

膜片隔离阀脉冲激光焊接工艺分析

杨 祎,王吉平,董继业,解 庆,常 涛,刘 钊

(西安航天动力研究所,陕西 西安 710100)

摘要 膜片隔离阀广泛应用于单组元液体火箭发动机,金属膜片和壳体的激光焊接是该产品需重点关注的工艺过程。通过分析产品焊接结构,得出宜采用热导焊、短焦镜头和低峰值功率进行膜片隔离阀脉冲激光焊接的结论。设计脉冲宽度、脉冲频率、重叠系数和离焦量的 4 因素正交试验,通过分析焊缝外观质量和接头熔深,获得各因素影响焊缝熔深的主次顺序及适用于膜片隔离阀的激光焊接参数。提出采用修正功率密度综合表征脉冲能量和离焦量对熔深的影响,分析结果表明,焊缝熔深随着修正功率密度的增加而增大,膜片隔离阀需选取较小修正功率密度和较低焊接速率或者较大修正功率密度和较高焊接速率来满足其性能要求。采用正交试验获得的激光焊接工艺规范所生产的膜片隔离阀,焊缝质量、密封质量和破裂压力稳定性均能满足设计要求。目前,膜片隔离阀已配套至多种型号飞行产品,并通过了飞行及试车考核。

关键词 膜片隔离阀;正交试验;脉冲激光焊接;焊缝质量;修正功率密度

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **文章编号** 1672-9374(2023)02-0107-08

Analysis on pulse laser welding for membrane isolation valve

YANG Yi, WANG Jiping, DONG Jiye, XIE Qing, CHANG Tao, LIU Zhao

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract Membrane isolation valve is widely used in monopropellant liquid rocket engines, and the laser welding for the metal membrane and the shell is an important process that should be focused on. By analyzing the structure of the product, it is concluded that the thermal conductivity pulse welding is suitable for the membrane isolation valve. As meanwhile, the conclusion of selecting short focal lens and lower peak power can ensure the quality of the welded joint was also obtained. To obtain the influences of parameters of pulse width, pulse frequency, overlap factor and welding frequency on weld penetration, orthogonal test was designed. By analyzing appearance and penetration of the welded joint, the primary sequence of four parameters and matched process parameters for membrane isolation valve were obtained. The modified power density was proposed to characterize the impact of pulse energy and defocusing amount on weld penetration. The results show that weld penetration increases with the increasing of the modified power density. In addition, it is concluded that lower modified power density and slower welding rate or higher modified power density and faster welding rate should be used on the pulse laser welding of the membrane isolation valve. The membrane isolation valves produced by the process parameters

收稿日期:2021-07-18;修回日期:2021-10-10

基金项目:国家自然科学基金(52005385)

作者简介:杨祎(1992—),女,硕士,工程师,研究领域为激光精密制造。

ters based on the orthogonal test can satisfy the designing requirements on quality of welded joint, sealing property and the stability of rupture pressure. Currently, the products have been used in a variety of flight products, and passed the tests and flight assessments.

Key words membrane isolation valve; orthogonal test; pulse laser welding; weld quality; modified power density

0 引言

膜片隔离阀广泛应用于单组元液体火箭发动机推进剂贮存供应系统中,与推进剂预包装贮箱集成设计,对预包装推进剂进行封存隔离,系统工作时膜片沿刻痕破裂打开形成推进剂流体通道。对于使用自燃推进剂的系统,隔离阀的密封作用必须绝对可靠,不允许贮箱加注推进剂后有任何泄漏^[1]。

膜片隔离阀由预制有一定深度刻痕的金属膜片和壳体采用激光焊接工艺连接,金属膜片和壳体材料均为钛基金属,焊后通过气密性试验检查激光焊缝及膜片刻痕处的密封性能,膜片隔离阀的焊接质量将直接影响到系统工作的可靠性。目前,膜片隔离阀的研究主要集中在产品设计^[1]和产品试验^[2]领域,产品焊接方法和焊接质量控制的系统研究较少。本文从膜片隔离阀结构入手,分析了激光焊接工艺参数选用的原则,设计正交试验匹配出了激光焊接工艺规范,所焊接的产品焊缝质量、密封性能和破裂压力稳定性均能满足设计要求。

1 膜片隔离阀焊接结构

膜片隔离阀的典型结构见图 1,金属膜片厚度为 0.12 mm,直径 $\Phi 20$ mm,壳体外形尺寸约为 $\Phi 24$ mm \times 40 mm。金属膜片原材料为碘法钛 TAD,壳体原材料为 TC4,其各元素质量分数见表 1,两种材料的冶金性和焊接工艺性较好^[3]。

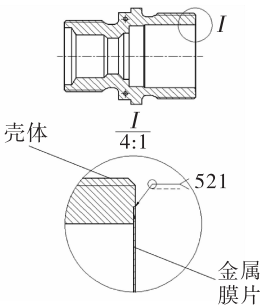


图 1 膜片隔离阀典型结构
Fig.1 Typical structure of membrane isolation valve

表 1 焊接接头材料主要元素质量分数

Tab.1 Major element mass fraction of welded joint materials

材料	元素质量分数/%					
	C	Si	O	V	Al	Ti
TAD	0.017	—	0.042	—	—	余
TC4	0.033	0.023	0.140	4.12	6.45	余

金属膜片结构见图 2,刻痕处剩余厚度仅为 0.05 mm 左右,刻痕与焊缝位置距离大约为 2 mm。膜片隔离阀激光焊缝设计要求见表 2,焊接接头除了满足熔深、表面质量和气密检查要求外,还需要严格控制热输入量使得焊接过程不会对金属膜片刻痕位置产生显著影响,从而保证膜片隔离阀的工作可靠性。

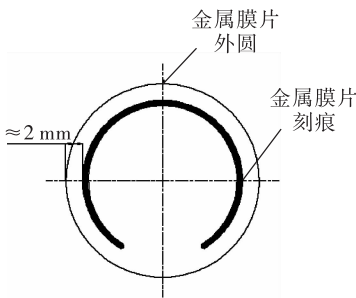


图 2 金属膜片结构示意图
Fig.2 Structure of metal membrane

表 2 膜片隔离阀激光焊缝设计要求

Tab.2 Design requirements for laser welding seam of membrane isolation valve

检查项目	设计要求
熔深要求	金属膜片焊透
表面质量	焊缝表面光亮光滑,无蓝色等更严重的氧化色,无咬边、凹坑、裂纹、气孔和夹杂物等可视缺陷
气密检查	通入 0.45 MPa 的压缩空气,保压时间不少于 5 min,无气泡

2 膜片隔离阀脉冲激光焊接理论分析

材料的激光焊接是激光束在材料表面反射、透射和吸收的复杂综合过程,本质上是光波的电磁场与材料相互作用的结果,只有被吸收的激光才能激发带电粒子运动转化成热能,使金属发生固体到液体、固体到气体或者基于二者之间的转变,实现金属的熔合^[4-5]。

根据激光作用在工件上的功率密度,激光焊接分为热传导焊和深熔焊^[6]。激光热传导焊时,材料表面的功率密度相对较低,材料表面仅存在液-固界面向材料内部推移形成熔池的过程,焊缝熔深相对较小,热影响区小,焊接变形小;激光深熔焊时,金属表面的高激光功率密度使金属快速蒸发,金属在蒸汽压力、反冲力等共同作用下形成小孔,实现“小孔焊接”,焊缝熔深相对较大,热影响区大^[7-10]。

膜片隔离阀金属膜片厚度小,焊缝位置靠近金属膜片刻痕外侧,二者热容差异大,金属膜片与壳体激光焊接时会伴随着零件的不均匀加热,严重时会导致零件的焊接应力积聚甚至变形^[11]。为了兼顾焊缝质量及金属膜片破裂压力性能,需要保证焊接零件热输入量小。热导焊焊接模式可以在保证金属膜片熔透的前提下引入较少的焊接热输入量,因而适用于膜片隔离阀的激光焊接。

在热导焊模式下,金属材料对激光的吸收率取决于激光波长、材料物性等固有因素及温度、表面状况(表面涂层和表面粗糙度)和激光功率密度等工艺因素^[12]。脉冲激光焊接的功率密度 P_d (单位为 W/cm^2) 可表示为

$$P_d = 4P/(\pi d^2) \quad (1)$$

式中: P 为激光作用于材料表面的平均功率, W ; d 为作用于金属表面激光束的光斑直径, cm 。

平均功率 P 取决于激光器发射的功率和材料的热物理性能,本文采用激光器发射的平均功率 P_E 表示激光作用于材料表面的平均功率 P , 作为不同试验件参数的比较依据,其数学表达式为

$$P_E = P_P \tau f \quad (2)$$

式中: P_P 为激光脉冲峰值功率, W ; τ 为脉冲宽度, s ; f 为脉冲频率, Hz 。

综合式(1)和式(2),脉冲激光焊接的功率密度 P_d 可表示为

$$P_d = 4P_P \tau f / (\pi d^2) \quad (3)$$

激光焊接时,激光束照射到金属材料表面,金属材料内部电子运动转化成热能后使金属材料熔化-凝固实现接头的熔合,理想的情况是接头两侧金属同时熔化形成稳定熔池^[13]。对于膜片隔离阀,由于金属膜片和壳体热容差异大,满足壳体和金属膜片同时达到金属熔化温度时,壳体吸收的热量要远远大于金属膜片。要满足焊缝两侧金属吸收的瞬时能量基本相同,就要求激光焊接能量密度相对集中,因此,选用焦距较小的聚焦透镜进行膜片隔离阀的焊接,聚焦透镜焦距为 100 mm ,聚焦光斑直径 0.2 mm 。

选用热导焊焊接模式进行膜片隔离阀激光焊接的根本原因是该模式的焊接热输入量小。减少焊接热输入量的一个方法是减小焊接功率密度,根据式(3)可知,在聚焦透镜光斑直径确定的前提下,峰值功率越小,功率密度越小,因此选用设备所能提供的最小峰值功率密度 500 W 后续工艺研究。

除聚焦透镜焦距和脉冲峰值功率外,脉冲激光焊接主要工艺参数还包括脉冲宽度、脉冲频率、重叠系数和离焦量^[14]。根据焊接冶金学理论,激光热导焊模式中,熔池形成的驱动力以熔池表面张力梯度引起的剪切力和浮力为主,相应的熔池流动机制分别为 Marangoni 对流和浮力引起的对流。Marangoni 对流由熔池表面张力梯度引起,对熔池深度有明显影响;浮力引起的对流由熔池近表面材料热胀冷缩引起,对熔池宽度有影响,但较强的 Marangoni 对流可以限制浮力引起的对流^[15]。研究表明:脉冲宽度为单个脉冲激光在金属表面的作用时间,影响焊缝区域以及焊缝表面区域温度梯度,从而影响 Marangoni 对流和浮力效应引起的对流,决定焊缝的熔深和熔宽,对焊缝宽度影响大;脉冲频率为单位时间内脉冲激光的数量,影响非激光

作用阶段熔池的热扩散行为,引起稳态 Marangoni 对流和浮力对流时间的改变,从而影响焊缝的熔深和熔宽^[15-16]。

离焦量主要影响金属表面激光束的光斑直径 d ,当离焦量为 0 时,光斑直径最小,为聚焦透镜的光斑直径。研究表明,光斑直径和离焦量 Δz 存在正相关关系^[17]

$$d \propto (\Delta z)^2 + d_0 \tag{4}$$

式中 d_0 为聚焦透镜光斑直径。

根据焦点位置和金属表面的相对位置,离焦量分为正离焦和负离焦,当焦点位置在焊接材料上方时为正离焦,反之为负离焦。根据光束的聚焦特性,当正、负离焦表面距金属表面位置相同时,辐照在金属材料表面的激光束光斑直径相同,因此激光功率密度相同^[18]。但是,采用负离焦进行焊接,材料内部的功率密度高于材料表面,温度梯度大所导致的稳态 Marangoni 对流时间长,因此焊缝熔深更大。所以,厚度较薄的板材、带材宜采用正离焦进行激光焊接^[19]。

脉冲激光焊接的焊接速率一般通过光斑直径 d 、脉冲频率 f 和重叠系数 K 计算,即

$$v = df(1 - K) \tag{5}$$

式中 K 值一般选取 0.5 ~ 0.9。

式(5)表明,焊接速率与脉冲频率和光斑直径成正相关,与重叠系数成负相关。焊接速率影响单脉冲能量,在其他参数不变的前提下,焊接速率的增加会导致 Marangoni 对流和浮力效应对流过程减弱,焊缝的熔深和熔宽随之减小。

3 正交试验设计及结果讨论

3.1 试验方案设计

对于脉冲宽度、脉冲频率、重叠系数和离焦量 4 个影响焊缝质量的工艺参数,设计 4 因素、3 位级正交试验对膜片隔离阀的脉冲激光焊接工艺进行研究,脉冲宽度 3 位级选择 2.5 ms、2.7 ms 和 3.0 ms,脉冲频率 3 位级选择 20 Hz、30 Hz 和 40 Hz,重叠系数 3 位级选择 0.65、0.70 和 0.75,离焦量 3 位级选择 0.1、0.3 和 0.5,具体试验方案见如表 3

所示的 L_9 因素水平表。

表 3 $L_9(3^4)$ 因素水平表

Tab. 3 $L_9(3^4)$ factor level table

试验号	A 因素	B 因素	C 因素	D 因素
	脉冲宽度/ms	脉冲频率/Hz	重叠系数	离焦量/mm
1	2.5	20	0.65	0.1
2	2.5	30	0.70	0.3
3	2.5	40	0.75	0.5
4	2.7	20	0.70	0.5
5	2.7	30	0.75	0.1
6	2.7	40	0.65	0.3
7	3.0	20	0.75	0.3
8	3.0	30	0.65	0.5
9	3.0	40	0.70	0.1

3.2 试验结果讨论

膜片隔离阀的焊接接头采用焊缝外观成形、熔深、熔宽 3 个结果进行表征,具体见表 4。

表 4 正交试验结果统计表

Tab. 4 Results of orthogonal test table

试验号	熔深/mm	熔宽/mm
1	0.176	0.610
2	0.209	0.616
3	0.175	0.639
4	0.177	0.631
5	0.268	0.647
6	0.281	0.606
7	0.214	0.663
8	0.206	0.660
9	0.434	0.684

9 个试验件的焊缝成形情况见图 3,以有无飞溅、焊缝氧化程度和焊缝规整程度 3 个方面作为评判依据,除试验件 9 因焊接热输入过大导致焊缝表面塌陷、产生焊接飞溅外,其余试验件的焊缝外观

成形情况基本一致,均能满足设计要求。9个试验件熔宽测量结果为0.606~0.684 mm,数据差异不大,原因是焊缝宽度影响较大的脉冲宽度3位级

差异小。9个试验件的焊缝熔深测量范围为0.175~0.434 mm,和焊缝外观成形存在相关性,随着熔深的增大,焊接的表面缺陷逐步显现。

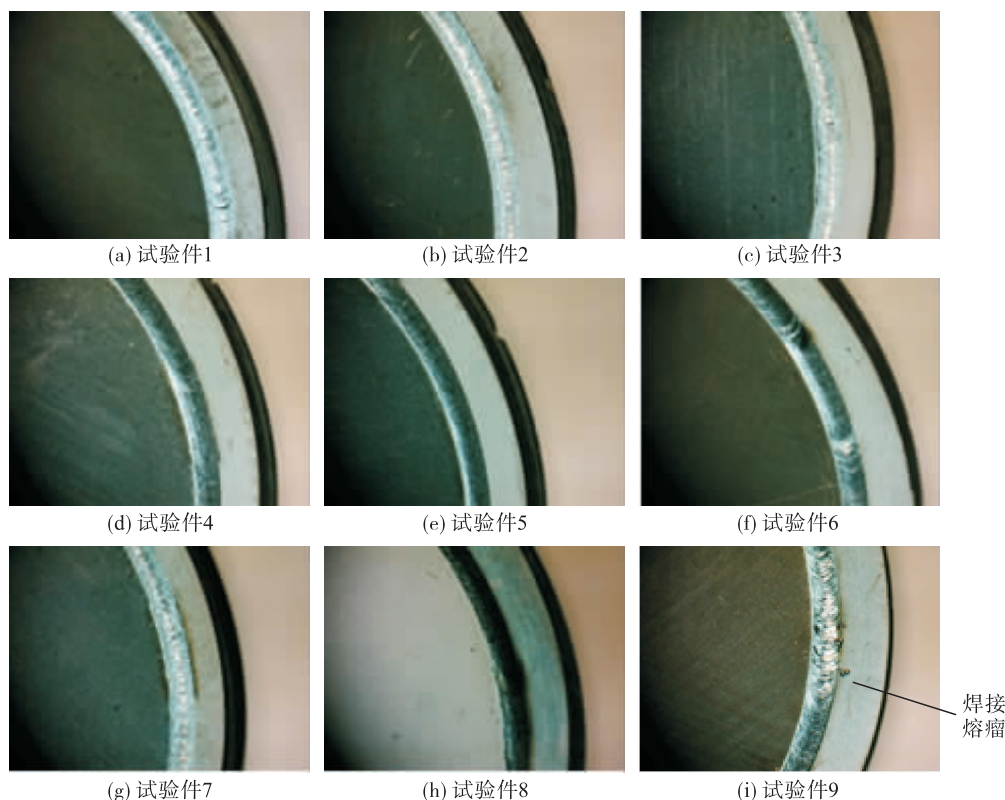


图3 正交试验试验件焊缝形貌

Fig.3 Morphology of welded joint of tests

对熔深最小(试验件3)和最大(试验件9)的试验件进行焊缝形貌显微分析(见图4、图5)。图4表明,试验件3的焊缝为适度熔透,焊缝呈典型热导焊半球形接头,金属膜片未见翘曲变形;图5表明,试验件9的焊缝为过熔透,焊缝表面塌陷,金属膜片靠近焊缝处局部减薄变形,出现轻微“颈缩”现象。对两个试验件的焊缝热影响区进行比较,试验件3的焊接热影响区明显小于试验件9,但焊缝及热影响区组织未见明显差异。试验件9金属膜片变形的原因如下:金属膜片和壳体的结构刚度差异极大,壳体的约束度比金属膜片大很多,金属膜片在受到较大焊接热输入时更容易发生变形。钛合金激光焊接接头各区域的微观组织一般为“网篮状”马氏体,接头静抗拉强度基本与母材相当,塑性略低于母

材;接焊缝的断裂韧性显著低于母材,而热影响区断裂韧性介于母材和焊缝金属之间^[20-22]。膜片隔离阀的使用工况为加注推进剂进行运输、贮存,存在一定的冲击,当焊缝热影响区过大时,组织的不均匀性凸显,存在脆性断裂的风险。因此,综合焊缝显微组织分析和膜片隔离阀使用工况,焊缝熔深应该在金属膜片熔透的前提下尽可能小。

采用极差分析法对9个试验件的熔深实测值进行分析,结果见表5。极差分析结果表明,4因素对焊缝熔深影响的主次顺序为:脉冲频率、离焦量、脉冲宽度和重叠系数。膜片隔离阀需要选择焊缝熔深小的参数集合,因此选择各因素中K值较小的位级,则最优组合为A₁B₁C₃D₃,即脉冲宽度2.5 ms,脉冲频率20 Hz,重叠系数0.75,离焦量0.5 mm。

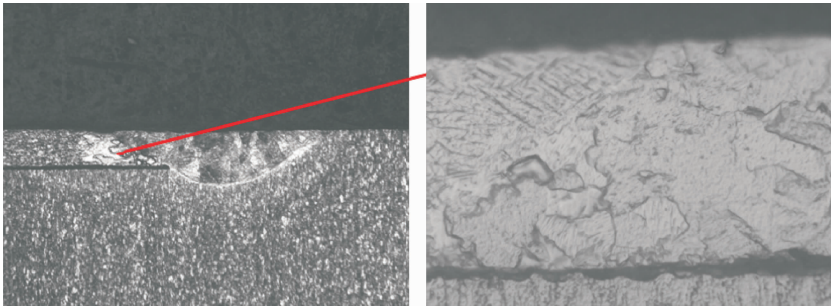


图 4 试验件 3 焊接接头金相显微图

Fig. 4 Metallographic micrograph of welded joint of test 3

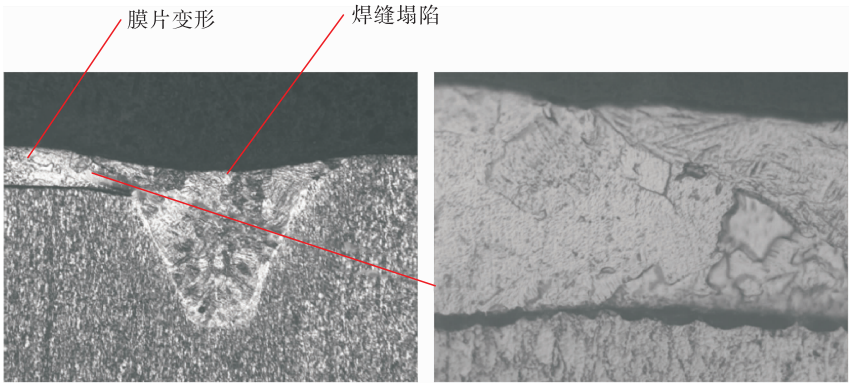


图 5 试验件 9 焊接接头金相显微图

Fig. 5 Metallographic micrograph of welded joint of test 9

表 5 正交试验极差分析
Tab. 5 Orthogonal test range analysis

项目	脉冲宽度	脉冲频率	重叠系数	离焦量
K_{1j}	0. 560	0. 567	0. 662	0. 878
K_{2j}	0. 726	0. 682	0. 820	0. 704
K_{3j}	0. 853	0. 890	0. 657	0. 557
R_j	0. 293	0. 323	0. 163	0. 321

影响脉冲激光焊接的工艺参数可综合考虑为功率密度 P_d 、离焦量 Δz 和焊接速率 v 。由于功率密度 P_d 中金属表面激光束光斑直径 d 受聚焦透镜光斑直径 d_0 和离焦量 Δz 影响,因此对功率密度 P_d 进行修正,修正功率密度 P_d' 数学表达式为

$$P_d' = 4P / [\pi(\Delta z^2 + d_0^2)] \tag{6}$$

根据式(6)计算各试验件的修正功率密度 P_d' ,建立其与焊缝熔深的散点图并进行数据拟合(见图 6),可以看出,焊缝熔深随着 P_d' 的增加而增大,

当 P_d' 增大到一定程度后,出现了焊缝熔深急剧增加的现象。这是由于 P_d' 的增大会造成熔池表面的温度梯度增大,进而导致 Marangoni 对流强度的增强,熔池内部对流速度和深度增加。由于材料内部的复杂冶金过程,温度梯度随着 P_d' 的增大趋近于指数型增长,因此表现出了熔深的急剧增加。

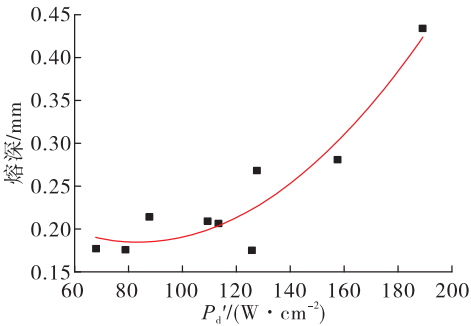


图 6 修正功率密度与熔深关系图

Fig. 6 Relationship between modified power density and weld penetration

建立修正功率密度 P_d' 、焊接速率 v 和焊缝熔深三者的关系(见图7),结果表明,在焊接速率 v 一定的情况下,修正功率密度 P_d' 的增大会导致焊缝熔深的增加,在修正功率密度一定的情况下,随着焊接速率的增加,焊缝熔深减小。图7表明,当焊缝熔深较小时,修正功率密度 P_d' 和焊接速率 v 存在相互匹配的参数带,需选取较小修正功率密度 P_d' 和较低焊接速率 v 或者较大修正功率密度 P_d' 和较高焊接速率 v 来满足焊缝熔深要求。

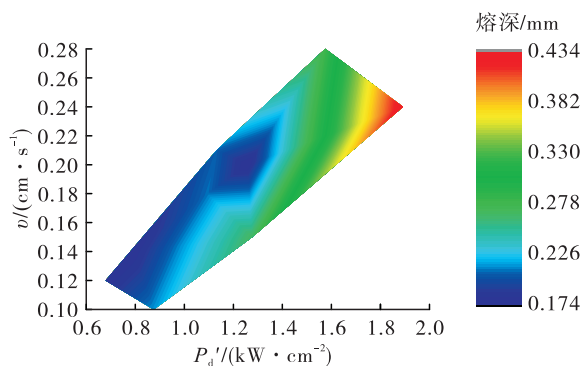


图7 修正功率密度、焊接速率与焊缝熔深关系图

Fig.7 Relationship among modified power density, welding rate and weld penetration

4 膜片隔离阀激光焊接工艺

4.1 焊接工艺流程

膜片隔离阀金属膜片与壳体的脉冲激光焊接工艺流程见图8。首先采用酒精或丙酮对金属膜片和壳体进行清洁,重点清洗待焊部位,但需要注意不能使金属膜片刻痕处受到外力损伤;将清洁后零件装夹在定位工装中,在显微镜下观察金属膜片与壳体凹槽端面贴合紧密,防止焊接过程中出现未熔合现象;将工件装夹在激光焊机工作台上,调整保护气角度,保证其在整个焊接过程中可以对焊缝熔池起到有效保护;采用低脉冲宽度进行金属膜片的激光点焊,点焊时在金属膜片圆周上依次对称分段进行,防止热输入量集中带来的金属膜片翘曲;依次进行首件膜片阀激光焊接、检验、产品焊接、外观检查。

采用上述工艺流程及工艺规范焊接的膜片隔离阀,焊缝表面呈现光亮的银白色,无咬边、凹坑、裂纹、气孔和夹杂物等可视缺陷;剖切件熔深满足

要求,焊缝内部未见气孔、夹杂缺陷。

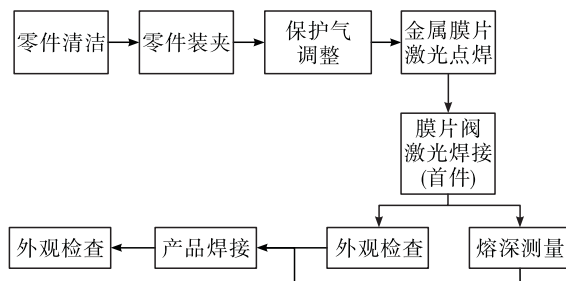


图8 膜片隔离阀激光焊接工艺流程

Fig.8 Laser welding process of membrane isolation valve

4.2 产品试验验证

膜片隔离阀焊接后进行气密性试验和破裂压力试验分别对焊缝密封以及膜片性能进行验证。采用上述焊接工艺流程和工艺规范焊接的产品,满足0.45 MPa的气密试验条件下保持5 min不泄漏的设计要求。图9为3种不同刻痕剩余厚度膜片隔离阀的破裂压力,每种刻痕剩余厚度的子样数为10个,其刻痕剩余厚度分别为46 μm 、51 μm 和56 μm 。结果表明,相同刻痕剩余厚度的10个子样的破裂压力基本一致。由此可见,膜片隔离阀的焊接工艺流程和基于正交试验优化的焊接工艺规范合理有效,能够满足产品的设计性能。目前,该产品已通过了多次试车和飞行考核。

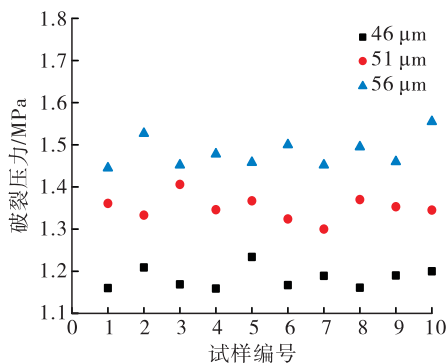


图9 膜片隔离阀破裂压力统计图

Fig.9 Rupture pressure of membrane isolation valve

5 结论

本文基于正交试验对膜片隔离阀的脉冲激光焊接工艺进行研究,具体结论如下。

1)膜片隔离阀脉冲激光焊接宜采用热导焊焊

接模式,选用短焦透镜和低峰值功率可以保证焊缝接头质量及产品使用性能。

2) 建立 $L_9(3^4)$ 正交试验表,极差分析得出影响焊缝熔深的主次顺序为脉冲频率、离焦量、脉冲宽度、重叠系数,匹配出适用于膜片隔离阀的焊接规范为 20 Hz、0.5 mm、2.5 ms 和 0.75。

3) 修正功率密度 P_d' 可以综合表征脉冲能量、离焦量对焊缝熔深的影响,焊缝熔深随着 P_d' 的增加而增加,且当 P_d' 增大到一定值后,熔深出现急剧增加的现象。

4) 膜片隔离阀需选取较小修正功率密度 P_d' 和较低焊接速率 v 或者较大修正功率密度 P_d' 和较高焊接速率 v 来满足焊接要求。

5) 膜片隔离阀的工艺流程和基于正交试验优化的激光焊接工艺规范能够保证产品的焊缝外观质量、密封性和破裂压力稳定性。产品已配套至多种型号飞行产品,并经过了飞行及试车考核。

参考文献

- [1] 白少卿,孙亮.膜片阀破裂压力稳定性研究[J].火箭推进,2015,41(6):46-50.
BAI S Q, SUN L. Research of bursting pressure stability for membrane valve[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2015, 41(6):46-50.
- [2] 刘文博,韩世涛,肖远,等.充放气速率对膜片阀膜片开裂的影响分析[J].中国设备工程,2020(18):121-122.
LIU W B, HAN S T, XIAO Y, et al. Analysis of the influence of inflation and deflation rate on the cracking of membrane valve diaphragm [J]. China Plant Engineering, 2020(18):121-122.
- [3] 中国机械工程学会焊接学会.焊接手册(第2卷):材料的焊接[M].北京:机械工业出版社,2013.
- [4] 李亚江,李嘉宁.激光焊接/切割/熔覆技术[M].北京:化学工业出版社,2012.
- [5] SALMINEN A S, KUJANPAEAE V P, MOISIO T I. Interactions between laser beam and filler metal [J]. Welding Journal, 1996, 75(1):9-13.
- [6] 陈彦宾.现代激光焊接技术[M].北京:科学出版社,2005.
- [7] 李亚江,王娟,夏春智.特种焊接技术及应用[M].2版.北京:化学工业出版社,2008.
- [8] TZENG Y F. Process characterisation of pulsed Nd:YAG laser seam welding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2000, 16(1):10-18.
- [9] 陈红梅,高立.发动机中冷器脉冲激光焊接研究[J].应用激光,2009,29(4):320-324.
- [10] 庞盛永.激光深熔焊接瞬态小孔和运动熔池行为及相关机理研究[D].武汉:华中科技大学,2011.
- [11] ГАПЕЕВ И С, 宋忠明.不同厚度异种金属零件的激光焊接[J].国外机车辆工艺,2017(4):17-19.
- [12] 董伟伟,林健,许海亮,等. SUS304 不锈钢超薄片脉冲激光焊接工艺及接头的显微组织和力学性能[J].机械工程材料,2019,43(5):38-42.
- [13] HE X, FUERSCHBACH P W, DEBROY T. Heat transfer and fluid flow during laser spot welding of 304 stainless steel[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2003, 36(12):1388-1398.
- [14] 陈涛,王智勇,肖荣诗,等.脉冲激光焊接的数学模型[J].焊接学报,2001,22(2):9-14.
- [15] 马广义,吴东江,王占宏,等.脉冲激光焊接对超薄 Hastelloy C-276 焊缝成形的影响[J].中国激光,2011,38(6):161-165.
- [16] 胡玉,张健,谭小军,等. Nd:YAG 脉冲激光焊接 TC4 时峰值功率、脉宽对焊缝成形的影响[J].应用激光,2014,34(5):427-432.
- [17] 秦国梁,林尚扬.激光焊接体能量及其对激光深熔焊缝熔深的影响[J].焊接学报,2006,27(7):74-76.
- [18] 宋凡,张祎玲,林嘉伟,等.空间发动机激光焊功率阈值研究[J].火箭推进,2018,44(4):40-46.
SONG F, ZHANG Y L, LIN J W, et al. Study on power threshold of laser welding for space engine [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2018, 44(4):40-46.
- [19] 熊丽娟,都东,何云峰,等.小尺寸不锈钢片脉冲激光焊接的参数分析[J].应用激光,2003,23(1):22-24.
- [20] LIU H, NAKATA K, YAMAMOTO N, et al. Mechanical properties and strengthening mechanisms in laser beam welds of pure titanium [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2011, 16(7):581-585.
- [21] LIU H, NAKATA K, YAMAMOTO N, et al. Microstructural characteristics and mechanical properties in laser beam welds of Ti₆Al₄V alloy [J]. Journal of Materials Science, 2012, 47(3):1460-1470.
- [22] 姚伟,巩水利,陈俐.钛合金激光焊接接头的组织和力学性能[J].焊接学报,2006,27(2):69-72.