

# 低密度铌合金与铌钨合金电子束焊接性能分析

许 璠 刘 政 张艳桥 宋国新

(西安航天发动机有限公司, 西安 710100)

**文 摘** 低密度铌合金与铌钨合金由于物理性能差异性较大,采用常规电子束方法焊接时,易产生焊接缺陷。为进一步探究低密度铌合金与铌钨合金焊接的可行性,通过数值模拟与工艺试验两种方法对其焊接接头的性能进行了系统研究。首先建立了异种材料有限元模型,对接头的温度场规律进行了分析;然后,采用真空电子束焊接的方法进行试验研究,从宏观形貌、力学性能、微观组织及元素分布等方面分析了接头性能。结果表明:采用电子束偏置铌钨侧焊接的方式,可获得无裂纹、无气孔,具有良好拉伸强度的低密度铌合金与铌钨合金接头。

**关键词** 低密度铌合金,铌钨合金,偏移量,电子束焊接

中图分类号:G456.3

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2022.04.014

## Analysis on Welding Properties of Low Density Niobium Alloy and Niobium-hafnium Alloy by Electron Beam Welding

XU Fan LIU Zheng ZHANG Yanqiao SONG Guoxin

(Xi'an Space Engine Company Limited, Xi'an 710100)

**Abstract** Due to the differences in physical property, low density niobium alloy and niobium-hafnium alloy were easy to produce welding defects when they were welded by conventional electron beam method. To further explore the feasibility of welding between low density niobium alloy and niobium-hafnium alloy, properties of the welded joint were numerical simulated and experimental studied. Firstly, the finite element model of dissimilar materials was established, and the temperature field of the joint was analyzed. Then, the experimental study was carried out by electron beam welding, and the macroscopic morphology, mechanical properties, microstructure and element distribution of the joint were analyzed. The results show that the joint of low density niobium-hafnium alloy and niobium-hafnium alloy without cracks, pores and has good tensile strength can be obtained by electron beam welding with niobium-hafnium alloy side offset.

**Key words** Low density niobium alloy, Niobium-hafnium alloy, Offset, Electron beam welding

### 0 引言

航天技术的发展要求发动机具有更高的推质比和比冲,这就需要所用材料既有较高的使用温度又具有更低的密度,且易于与其他部件连接。低密度Nb-Ti-Al系合金具有密度低、中温强度高、冷热加工性能优异、价格低等优点,成为引人关注的一类新型铌合金,是未来航天航空领域高温结构件的重要候选材料。目前,我国液体火箭发动机的推力室身部普遍采用同种材料的常规铌合金,如铌钨合金的短身部与延伸段,然后利用电子束焊将两者连接起来<sup>[1-4]</sup>,导致推力室重量相对较重。为了进一步实现发动机轻量化目标,根据推力

室工作温度、强度和刚度要求,在其高温段仍沿用高温强度较高的铌钨合金,而在温度较低的延伸段改用低密度铌合金,从而大幅降低推力室重量<sup>[5]</sup>。然而低密度铌合金和铌钨合金属于难熔金属,焊接性能较差,在高温下易氧化和氮化,出现焊接裂纹以及焊缝金属和热影响区脆化。而且,受异种材料特性限制,低密度铌合金与铌钨合金熔点差异性大,采用常规电子束对中焊接时,易产生焊接缺陷。因此,为了探究此焊接接头在发动机工程应用中的可行性,研究低密度铌合金与铌钨合金的焊接工艺具有重要意义。

目前,国内外学者对难熔合金材料焊接做了大量

收稿日期:2021-03-19

基金项目:装备预研联合基金项目(6141B06310101)

第一作者简介:许璠,1989年出生,硕士,工程师,主要从事焊接工艺及数值模拟技术工作。E-mail:xfan710100@163.com

的研究:白润<sup>[6]</sup>采用真空电子束焊方法,研究了低密度铌合金(LDNb)自身焊、与高强铌合金(Nb521)、高温钛合金(TC4)的焊接接头组织与性能,认为通过束流偏向高熔点合金一侧的焊接方式,得到的焊接接头性能优异;郭顺<sup>[7]</sup>采用激光偏置铝侧焊接的方式,完成了钛合金和铝合金的连接,认为接头对偏置距离具有一定的敏感性,其合适的偏置范围为0.6~1.5 mm;WANG<sup>[8]</sup>对Ti-6Al-4V合金试件进行电子束焊接试验,得到了不同工艺参数对其微观组织和力学性能的影响规律。

从以上研究可以看出,虽然国内外学者的研究已经取得了不少成果,但是尚未有低密度铌合金与铌钨合金焊接方面的报道。为此,本文在前人研究成果基础上,针对低密度铌合金/铌钨合金异种材料,建立了有限元模型,对其焊接接头的温度场规律进行分析,获得最佳焊接偏移量及工艺参数;然后采用真空电子束焊接试板,检测分析焊接接头的宏观形貌、力学性能、微观组织及元素分布,为异种难熔合金的焊接实际应用提供理论依据和参考。

## 1 工艺焊接试验

### 1.1 试验材料

试验用材料为低密度铌合金 Nb-Ti-Al、铌钨合金 NbHf10-1,厚度为 1.5 mm,焊接形式为平板对接,不添加中间层材料和焊接材料。低密度铌合金 Nb-Ti-Al、铌钨合金 NbHf10-1 材料的主要化学成分如表 1、2 所示,物理性能如表 3 所示,金相照片如图 1 所示。低密度铌合金为单相合金,再结晶态为典型的等轴晶组织,黑色颗粒为第二相弥散强化相 TiC,尺寸为 200 nm 左右,均布于晶界及晶粒内部;铌钨合金为单相固溶体合金。

表 1 低密度铌合金的主要化学成分 % (w)

Tab. 1 Chemical composition of low density niobium alloy % (w)

牌号	Nb	Ti	Al	V	Zr	Mo
Nb-Ti-Al	余量	26~35	4~10	5~10	0.5~5	0~5

表 2 铌钨合金 NbHf10-1 的主要化学成分 % (w)

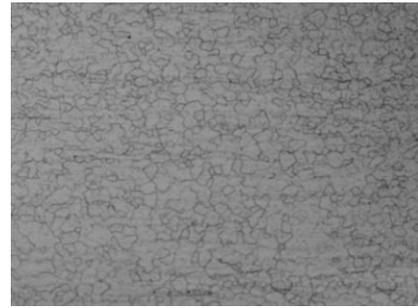
Tab. 2 Chemical composition of NbHf10-1 alloy % (w)

牌号	Nb	Hf	W	Ti	Zr	Ta
NbHf10-1	余量	9~11	≤0.5	0.7~1.3	≤0.7	≤0.5

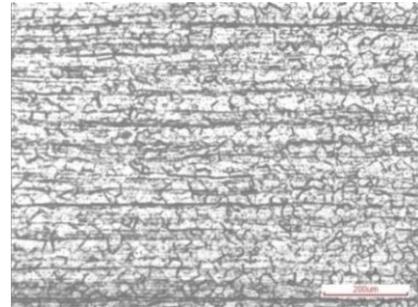
表 3 试验材料的物理性能

Tab. 3 Physical properties of test material

牌号	$R_m$ /MPa	A/%	$\rho/g \cdot cm^{-3}$	$\lambda/W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	$T_m/^\circ C$
Nb-Ti-Al	958	41	6.0	6.5	2 100
NbHf10-1	392	25	8.8	53.7	2 400



(a) 低密度铌合金



(b) 铌钨合金

图 1 试验材料金相组织

Fig. 1 Microstructure of test material

### 1.2 试验设备

试验所用的焊机为从法国 TECHMETA 公司引进的 MEDARD43 型脉冲电子束焊机,该焊机最大功率为 6 kW,加速电压为 20~60 kV 连续可调,束流强度为 0~100 mA 连续可调,枪室的真空度可达  $10^{-2} \sim 10^{-4}$  Pa。

### 1.3 焊接工艺

对待焊试件对接面及周围区域采用机械清理的方法,即焊前将待焊接端面用 200#、400#、600#、800#、1 000# 的水砂纸逐级打磨,然后用丙酮清洗并吹干。将清理好的试件底面平齐并沿长边对接放入自制夹具中紧贴压靠,使对接间隙不超过 0.05 mm。

试件放入真空室,当真空度达到  $5 \times 10^{-2}$  Pa 时,启动试验焊接程序,按表 4 所设定的工艺参数进行焊接试验。

表 4 焊接工艺参数

Tab. 4 Welding parameters

加速电压/ kV	聚焦电流 $I_f$ /mA	偏移量 $h_c$ /mm	焊接束流 $I_b$ /mA	焊接速度 $v$ /m·min <sup>-1</sup>
60	2 420	0~0.8	15~25	0.5~1.5

### 1.4 测试设备及方法

拉伸试件按照国家标准 GB/T2651—2008,沿垂直焊缝方向线切割加工,然后用砂纸进行打磨,再用丙酮进行清洗,采用万能试验机对试件进行常温拉伸试验。

截取金相试样后,采用 80#到 1 500#砂纸逐级打磨,然后用金刚石抛光剂进行机械抛光。划痕消除后,在腐蚀剂(体积比,  $HNO_3:HF:H_2O=1:3:6$ )中对观

察面进行化学浸蚀。焊缝的微观组织在OLYMPUS-GX71光学显微镜下观察,采用能谱分析仪对接头内各化学元素分布进行线扫描。

## 2 数值模拟

电子束焊接是一个热源高度集中的作用过程,运用有限元方法模拟焊接的温度场分布,有助于研究电子束的热作用过程。

### 2.1 有限元模型

建立瞬态EBW焊接有限元模型。计算选用六面体单元,焊缝区域由于温度梯度较大,取较小单元尺寸,而母材区域由于温度梯度较小,取较大的网格划分,以兼顾精度与速度。

### 2.2 热源模型

热源模型选为适用于薄板电子束焊接的旋转抛物面热源模型,其模型如图2所示。根据电子束能量分布特点,不同位置的热流输入为:

$$Q = \frac{6\eta UI(Z_e - Z_i)e^3}{\pi(e^3 - 1)H^2 r_e^2} \exp\left(-\frac{3r^2}{r_0^2}\right) \quad (1)$$

$$r_0 = r_e \sqrt{\frac{z - z_i}{z_e - z_i}}$$

式中, $Z_e$ 为抛物线的纵向坐标最大值; $Z_i$ 为抛物线的纵向坐标最小值; $r_e$ 为热源半径; $\eta UI$ 为电子束有效功率输入; $r_0$ 为热源任意截面半径; $H$ 为热源高度。

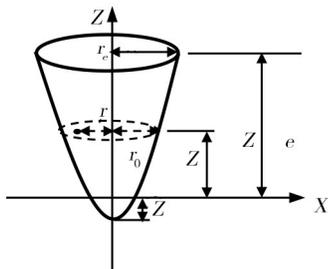


图2 热源模型  
Fig. 2 Heat source model

## 3 模拟结果及讨论

### 3.1 焊接接头温度场分布

对所建立的有限元模型进行可靠性评价,目前普遍采用熔合线形貌对比的方法进行验证。该方法认为,模拟所得焊缝形貌与试验吻合良好,一定程度上可证明有限元计算的正确性。

图3为焊缝截面形貌模拟结果与试验结果对比。由图可知,模拟熔池呈“长漏斗”形状。将模拟所得熔池与实际熔池对比可发现,两者在熔池外形、顶部及底部熔宽几乎完全吻合,故建立的模型及计算结果可用于焊接过程研究。

经模拟分析,获得 $t = 3\text{ s}$ 时电子束流作用中心横截面、熔池前端横截面(距束流中心4 mm)和熔池后端横

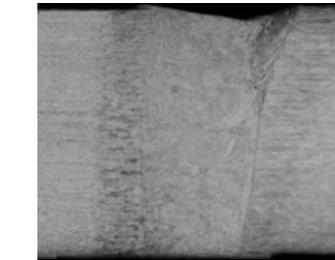
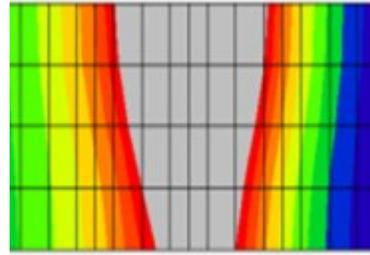


图3 焊接接头模拟/试验熔池形貌

Fig. 3 Simulation/experimental weld pool profile of the joint

截面(距束流中心4 mm)不同位置的温度分布,如图4所示。从图中可以看出,三处横截面的温度场均呈明显的非对称性。在焊缝中心上,低密度钨合金侧受焊接热作用影响的区域仅为4 mm,而钨钨合金侧受焊接热作用区域可达11 mm,即低密度钨合金侧焊接热量的累积更为明显,而钨钨合金侧导热系数大,作用区域更广。再加上低密度钨合金的熔点比钨钨合金的熔点低,从而导致焊缝向低密度钨合金侧偏移。

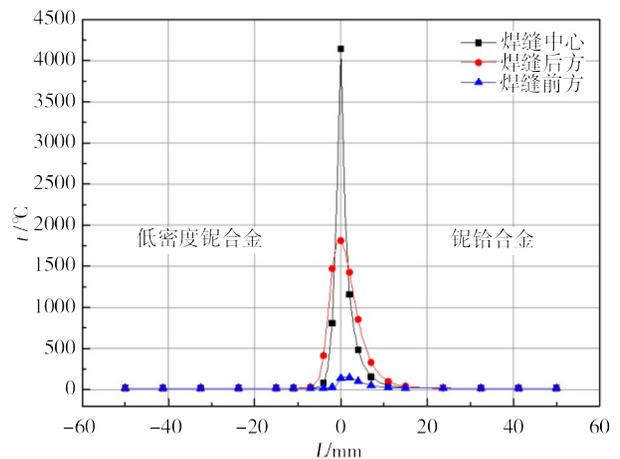


图4 焊缝区域不同位置的温度分布

Fig. 4 Temperature distribution in different position of weld zone

### 3.2 焊接偏移量对熔合特性的影响分析

当电子束流的偏移量不合适时,焊接接头中极易存在焊缝熔合不良等缺陷,降低焊接性能<sup>[9]</sup>。为了改善低密度钨合金与钨钨合金电子束焊接过程中的焊缝不对称性,研究电子束偏移量对焊接熔合特征的影响。偏束焊工艺参数如表5所示。

表5 偏束焊工艺参数

Tab. 5 Welding parameters with different offset

试验编号	偏束位置 $h_c$ /mm	加速电压/kV	焊接束流 $I_b$ /mA	聚焦电流 $I_f$ /mA	焊接速度 $v$ /m·min <sup>-1</sup>
1	偏低密度钨合金 0.8	60	20	2 420	1
2	偏低密度钨合金 0.5				
3	偏低密度钨合金 0.2				
4	偏钨钨合金 0.2				
5	偏钨钨合金 0.5				
6	偏钨钨合金 0.8				

焊接接头的横截面形貌如图5所示,其中,低密度钨合金上表面熔宽为  $T_1$ ,下表面熔宽为  $T_2$ ;钨钨合金上表面熔宽为  $N_1$ ,下表面熔宽为  $N_2$ 。为了定量分析偏移量对焊接熔合特征的影响,通过仿真获得不同偏移量下的焊接接头温度场,提取焊缝的横截面,分析不同偏移量下低密度钨合金与钨钨合金侧熔宽的变化情况。

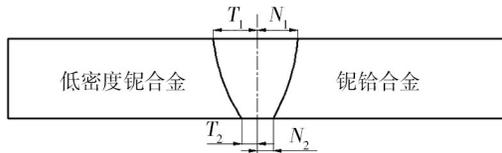


图5 低密度钨合金与钨钨合金焊缝示意图

Fig. 5 Welding diagram of low density niobium/ NbHf10-1 alloy

图6为不同偏移量下,低密度钨合金与钨钨合金电子束焊缝熔宽(向钨钨侧偏移量为正,否则为负)。由图可以看出,当偏移量小于0.25 mm时,  $T_1 > N_1$ 且  $T_2 > N_2$ 。当偏移量约为0.25 mm时,  $T_1 = N_1$ 但  $T_2 > N_2$ 。当偏移量为0.3 mm时,  $T_2 = N_2$ 但  $T_1 < N_1$ 。在低密度钨/钨钨合金电子束焊接时,为了获得较好的接头强度,并获得较宽的焊接工艺规范,  $T_2 = N_2$ 且  $T_1 = N_1$ 时较为合适。但是考虑到钨钨合金熔点高,且导热系数大,会导致焊缝成形时,焊缝凹凸不平,焊缝形貌变差。因此,为了兼顾焊缝成形和焊接接头强度,焊接偏移量选择为0.2 mm较为合适。

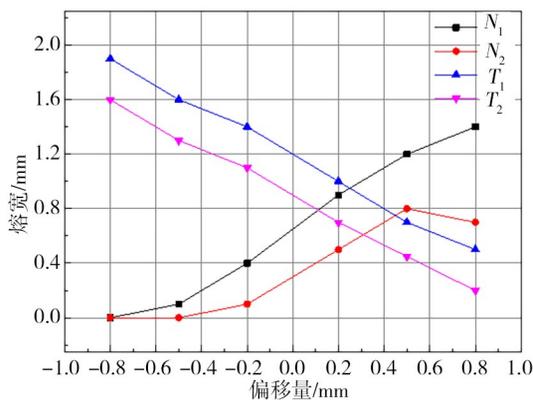


图6 偏移量对低密度钨合金与钨钨合金焊缝熔宽的影响

Fig. 6 Effect of offset on weld pool width of low density niobium/ NbHf10-1 alloy

## 4 试验结果与分析

### 4.1 焊缝宏观形貌

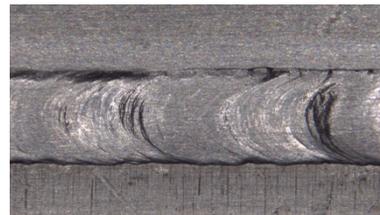
图7为束流的偏移量是-0.2、0、0.2、0.5 mm时的焊缝宏观形貌。由图可见,当偏移量为-0.2、0 mm时,焊缝背面成形向低密度钨合金侧偏移,经X射线探伤,存在未熔合现象;当偏移量为0.2 mm时,焊缝具有一定的单面焊双面成形的特征,焊缝表面为银白色,焊缝的鱼鳞纹均匀分布,无表面缺陷。经X射线探伤,不存在未熔合、裂纹、气孔等缺陷;当偏移量为0.5 mm时,焊缝背面出现明显凹凸现象,形貌变差。



(a) -0.2 mm 焊缝正面成形



(b) -0.2 mm 焊缝背面成形



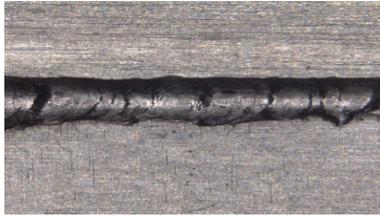
(c) 0 mm 焊缝正面成形



(d) 0 mm 焊缝背面成形



(e) 0.2 mm 焊缝正面成形



(f) 0.2 mm 焊缝背面成形



(g) 0.5 mm 焊缝正面成形



(h) 0.5 mm 焊缝背面成形

图7 不同偏移量时焊接接头表面成形

Fig. 7 Welding beam surface of different displacement

#### 4.2 力学性能及断口分析

对12根最佳偏移量下的焊接试样进行室温拉伸测试,并进行拉伸断口分析,判断接头的断裂部位、断裂性质及特征。焊接接头平均抗拉强度达到453 MPa,抗拉强度大于铌钎合金基体抗拉强度,断裂发生于铌合金基材上,有一定的颈缩,断口呈现暗灰色。图8为断口的扫描形貌,断口存在明显的“韧窝”,“韧窝”呈现等轴状,断裂形式为韧性断裂。这表明当电子束偏向铌钎侧时,焊接接头具有较高的强度和塑性。

#### 4.3 金相组织分析

图9为低密度铌合金和铌钎焊缝不同位置的微观组织形貌。在低密度铌合金靠近焊缝一侧,存在厚度约为0.2~0.3 mm的热影响区。在热影响区,晶粒相比低密度铌合金母材晶粒更细小,这主要是由于电子束焊过程是一个快速升温 and 快速冷却的过程,热影响区发生完全重结晶从而使晶粒细化。在铌钎合金靠近焊缝一侧,焊接热影响区不明显,铌钎合金侧焊缝呈

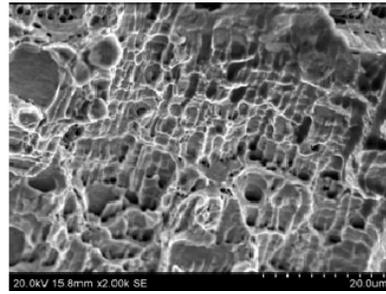
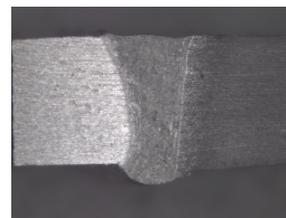


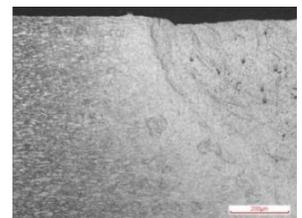
图8 焊接接头断口形貌

Fig. 8 Fracture surface of the joint

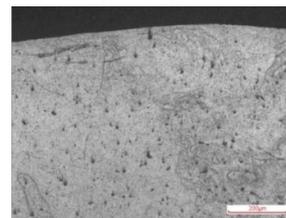
黑灰色,明显的不同于低密度铌合金侧焊缝形貌,说明该位置铌钎合金含量高。在焊缝中心,焊缝微观组织分布均匀,未发生明显的偏析现象,说明两种材料在固相下可以形成无限互溶固溶体。



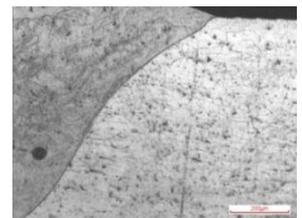
(a) 低密度铌/铌钎合金焊缝



(b) 低密度铌合金侧焊缝



(c) 焊缝中心



(d) 铌钎合金侧焊缝

图9 接头微观组织

Fig. 9 Microstructures of the joint

#### 4.4 焊缝元素分布

为进一步分析焊缝中各金属元素含量的变化,对整个焊缝进行了线扫描,结果如图10所示。从Al、V微量元素的分布曲线可以看出,微量元素分布均匀,未发生明显的偏析现象,从而避免了因元素偏析而导致的热裂纹或接头性能各向异性等问题。

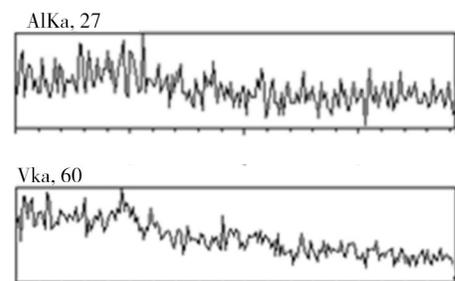


图10 试件EDS线扫描元素分布

Fig. 10 EDS line scan results of the joint

## 5 结论

(1)接头横截面温度场均呈明显的非对称性,这是因为低密度铌合金侧焊接热量的累积更为明显,而铌钎合金侧导热系数大,作用区域更广,再加上低密度铌合金的熔点比铌钎合金的熔点低,会导致焊缝向低密度铌合金侧的偏移。

(2)采用真空电子束焊接方法,当电子束偏向铌钎合金侧约0.2 mm时,低密度铌合金与铌钎合金具有较好的焊接性能。焊缝微观组织均匀,力学性能优良,焊缝满足GJB1718A—2005 I级要求。

### 参考文献

[1] 陈新民,耿雅辉,何迎春,等. 异种状态TC4钛合金电子束焊接性能分析[J]. 宇航材料工艺, 2016, 46(2): 39-43.

CHEN Xinmin, GENG Yahui, HE Yingchun, et al. Property of electron beam welded joints in different states of TC4 alloy plates [J]. Aerospace Materials & Technology, 2016, 46(2):39-43.

[2] YANG Shanglei, XUE Xiaohuai, LOU Songnian, et al. Electron beam welding of Re and BT5-1 titanium alloy [J]. Rare Metals, 2005, 24(3):293-297.

[3] 李少青,张毓新,王学东,等. 基于电子束能量分布控制的异种金属的焊接[J]. 机械工程材料, 2005, 29(9): 35-37.

LI Shaoqing, ZHANG Yuxin, WANG Xuedong, et al. Welding of dissimilar metals based on electron beam energy distribution control [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2005, 29(9):35-37.

[4] 王厚勤,韩柯,张秉刚,等. 高铌TiAl/Ti600合金电子束焊接接头组织与性能[J]. 焊接学报, 2017, 38(6):96-101.

WANG Houqin, HAN Ke, ZHANG Binggang, et al. Investigation on the microstructure and mechanical properties of high-Nb TiAl/Ti600 alloy electron beam welded joints [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(6): 96-101.

[5] LIU Yingying, YAO Zekun, GUO Hongzhen, et al. Microstructure and property of the Ti-24Al-15Nb-1.5Mo/TC11 joint welded by electron beam welding [J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2009, 16(5):568-575.

[6] 白润,郑欣,蔡小梅,等. 低密度铌合金焊接接头组织与性能的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(5):1302-1307.

BAI Run, ZHENG Xin, CAI Xiaomei, et al. Microstructure and properties of welded joints of low density Niobium alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(5):1302-1307.

[7] 郭顺,彭勇,朱军,等. 钛/铝激光焊接的微观组织及力学性能[J]. 中国激光, 2018, 45(11):1102010.

GUO Shun, PENG Yong, ZHU Jun, et al. Microstructure and mechanical properties of laser welded Ti/Al alloys [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(11):1102010.

[8] WANG Shaogang, WU Xinqiang. Investigation on the microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy joints with electron beam welding [J]. Materials & Design, 2012, 36:663-670.

[9] 张岩. 钛合金/不锈钢异种材料激光焊接头微观组织及力学性能的研究[D]. 长春:吉林大学, 2019.

ZHANG Yan. Study on microstructures and properties of laser welded joints of titanium alloy/stainless steel dissimilar materials [D]. Changchun:Jilin University, 2019.