

文章编号:1673-0062(2018)02-0087-05

## 基于 ANSYS 核用管道焊接工装的有限元分析

张攀<sup>1</sup>, 王湘江<sup>1,2\*</sup>

(1.南华大学 机械工程学院,湖南 衡阳 421001;2.南华大学核设施应急安全作业技术与装备湖南省重点实验室,湖南 衡阳 421001)

**摘要:**管道焊接工装是根据研究需要设计的一种试验设备,主要完成核电安装焊接过程中对组队管道实现 0~90°的翻转和 0~360°的旋转.为校核其工装设备的强度及变形对激光热丝焊焦深的影响,将其翻转和旋转过程简化为 7 个工况,利用有限元分析软件得到该管道焊接工装设备的应力值与变形值,计算并分析强度及变形是否符合要求,得到的计算结果为同类试验激光焊接工装设备的设计提供了有效的设计指导.

**关键词:**管道焊接工装设备;有限元分析;ANSYS;强度与变形

**中图分类号:**TG316      **文献标志码:**A

## FEA Analysis of Nuclear Pipe Welding Tool Based on ANSYS

ZHANG Pan<sup>1</sup>, WANG Xiang-jiang<sup>1,2\*</sup>

(1.School of Mechanical Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;  
2.Hunan Provincial Key Laboratory of Emergency Safety Technology and Equipment for Nuclear Facilities, Hengyang, Hunan 421001, China)

**Abstract:** The pipeline welding tooling is a kind of test equipment designed according to the research needs. It mainly achieves 0 ~ 90 degree turning and 0 ~ 360 degree rotation of the team pipe in the process of nuclear power installation and welding. In order to check the strength of the tooling equipment and the effect of deformation on the depth of focus of the laser wire, the turning and rotating process is simplified to seven working conditions. The Stress value and deformation value of the welding equipment are obtained by finite element analysis software. Calculate and analyze whether the strength and deformation are in conformity with the requirements. The calculation results provide an effective design guide for the design of similar test for laser welding equipment.

**key words:** pipe welding tooling equipment; FEA; ANSYS; strength and deformation

收稿日期:2018-02-12

作者简介:张攀(1993-),男,土家族,硕士研究生,主要从事与机械工程方面的研究.E-mail:1752122688@qq.com.

\* 通讯作者:王湘江,E-mail:wangxiangjiang72@163.com

## 0 前言

针对第三代核电站反应堆 AP1000 主管道焊接工艺,具有壁厚大、焊接空间狭窄、全位置焊接和高质量焊缝成形要求等特点<sup>[1-3]</sup>,开发适用于三代核电站主管道激光热丝窄间隙自动焊技术与装备,焊接辅助工装属于焊接相关的周边辅助设备,起配合和辅助焊接的作用.通过翻转功能可以使管道工件处于最佳的焊接位置,回转功能可以完成管道工件环缝自动焊接,对于不同直径管道工件所需焊接速度不同,回转速度是变频无级可调的<sup>[4-6]</sup>.本次设计的与主管道焊接相适应的专用焊接辅助工装主要用于直径小于 1 000 mm,重量不大于 2 000 kg 范围内的管道工件焊缝位置的变位,以确保窄间隙激光热丝焊接相关工艺参数开发验证、激光热丝返修焊接工艺研究及相关焊接实验顺利实施,从而达到确保和稳定焊接接头质量、减轻研究测试人员的劳动强度以及改善劳动条件的作用.

该管道焊接工装设备需要通过旋转并将工件翻转到适当的工作位置.由于工件在旋转和翻转时没有固定的顺序,工装设备的负载是不固定的,从而工装设备产生的应力与变形随着工件以及工作位置的不同而变化.本文基于 ANSYS workbench 软件,对窄间隙激光热丝焊接工装设备进行强度和变形分析,找出应力集中和变形较大的位置,得到工装设备的应力和变形规律,计算焊接设备的强度及对激光热丝焊焦深的影响,为同类激光焊接工装设备的可靠性设计与分析提供了理论指导<sup>[7]</sup>.

## 1 管道激光焊接工装设备强度校核的理论方法

管道焊接工装设备在翻转和旋转时,主要承

受自身支撑管道重力和组队管道重力.由于管道的倾覆过程是逐步操作的,所以这是一个基于载荷条件的线性静力学分析,用线性静力学分析法分析工装设备在给定静荷载作用下的响应,其力的方程为<sup>[8]</sup>:

$$[K]\{X\} = F \quad (1)$$

其中假设条件为:[ $K$ ]矩阵必须是连续的,相应的材料必须满足线弹性理论和小变形理论; $\{F\}$ 矩阵是静态载荷,不考虑时变载荷,不考虑如质量和阻尼等惯性影响.对于分析结果,总体变形量为<sup>[8]</sup>:

$$U_{\text{total}} = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2} \quad (2)$$

式中: $U_x$ 、 $U_y$ 、 $U_z$ 分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的变形.管道焊接工装选用低碳钢材料,根据第四强度理论,其等效应力为<sup>[8]</sup>:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}{2}} \quad (3)$$

式中: $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  分别为三向主应力.

## 2 管道激光焊接工装几何模型及翻转工况确定

设计的该管道焊接工装设备主要技术指标要求为外形尺寸:1 375 mm×1 425 mm×1 690 mm (高);工装材质:钢件(碳素结构钢 Q235);高度调整范围:1 015~1 475 mm;基本承载能力:2 000 kg;管道直径适应尺寸:Φ400~1 000 mm;工装高度调节行程:460 mm;焊接工位:2G、5G 和 6G;翻转角度:0~90°;翻转速度:0.3~1 r/min;旋转角度:0~360°;旋转速度:0.5~2 r/min;组对方式:人工组对,尽量采用标准件,便于加工制造.管道焊接工装设备在翻转和旋转位置的结构位置如图 1 所示.

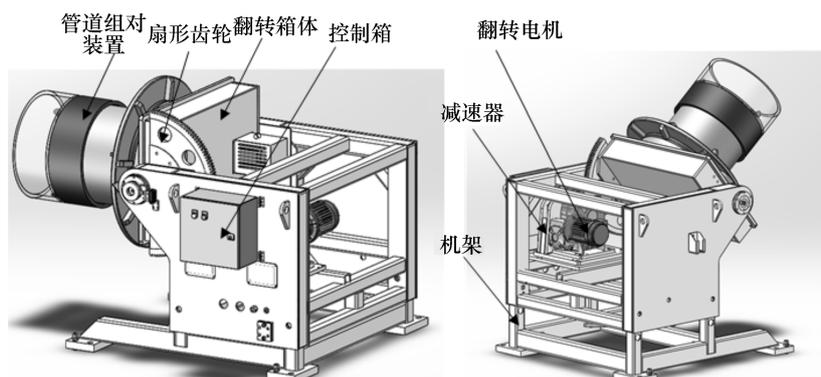


图 1 三维实体核用管道焊接工装结构位置示意图

Fig.1 Three-dimensional solid nuclear pipe welding tool structure location diagram

利用 SolidWorks 三维建模软件对管道焊接工装结构进行建模.工装结构材料选用普通碳素钢 Q235,其力学性能如表 1 所示.根据管道激光焊接工装设备的实际情况,将管道焊接工装从水平位置到翻转 90°位置分为七个工况,分别校核管道焊接工装的结构强度,从而达到间接校核管道焊接工装在翻转过程中工装强度的目的.七种

工况的位置如图 2 所示<sup>[9-12]</sup>.

表 1 碳素钢 Q235 力学性能

Table 1 Mechanical Properties of carbon steel Q235

材料	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /GPa	泊松比
Q235 低碳钢	235	375~460	200~210	0.3

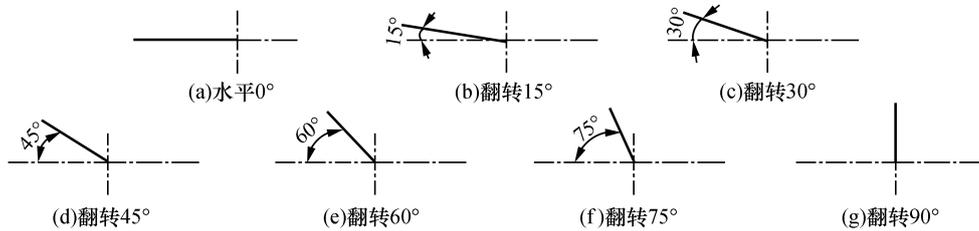


图 2 七种工况位置

Fig.2 Seven working condition positions

### 3 管道激光热丝焊接及工装设备的静态分析

#### 3.1 激光热丝焊接工艺参数

##### 1) 输出功率

采用激光热丝焊接时,总的输出功率等于激光输出功率和焊丝加热功率之和,其中对焊丝进行加热能够大大降低焊接时焊丝对激光热源的依赖,从而大大提高激光热丝焊接的效率,缩减成本.焊接管道焦点处能量吸收的多少取决于激光输出功率的大小和辐照时间的长短,在能量分布、焦点位置等参数设置相同的情况下,增加激光功率可以提高焊接速度、加大焊缝深宽比,并且随着激光输出功率的增加,工件表面吸收的能量就越多,表面的温度也就越高.材料温度越高对激光的吸收率也就越高<sup>[13]</sup>,因此在一定程度上也能降低焊接过程中对激光输出功率的需求.

##### 2) 透镜焦距

激光焊接时,激光束一般采用会聚的方式来聚焦.聚焦光斑的大小与焦距有关,焦距越大,焊接时在工件表面所形成的光斑就越大,焦深也随之增加,但是焦距越大,焦点处功率密度就越小.对于需要产生较大熔深的焊接,在设置焦距参数一定的情况下,需要提高激光的焊接功率.

##### 3) 送丝参数

激光热丝焊接的送丝参数包括送丝的方向、角度、落点、速度及焊丝加热长度等.送丝方向有前送丝和后送丝两种方式,在焊接过程中,一般采用前送丝的方式,原因是因为焊接过程中进

行预热的焊丝能在激光的运动作用下相当与一牵引力带动焊丝的牵引,使得焊丝运动更平稳,有利于焊接的填丝.送丝角度  $\theta$  指的是焊丝与激光束之间的夹角,一般  $\theta$  取值范围为  $30^\circ \sim 70^\circ$ <sup>[14]</sup>.送丝落点一般距离激光焦点距离为  $2 \sim 4$  mm,送丝速度由填充焊丝的金属量等于焊缝间隙的体积来计算.焊丝加热长度为焊丝送丝嘴到工件之间的距离,一般取值范围为  $10 \sim 15$  mm.

##### 4) 脉冲频率

激光脉冲频率是激光热丝焊接过程中的重要参数,只有当脉冲频率、光斑尺寸和焊接速度等参数调节到合适的范围时,焊接点的重叠率才能达到 90% 以上,从而满足焊接的基本要求.对于激光热丝焊接,在焊接速度一定时,如果脉冲频率过小,那么焊接点的重叠率达不到要求,最后形成的焊缝外观形貌会比较粗糙,如果脉冲频率过大,则焊接点的重叠率会过大,最后形成的焊缝外观易出现焊穿等焊接缺陷<sup>[15]</sup>,因此只要调节激光脉冲频率在一定的范围时才能形成良好的焊缝.

#### 3.2 分析步骤

利用 ANSYS Workbench 软件对管道焊接工装设备在静态受力条件下进行有限元分析,然后得到分析结果,其主要的分析过程及参数设置为<sup>[16]</sup>:

##### 1) 进行材料属性的定义.

2) 对约束进行分析.进给力为  $1/4$  mm 个远程位移,作用对象为外面六个紧固杆.

3) 进行网格划分,采用实体网格单元进行划分,网格划分完成后,进行网格检查并求解.

3.3 计算结果与分析

组队管道重量取 2 t(鉴于组队管道从 0° 翻转到 90° 的过程中受惯性载荷和不均衡载荷影响,在组队管道原重量的基础上增加 1.5 倍的安全余量),并且研究的重点为管道工装夹具紧固杆的强度及变形是否能满足要求,所以无须考虑工装机构自身的应力应变情况<sup>[17]</sup>.为简化模型、提高计算效率,将组队管道所受的力用加载在其质心上的远程位移代替,来分析工装的应力应变情况.七种工况位置的应力应变值如表 2 所示,其中翻转 0° 到 90° 时,夹紧固定杆的应力应变如图 3 所示.

表 2 夹紧固定杆七种工况的应力应变情况

Table 2 Clamping rod in seven conditions of stress and strain conditions

工况	工装最大等效力 /MPa	工装最大变形 /mm
水平 0°	151.98	0.304 4
翻转 15°	153.67	0.306 7
翻转 30°	150.13	0.305 1
翻转 45°	154.69	0.302 7
翻转 60°	144.93	0.306 8
翻转 75°	155.82	0.304 5
翻转 90°	148.71	0.305 7

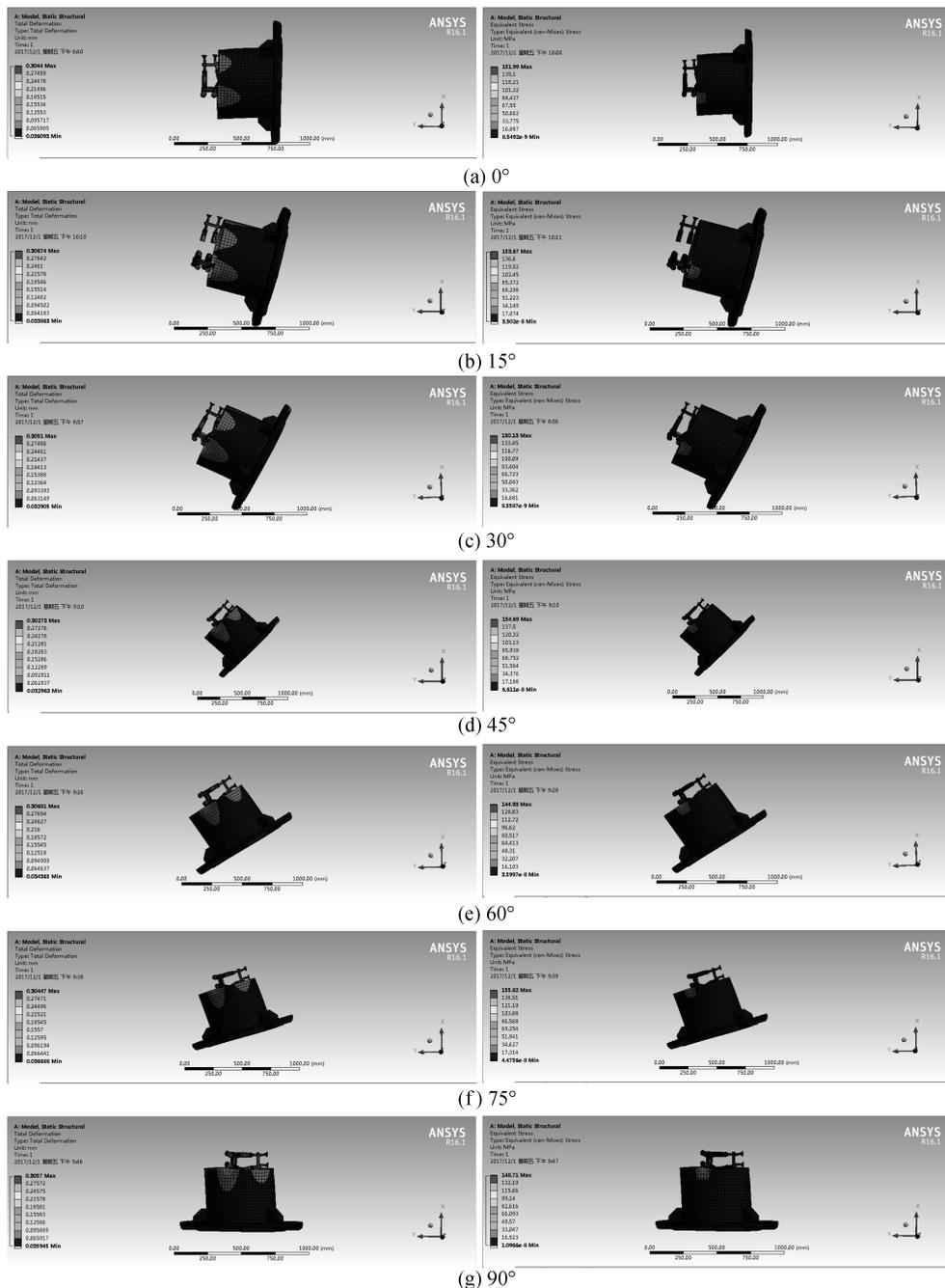


图 3 所示翻转 0° 到 90° 时,夹紧固定杆的应力应变情况

Fig.3 The clamping rod stress and strain conditions when the flip is 0° to 90°

由以上分析可知,管道工装夹紧固定杆的最大等效应力和最大变形在翻转角度从 $0^{\circ}$ 到 $90^{\circ}$ 时而逐渐发生变化.在翻转过程中,最大等效应力出现在 $15^{\circ}$ 和 $75^{\circ}$ 位置左右,为 $155\text{ MPa}$ ,最大变形出现在 $15^{\circ}$ 和 $75^{\circ}$ 左右的位置,为 $0.307\text{ mm}$ .其原因是因为在翻转过程中随着翻转角度的变化,承重

组队管道支架的受力方向发生改变,从而导致整个管道工装夹紧固定杆结构受力条件发生变化,其等效应力和变形逐步呈现为正弦规律,如图4.且管道工装最大变形在激光热丝焊接焦深的可调节范围内,所以无需进行补偿.

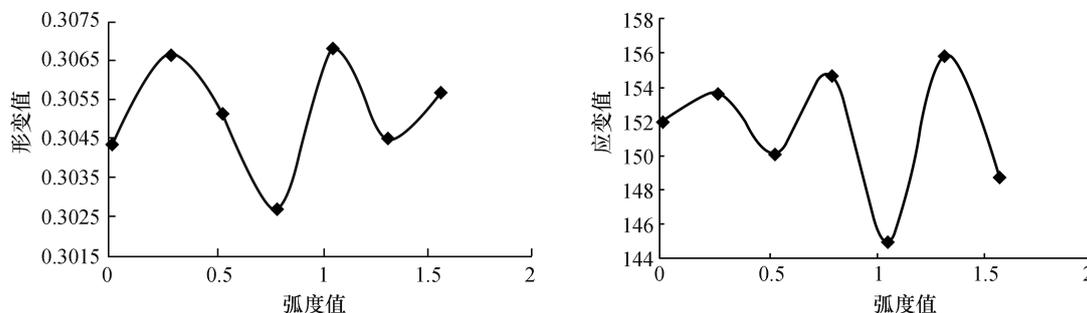


图4 管道焊接工装设备随角度变化的变形情况

Fig.4 Pipe welding tooling equipment with changes in the angle of deformation

## 4 结论

通过对管道工装设备翻转过程的有限元分析,得出以下结论:

1)管道工装设备在翻转过程中,最大等效应力发生在管道支撑杆上,最大变形发生在支撑架上,随着转角的增大,最大等效应力和最大变形逐渐变化,并呈现为正弦规律,ANSYS Workbench 软件为产品结构设计提供了重要的计算依据,也为管道焊接工装设备的生产制造和实际应用提供了理论依据.

2)管道焊接工装设备采用的是低碳钢 Q235,管道焊接工装设备翻转过程中最大等效应力为 $155\text{ MPa}$ ,安全系数为 $235/155=1.52$ ,可知该设备满足设计要求.

3)管道的变形对激光热丝焊接的焦深影响不大,无需对激光热丝焊进行补偿.该管道焊接工装的设备的设计制造,目前已成功投入实验室的焊接管道焊接的使用.

### 参考文献:

[1] 卢华兴.AP1000 核电站主管道国产化研制进展[J].上海金属,2010,32(4):29-32.  
 [2] 程艳艳.焊接过程中安全管理的注意事项研究[J].工程技术研究,2016(6):169.  
 [3] 成威,廖秋慧.不锈钢薄板焊接变形影响因素与控制方法[J].轻工机械,2015,33(1):107-110.  
 [4] 苗树林.探析先进焊接工装夹具及其在机械装备制造业中的应用[J].工程技术(文摘版),2016(12):202-203.

[5] 孙凤先,马庆贤.AP1000 主管道控制制造工艺探索[J].大型铸锻件,2010,32(4):30-32.  
 [6] 唐艳华,赵云峰,祁荣先,等.变位机用转盘轴承的载荷分析与仿真[J].机械设计,2011,28(5):10-14.  
 [7] 管锋,周传喜,易先中,等.基于 SolidWorks 三曲柄单环减速器三维建模及环板的有限元分析[J].煤矿机械,2013,34(3):265-267.  
 [8] 庞素敏.风机轮毂工装翻转强度有限元分析[J].设计与研究,2013,40(7):46-48.  
 [9] 王丰景.钢结构焊接变形与焊接应力研究[J].工程技术研究,2017(4):72-73.  
 [10] 李克安,周晟,崔荣繁,等.重型燃气轮机吊具有限元结构分析[J].湖南理工学院学报,2008,21(1):45-48.  
 [11] 王文辉,谢峰.基于有限元分析的试验台底座的优化设计[J].机械,2011,38(2):41-45.  
 [12] TANG Y H, ZHAO Y S. Mechanism design of a two DOF heavy positioner and turns-over structure[J]. Applied mechanics and materials, 2013, 271(1): 1017-1021.  
 [13] 温鹏,郑世卿,荻崎贤二,等.填充热丝激光窄间隙焊接的实验研究[J].中国激光,2011,33(11):104-109.  
 [14] PARK Y W, YU J, RHEE S. A study on the weld characteristics of 5182 aluminum alloy by Nd: YAG laser welding with filler wire for car bodies[J]. International journal of automotive technology, 2010, 11(5): 729-736.  
 [15] YAMAMOTO M, SHINOZAKI K, KADOI K. Development of hot-wire laserwelding method for lap joint of steel sheet with wide gap[J]. Quarterly journal of the Japan welding society, 2011, 29(3): 58-61.  
 [16] 吕若尘,任工昌.商用车油箱支架的有限元分析及优化[J].制造业自动化,2014,36(7):77-79.  
 [17] 武帅,郭瑞琴,李中,等.斗轮堆取料机斗轮体结构分析与优化设计[J].机械设计与制造,2014(11):5-8.

(责任编辑:扶文静)