

● 试验与研究 ●

TA15 钛合金薄板激光-TIG 复合焊接头 疲劳性能研究

刘晓寒, 倪家强, 刘艳梅

(沈阳飞机工业(集团)有限公司 工艺研究所, 辽宁 沈阳 110034)

摘 要:针对复合热源焊接在钛合金航空结构件的应用,开展了 2.5 mm 厚 TA15 钛合金薄板激光-TIG 电弧复合热源对接结构焊接试验。并对 TIG 焊接头、复合热源焊接接头和母材进行了疲劳测试分析,分别计算各自在不同应力水平下的中值疲劳寿命,采用扫描电镜(SEM)对复合热源焊接接头疲劳试样断口进行观察以了解断裂路径。结果表明:复合热源焊接接头疲劳断裂发生在热影响区,复合热源焊接接头疲劳寿命大于 TIG 焊接头,在 560、672、784、896 MPa 应力水平下时复合热源接头疲劳寿命分别为母材的 91.5%、90.6%、82.7%、84%。断口由疲劳源区、裂纹稳定扩展区和瞬断区组成,起裂源位于试件表面。

关键词:激光-TIG 复合焊接;钛合金;中值疲劳寿命

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.2019.03.004

中图分类号: TG405

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2019)03-0015-04

Study on Fatigue Property of Laser-TIG Hybrid Welded Joint of TA15 alloy Thin Plate

LIU Xiaohan, NI Jiaqiang, LIU Yanmei

(Technology Research Institute, Shenyang Aircraft Corporation, Shenyang 110034, China)

Abstract: Aiming at the application of hybrid heat source welding in titanium alloy aviation structural parts, the butt welding experiment of 2.5 mm thick TA15 titanium alloy thin plate with laser-TIG arc hybrid heat source was carried out. The fatigue test analysis of the TIG welded joint, hybrid heat source welded joint and base metal was carried out, and the median fatigue life under different stress levels was calculated respectively. The fatigue specimen fracture of the hybrid heat source welded joint was observed by scanning electron microscope (SEM) to study the fracture path. The results show that the fatigue fracture of the hybrid heat source welded joint occurs in the heat affected zone, and the fatigue life of the hybrid heat source welded joint is bigger than that of the TIG welded joint. Under 560, 672, 784 and 896 MPa stress levels, the fatigue life of the hybrid heat source welded joints reaches 91.5%, 90.6%, 82.7% and 84% of base metal, respectively. The fracture consists of fatigue source zone, crack stable extension zone and instantaneous zone, and the crack initiation source is located on the surface of the sample.

Key words: laser-TIG hybrid welding; titanium alloy; median fatigue life

TA15 钛合金由于具有比强度大、耐腐蚀等优点,在飞机结构件制造中有着广泛的应用^[1-3]。对于钛合金薄板,由于制造和成形的困难,焊接已然成为一种必要的加工手段。低功率 YAG 激光-TIG 电弧复合热源(以下称“复合热源”)是一种由低功率脉冲激光对 TIG 电弧进行调控的焊接方法,由于提高了能量密度,对薄板的焊接有低热输入、低能耗、高效率等优势^[4-5]。飞机在空中所受到的气流颠簸和穿云

颠簸以及频繁起飞降落都会使飞机焊件承受疲劳载荷,并对焊件的疲劳状况提出了更高的要求。那么焊接接头的疲劳性能就成为其是否能够最终应用的主控项目。近些年,国内国际学者、研究机构对复合热源焊件机械性能做了大量的研究工作^[6-8],但对其焊接接头疲劳性能研究结果鲜见报道,严重制约了该焊接方法在航空航天领域的发展应用。本文探索了满足低功率脉冲激光-TIG 电弧复合热源焊接疲劳性能的工艺规范,同时在该工艺规范指导下实现了 2.5 mm 厚 TA15 钛合金板材的全熔透对接焊,对比研究了复合热源焊接、TIG 电弧焊接以及 TA15 母材在不同应力水平下的疲劳性能差异及其成因。本论文研究结果可以指导复合热源焊接工艺优化,为

收稿日期:2018-08-06

基金项目:国家科技重大专项项目(2013ZX04001041)

作者简介:刘晓寒(1986-),男,辽宁沈阳人,工程师,硕士,主要研究方向:航空焊接技术;电话:15142056592;
E-mail:sacxh27262@163.com

钛合金焊接结构的航空航天工程应用提供技术支撑,同时为钛合金薄板焊接接头疲劳性能分析提供参考。

1 试验方法

试验采用材料为国产 TA15 钛合金(名义成分 Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V),属于一种富含铝元素的近 α 钛合金,其化学成分如表 1 所示。母材微观组织如图 1 所示,主要由初生 α 相与散布在其晶界处的相组成的细小等轴晶。其试板尺寸为 $100\text{mm}\times 100\text{mm}\times 2.5\text{mm}$,焊丝成分与母材一致,直径为 1.0mm 。焊前对板材与焊丝表面进行打磨,除去表面氧化膜,用丙酮清除表面有机物并进行干燥处理。采用龙门式机械行走机构和激光在前的旁轴式激光与 TIG 电弧复合热源模式,并采用前方冷送丝方式进行钛合金复合热源焊接试验。试验所用的工艺参数为激光功率为 500W ,离焦量为 2mm ;TIG 焊枪与板材呈 45° 角,钨极高度为 1.5mm ,钨极尖端与激光间距为 1.5mm ,送丝角度为 30° ,TIG 电流为 170A 。由于钛合金在大气中的化学性质极为活泼,在 250°C 以上就会吸收空气中的氢、氮、氧等元素,造成焊缝的污染,影响接头的机械性能。因此,在焊接过程中,需要用充有 Ar 的保护托罩,对焊后仍处于高温区的焊缝进行待降温保护。焊枪保护气流量为 15L/min ,保护罩气体流量为 20L/min ,背面气体流量为 5L/min ,装置示意图如图 2 所示。

表 1 TA15 钛合金的化学成分(质量分数,%)
Tab.1 Chemical composition of TA15 titanium alloy (wt%)

Al	Zr	Mo	V	杂质	Ti
5.5~7.0	1.5~2.5	0.5~2.0	0.8~2.5	≤ 0.7	余量

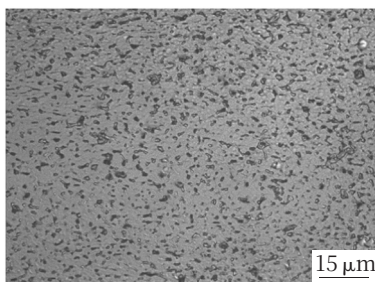


图 1 母材微观组织
Fig.1 Microstructure of base metal

为了分析接头的组织,沿接头横截面进行取样,经研磨、抛光,最后使用 Kroll 试剂对试样进行处理后,在金相显微镜下对接头组成进行观察。并根据

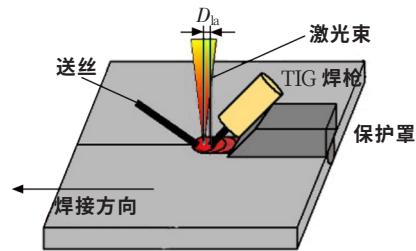


图 2 激光-TIG 电弧复合焊接装置示意图
Fig.2 Schematic of laser-arc hybrid welding

国家标准 GB/T 26076-2010 制备焊接接头疲劳试验试样,如图 3 所示。疲劳试验前需要去除试样正反面焊缝余高并对表面打磨抛光,避免由于粗糙表面对疲劳裂纹的萌生产生影响而导致试验数据不准确。每组参数下取 3 个试样进行试验,最终试验结果为 3 次试验结果的平均值,以研究接头疲劳性能差异。

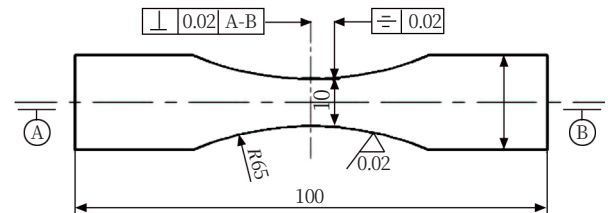


图 3 接头疲劳试验试样 (mm)
Fig.3 Fatigue test sample of welded joint (mm)

疲劳试验采用 100kN 疲劳试验机,轴向加载,室温、空气中进行,疲劳试验参数如表 2 所示。其中最大应力水平 σ_{max} 分别为母材抗拉强度的 $0.5, 0.6,$

表 2 疲劳试验参数
Tab.2 Parameters of fatigue test

最大应力水平 $\sigma_{\text{max}}/\text{MPa}$				应力比 R	加载频率 f/Hz	加载波形
组 1	组 2	组 3	组 4			
560	672	784	896	0.1	20	正弦波

$0.7, 0.8$ 倍(母材抗拉强度为 1120MPa)。采用中值疲劳寿命的计算对疲劳数据进行处理,如式(1):

$$\log \hat{N}_{50} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log N_i \quad (1)$$

式中: N_i 为焊接接头疲劳寿命观测值(测值个数满足要求); $\hat{N}_{50}$ 为可靠度 50% 的中值疲劳寿命。

最后为研究焊接接头疲劳断裂机制,利用 Zeiss Supra-55 型扫描电镜分析试样断口形貌特征。

2 疲劳性能测试结果与分析

2.1 接头疲劳断裂位置分析

图 4 为疲劳件在应力水平为 672MPa 下的疲劳试验断裂位置。从图中可以看出 TIG 焊接头疲劳试

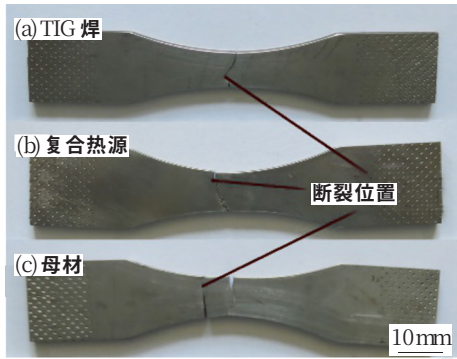


图 4 应力水平 672 MPa 下接头疲劳断口位置
Fig.4 Fatigue fracture position of welded joints under the stress level of 672 MPa

件断裂于熔合区,复合热源焊接头断裂于热影响区。疲劳裂纹的产生对材料组织梯度的敏感度很高,且萌生与扩展速率正比于材料的组织梯度。2.5mm 厚 TA15 钛合金复合热源焊接,由于焊接速度快,焊接热输入小,针状 α 相来不及长大,导致焊缝组织为较为均匀的等轴晶。近母材侧的热影响区的等轴 α 相较为粗大且仍混合有片状 α 组织。而热影响区的近焊缝侧,在粗大 α 组织中,出现了针状的 α 相,如图 5 所示。因此,在热影响区出现了较大组织梯度,该区抗疲劳断裂的能力较低。

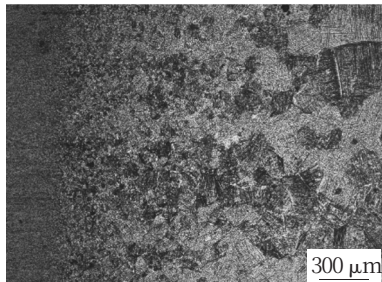


图 5 复合热源热影响区组织
Fig.5 Microstructure of HAZ of compound heat source

2.2 不同焊接方法疲劳性能分析

为了研究复合热源焊接接头的疲劳性能,本文以 TIG 焊接头与母材疲劳性能作为基准,对复合热源接头的疲劳性能进行了统计,图 6 为 672 MPa 下不同焊接方法焊接接头疲劳性能。同时为了进一步揭示不同焊接方法疲劳性能的差异,分别对 TIG 焊接与复合热源焊接热影响区组织在 SEM 下进行了观察,结果如图 7 所示,从组织角度对两种焊接方法疲劳性能差异进行探讨。

从图 6 中可以看出,两种焊接接头的疲劳性能均低于母材,且母材的疲劳寿命为 29376 次,而 TIG 接头的为 22908 次,为母材的 80%,复合热源的为

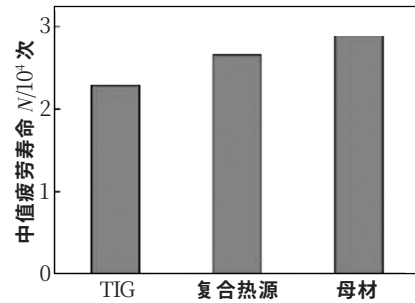


图 6 672 MPa 下不同焊接方法焊接接头疲劳性能
Fig.6 Fatigue property of joint welded by different methods under 672 MPa

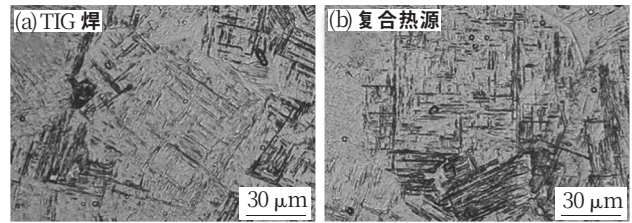


图 7 不同焊接方法热影响区组织图
Fig.7 Microstructure of HAZ of different methods

26614 次,为母材的 90.6%。

从图 7(a)中可以观察到 TIG 焊接头热影响区组织为沿不同方向析出的片层状 α 相。图 7(b)显示相对于 TIG 焊接头组织,复合热源焊接接头组织片层状 α 相的含量明显增多,且尺寸较细。

据研究,等轴组织具有较强的抗裂能力,有利于提高接头的塑性和抗冲击性能。而相对于等轴组织,裂纹在片状组织中的扩展方向的改变更加频繁,在以初生裂纹为主的基础上,又生出许多次性裂纹,这些次性裂纹会以增加裂纹总长度的形式来消耗断裂所需能量,因此片状组织有较强的抗裂纹扩展能力,可以提高接头的断裂韧性。最后,由于钛合金激光-电弧复合焊接的接头由等轴 α 相和片状 α 相组成,因此,随着等轴相的增加,接头的抗裂纹生成能力增强,而随片状组织的增加,有利于提高接头的疲劳循环次数。

2.3 不同应力水平接头疲劳性能对比

为了对复合热源钛合金焊接接头不同应力水平的疲劳性能进一步研究,将 TA15 母材,与焊接接头的疲劳性能进行对比,试验结果如图 8 所示。

从图 8 中可以看出,随着最大应力水平 $\sigma_{\max}$ 的增大,TA15 钛合金母材以及复合热源焊接接头的中值疲劳寿命均呈现出减小的趋势。此外当 $\sigma_{\max}$ 为 560 MPa 时,复合热源焊缝的中值疲劳寿命 29876 次,为母材 32636 次的 91.5%; 当 $\sigma_{\max}$ 为 672 MPa

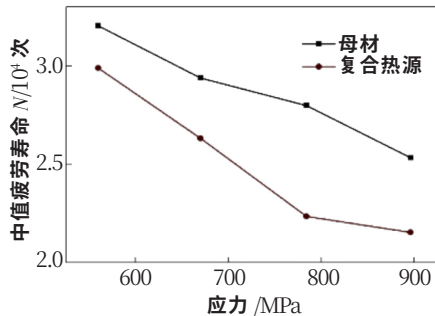


图8 不同应力水平下焊接接头疲劳性能
Fig.8 Fatigue life of joints under different stress levels

时, 复合热源焊缝的中值疲劳寿命 26614 次为母材 29376 次的 90.6%; 当 $\sigma_{\max}$ 为 784 MPa 时, 复合热源焊缝的中值疲劳寿命 24633 次为母材 29786 次的 82.7%; 当 $\sigma_{\max}$ 为 896 MPa 时, 复合热源焊缝的中值疲劳寿命 21348 次, 为母材 25324 次的 84%。

结合图 7 热影响区组织图对试验结果进行分析, 复合热源热影响区的等轴相受到拉应力作用时, 其疲劳源的形成能力较差, 形成疲劳源需要消耗较多的能量, 所以 TA15 钛合金复合热源接头疲劳性能在低应力水平下时较高。在加载的循环应力较高时, 复合热源接头局部产生了应变集中, 因此在高的疲劳循环应力作用下, 产生了塑性变形进而产生裂纹, 最终结果表现为疲劳寿命下降。

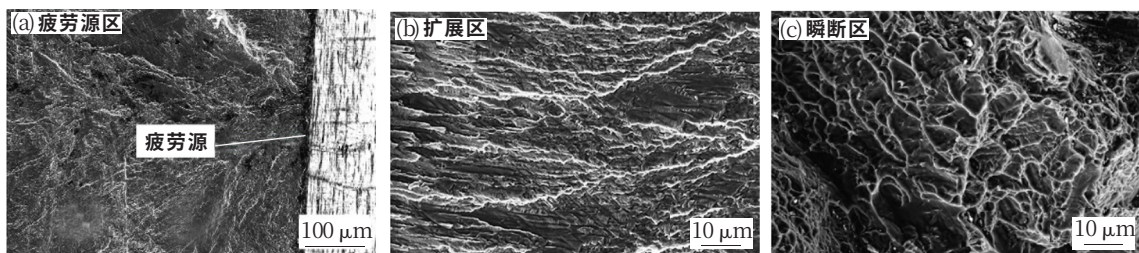


图9 复合热源疲劳断口形貌
Fig.9 Fatigue fracture morphology by hybrid heat source

4 结论

(1) 2.5mm 厚 TA15 钛合金复合热源焊接接头疲劳性能测试断裂多发生在热影响区, 这与热影响区组织梯度有密切关系。

(2) TIG 焊接头的疲劳寿命小于复合热源焊接头。随着最大应力水平增大, 母材和复合热源接头的中值疲劳性能均呈现出下降的趋势, 且相对于母材, 复合热源下降较快。在 560、672、784、896 MPa 应力水平下时复合热源接头疲劳寿命分别为母材的 91.5%、90.6%、82.7%、84%。

3 复合热源疲劳试件断口分析

已有研究结果表明, 疲劳断裂需经历疲劳裂纹萌生、裂纹平稳扩展以及失稳扩展三个阶段, 在典型疲劳断口所包含的三个区分别是: 疲劳源区、裂纹的平稳扩展区以及瞬断区三部分^[9-10]。通过用 SEM 对复合热源接头热影响区断口进行观察, 如图 9 所示。

根据裂纹的形貌来判定各区域位置, 可以发现, 疲劳断口主要由三个区域组成, 分别为具有放射状裂纹的疲劳源区; 具有韧性或脆性裂纹的扩展区以及具有韧窝状的瞬断区。从图 9 可以看出, 疲劳裂纹形成于试件表面右侧边缘, 并从右侧向左扩展。这主要是由于经过机械加工的试件表面, 虽然经过一定的粗糙度处理, 但仍然有细小的缺陷, 在试验过程中, 该位置在交变应力的作用下应力集中, 并催生出疲劳源。另外由于处于平面应力作用下的试样表面, 更有利于塑性变形, 且相对于试件内部晶粒, 试件表面的晶粒更容易滑移开裂, 形成疲劳源。随着试验的进一步进行, 疲劳裂纹继续扩展, 最终形成裂纹扩展区, 如图 9(b)所示。从图中可以看出, 扩展区形成了明显的韧性疲劳裂纹。在扩展区, 由于裂纹受到阻力较小, 裂纹不断扩展, 最终失稳得到由明显撕裂棱特征韧窝组成的瞬断区, 如图 9(c)所示。

(3) 接头疲劳试验断口可分为疲劳源区、裂纹稳定扩展区和裂纹快速扩展区三个典型区域, 裂纹起源于试件表面边缘处。

参考文献:

- [1] 赵晓龙, 王彬, 巩水利, 等. 2.0mm 厚 TC4 钛合金激光焊接接头组织与力学性能研究 [J]. 热加工工艺, 2017, 46(9): 209-211.
- [2] 史吉鹏, 王红阳, 杨林波, 等. 钛合金激光-TIG 复合焊接保护状态对焊缝成形及影响 [J]. 焊接学报, 2017, 38(2): 61-65.

(下转第 23 页)

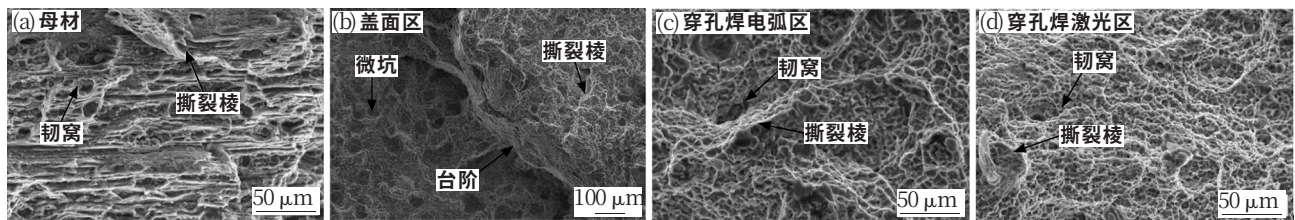


图 11 不同断口微观形貌

Fig.11 Micro morphology of different tensile fracture

显看到 7A52 铝合金的轧制分层结构。图 11(b)为盖面区断口微观形貌,从图中可以看出,盖面区断口存在解理台阶和大量微坑,撕裂棱短小弯曲,为解理型断裂。图 11(c)与 11(d)为穿孔焊的电弧区和激光区的断口微观形貌,从图中可以看出,断口同时存在大量韧窝、撕裂棱,为韧脆结合断裂。相对于激光区,电弧区的韧窝较多,且韧窝较大较深;但撕裂棱较少,因此电弧区的韧性比激光区好。

3 结论

针对传统电弧焊接高强铝合金厚板时,采用多层多道的焊接方式,坡口填充量大、层道间清理时间长、焊接效率低的问题,本课题提出采用“激光-MIG 复合穿孔+MIG 盖面”实现厚板铝合金高效率焊接的新方式。

(1) 采用激光-MIG 复合穿孔焊实现工件单道熔透,选用 MIG 摆动焊接实现单道盖面,得到成形美观的焊缝。与传统 MIG 多层多道焊接相比,焊接效率提高了 263%。

(2) 穿孔焊的热影响区为狭长的树枝晶,组织

较为粗大。熔合区组织不均匀,靠近热影响区的区域为宽度很窄的等轴细晶区,在靠近焊缝区的区域为很短的沿着焊缝中心方向生长的柱状晶结构。焊缝区为等轴晶。电弧区的组织比激光区粗大。

(3) 焊缝比母材硬度低,母材硬度为 107 HV,激光区、电弧区、盖面区焊缝区的硬度分别为母材的 75.7%、82.2%和 62.6%。盖面区的平均抗拉强度为 253 MPa,达到母材的 53.2%,为解理型断裂;穿孔焊的平均抗拉强度为 317 MPa,达到母材的 66.7%,为韧脆结合型断裂,电弧区比激光区韧性好。

参考文献:

- [1] 冉国伟,宋永伦,闫思博,等. 2219 铝合金复合热源焊接工艺及接头性能[J]. 焊接学报,2011,32(9):25-29.
- [2] 严军. 光纤激光-电弧复合焊接高强铝合金工艺、缺陷产生与质量控制[D]. 武汉:华中科技大学,2011.
- [3] Walduck R P, Biffin J. Plasma arc augmented laser welding [M]. 1994.
- [4] 许良红,田志凌,彭云,张小牧. 高强铝合金的激光-MIG 复合焊接的实验研究[J]. 稀有金属,2005(5):773-779.
- [5] 钱红丽. 7A52 铝合金光纤激光焊及激光-MIG 复合焊工艺研究[D]. 南京:南京理工大学,2014. [H]

(上接第 18 页)

- [3] 关峰,倪家强,刘广鑫,等. 大厚度 TC4-DT 钛合金电子束焊接接头微观组织和力学性能研究[J]. 航空制造技术,2017(3):74-77.
- [4] 李陈宾,刘黎明. 激光-电弧复合热源焊接钛合金薄板 T 形结构件[J]. 焊接学报,2012,33(1):29-32.
- [5] Shi J P, Zhou Y B, Liu L M. Application of pulsed laser-TIG heat source in root welding of thick plate titanium alloys [J]. Applied Sciences, 2017, 7(5): 525.
- [6] Chen M H, Xin L J, Zhou Q, et al. Effect of laser pulse on alternative current arc discharge during laser-arc hybrid welding of magnesium alloy [J]. Optics and Laser in Engineering, 52018, 100:208-215.
- [7] 王旭海,陈轩,张静,等. 间隙对激光-电弧复合焊接接头成形影响的研究[J]. 热加工工艺,2015,44(23):31-34.
- [8] 熊俊,付忠奎,鄢江武,等. 中厚板 TC4 激光-TIG 复合焊接工艺研究[J]. 热加工工艺,2015,44(15):226-229.
- [9] 刘昕,唐振云. TA15 钛合金电子束焊缝形状对疲劳性能的影响研究[J]. 航空制造技术,2013(13):119-124.
- [10] 王厚勤,张秉刚,王廷,等. 60mm 厚 TC4 钛合金电子束焊接接头疲劳性能[J]. 焊接学报,2015,36(5):14-16. [H]