

不锈钢激光焊接质量控制分析

刘金宏 冯嘉敏 石辰蕾 范月容 赵守智

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要: 对于密封性和装配精度要求较高的薄壁多腔室嵌套结构容器, 普通的焊接方法会造成焊接变形大, 导致装配公差超差。激光焊接热输入量小, 焊接变形小, 能够满足本项目容器精密组装的焊接要求。本文主要从激光焊接原理及试验过程分析讨论了多腔室嵌套结构容器焊接过程中的质量控制。

关键词: 激光焊接; 不锈钢; 容器; 焊接变形

0 引言

某多腔室嵌套容器采用奥氏体不锈钢材料制造, 其组装焊接后高温密封性能、尺寸公差和形位公差要求均很高, 选择合适的连接方法尤为重要。对于有高温密封性能要求的密封容器, 一般采用焊接方式进行连接, 而奥氏体不锈钢材料连接方式主要有电弧焊、埋弧焊、熔化极气体保护焊、惰性气体保护焊、电子束焊接和激光焊接。由于设备结构复杂, 组装精度与高温密封性要求较高, 经对比各种焊接方法的优缺点后, 最终选择了激光焊接。激光焊接具有加热范围小、热输入量小、焊接变形和焊接残余应力小的特点, 也可焊接难以接近的部位, 实现非接触远距离焊接, 具有很大的灵活性等优点。本文就激光焊接参数的确定进行了讨论。

1 激光焊接原理

激光焊接过程中, 激光被材料吸收, 使材料产生物态变化。根据材料吸收不同激光能量后物态的不同, 激光焊接可分为热导焊和深熔焊两种。热导焊时材料只是熔化, 焊接过程简单、熔深小、平稳; 深熔焊时材料发生了熔化、汽化和等离子化, 并有小孔效应, 过程比较复杂, 但是焊缝深宽比大。本项目产品主要采用深熔焊进行激光焊接。

一般情况下, 激光辐射照度大于 $106\text{W}/\text{cm}^2$ 时, 材料表面熔化、汽化, 当汽化速度足够大时, 所产生的蒸汽反冲压力克服熔融金属流动所产生的流体动压力、重力引起的液体静压力和液体表面张力将熔融材料抛出, 该处的熔池便下凹形成小坑, 这一数值被称为临界辐射照度。这也是获得激光深熔焊的最低辐射照度。

凹坑表面在激光的继续作用下, 其上金属进一步熔化和汽化, 高压金属蒸汽从坑底不断产生并向外不断喷发, 从而进一步加深小孔, 光束也进一步深入, 当凹坑的表面照度达到最低辐射照度时, 金属材料不会被熔化、

汽化, 或者所产生的金属蒸汽压力等于或小于液态金属的重力和表面张力后, 小孔不再加深, 最终在液态金属中形成一个小孔。这时小孔内充满因高温蒸汽部分电离而形成的等离子体, 部分等离子体逸出小孔, 在小孔出口上方形成区域等离子体云。这个过程瞬间完成。

当激光束开始在工件上移动时, 在激光前进方向上, 小孔的前沿在小孔效应的作用下熔融坍塌, 呈现前沿略向后弯, 后沿明显倾斜的倒三角状。小孔前沿在激光的作用下熔融, 其温度高、蒸汽压力大, 而后沿由于远离激光作用的方向, 蒸汽压力较小, 温度相对较低, 在此温度差和压力差的作用下, 熔融金属液体沿小孔周围由前端向后端流动, 在小孔后端形成一个漩涡, 最后在后沿处凝固。由于小孔效应的存在, 使激光束能量能深入到材料内部, 形成深而窄的焊缝, 焊缝的深度约等于小孔的深度, 激光辐射照度越大, 小孔就越深, 焊缝的熔深也就越大。

2 工件激光焊接质量控制

影响激光焊接质量的参数主要有焊接设备、工件状况和焊接参数。

2.1 焊接设备

焊接设备影响焊接质量的因素包括输出功率及稳定性、光束模式、聚焦镜焦距和光学部件质量及其稳定性。某院采用通快公司 7040 激光焊机 (图 1) 进行项目产品的焊接, 激光功率 4000W , 光斑大小 0.1mm 和 0.4mm 两种规格, 该产品各部件质量已属于国际先进水平, 可认为对焊接质量的影响最小。

2.2 工件状况

工件状况是影响激光焊接质量的另一个重要因素。一般要求工件边缘比较整齐、无倒角、高装配精度、焊缝与光斑严格对中, 并且在焊接过程中不因焊接热变形导致光斑与焊缝对中情况发生变化。因为激光焊接一般采用自熔焊, 光斑小, 如装配间隙过大, 光束会穿过间

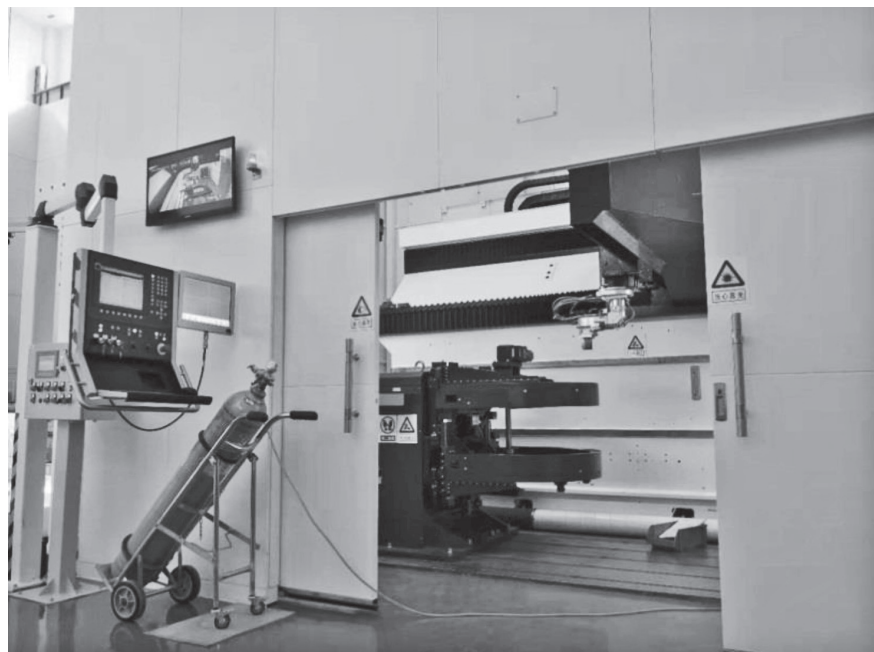


图1 通快 7040 激光焊机

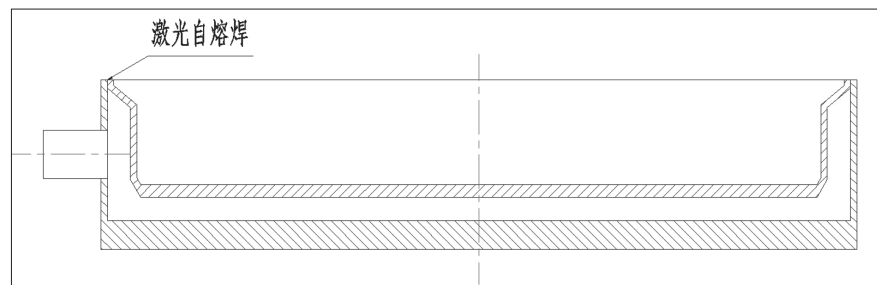


图2 工件形式

隙而不熔化母材，或者引起明显的咬边、凹陷；或者光斑对焊缝的偏差较大造成未焊透或未熔合。本项目工件焊缝大部分如图2所示。零件均采用精加工的方式，焊接处母材厚度为3mm，焊缝深度要求也为3mm，配合间隙在0.1mm以下，焊接时采用入焦或离焦的方式使焊缝处的光斑大于0.1mm。另外，还制造了专用工装对工件进行固定，将工件状况对焊缝焊接质量的影响降为最低。

2.3 焊接参数

焊接参数是影响焊接质量最重要的因素。在激光焊接过程中，最主要的焊接参数有光束焦点位置、焊接速度和激光功率三项。这三项决定了焊缝的熔深、熔宽、焊接过程和焊缝成形的稳定性。

焦点位置应在距工件表面合适的位置。焦点在工件表面以下（入焦）为负，焦点位置在工件表面以上（离焦）为正。焦点位置的熔深和熔宽都比较大，属于稳定的激光深熔焊区间。根据试验情况，当实际

离焦量偏离理想离焦量时，焊接过程中飞溅明显，焊缝会有塌陷现象，考虑到工件实际情况，要求焊缝深度在2~3mm，最终根据试验情况选用离焦在+5~+6mm，如图3所示。

当其余参数固定，随着激光功率的增大，焊缝熔深以一定的比例关系增加，其影响见图4。此图在选择焊接功率时的试验数据。结合工件和试验的实际情况，确定焊接功率为3000W。

当焊接功率和焦点位置不变时，随着焊接速度的增加，焊缝熔深逐渐减小，理论上当焊接速度增加到一定程度时，会产生不稳定焊接，最后转变为热导焊。根据试验情况，正常状况下焊接速度的变化一般不会达到不稳定焊接，甚至热导焊。但焊接速度较慢时，焊缝缺口大，焊缝塌陷严重，焊接速度过快时，焊接连续性差，焊缝质量差。针对目标工件，按照不同的焊接结果选择合适的焊接速度。试验结果见图5。结合工件和试验情况，确定焊接速度为3m/min。

当焊接基本参数确定后，在焊接时还应控制激光束的倾角。相关研究表明，激光束的倾角对激光焊接时产生的小孔型气孔有较大的影响：当光束后倾时，气孔增多，倾角越大气孔越多；当光束

前倾时，气孔减少，倾角越大气孔越少。

当激光束向前移动时，焊缝熔池前壁（激光前进方向）不断熔化，焊缝熔池不断凝固，在激光热效应下焊缝底部金属蒸发产生的气泡不断从熔池逸出，如果熔池保持熔融状态时间较长，金属蒸汽气泡就容易逸出，如

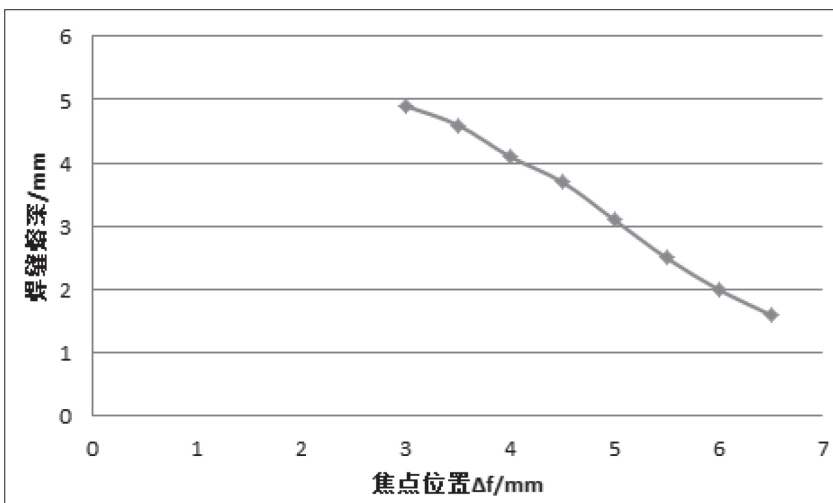


图3 离焦量曲线

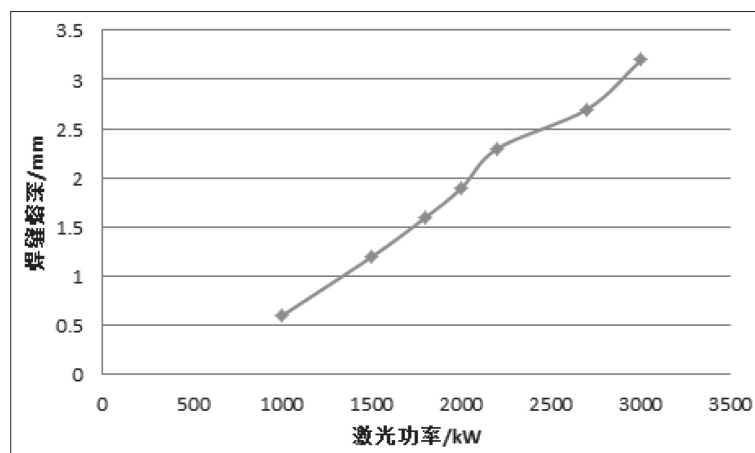


图 4 功率变化对焊缝的影响

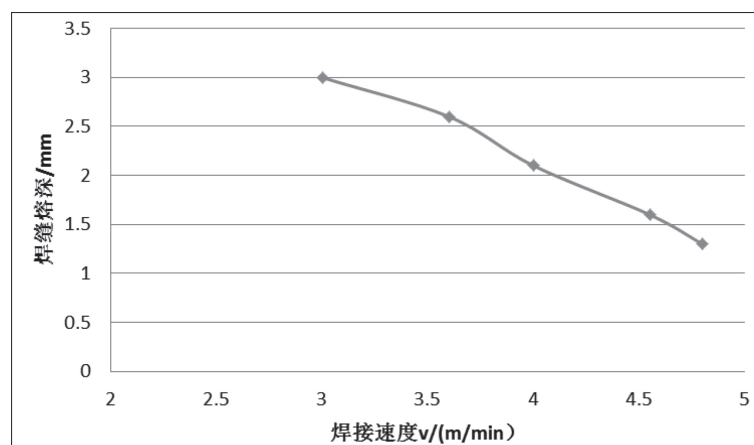


图 5 焊接速度对焊缝的影响

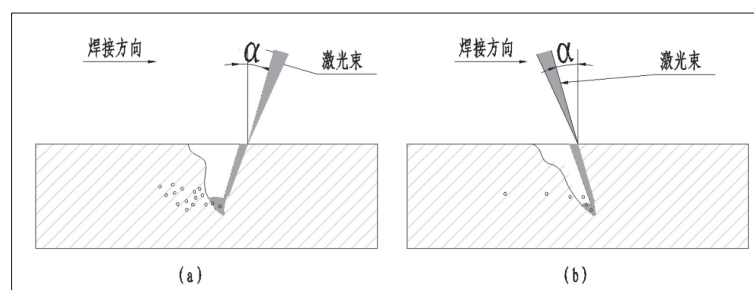


图 6 激光束倾角对产生气泡的影响

果熔池保持熔融状态时间较短,大的金属蒸汽气泡就不容易逸出,从而保留在凝固的焊缝中。

当激光束后倾时,由于熔池的后壁基本处于垂直方向,产生的气泡很容易碰到熔池厚壁,很快与凝固的焊缝金属凝结在一起(图 6 (a));当激光束前倾时,由于熔池的厚壁角度与垂直方向有夹角,气泡产生后不会很快碰到熔池的厚壁,会很快从熔融的焊缝金属中逸出消失(图 6 (b))。根据工件焊缝的特点,在产品焊接时采用前倾角度 $\alpha \approx 10^\circ \sim 15^\circ$ 进行焊接,对试件进行检查,未发现气孔。

3 结语

通过对焊接接头厚度为 3mm 的不锈钢材料激光对接焊缝焊接试验研究及结果分析,得到本试验的最佳工艺参数为:输出功率 3000W,离焦量采用 +5mm,焊接速度为 3m/min,前倾角度 $10^\circ \sim 15^\circ$,采用氩气保护。在该焊接工艺下,能够得到质量较高的焊缝,焊接完成的产品经过常温和高温氦检,整体泄漏率达到 $10^{-12} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$,达到图纸设计要求。

参考文献:

- [1] 陈武柱. 激光焊接与切割质量控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [2] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册 (第 1 卷) [M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- [3] 陆建, 等. 激光与材料相互作用物理学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [4] 陈武柱, 张旭东, 任家烈, 等. 激光焊接时焊接模式转变规律及焊接稳定性的研究 [J]. 中国激光, 1996, 23 (7): 657-661.
- [5] 张晓红, 陈武柱, 等. 激光深熔焊小孔型气孔的产生及其防治技术的研究 [J]. 中国激光, 2007, 34 (增刊): 298-301.