

# 大熔深激光焊气孔抑制技术

宋 凡<sup>1</sup>, 潘 攀<sup>1</sup>, 陈晓江<sup>2</sup>, 唐 磊<sup>2</sup>, 刘生建<sup>2</sup>

(1. 上海空间推进研究所, 上海 201112;

2. 上海空间发动机工程技术研究中心, 上海 201112)

**摘 要:**针对空间发动机中频繁出现的大熔深激光焊需求,以及随之而来的工艺性气孔超标问题,在3种工艺模式下开展了气孔抑制技术研究:一为非熔透焊模式、稍快焊接速度、正向大幅提高离焦量( $\geq 4$  mm)、负方向适当倾斜入射( $-10^\circ$ )和辅以大功率补偿熔深;二为非熔透焊模式、普通焊接速度、正向少许提高离焦量、垂直入射、特定扫描波形(O形)、特定扫描频率(100~150 Hz)和特定扫描幅度(0.4~0.6 mm);三为稳定熔透焊模式、稍慢焊接速度、表面聚焦、垂直入射、调整功率保证焊缝背宽比介于适宜范围内(0.45~0.65)。最终试验结果显示在4 mm熔深前提下,3种方法皆可将焊缝气孔率控制在5%以下,满足航天焊接标准的II级质量要求,且采用最佳工艺规范焊接的产品已通过了飞行试验考核。

**关键词:**激光焊;大熔深;气孔率;抑制技术;工艺参数

**中图分类号:** TG456.7      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-9374(2019)06-0084-06

## Porosity suppression technology for large-depth laser welding

SONG Fan<sup>1</sup>, PAN Pan<sup>1</sup>, CHEN Xiaojian<sup>2</sup>, TANG Lei<sup>2</sup>, LIU Shengjian<sup>2</sup>

(1. Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Space Engine, Shanghai 201112, China)

**Abstract:** Aiming at the frequent demand for deep penetration laser welding in space engines, and the consequent problem of process porosity, researches on porosity suppression technology were carried out in three process modes. The first type is a non-fusion welding mode, slightly faster welding speed, positively increasing the amount of defocus ( $\geq 4$  mm), proper oblique incidence in the negative direction ( $-10^\circ$ ), and supplemental high power. The second type is a non-fusion welding mode, common welding speed, positive defocusing amount, vertical incidence, shaped scanning wave (O-shape), scanning frequency (100~150 Hz), and scanning amplitude (0.4~0.6 mm). The third type is a stable penetration welding mode, slightly slower welding speed, surface focusing, vertical incidence, and appropriate power to ensure the back-width ratio between an appropriate zone (0.45~0.65). Final results show that under the premise of 4mm penetration depth, all of the three methods can control the porosity of the weld to be low 5%, which meets the second-level quality requirements of the aerospace welding standard. Meanwhile, the products with the best process specifications have passed the flight test.

收稿日期:2018-10-07;修回日期:2019-03-23

基金项目:装发部预研航天科技联合基金项目;上海市科学技术委员会资助课题(17DZ2280800)

作者简介:宋 凡(1989—),男,硕士,研究领域为空间推进系统激光焊接工艺技术

**Keywords:** laser welding; large-depth weld; porosity; suppression technology; process properties

0 引言

随着深空探测技术的快速发展,空间发动机中的大熔深激光焊需求急剧增多(熔深 $h > 1.5\text{ mm}$ )。气孔是激光焊缝中最普遍存在的缺陷,而目前行业内尚无系统性的控制理论基础,因此激光焊技术的应用瓶颈逐渐凸显,导致在产品设计中熔深较大时只能让位于电子束焊。因此需要从空间发动机的典型产品结构出发,探索研究有效的激光焊气孔抑制技术,得到可以工程化使用的专门工艺方法,从而提高本单位激光焊的能力上限,降低生产成本和制造周期,拓宽设计人员的发挥空间。

1 技术要求

为明确焊接参数与焊缝内部产生气孔的量化关系,引入气孔率作为评估标的。定义气孔率 $P$ 为气孔直径 $A_p$ 之和与焊缝全长 $A_w$ 比值<sup>[1]</sup>,即

$$P = \sum A_p / A_w \times 100\% \tag{1}$$

空间发动机激光焊接头的常用材料为不锈钢 1Cr18Ni9Ti,其焊接简化结构如图 1 所示。焊后需对焊缝进行多项质量检查,具体技术要求见表 1。

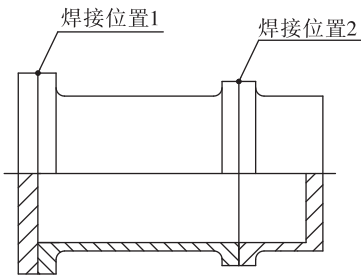


图 1 大熔深激光焊接头结构

Fig. 1 Schematic structure diagram of the laser welding joint

表 1 大熔深激光焊接头技术要求

Tab. 1 Technical requirements of the laser welding joint				
熔深/ mm	气孔率	爆破性能/ min	耐压性能/ min	氦气漏率/ (Pa · m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )
1.5 ~ 4.0	I 级 ≤ 3%	70 MPa	53 MPa	35 MPa
	II 级 ≤ 5%	≥ 5	≥ 15	≤ 10 <sup>-7</sup>

2 工艺试验

激光深熔焊气孔按形成原因可分 3 类:①母材受污染而产生的成分性气孔;②焊接过程中匙孔不稳定而导致的工艺性气孔;③保护气或空气卷入匙孔而形成的混入性气孔。

对于成分性气孔,需要通过焊前严格清理来减少和避免。对于工艺性和混入性气孔,需要从焊接过程出发以分析。大阪大学 Mizutani/Matsunawa、华中科技大学陈俐、哈焊所王威等人<sup>[2-5]</sup>的研究表明,在相对稳定的激光深熔焊过程中,光束通过孔壁的多次反射到达匙孔底部,金属蒸汽的周期性强烈喷发变化导致匙孔和熔池的高频振荡波动。当某个时刻孔底的波动超过一定限度后,若干个孤立的气泡就会应运而生,如果气孔离熔池表面的距离过远,或液态金属的凝固速度过快,或气泡上浮逸出的动力不足,则它们最终将残留于固态焊缝中而形成气孔。因此合适的工艺参数能减小匙孔的波动频率或幅度,或形成较好的熔池环境以利于气泡的逸出,从而可以抑制气孔超标现象的产生<sup>[6]</sup>。

2.1 正向离焦焊思路

为了探究功率、速度、离焦量、入射角等因素对气孔行为的影响规律,在固定其他参数的基础上对这 4 种参数进行了正交试验(定义焦点在工件上方时离焦量为正、光束向后仰时入射角为负)。焊后剖切检测熔深并逐一进行射线拍片,最终所得熔深和气孔率随参数而变化的情况如图 2 所示。

在得到每个特定熔深的前提下,当速度和功率的搭配发生变化时,焊缝的气孔率有所差别(熔深 $< 1.85\text{ mm}$ 时,慢速低功率的焊缝气孔率更低;熔深 $\geq 1.85\text{ mm}$ 时,快速高功率的焊缝气孔率更低)。正向离焦和负角入射更有利于抑制气孔生成,并且正向离焦的作用更明显。通过实验发现,离焦量增至 8 mm 及以上时,过大的熔宽和热输入对接头成形和结构精度造成了不利影响;此外负角过大时光束深熔转变区间大幅延后,因此这两项参数不宜设置过大。

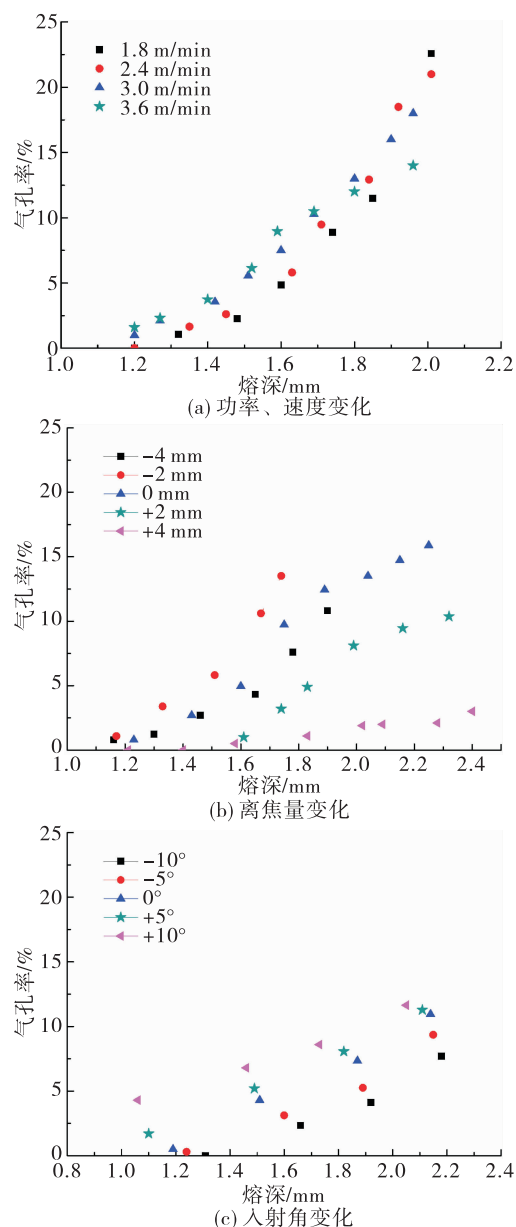


图2 工艺参数改变时焊缝气孔率与熔深的对应关系

Fig. 2 Relationship of the porosity and the welding depth by the change of process parameters

有研究做了匙孔振幅与激光功率/焊接速度的关系仿真<sup>[7]</sup>,计算表明当激光功率线性减小或焊接速度线性增大时,匙孔振幅也显著减小。在以较小功率作低熔深焊接时,匙孔的振荡已经比较稳定,此时即使提高焊接速度,其促进稳定振荡的作用相对不明显。而提升速度会缩减光束在当前位置的加热时长,即匙孔的存续时间更少,导致金属蒸气完全喷出的概率降低,因此从气孔生成角度来说,提升速度起的消极作用更大。反之在以较大功率

作高熔深焊接时,匙孔的振荡非常不稳定,高速促进稳定振荡的作用为主,最终表现为焊缝内的气孔更少。

正离焦时熔池表面的光斑比实焦时更大,并且光束呈圆锥形发散状,功率不变时功率密度更低,即需要提高功率以造成相同的熔深。此外有研究<sup>[8]</sup>表明,光束在孔内进行多次吸收和反射时,主要的光能都在1~3次的反射位置被吸收,而正离焦相较于实焦和负离焦来说,相同反射次数的位置更靠上<sup>[9]</sup>,即匙孔上沿的受热比例更高。加上更高功率带来更多的金属气化量,正离焦时匙孔的开口程度更大,熔池横截面形状趋于三角形而非丁字形,匙孔闭合所需的时间也更长,金属蒸气更容易完全喷出,即正离焦时焊缝气孔数量更少。

理想的匙孔形态一般为倒直立的圆锥,然而在实际的焊接过程中,由于光束的连续移动和熔池的黏滞作用,匙孔会发生向后的弯曲变形<sup>[10]</sup>。当光束入射角为负时,光束相对于前进方向轻微后仰,导致匙孔下部的后弯程度有所减小,即匙孔的整体形状更趋于竖直。此时激光功率和焊接速度不变,因此熔池匙孔的总长不变,即留给金属蒸气喷出的路程不变。考虑到越竖直的匙孔越利于蒸气顺畅地喷出,蒸气越不易于残留在焊缝内,即最终焊缝内部的气孔更少。

综上,第一种抑制气孔的工艺思路为:常规激光焊接头、稍快的焊接速度、正向大幅提高离焦量、负方向适当倾斜入射和辅以大功率补偿熔深。

## 2.2 光斑扫描焊思路

前一节的焊接技术开发于某种功能单一的老式激光焊机,该焊机只具备单激光、单光束和固定光斑的硬件功能,而近年来通过改进设备来实现抑制气孔的新方法日益增多,例如激光电弧复合法、双光束法、光斑扫描法等<sup>[11-14]</sup>。上述方法的核心目的都在于通过改变光斑的作用形态,进而扩大匙孔的口径和减缓孔口闭合的速度,创造有利于蒸气逸出和气泡上浮的环境,从而实现减少工艺性气孔的目的<sup>[15]</sup>。

在光斑扫描焊模式下,可调整的扫描参数为波形 $S$ 、频率 $f$ 和幅度 $A$ (半长)。在固定其他参数的基础上对这3种参数进行了正交试验,最终所得熔深和气孔率随参数变化的情况如图3所示。

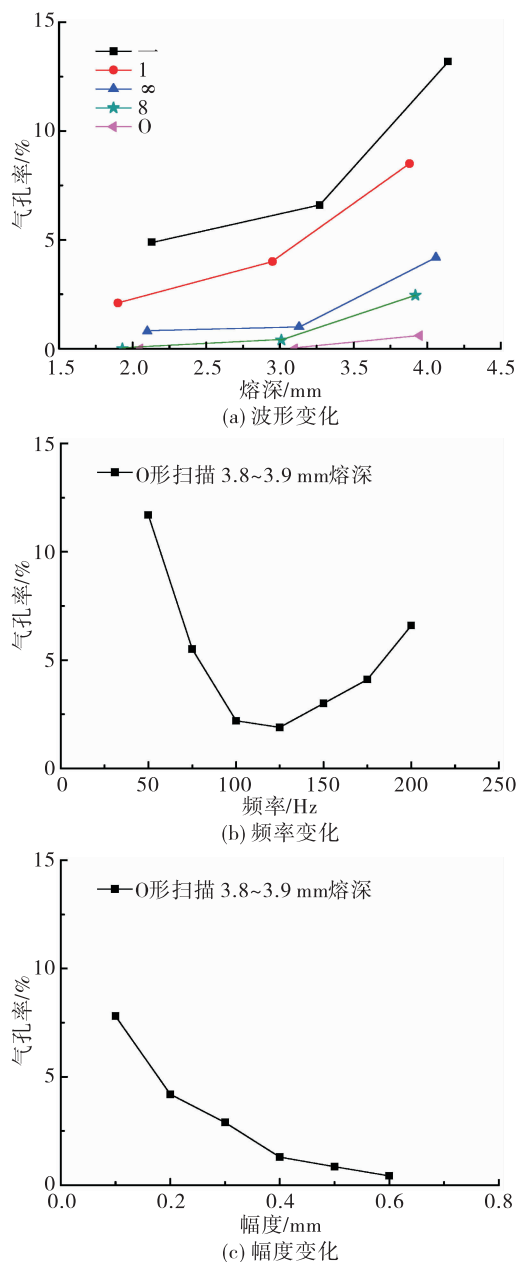


图3 扫描参数改变时焊缝气孔率与熔深的对应关系

Fig. 3 Relationship of the porosity and the welding depth by the change of scan parameters

在得到每个特定熔深的前提下,对于几种常见的扫描波形来说,0形扫描的焊缝气孔率更低;最优的扫描频率范围为100~150 Hz,过高或过低的频率都会减弱气孔抑制效果。扫描幅度越大气孔率越低,但考虑到幅度较大时频率会受影响,而且焊缝表面宽度不宜过大,因此最优幅度范围为0.4~0.6 mm。

在光斑扫描激光焊中,光束按照一定的波形、幅度和频率做规律性摆动。首先光束的横向运动减少了纵深向的热输入,即减小了匙孔熔池的深宽比;其次扫描导致光斑附近的焊缝发生反复重熔,即延长了液态熔池的停留的时间;最后光束的摆动导致匙孔随之摆动,可以对液态熔池起到一种规律性的搅拌的作用,从而改变了熔池内温度场和流体场的分布状况,重塑了液态金属传热和对流的模式。以上几种作用都会形成有利于气泡浮出的熔池形态,从而对抑制甚至消除气孔起到了明显的作用<sup>[16]</sup>。在幅度一定的情况下,频率决定了光斑对熔池的搅拌程度;在频率一定的情况下,幅度决定了光斑对熔池的搅拌面积;而波形的区别在于根本上改变传热和传质的形式,例如1形是横向重熔搅拌;一形是纵向重熔搅拌,0,8及 $\infty$ 形是横纵向兼有但侧重度不同。这些搅拌参数都直接决定着匙孔的形态和稳定性,从而对气孔倾向产生不同程度的影响。

综上,第2种抑制气孔的工艺思路为:振镜摆动激光头、普通的焊接速度、正向少许提高离焦量、垂直入射、0形扫描波形、100~150 Hz扫描频率、0.4~0.6 mm扫描幅度。

### 2.3 稳定熔透焊思路

前两节的焊接模式为非熔透焊模式,即整条焊缝的最大熔深小于工件的壁厚。随着激光焊的线能量逐渐增大,熔池和匙孔会向纵深处发展,当熔池刚好穿透而匙孔尚未穿透时,匙孔前壁高速向下流动的熔融金属克服表面张力流出工件背面,该金属液柱在冷却时凝固成明显的背面余高,此时的焊接模式为临界熔透焊。当熔池和匙孔都穿透工件时,大部分金属蒸气在高压的作用下从下孔口喷出,同时匙孔周围的熔融金属在蒸汽反冲力的驱动下向下流动,并在克服表面张力的作用后脱离熔池形成背面飞溅,直接导致焊缝背面不再有明显余高,此时的焊接模式为稳定熔透焊。

为了探究熔透程度因素对气孔行为的影响规律,在固定其他参数的基础上进行了对比试验(以背面熔宽/正面熔宽即“背宽比”来区分熔透程度)。焊后剖切检测熔深并逐一进行拍片,最终所得熔深和气孔率随参数变化的情况如图4所示。

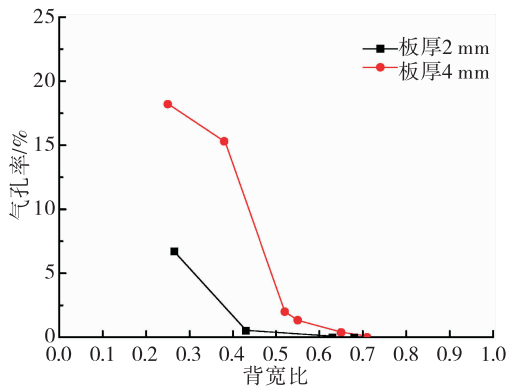


图 4 背宽比不同时焊缝气孔率与熔深的对应关系  
Fig. 4 Relationship of the porosity and the welding depth by the change of back-width ratio

在同样熔透试件壁厚 ( $h = 2/4\text{ mm}$ ) 的前提下, 当背宽比小于 0.4 ( $h = 2\text{ mm}$ ) 或 0.45 ( $h = 4\text{ mm}$ ), 即处于临界熔透焊模式时, 焊缝内部气孔数量较多, 气孔率明显超过标准要求; 当背宽比大于 0.4 ( $h = 2\text{ mm}$ ) 或 0.45 ( $h = 4\text{ mm}$ ), 即处于稳定熔透焊模式时, 焊缝内部气孔急剧减少至 3% 以下, 且当背宽比处于 0.6 ~ 0.7 范围内时气孔基本消失。考虑到焊缝宽度和热变形量的结构相性, 不建议背宽比大于 0.65。

在非熔透和临界熔透模式下, 匙孔直径较小且只有上部一个开口, 在高频振荡的熔池内部, 匙孔中部的提前聚合会将气体封闭形成气泡。有研究<sup>[4]</sup>称由于稳定熔透模式下的匙孔底部也有开口, 因此金属蒸气逸出的通道数翻倍且路程缩短, 同时较高的熔透功率增大了匙孔的束腰直径, 导致匙孔四壁液态金属提前聚合成孔的概率大大减小。

综上, 第三种抑制气孔的工艺思路为: 常规激光焊接头、稍慢的焊接速度、表面聚焦、垂直入射、调整功率保证焊缝背宽比介于 0.45 和 0.65 之间。

3 产品模拟件验证

焊接设备采用德国通快公司生产的 Nd: YAG 固体激光器, 最大功率为 3 kW。焊接过程保护气为高纯氩, 吹送方式为旁轴 45° 后吹。

零件在焊前先用温热微生物洗液除油, 后用 HF/HNO<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 混合剂除去氧化膜, 再用酒精将除油液和酸洗剂冲净, 最后经过 80° 和 1 h 的烘干以除去酒精。清理好的零件按图进行装配和定位, 并装

夹到激光焊机的卡盘上。对焊缝进行回转检测校调, 保证错边不超过 0.05 mm, 间隙不超过 0.01 mm。

焊前须重新标定焦点和叉线, 成功后方可编辑参数开始焊接。3 种思路下的具体参数如表 2 所示。

表 2 产品模拟件激光焊接工艺参数  
Tab. 2 Process parameters of laser welding for product simulation parts

组号	功率/ W	速度/ (m · min <sup>-1</sup> )	离焦量/ mm	入射角/ ( ° )
1	2 000 ~ 5 000	1.8 ~ 3.0	+4 ~ +8	-10
2	1 500 ~ 3 000	1.5 ~ 2.4	0 ~ +1	0
3	1 400/3 800	1.5	0	0

第 2 组横扫描参数为: 0 型波/120 Hz/0.5 mm, 焊后对所有焊缝进行无损检测, 同时记录气孔和裂纹的数量与尺寸。对金相试件进行有效熔深检测记录, 对性能试样进行爆破强度、耐压强度和氦气漏率检测记录, 最终所得测试结果如表 3 所示。

表 3 产品模拟件焊缝性能测试结果  
Tab. 3 Test results of welds in product simulation parts

组号	气孔率/ %	熔深/ mm	爆破性能/ min	耐压性能/ min	氦气漏率/ (Pa · m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )
1	<1	1.55 ~ 4.0	≥5 通过	≥15 通过	4.6 × 10 <sup>-8</sup>
2	0 ~ 4.3	1.6 ~ 3.9	≥5 通过	≥15 通过	7.7 × 10 <sup>-8</sup>
3	<2	2.0 / 4.0	≥5 通过	≥15 通过	6.3 × 10 <sup>-8</sup>

表 3 显示所有试件的焊缝质量都满足相关标准的 I 级要求, 证明 3 种工艺思路均可有效地抑制激光焊接工艺性气孔。

上述气孔抑制技术已应用于百、千牛级单、双组元姿轨控发动机中, 相关运载、载人和探测动力系统均已经过试车和飞行考核。

4 结论

基于空间发动机常用的不锈钢材料, 其大熔深激光焊接头气孔抑制技术一般有以下 3 种:

1) 在相同的特定熔深下, 随着焊接速度、正向



离焦量和负向入射角的增大,激光焊缝内部的气孔相应减少。因此第一种抑制气孔的工艺思路为:稍快的焊接速度、正向大幅提高离焦量(+4~+8 mm)、负方向适当倾斜入射( $-10^\circ$ )和辅以大功率补偿熔深。

2)在相同的特定熔深下,恰当的扫描波形、合适的扫描频率和更大的扫描幅度,都会减少激光深熔焊缝的气孔率。因此第2种抑制气孔的工艺思路为:普通的焊接速度、正向少许提高离焦量、垂直入射、O形扫描波形、100~150 Hz扫描频率、0.4~0.8 mm扫描幅度。

3)前两种非熔透焊模式下抑制气孔的工艺思路需要大功率激光器或扫描式激光头,并不适用于功率较低且功能简单的激光焊机。若产品结构允许背面机械加工,则可采用稳定熔透焊模式以替代。因此第3种抑制气孔的工艺思路为:稍慢的焊接速度、表面聚焦、垂直入射、调整功率保证焊缝背宽比介于0.45~0.65之间。

#### 参考文献:

- [1] 宋凡,马纪龙,于康,等.空间发动机激光深熔焊气孔特性研究[J].焊接,2018(8):44-49.
- [2] MIZUTANI M, KATAYAMA S, MATSUNAWA A. X-ray observation of keyhole instability in zinc molten pool and estimation of recoil pressure in laser welding[C]//Pacific International Conference on Applications of Lasers and Optics. Melbourne, Australia: Laser Institute of America, 2004.
- [3] MATSUNAWA A, SEMAK V. The simulation of front keyhole wall dynamics during laser welding[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1997, 30(5):798-809.
- [4] 王威,徐广印,段爱琴,等.1420铝锂合金激光焊接气孔形成机理[J].焊接学报,2005,26(11):59-62,2.
- [5] 陈俐.航空钛合金激光焊接全熔透稳定性及其焊接物理冶金研究[D].武汉:华中科技大学,2005.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 金湘中.激光深熔焊接小孔效应的理论和试验研究[D].长沙:湖南大学,2002.
- [9] 陈虹.激光光束质量对光束传输聚焦和加工质量的影响[D].北京:北京工业大学,2006.
- [10] 程元勇.激光深熔焊接铝合金孔内等离子体的反韧致辐射吸收研究[D].长沙:湖南大学,2012.
- [11] XIE J. Double beam laser welding[J]. Welding Journal, 2002, 81(10):223-230.
- [12] 李俐群,陈彦宾,陶汪.铝合金双光束焊接特性研究[J].中国激光,2008,35(11):1783-1788.
- [13] 包刚,彭云,陈武柱,等.超细晶粒钢光束摆动激光焊接的研究[J].应用激光,2002,22(2):203-205,208.
- [14] 赵琳,张旭东,陈武柱,等.光束摆动法减小激光焊接气孔倾向[J].焊接学报,2004,25(1):29-32.
- [15] 滕彬,杨海锋,王小朋,等.激光小孔型气孔产生原因及抑制方法[J].焊接,2015(9):34-37,74.
- [16] 张甫,王威,王旭友,等.TC4钛合金激光扫描焊接工艺参数对气孔的影响[J].焊接,2016(2):35-39,71.

(编辑:马杰)