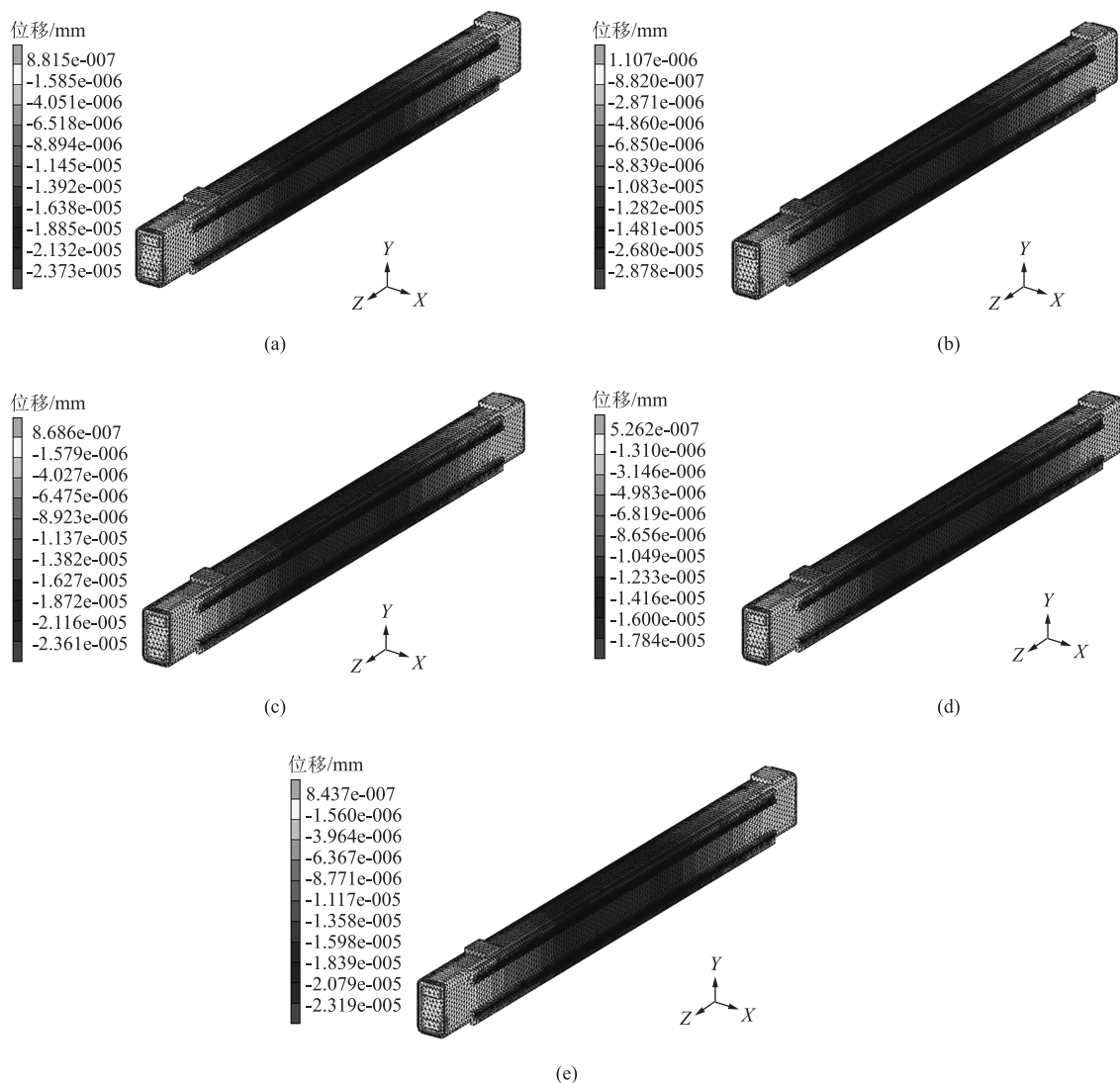


图 10 各工况下横梁的 Y 向位移云图

(a) 工况 3 (b) 工况 6 (c) 工况 8 (d) 工况 10 (e) 工况 13

Fig. 10 Cloud diagrams of Y-direction displacement for beam under each working condition

(a) Condition 3 (b) Condition 6 (c) Condition 8 (d) Condition 10 (e) Condition 13

位。为避免因横梁变形过大导致设备精度变差，在后续优化设计阶段应综合考虑，尽量消除其对设备精度的影响。

#### 参考文献：

- [1] 王桂兰, 符友恒, 梁立业, 等. 电弧微铸轧复合增材新方法制造高强度钢零件 [J]. 热加工工艺, 2015, 44 (13): 24-27.  
Wang G L, Fu Y H, Liang L Y, et al. New hybrid additive manufacturing method for forming high strength parts by weld-rolling [J]. Hot Working Technology, 2015, 44 (13): 24-27.
- [2] 何仲赞, 洪军, 卢秉恒, 等. 金属电弧喷涂成型快速制模关键技术与应用 [J]. 塑性工程学报, 2008, 15 (2): 65-69.  
He Z Y, Hong J, Lu B H, et al. Key technologies and application of metal arc spray tooling [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2008, 15 (2): 65-69.
- [3] 卢顺, 周杰, 李梦瑶, 等. 双金属层堆焊法制备铸钢基体大型锻模 [J]. 金属热处理, 2013, 38 (10): 58-61.  
Lu S, Zhou J, Li M Y, et al. Large forging die manufactured with dual hardfacing metal layer on cast steel matrix [J]. Heat Treatment of Metals, 2013, 38 (10): 58-61.
- [4] Fuhrich T, Berger P, Hügel H. Effect in laser deep penetration welding of steel [J]. Journal of Laser Applications, 2001, 13: 178-186.
- [5] 李权, 王福德, 王国庆, 等. 航空航天轻质金属材料电弧熔丝增材制造技术 [J]. 航空制造技术, 2018, 61 (3): 74-82, 89.  
Li Q, Wang F D, Wang G Q, et al. Wire and arc additive manufacturing of lightweight metal components in aeronautics and astronautics [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61 (3): 74-82, 89.

(下转第 121 页)