

高温钛合金BTi-62421S激光 焊接及超塑应用工艺研究

Research on Laser Welding and Superplastic Process for Superalloy BTi-62421S

北京航星机器制造公司 王志敏 姚为史 科
宝钛集团有限公司 马鸿海



王志敏

高级工程师,主要从事航天材料及结构的焊接工艺研究,激光及激光-MIG复合焊接工艺研究,先后承担过总装“十一五”预研课题、航天科工集团创新课题等多项研究项目。

高温钛合金 BTi-62421S 是宝钛集团在 Ti-6242S (美国牌号)、BT18Y 和 Ti-55 等高温钛合金的研制基础上,设计并优选了合金化学成分,开展了合金熔炼工艺、锻造工艺、轧制工艺流程及参数、热处理工艺、加工工艺-显微组织-力学性

采用激光焊工艺能很好地保证钛合金超塑成形时的气密性要求,表明超塑成形结合焊接技术能够一次成形出多层中空结构零件,在型号产品上应用具有很大应用前景。

能关系等研究,研究出的一种适用于 550℃ 高温的新型钛合金。因为高温钛合金比普通的 TC1、TC4、TA15 等钛合金具有更高的使用温度范围,所以其在航空航天领域中的应用潜力巨大^[1]。

在航天结构制造过程中,材料的焊接性能直接影响到材料可用性,近几年来,激光焊接作为一种高能束焊接方法,由于其能量密度高,焊缝成形好、焊接热影响区小、焊接变形小、焊接效率高、焊接质量好、自动化程度高等优点,在航天结构铝合金、钛合金材料的焊接制造中得到了越来越多的应用^[2]。

高温钛合金 BTi-62421S 作为一种新型钛合金,其焊接工艺和性能还

没有相关的研究报道,本文试验研究了该种材料的激光焊接工艺,研究了焊接接头常温和 550℃ 高温抗拉强度、550℃ 高温持久性能,并观察了金相组织,为高温钛合金 BTi-62421S 的焊接应用提供了试验依据,为该材料在后续舵面超塑成形提供试验数据。

试验方法

1 试验材料及设备

试验采用宝钛集团提供的高温钛合金 BTi-62421S 板材,热处理状态为退火状态,规格为 200mm × 55mm × 2mm,其化学成分见表 1,材料室温及 550℃ 力学性能见表 2。

表1 高温钛合金BTi-62421S的化学成分质量分数

%

牌号	合金元素							杂质元素, 不大于				
	Ti	Al	Sn	Zr	Mo	Nb	Si	Fe	N	C	H	O
BTi-62421S	余量	5.8~7.0	1.5~2.5	3.5~4.5	0.3~1.3	1.5~2.5	0.05~0.5	0.2	0.05	0.1	0.012	0.15

表2 高温钛合金BTi-62421S的室温及550℃力学性能

温度/℃	σ_f /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ_5 /%
室温	1160	1040	10.3
550	680	575	13.5

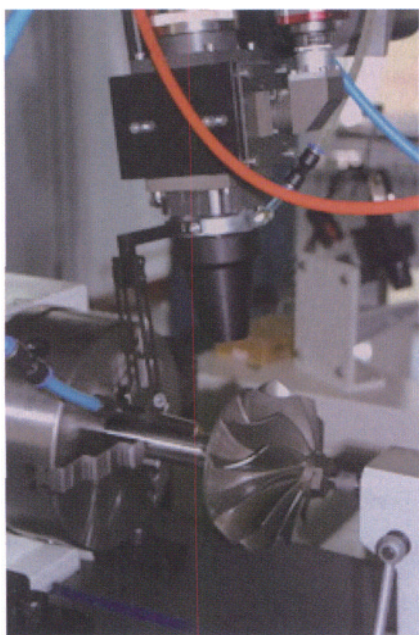


图1 激光焊接机

试验所用的激光焊接机(见图1)配备了激光器为额定功率4kW的Nd:YAG固体激光器,输出波长为 $1.06\mu\text{m}$ 的连续波激光,采用焦距为150mm的聚焦透镜。

2 焊接工艺

焊前采用碱洗除油,酸洗去除表面氧化物,经清水清洗后进行烘干,烘干后的试板要求表面洁净,无氧化色。装配前采用不锈钢丝刷对焊接区域及对接端面进行打磨,然后用丙酮擦拭干净。

焊接熔池的通气保护是钛合金焊接过程中的关键技术。保护的好

坏直接决定了焊缝成型和焊缝的综合力学性能。根据钛合金的性质,确定对焊缝及热影响区超过 400°C 区域进行惰性气体保护,焊接过程中采用喷嘴、拖罩及背面保护垫板共同对焊接接头进行保护,保护气体采用纯度为99.99%的氩气。经过工艺优化试验后,焊接时采用的较佳工艺参数如表3。

试验结果与分析

1 焊缝外观质量

试验中发现,气体的流量对焊接过程有很大影响。首先,为了避免保护气体对焊接过程的不良影响,氩气纯度应不小于99.99%;当侧吹气的流量太小时,不足以抑制焊接过程中产生的等离子体,会导致熔深波动,甚至影响焊接过程的稳定性;当侧吹气的流量太大时,作用在熔池上的气体压力过大,会造成熔池塌陷;另外,拖罩与背部保护的气体流量也直接影响了保护效果,有一个最佳值(如表3所示)。在最佳的气体流量下,焊缝正面及背面都为银白色。

激光焊过程中,保持激光聚焦点位置的准确和稳定,是保证焊缝成

形,获得一致熔深的重要因素。为了确保焊接过程的稳定性,对镜片的焦深进行测定。实际焊接过程中,当离焦量在 $-0.5\text{mm}\sim+0.5\text{mm}$ 之间变化时,都能获得熔透性很好的焊缝。实际焊接中为了确保焊接熔深均匀,离焦量应保持在焦点的 $\pm 0.5\text{mm}$ 之内。

焊接过程中发现,焊前装配间隙对焊缝质量影响极大。装配间隙超过 0.2mm 时,焊缝出现凹陷。这是由于YAG固体激光器运行在TEM01*模式下,即焦斑中央集中了大部分激光能量,而激光聚焦后的焦斑直径约 0.45mm ,当间隙过大时,大部分能量在间隙中损失,基材吸收的能量有限,不能熔化足够的母材形成焊缝。对于焊接实际生产而言,当局部装配间隙达到 0.2mm 时,可以通过调整离焦量来控制焦斑尺寸,适当降低能量密度和焊接速度来提高间隙的宽容度;还可以采取平行双光束的方式焊接,利用增大光斑直径的方法来弥补间隙过大的问题。当对接间隙控制在 0.1mm 以内时,可以获得成形优良的焊缝。

另外,焊前装配过程中,焊缝的错边对接头质量也有较大的影响。当焊缝两边的错边量超过 0.3mm 时,焊缝凸凹不平,其力学性能降低。为了确保焊缝质量合格,错边量应控制在 0.2mm 之内。

采用经过工艺优化得到的最佳参数(如表3所示)焊接,焊缝成形良好,保护效果良好,焊缝为银白色,

表3 焊接工艺参数

激光功率/kW	焊接速度/ $(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	离焦量/mm	侧吹气体流量/ $(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$	拖罩保护气体流量/ $(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$	背面保护气体流量/ $(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$
1.3	1.5	0	15	25	10

外观检查,焊缝宽窄均匀,焊缝到母材过渡圆滑,如图2所示。

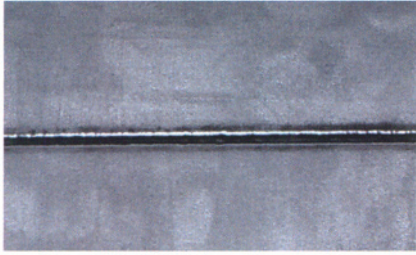


图2 焊缝外观

2 焊缝内部质量

对该焊接接头进行X光射线检查,内部没有气孔、裂纹等焊接缺陷,能够达到GJB 1718的I级接头要求。

3 抗拉强度

3.1 常温抗拉强度

将焊接完成的平板按GB 2651《焊接接头拉伸试验方法》切取试样,在万能试验机上进行了抗拉强度试验,具体数值见表4。

由于试样断裂位置位于母材,说明该焊接接头的抗拉强度与母材相当或高于母材,经和母材试样的延伸率对比,也基本相当,试样断口呈韧窝断口特征,为韧性断裂。

3.2 550℃高温抗拉强度及高温持久

焊接后的平板试样进行了550℃高温抗拉强度测试和550℃高温持久性能测试,550℃高温焊接接头抗拉强度见表5,高温持久性能见表6。

从表5可以看出,焊接接头在550℃高温状态下极限抗拉强度和母材的(615~815)MPa基本相当,试样断裂部位也为母材。从表6可以看出焊接接头在550℃高温状态在400MPa恒力下的高温持久性能较好,持续30h未出现裂纹。

4 金相分析

对材料厚度为2mm的激光焊接接头截面及母材焊缝进行了金相观察,如图3所示。

表4 常温抗拉强度

序号	极限抗拉强度值/MPa	延伸率/%	断口位置
1	1170	15%	母材
2	1120	11%	母材
3	1180	15%	母材

由图3可以看出,激光焊缝组织为细小密集的针状马氏体组织,其密集的界面对焊缝产生界面强化效果,这种针状马氏体组织的存在明显提高了焊缝强度,增强了焊缝及热影响区的强硬度^[3],使焊接接头具有较好的抗拉强度,也是抗拉试验时试样断于母材的主要原因。

超塑应用

某舵面采用激光焊接+超塑成

形工艺成形,保证气密性是超塑成形过程中的关键技术之一。舵面蒙皮采用激光焊接的方法将对接边进行焊接,保证其在超塑成形温度下的密封性,这要求焊接接头在高温高压下缓慢变形贴膜时具有一定的强度,并不出现破裂和漏气。超塑成形前的激光焊舵面见图4,超塑成形后的激光焊舵面见图5。

激光焊接接头经超塑成形后进行室温强度检测,抗拉强度值达到

表5 550℃焊接接头抗拉强度

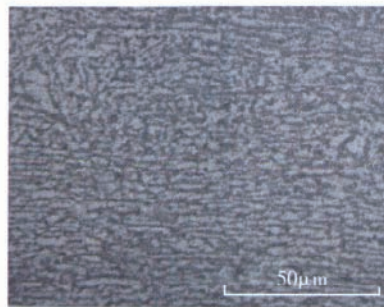
序号	极限抗拉强度值/MPa	延伸率/%	断口位置
1	761	9.5%	母材
2	802	9.5%	母材

表6 550℃焊接接头高温持久性能

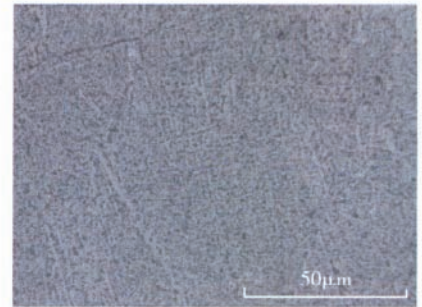
序号	试验应力/MPa	持续时间/h
1	400	>30



(a) 截面形状

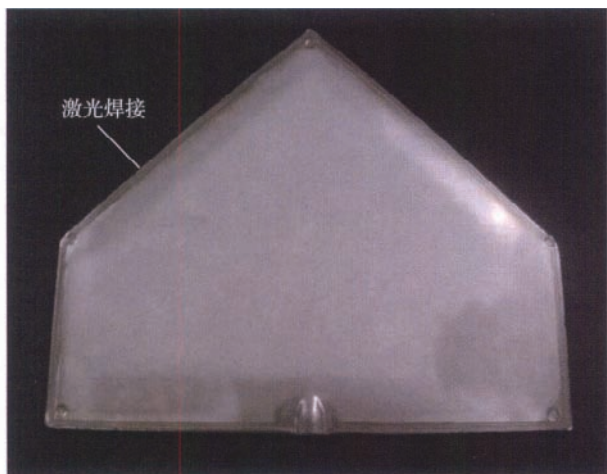


(b) 母材组织

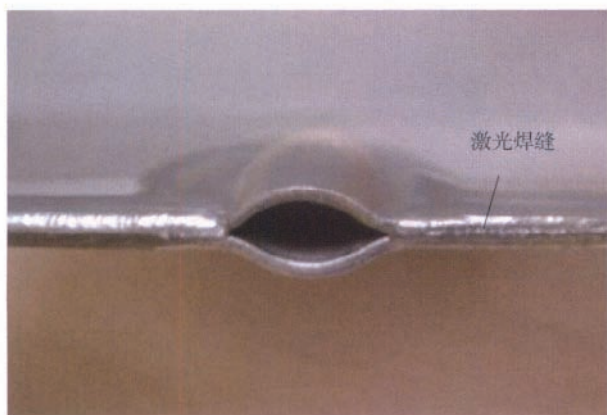


(c) 焊缝组织

图3 激光焊接接头金相组织



(a) 激光焊舵面模拟件



(b) 激光焊缝

图4 超塑成形前的激光焊舵面

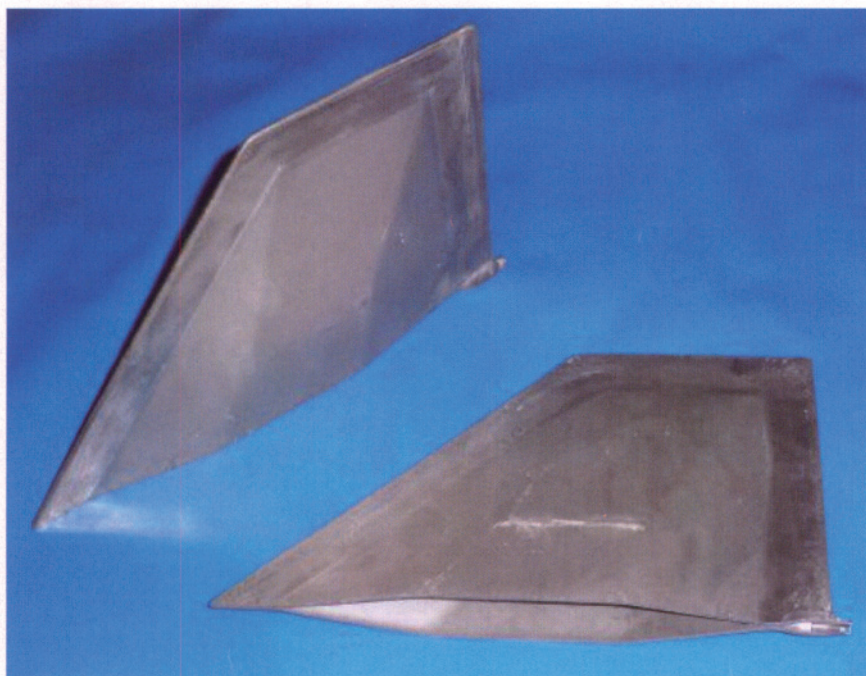


图5 超塑成形后的激光焊舵面

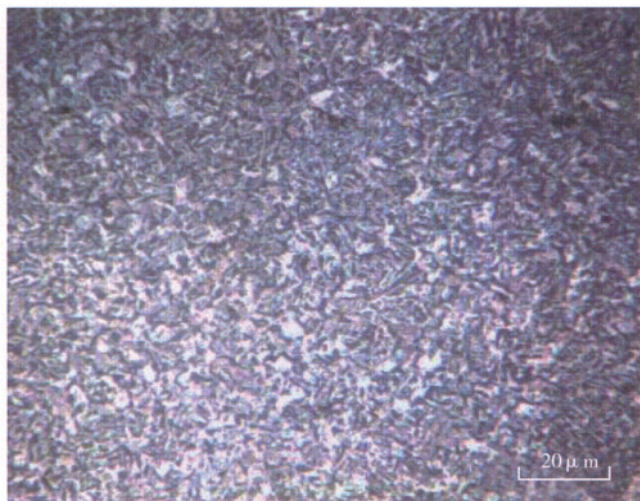


图6 超塑成形后的焊缝组织

905 MPa, 达到母材强度的 84.6%。高温 600 °C 强度达到 635 MPa, 达到母材强度的 90.5%。

对经超塑成形后的焊缝组织进行金相观察(见图 6), 金相组织没有出现裂纹等缺陷, 也无明显变

化。

结论

(1) 高温钛合金 B Ti-62421S 具有较好的激光焊接工艺性, 采用适宜的工艺参数, 可以得到外观成形良好, 内部无气孔、裂纹等缺陷的焊缝, 可以达到 CJB 1718 I 级接头要求。

(2) 高温钛合金 B Ti-62421S 激光焊接接头的常温力学性能, 550 °C 高温力学性能较好, 基本和母材相当, 拉伸断裂于母材内。

(3) 高温钛合金 B Ti-62421S 激光焊接接头在 550 °C 高温、400 MPa 的应力条件下, 持久性能较好, 持续 30h 未出现裂纹。

(4) 采用激光焊工艺能很好地保证钛合金超塑成形时的气密性要求, 表明超塑成形结合焊接技术能够一次成形出多层中空结构零件, 在型号产品上具有很大应用前景。

参考文献

- [1] 许国栋, 王凤娥. 高温钛合金的发展和应 用. 稀有金属, 2008(12): 774-780.
- [2] 陈彦宾. 现代激光焊接技术. 北京: 科学出版社, 2005.
- [3] 程东海, 黄继华. TC4 钛合金激光拼 焊接头显微组织及力学性能分析. 焊接学报, 2009(2): 103-106.

(责编 小城)