

文章编号:1001-5078(2016)10-1195-05

· 激光应用技术 ·

密封高压气体的激光焊接工艺研究

金越越, 封芸, 梁进智, 王宏杰, 李金成
(北京奥依特科技有限责任公司, 北京 100015)

摘要:为了实现在器件内密封高压气体,设计制造了一套激光焊接加工设备。主要研究其激光加工参数对焊接工艺的影响,分析单脉冲能量、离焦量、氦气压力等参数,对其焊接熔深、焊缝形貌及气密性的影响。试验结果表明,通过优化工艺试验参数,最终可实现在器件内密封10 MPa 氦气,泄漏率小于 $1.33 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$;并且随着氦气压力的增大,焊接熔深逐步增大,焊缝形貌改善,表面金属光泽度增强。

关键词:激光焊接;高压气体;密封;泄漏率;熔深

中图分类号:TG456.7 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2016.10.005

Study on laser welding technology of seal high pressure gas

JIN Yue-yue, FENG Yun, LIANG Jin-zhi, WANG Hong-jie, LI Jin-cheng
(Beijing Opto-Electronics Technology Co., Ltd., Beijing 100015, China)

Abstract:To achieve the seal of the high-pressure gas in the device, a set of laser welding processing equipment was designed and manufactured. The effect of laser processing parameters on the welding process was studied, and the influences of some parameters such as pulse energy, defocusing amount, helium pressure on weld depth, weld appearance and tightness were analyzed. The results show that the 10 MPa helium sealed in the devices and leakage rate of less than $1.33 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ were achieved by optimizing the process parameters. In addition, with the increase of helium pressure, the weld depth increases gradually, weld appearance has been improved and the metal luster of weld surface has been enhanced.

Key words: laser welding; high pressure gas; seal welding; leakage rate; weld depth

1 引言

激光焊接技术是利用激光光束聚焦装置产生极高能量密度的光束,将激光的焦点定位在需要焊接的工件上,工件将会在极短的时间内熔化在一起,从而达到焊接的效果。激光焊接作为一种精密加工技术,其具有焊缝平整、热影响区小、焊接强度高、可实现非接触等特点^[1-2]。焊接环境通常是在常压侧吹状态下或是在真空环境下加惰性气体保护。本文研究在高压环境下,用于密封器件内高压气体的激光焊接设备及其工艺试验。

一般来说,在器件内密封气体主要有电弧焊和激光焊两种方式。电弧焊主要用于在器件内密封5 MPa压力以下的气体,若压力高于5 MPa将存在引弧困难,电弧稳定性差,且不易实现非接触焊接等问题^[3]。而激光焊接技术既可实现与器件的非接触,又可通过材料的自熔焊,实现密封高压气体的目的。本文为了在器件内密封10 MPa的高压气体,设计研制了一套激光焊接加工设备,并研究其加工参数对焊接熔深、气密性及焊缝形貌的影响,最终使器件可密封10 MPa 氦气,泄漏率小于 1.33×10^{-9}

作者简介:金越越(1987-),女,回族,硕士,主要从事激光焊接,切割,打标等方面的工艺试验研究。E-mail: jyy6122@126.com

收稿日期:2016-04-26

$\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$,且焊接形貌良好。

2 试验设备及方法

2.1 试验设备

为实现在器件内密封高压气体,设计研制了一套激光焊接设备。该设备主要由激光器、光学系统、高压密封腔室系统、运动工作台及计算机控制系统等部分组成,设备结构如图1所示。

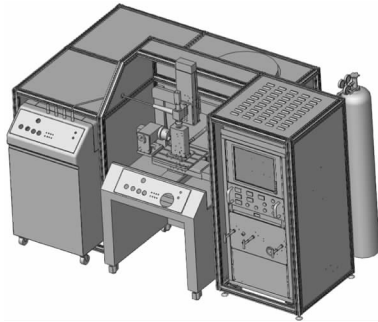


图1 密封高压气体的激光焊接设备示意图
Fig. 1 Laser welding equipment schematic diagram for sealing high-pressure gas

激光器采用300 W的灯泵脉冲Nd:YAG激光,为了方便加工使用,将激光器输出的光束通过光纤进行传输。光学系统中包括聚焦光路和成像光路,成像光路配置与激光同轴的CCD及照明系统。高压密封腔室系统由密封腔室、真空泵、控制气路所组成。密封腔室分为上、下两个腔体部分,上腔体为激光传输部分,下腔体为样品放置区域,可通过不同尺寸的定位套满足焊接加工件的要求。设备局部如图2所示。

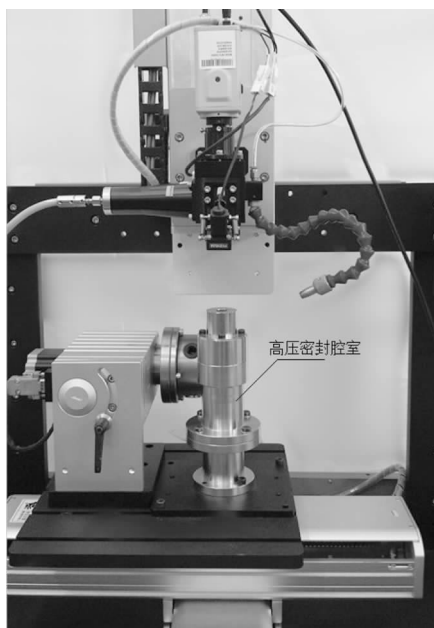


图2 密封高压气体的激光焊接设备局部实物图
Fig. 2 Laser welding equipment local physical diagram for sealing high-pressure gas

为了保证高压密封腔室可承受10 MPa氦气,同时能实现高效的激光焊接。腔室光学窗口的设计至关重要,经过压力计算与模拟分析,选用厚度20 mm的石英玻璃作为腔室的传输窗口,石英玻璃具有耐高温、热膨胀系数低、耐热震性良好^[4]等优点,其在紫外到红外的整个光谱波段都有较好的透光性,配合高增透率的介质膜,能使焊接激光高效传输,减小了激光能量的损失。同时,为了减小金属蒸汽对传输窗口的污染,在传输窗口下方配置厚度1 mm左右的保护玻璃片。整套设备操作方便,安全可靠。

2.2 试验方法

试验中所需要焊接的器件为圆管状,分为圆管主体和上下端塞三部分,焊接材料为304不锈钢,焊接前先将这三部分在丙酮试剂中超声清洗,再利用旋转夹头在常压侧吹环境下,将圆管与上下端塞进行环焊。由于器件为薄壁材料,在无离焦状态下^[5],即可保证焊缝平滑、无裂纹。

将环焊后的器件放置于高压腔室内,器件上端塞表面有直径0.5 mm的通气孔,对高压密封腔室内充入一定压力的氦气,高压氦气可通过加工件表面的通气孔进入器件内;此时聚焦后的激光束,通过焊接室的玻璃窗口传输到加工件通气孔表面,可直接利用高能量的激光将通气孔焊接封住,达到将氦气密封在加工件内的目的,试验原理示意如图3所示。

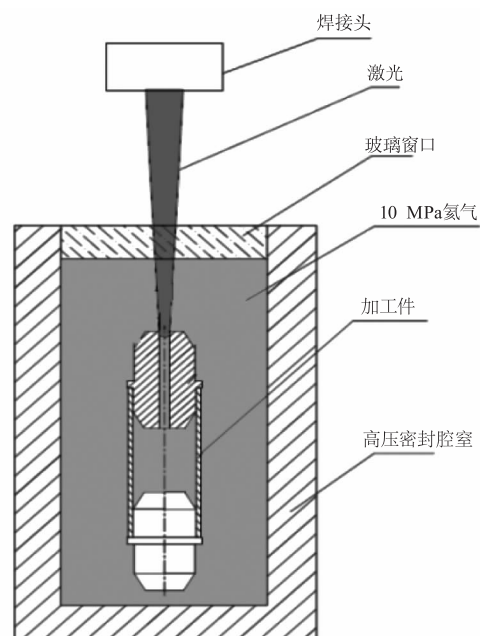


图3 高压密封激光焊接原理示意图

Fig. 3 High-pressure seal laser welding principle diagram

为了保证激光焊接光斑可以高效覆盖直径

0.5 mm 的通气孔,由公式(1)、(2)计算可得,应选用焦距 180 mm 的聚焦镜进行密封堵孔焊接。

聚焦光斑直径可表示为:

$$d = \frac{2\lambda}{\pi NA} \quad (1)$$

式中, λ 代表激光波长;NA 表示聚焦光斑的数值孔径。

焦深可表示为:

$$b = \frac{2\pi\omega_0^2}{\lambda} \quad (2)$$

式中, ω_0 代表聚焦后光斑的束腰直径。

为了达到更好的焊接效果,将加工件固定于压力容器后,对器件及容器内进行气体置换。先对容器内进行抽真空,抽真空完成后,对容器内充入一定量的氦气,保压 5 min,再对容器进行抽真空,根据相关计算要保证 10 MPa 氦气在容器内达到高纯度,抽真空时间约为 10 min。置换完成后对腔室内充入预定气压的氦气,进行密封焊接试验。

3 试验结果及分析

为了分析不同试验参数对焊接熔深及气密性等方面的影响,分别对单脉冲能量、离焦量、氦气压力等参数进行试验分析。为了更好的分析试验结果,在焊接试验完成后,先利用氦质谱仪对焊接后的器件进行气密性检测,再将加工件沿焊接堵孔中心对半切开,进行金相实验,测量焊接熔深并分析其微观组织结构。

3.1 焊接工艺参数对焊接效果的影响

3.1.1 单脉冲能量

在高压密封腔室内充入 10 MPa 的氦气,等器件与腔室匀压后,在相同的离焦量下,将激光的单脉冲能量从 50 J 逐步增大到 75 J,其焊接熔深的变化如图 4 所示。

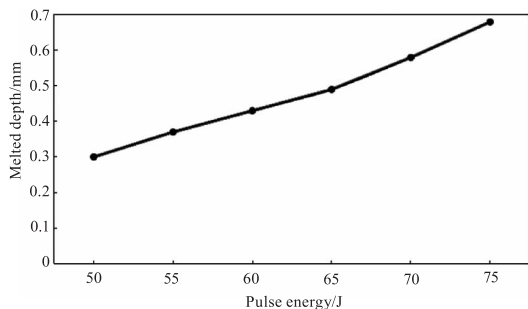


图 4 单脉冲能量与焊缝熔深的关系曲线图

Fig. 4 The single pulse energy and weld depth of relation curve

从图中可以看出,在高压环境下随着激光单脉

冲能量的增加,焊缝熔深逐步增大。经氦质谱仪检测,当单脉冲能量大于 60 J 后,氦气的泄漏率小于 $1.33 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$;并且当单脉冲能量大于 70 J,焊接熔深大于 0.5 mm,达到较好的焊接效果。

3.1.2 脉冲宽度

脉冲宽度是每个脉冲作用的时间,是脉冲焊接的重要参数之一,脉冲宽度的大小可用于区别材料去除与材料熔化^[6]。随着脉宽的增加,焊缝熔深越大。在 10 MPa 的氦气压力下,逐步增大激光脉宽,当脉宽为 12 ms 时,可密封住 0.5 mm 的通气孔,当脉宽为 16 ms 时,器件的氦气泄漏率小于 $1.33 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$,焊缝熔深大于 0.5 mm,且焊缝表面成形良好。

3.1.3 离焦量

在 10 MPa 氦气压力环境下,为保证激光聚焦光斑可密封住直径 0.5 mm 的通气孔,需要一定的离焦量。同时,采用一定的离焦量也可避免激光处于焦点位置时,由于功率密度较大形成蒸发气孔。

由于本试验焊接过程中需要通过石英玻璃窗口,根据光学折射原理^[7],经过厚度 20 mm 的光学窗口,激光的焦点位置将向下偏移。为了提高激光传输效率且减小光学窗口的污染,焊接时采用正离焦,经试验分析离焦量在 3 mm 时,可实现较好的密封效果及焊缝容貌,焊缝剖面如图 5 所示。

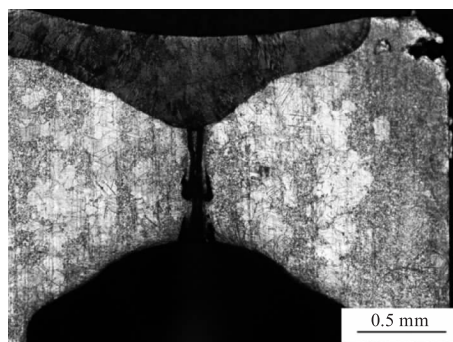


图 5 3 mm 离焦量时焊缝剖面图

Fig. 5 3 mm defocus distance of weld profile

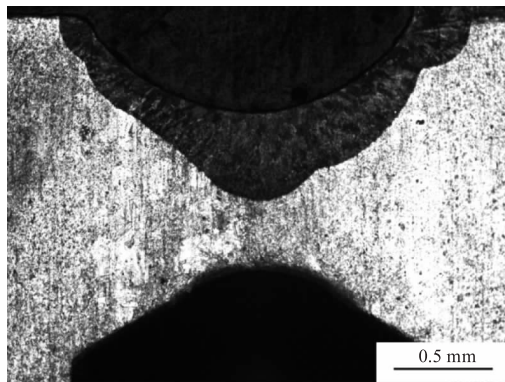
3.2 氦气压力对焊接效果的影响

通过以上工艺试验,在正离焦 3 mm,脉宽 16 ms,单脉冲能量 70 J 时,可得到最佳的焊接效果。在这组工艺参数下,分别对腔室内充入 1.5 MPa、5 MPa 和 10 MPa 的氦气进行焊接试验,以分析在不同压力环境下的焊缝熔深、焊缝形貌及气密性。

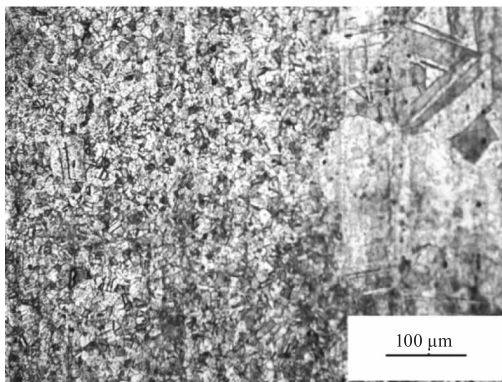
3.2.1 1.5 MPa 氦气试验效果

在高压密封腔室内充 1.5 MPa 氦气,从成像中可监测到,焊接过程中产生大量的金属蒸汽污染物,焊接后焊缝表面的金属光泽暗淡。经检测加工件的

氦检漏率为 $2.7 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 符合密封要求。通过显微镜测量焊接熔深为 0.4 mm, 图 6(a)、(b) 分别为 1.5 MPa 氦气条件下加工件焊缝熔深和焊缝微观组织结构。



(a) 1.5 MPa 氦气下的焊缝熔深



(b) 1.5 MPa 氦气下微观组织图

图 6 1.5 MP 氦气下的焊缝熔深及微观组织图

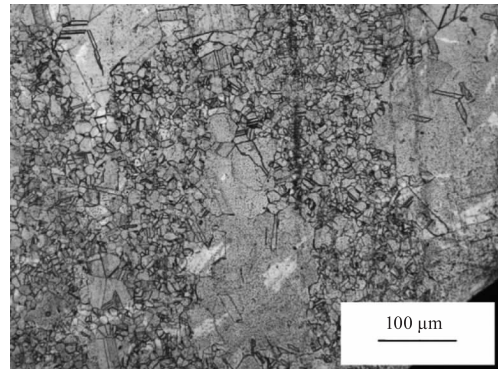
Fig. 6 Weld depth and micro-structure of 1.5 MPa helium

3.2.2 5 MPa 氦气试验效果

在高压密封腔室内充 5 MPa 氦气, 可观测到焊接时产生少量的金属蒸汽并伴随有金属污染物, 焊接表面呈现金属光泽, 焊接熔深为 0.5 mm, 加工件的氦检漏率为 $2.6 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, 图 7(a)、(b) 分别为 5 MPa 氦气条件下加工件焊缝熔深和焊缝微观组织结构。



(a) 5 MPa 氦气下的焊缝熔深



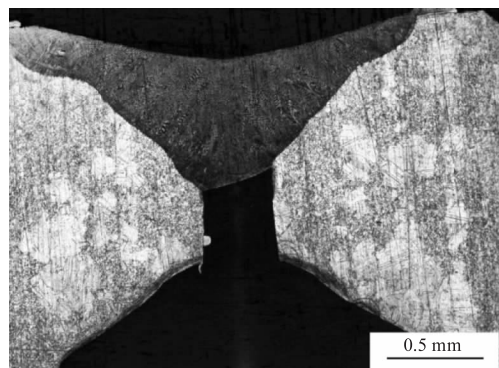
(b) 5 MPa 氦气下微观组织图

图 7 5 MPa 氦气下的焊缝熔深及微观组织图

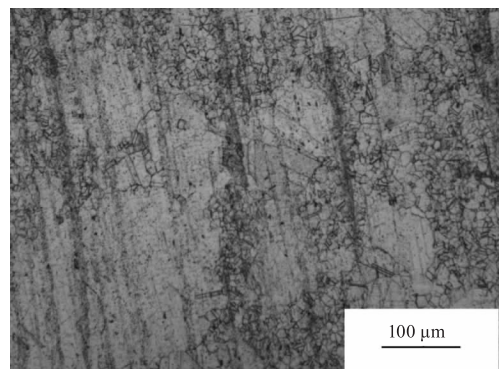
Fig. 7 Weld depth and micro-structure of 5 MPa helium

3.2.3 10 MPa 氦气试验效果

在高压密封腔室内充 10 MPa 氦气, 焊接时只产生极少量的金属蒸汽, 焊接表面呈明显的金属光泽, 焊接熔深为 0.66 mm, 加工件的氦检漏率为 $2.6 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, 图 8(a)、(b) 分别为 10 MPa 氦气条件下加工件焊缝熔深和焊缝微观组织结构。



(a) 10 MPa 氦气下的焊缝熔深



(b) 10 MPa 氦气下微观组织图

图 8 10 MPa 氦气下的焊缝熔深及微观组织图

Fig. 8 Weld depth and micro-structure of 10MPa helium

通过以上试验结果可以看出, 在不同的压力环境下, 器件的氦气泄漏率基本一致, 均小于试验中设定的 $1.33 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 满足器件的密封性要求。从金相实验中可知焊缝熔合区底部为奥氏体等

轴晶区,两侧和中部为奥氏体柱状晶,从微观组织结构图中可以看出随着氦气压力的增加,焊缝内部晶状形貌逐步改善,且无气泡及微裂纹。

焊接熔深的变化规律如图9所示,从氦气压力与焊缝熔深关系曲线图中可以看出,随着氦气压力的增加,焊接熔深逐渐增大。从试验中分析可得,充入1.5 MPa氦气时腔体内的氦气压力远低于10 MPa与5 MPa,导致焊接时产生大量的金属蒸汽污染物漂浮于腔室光学窗口附近,污染物体被密封在腔室内无法散开,阻碍了激光的传输效率,使得焊接熔深下降。

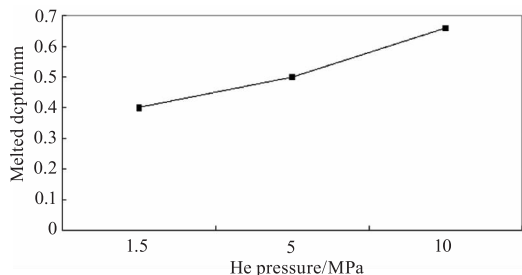


图9 氦气压力与焊缝熔深关系曲线图

Fig.9 Helium pressure and weld depth of relation curve

4 结论

根据激光焊接的特性,设计制造了一套可在高压环境下,密封器件内高压气体的激光焊接加工设备。利用这套设备进行了一系列的工艺试验,通过工艺试验验证及其结果分析,得到如下结论:

(1)在单脉冲能量70 J,脉宽16 ms,正离焦3 mm的工艺参数下,可实现在器件内密封10 MPa的高压氦气,泄漏率小于 $1.33 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$,且得到理想的焊缝熔深及焊缝成形效果。

(2)在相同的焊接参数下,分别充入1.5 MPa、5 MPa和10 MPa的氦气,由试验可知,随着腔室内氦气压力强度的增加,焊接熔深逐步增大,焊缝表面金属光泽度增强,焊缝形貌得到改善。

该设备的制造及工艺试验结果,为后期高压气体的密封焊接工艺提供了一定的试验依据,在以后

的试验过程中,可在更高的气体压力环境下进行工艺试验研究。

参考文献:

- [1] TZENG Y F. Process characterization of pulsed Nd:YAG laser seam welding[J]. *Advanced Manufacturing Technology*,2000,16(1):10-18.
- [2] CHEN Anjian. Study on alloy steels for laser welding[J]. *Laser & Infrared*,2000,30(3):167-168. (in Chinese) 陈安健. 合金钢激光焊接的研究[J]. *激光与红外*,2000,30(3):167-168.
- [3] WANG Chunjiang, JIAO Xiangdong, ZHOU Canfeng, et al. Analysis of arc shape in pulsed MIG welding under high pressure air environment[J]. *Welding Technology*,2010,39(10):7-11. (in Chinese) 王春健,焦向东,周灿丰,等. 高压空气环境下脉冲MIG焊电弧形态分析[J]. *焊接技术*,2010,39(10):7-11.
- [4] ZHANG Baoqing. The essential characteristic of quartz glass and the proper usage of quartz tubes [J]. *Power Electronics*,1994,4(11):58-61. (in Chinese) 张葆青. 石英玻璃的基本特性及石英管的正确使用办法[J]. *电力电子技术*,1994,4(11):58-61.
- [5] ZHAO Huan, DENG Bin, WAN Xixin, et al. Pulsed laser seam welding technology for aluminum alloy package encapsulation[J]. *Equipment for Electronic Products Manufacturing*,2014,11:10-15. (in Chinese) 赵贇,邓斌,万喜新,等. 铝合金外壳气密性封装的脉冲激光焊缝[J]. *电子工业专用设备*,2014,11:10-15.
- [6] GENG Ping, YANG Yuling, ZHANG Duo. Low power Nd:YAG laser welding of 18-8 type austenitic stainless steel[J]. *Laser & Infrared*,2007,37(1):34-36. (in Chinese) 耿平,杨玉玲,张多. 18-8型奥氏体不锈钢低功率Nd:YAG激光焊接研究[J]. *激光与红外*,2007,37(1):34-36.
- [7] YU Daoyin. *Engineering optics* [M]. Beijing: Machinery Industry Press,1999. (in Chinese) 郁道银. *工程光学*[M]. 北京:机械工业出版社,1999.