

TC4 钛合金激光焊中工艺参数对气孔生成量的影响

李海刚¹ 原 璋² 程 昊¹ 蒲海涛²

常保华² 都 东² 单际国²

(1 航天材料及工艺研究所,北京 100076)

(2 清华大学机械工程系先进成形制造教育部重点实验室,北京 100084)

文 摘 研究了 TC4 钛合金激光焊接在平焊、横焊两种位置下工艺参数对气孔生成量的影响。结果表明:平焊时,气孔生成量随激光功率、离焦量的增大先减小后增大,随焊接速度的增大先增大后减小;横焊时,气孔生成量随激光功率的增大而增大,随焊接速度的增大而减小,随离焦量的增大先减小后增大。利用正交试验方法得到的优化工艺参数进行焊接,气孔生成量大幅减少,在两种位置下均可得到内部质量良好的焊缝。

关键词 TC4 钛合金,激光焊接,平焊,横焊,气孔

中图分类号: TG456.7

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2017.06.007

Influence of Welding Parameters on Porosity in Welding of TC4 Titanium Alloy in Two Positions

LI Haigang¹ YUAN Zhang² CHENG Hao¹ PU Haitao²

CHANG Baohua² DU Dong² SHAN Jiguo²

(1 Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

(2 Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University and Key Laboratory for Advanced Manufacturing by Materials Processing Technology, Ministry of Education of P.R.China, Beijing 100084)

Abstract The influence of welding parameters on porosity in the welding of TC4 titanium alloy in flat and horizontal positions was investigated. Results showed that parameters had different influences on porosity in different positions. In flat position, the amount of porosity decreased first and then increased with the increase of laser power and defocus, it increased first and then decreased with the increase of welding speed; in horizontal position, the amount of porosity decreased with the decrease of laser power and the increase of welding speed, and it decreased first and then increased with the increase of defocus. By optimization of parameters with the range analysis method, the amount of porosity is reduced significantly in weld beads, and welds with good inner quality could be produced under both flat and horizontal welding positions.

Key words TC4 Titanium alloy, Laser welding, Flat position, Horizontal position, Porosity

0 引言

TC4 钛合金具有比强度高、耐腐蚀性好的优势,在航天、航空领域得到了广泛的应用,例如军用和民

用飞机、人造卫星壳体、航天器燃料箱等等^[1-3]。焊接是航天航空零件加工的一种重要手段,可以有效减轻结构质量,降低加工成本^[4]。激光焊接功率密度

收稿日期:2017-03-17;修回日期:2017-06-13

基金项目:国家自然科学基金重点支持项目(U1537205)

第一作者简介:李海刚,1972 年出生,高级工程师,主要从事特种焊接工艺技术研究。E-mail:wuweizhixy@163.com

通信作者:常保华,1973 年出生,副教授,主要从事激光焊接与增材制造领域的研究。E-mail:bhchang@tsinghua.edu.cn

大,焊接热影响区小^[5],易于实现不同空间位姿下复杂轨迹、高柔性低热输入的加工。气孔是激光焊接中一类典型的缺陷,显著影响焊接接头的性能。国内外学者针对不同空间位置的激光焊接、激光焊接中的气孔等问题进行了研究。

GUO 等^[6]对平焊和横焊两种位置下的 S700 高强钢激光焊接进行了对比研究,研究表明,与平焊相比,横焊位置下的焊接缺陷(如咬边和焊缝下沉)都有所缓解,其原因是横焊位置实现了熔池表面张力、流体静压力(重力)和金属蒸汽的反冲压力三者的平衡。MUHAMMAD 等^[7]对不同空间位置下激光焊接低碳钢进行了研究,指出不同空间位置下熔池形貌差别不大,但是对气孔结构有显著的影响。GOUSSAIN 等人^[8]对几种材料厚板的多位置 CO₂ 激光焊接进行了研究,发现空间位置对焊接熔深有显著影响,不同位置下所对应的最优焊接参数不同。因此,研究不同位置下激光工艺参数对焊接质量的影响,对于设计和规划焊接位置与焊接路径、优化不同位置下的焊接工艺参数有重要意义。对于 TC4 钛合金在不同空间位置下激光焊接的接头质量,目前尚未见到相关报道。为此,本文研究了平焊、横焊两种位置下,工艺参数对于焊接接头内气孔缺陷的影响。

1 试验

1.1 材料及设备

TC4 钛合金板,板厚为 3 mm。在焊接前,首先对板材进行酸洗,并用丙酮擦拭表面,除去油污等有机物。试验采用德国 IPG 公司生产的 YLS-6000 型光纤激光加工系统,配合德国 REIS 公司生产的 REPC-C15 龙门式机器人进行焊接,焊接过程中采用高纯氩气保护。

根据 $L_9(3^3)$ ^[9],对两种位置分别设计正交表(表 1)。试验中,焊接功率、速度、离焦量 3 个因素各有 3 个水平,两种焊接位置分别进行 9 次实验。接头形式为对接,每块试板的尺寸为 3 mm×100 mm×250 mm。

表 1 平焊和横焊正交试验参数设计

Tab.1 Orthogonal experiment parameters design in flat and horizontal positions

水平 编号	功率/W		焊接速度 /mm·s ⁻¹	离焦量 /mm
	平焊	横焊		
1	1.9	2.1	8	-2
2	2.2	2.4	14	0
3	2.5	2.7	20	2

1.2 性能测试

对每组参数所对应的一条焊缝进行 X 射线检验,使用工业观片灯观察并测量 X 光片中气孔的累计长度。按照航天行业标准 QJ1666A—2011^[10]中的

I 级焊缝要求对内部质量进行评定。

2 结果与分析

2.1 平焊试样气孔分析

按照表 1 中的参数进行平焊条件下的 9 组正交试验,完成后对焊缝进行 X 光检测。结果发现,9 条焊缝中均存在不同程度的气孔。气孔主要位于焊缝的中部,呈零散的点状分布或者聚集成链。其中,激光功率为 2.5 kW,焊接速度为 14 mm/s,离焦量为 -2 mm 时,焊缝中气孔含量最多,呈链状聚集(图 1)。

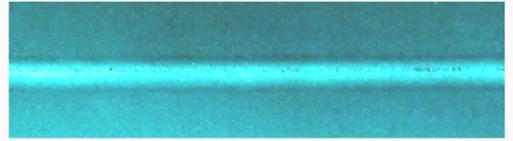


图 1 平焊焊缝中出现的大量气孔

Fig.1 Porosities in the weld of flat welding

对气孔数量进行定量统计(表 2),对结果进行极差分析(表 3)。表 3 中, K 值表示该因素该水平对指标的总影响, K 均值表示该因素该水平对指标的平均影响, R 值为该因素各 K 均值的最大差别,反映了该因素对指标影响的大小, R 值越大,该因素对指标的影响越大。将 K 均值随因素水平变化的情况绘制为折线图,如图 2 所示。

表 2 平焊正交试验数据表

Tab.2 Orthogonal experiment data sheet for flat welding

序号	功率/ kW	焊接速度/ mm·s ⁻¹	离焦量/ mm	100 mm 焊缝 气孔总长/mm
1	1.9	8	-2	7.3
2	1.9	14	0	7.0
3	1.9	20	2	18.5
4	2.2	8	0	9.4
5	2.2	14	2	8.0
6	2.2	20	-2	7.8
7	2.5	8	2	17.8
8	2.5	14	-2	33.3
9	2.5	20	0	3.4

表 3 平焊极差分析数据表

Tab.3 Range analysis data sheet for flat welding

	功率/kW	焊接速度/mm·s ⁻¹	离焦量/mm
K_1	32.8	34.5	48.4
K_2	25.2	48.3	19.8
K_3	54.5	29.7	44.3
K_1 均值	10.9	11.5	16.1
K_2 均值	8.4	16.1	6.6
K_3 均值	18.2	9.9	14.8
R	9.8	6.2	9.5

极差分析的结果说明,平焊条件下,对气孔生成量影响最大的工艺参数为功率和离焦量,接下来为焊接速度,功率和离焦量的影响程度较为接近。气孔的生成量随激光功率、离焦量的增大,先减小后增加,随焊接速度的增加,先增大后减小。根据正交试验结

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2017 年 第 6 期

果,平焊条件下最优焊接参数为:激光功率 2.2 kW,焊接速度 20 mm/s,离焦量 0。

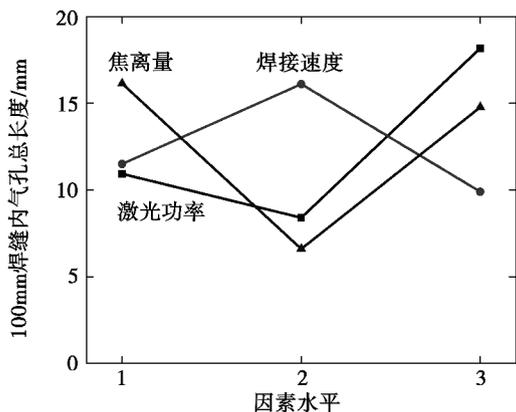


图2 平焊时气孔生成量随各因素水平变化情况

Fig.2 Change of porosity formation with different factors and levels for flat welding

2.2 横焊试样气孔分析

按照表 1 中设计的参数进行横焊条件下的 9 组正交试验,完成后对焊缝进行 X 光检测。结果发现,9 条焊缝中均存在不同程度的气孔,气孔多位于焊缝背离重力方向一侧,气孔大小不一,分散分布。其中,激光功率为 2.5 kW,焊接速度为 14 mm/s,离焦量为 -2 mm 时,焊缝气孔含量最多,如图 3 所示。可以发现,横焊过程中产生的气孔,形态和分布与平焊时有着很大的不同。对气孔数量进行定量统计(表 4),对结果进行极差分析(表 5)。将 K 均值随因素水平变化的情况绘制为折线图(图 4)。

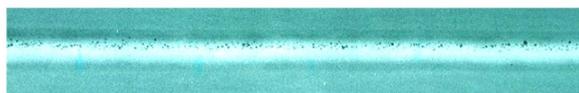


图3 横焊焊缝中出现的大量气孔

Fig.3 Porosities in weld of horizontal welding

表 4 横焊正交试验数据表

Tab.4 Orthogonal experiment data sheet for horizontal welding

序号	功率/ kW	焊接速度/ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	离焦量/ mm	100mm 焊缝气孔 总长/mm
1	2.1	8	-2	67.7
2	2.1	14	0	20.0
3	2.1	20	2	11.6
4	2.4	8	0	74.0
5	2.4	14	2	39.7
6	2.4	20	-2	26.1
7	2.7	8	2	75.1
8	2.7	14	-2	41.3
9	2.7	20	0	22.5

表 5 横焊极差分析数据表

Tab.5 Range analysis data sheet for horizontal welding

	功率/kW	焊接速度/ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	离焦量/mm
K_1	99.3	216.8	135.1
K_2	139.8	101	116.5
K_3	138.9	60.2	126.4
K_1 均值	33.1	72.3	45.0
K_2 均值	46.6	33.7	38.8
K_3 均值	46.3	20.1	42.1
R	13.5	52.2	6.2

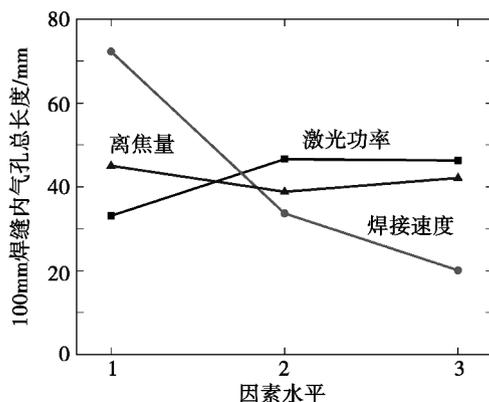


图4 横焊时气孔生成量随各因素水平的变化情况

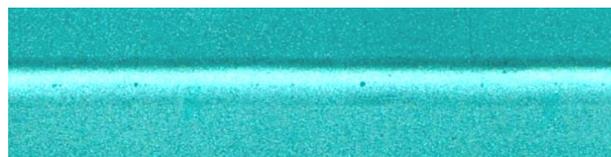
Fig.4 Change of porosity formation with different factors and levels for horizontal welding

极差分析的结果说明,横焊条件下,对气孔生成量影响最大的工艺参数为焊接速度,接下来分别为功率和离焦量。焊接速度的影响远大于功率和离焦量。气孔的生成量随焊接速度的增加、激光功率的减小而减小,离焦量改变时变化不大。

根据正交试验的结果,横焊条件下最优焊接参数为:激光功率 2.1 kW,焊接速度 20 mm/s,离焦量 0。

2.3 优化工艺参数的验证

利用上文在极差分析中得到的优化参数,进行验证性试验,两种焊缝 X 光片(图 5)。



(a) 平焊



(b) 横焊

图5 两种焊缝 X 光片

Fig.5 Optimized result for horizontal welding and flat welding

对气孔进行定量测量,平焊焊缝中 100 mm 区域内气孔总长为 6.5 mm,横焊焊缝中 100 mm 区域内气孔总长为 3.8 mm。可以发现,使用优化后的工艺参数,平焊焊缝中气孔总长虽没有达到最小值,但含量较低,仅高于表 2 中的实验 9,这是由于尽管激光焊接质量基本稳定,但相同参数下不同焊道中的气孔量仍可能存在小范围波动;横焊焊缝中的气孔含量相比 9 组正交试验大幅减少,优化效果十分显著。

2.4 两种焊接位置的对比

对比 2.1 和 2.2 中的结果可以发现,不同焊接位置下,工艺参数对气孔的生成规律产生了不同的影响。平焊条件下,对气孔生成量影响最大的工艺参数为功率和离焦量,横焊条件下则为焊接速度。

平焊条件下,表 2 中 9 组实验焊缝中气孔的平均长度为 13.15 mm;横焊条件下,表 4 中 9 组实验焊缝中气孔的平均长度为 42 mm。可见在一定的工艺参数范围内,横焊位置比平焊位置更容易形成气孔。通过本文的研究,在两种焊接位置下均获得了气孔总长低于 5 mm 的 I 级焊缝。为获得最低气孔量,在两种位置下焊接时需采用不同的激光焊工艺参数。

3 结论

(1)进行了 TC4 钛合金平焊和横焊条件下激光焊接的三因素三水平正交试验,利用极差分析获得了不同焊接位置下不同工艺参数对气孔生成量的影响规律。

(2)不同空间位置条件下,焊接接头中气孔的形态和分布不同,工艺参数对气孔生成规律的影响也不同。平焊时,气孔生成量随激光功率、离焦量的增大先减小后增大,随焊接速度的增大先增大后减小;横焊时,气孔生成量随激光功率的增大而增大,随焊接

速度的增大而减小,随离焦量的增大先减小后增大。

(3)通过极差分析得到了两种位置下各自的优化工艺参数,有效降低了焊缝中气孔的含量。在两种焊接位置均制备出了内部质量良好的焊缝。

参考文献

- [1] 李梁,孙健科,孟祥军.钛合金的应用现状及发展前景[J].钛工业进展,2004,21(5):19-24.
- [2] 邵娟.钛合金及其应用研究进展[J].稀有金属与硬质合金,2007,35(4):61-65.
- [3] 刘莹,曲周德,王本贤.钛合金 TC4 的研究开发与应用[J].兵器材料科学与工程,2005,28(1):47-50.
- [4] 刘西霞.钛合金薄板激光焊接变形控制研究[D].湖南大学,2014.
- [5] 游德勇,高向东.激光焊接技术的研究现状与展望[J].焊接技术,2008,37(4):5-9.
- [6] WEI GUO.Comparison of laser welds in thick section S700 high-strength steel manufactured in flat(1G) and horizontal(2G) positions[J].CIRP Annals-Manufacturing Technology,2015,64(1):197-200.
- [7] MUHAMMAD SOHAIL,SANG-WOO HAN,SUCK-JOO NA,et al.Numerical investigation of energy input characteristics for high-power fiber laser welding at different positions[J].The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2015,80(5/8):931-946.
- [8] GOUSSAIN J C,BECKER A,CHEHAIBOU A,et al.Heavy-section welding with very high power laser beams:the challenge[J].Proceedings of the SPIE-The International Society for Optical Engineering,1997,3097:118-128.
- [9] 陈魁.试验设计与分析[M].北京:清华大学出版社,2005.
- [10] 国家国防科技工业局.钛及钛合金熔焊技术要求[S],2011.