铜-钢电子束焊接材料的 疲劳特性

Fatigue characteristics of copper-steel electron beam welding materials

摘要:异种金属焊接构件的疲劳性能对于航天器的服役可靠性具有重要影响。探索了 Cro.8 铜合金和 1Cr21Ni5Ti不 锈钢异种金属焊接接头的疲劳寿命和疲劳断裂机制,采用合理的电子束焊接工艺制备得到铜-钢复合板。利用金相显微 镜表征和分析焊缝处的组织与成分,使用电子拉伸试验机和疲劳试验机对焊接接头进行力学性能测试,利用扫描电镜观 察不同周次断裂下的疲劳断口。结果显示:两种金属整体冶金结合情况良好,但是钢侧局部熔合区面积较大且由钢基体 伸入到焊缝中;铜-钢电子束焊接接头的拉伸试样均断裂于焊缝最小截面处,疲劳试样的平均疲劳极限值为 48.04 MPa, 且均起裂于焊缝最小截面处;高周疲劳试样在焊缝上表面端点处观察到单一裂纹源,低周疲劳试样观察到较多裂纹源分 布于焊缝上下表面及内部,两者的最终断裂区均位于铜合金基体。可见在疲劳断裂过程中,焊接试样在高周和低周断裂 下的裂纹源数量存在差异,但是裂纹均易萌生于焊缝最小截面处,且向铜合金基体进行扩展。

关键词:铜-钢复合板;电子束焊接;焊缝;疲劳性能;断裂机制

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2021.001236

中图分类号: TG456.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2023)03-0089-09

Abstract. The fatigue performance of dissimilar metal welded components has an important influence on the service reliability of spacecraft. The fatigue life and fatigue fracture mechanism of dissimilar metal welded joints of QCr0. 8 copper alloy and 1Cr21Ni5Ti stainless steel were investigated. The copper-steel composite plate was properly prepared by electron beam welding. The microstructure and composition of welding seam were characterized and analyzed by metallographic microscope. Mechanical properties of welded joints were tested using electronic tensile testing machine and fatigue testing machines. Scanning electron microscopy was used to observe the fatigue fracture in different cycles. The results show that the overall metallurgical bonding of the two metals is good, however, the local fusion zone on the steel side has a large area and extends into the weld from the steel base. The tensile specimens of the copper-steel electron beam welding all fracture at the minimum section of the weld, and the average fatigue limit of the fatigue specimens is 48.04 MPa and they all fracture at the minimum section of the weld. In the high cycle fatigue sample, a single crack source is observed at the endpoint of the weld top surface, while in the low cycle fatigue sample, more crack sources are observed on the top and bottom surface and inside of the weld. The final fracture zone of both samples is located in the copper alloy matrix. It can be seen in the process of fatigue fracture, the number of crack sources is different between high and low cycle fracture, but in both cases, the cracks are easy to

initiate at the minimum section of the weld and spread to the copper alloy matrix.

Key words: copper-steel composite plate; electron beam welding; weld; fatigue performance; fracture mechanism

随着我国载人航天、登月计划以及火星探测等项目的相继实施,对航天器长期在轨工作的要求越发严 苛,航天器的可靠性成为当下我国航天领域的重要研 究课题。异种金属焊接结构为航天器中最为常见的结 构之一,其焊接接头处的疲劳性能成为影响航天器寿 命的关键^[1-2]。航天器所使用的铜-钢复合材料中,铜 侧为 QCr0.8 铜合金,该合金在保持了纯铜优异导电 性的同时,具有较高的强度和硬度,同时还具备良好的 塑性成形性,良好的焊接性和切削性^[3-4]。钢侧材料为 1Cr21Ni5Ti 铁素体-奥氏体型双相不锈钢,该不锈钢 具有高强度,良好的耐氧化性和焊接性^[5-6]。

电子束焊接是指依靠高速电子束的撞击,使焊接 部位熔化并形成焊缝的焊接方法。该方法在焊接两种 不同材料时,由于焊接过程中的热循环时间短,所以减 少了由于热膨胀系数等性能的差异而产生裂纹的可能 性,极大增加了接头处的力学性能。此外,采用电子束 焊接方法的焊接变形小,焊缝深度比大,焊接质量高, 且焊接规范有着较宽的调节范围。对于异种金属电子 束焊接结构,桑桑^[7]研究了 Ta-GH3128 电子束焊接 的焊缝组织与断裂特征:郭顺等[8]通过有限元温度场 模拟分析得到了 Ti-Cu 电子束焊接过程中的相结构变 化与原子扩散情况;江畅^[9]研究了异种钛合金电子束 焊接的具体工艺以及静态力学性能,观察并分析了拉 伸断口特征;Niu 等^[10] 通过添加中间层提高了 NiTi/ 不锈钢电子束焊接的断裂强度;郭绍庆等^[11]通过富 Si 非增强中间层改善了铝基复合材料的电子束焊接工 艺; Silvalima 等^[12] 研究了低合金钢-镍基高温合金异 种金属焊缝在焊后热处理过程中组织以及微观力学性 能的演变。整体而言,目前国内外对于异种金属电子

束焊接结构的研究主要局限于焊接工艺、焊接组织以 及静态力学性能^[13-18],对于其在交变载荷下的力学行 为和断裂机制研究很少。本工作采用合理电子束焊接 工艺加工铜-钢试板,通过焊缝处的组织与成分的表征 评定材料冶金质量,并且对焊接试样的拉伸性能和疲 劳性能进行测试,得到了焊接试样在室温条件的平均 疲劳强度,通过对疲劳断口形貌的观察,分析了该焊接 结构在不同断裂周次下疲劳断裂机制。进一步归纳出 异种金属电子束焊接材料疲劳断裂的一般规律。

1 实验材料及方法

1.1 焊接材料

按航天器结构,加工铜-钢电子束焊接试板,并进 行电子束焊接实验^[19]。铜侧材料为 QCr0.8 铜合金, 钢侧材料为 1Cr21Ni5Ti 不锈钢,两种合金的成分分 別如表 1 和表 2 所示。试板厚度为不等厚对接, QCr0.8 铜合金厚度为 2.4 mm,1Cr21Ni5Ti 不锈钢厚 度为 1.7 mm,焊接试板对接厚度如图 1 所示。按照 工艺流程进行试板焊接实验,选取最佳工艺参数,获 得成形和内部质量良好的铜-钢电子束焊接试板,具 体工艺参数如下:束流为 39~42 mA,焊接速度为 500 mm/min,加速电压为 60 kV,工作距离为 300 mm。

表1 QCr0.8 铜合金的化学成分(质量分数/%)

Table 1	Chemical compositions of QCr0. 8 copper alloy
	(mass fraction / %)

Sample	Zn	Sn	Mn	Fe	Si	Cr	Cu
QCr0.8	0.0123	0.0158	0.0387	0.111	0.0284	0.582	Bal

表 2 1Cr21Ni5Ti 的化学成分(质量分数/%)

Table 2 Chemical composit	tions of 1Cr21Ni5Ti stainless	s steel (mass fraction/ $\%$	
---------------------------	-------------------------------	------------------------------	--

Sample	С	Cr	Ni	Si	Mn	Ti	Al	Fe	
1Cr21Ni5Ti	0.104	21.07	5.63	0.700	0.536	0.452	0.0374	Bal	

1.2 拉伸性能实验

参照国标 GB/T 2651-2008 中的板状试样,将焊



接试板进行切割,加工成保留焊缝余高的拉伸试样,其 中试样的厚度为母材厚度,焊缝位于试样的中间部位。 图 2 为拉伸试样规格示意图。

拉伸实验使用 INSTRON 5500R 电子拉伸试验 机。拉伸速度参照于两个实验夹头的相对运动速率, 数值为 2 mm/min。图 3 为断裂后的拉伸试样典型实 物照片。



图 2 铜-钢电子束焊接拉伸试样示意图 Fig. 2 Diagram of copper-steel electron beam welding tensile specimen



图 3 铜-钢电子束焊接拉伸试样实物图

- Fig. 3 Photo of copper-steel electron beam welding tensile specimens
- 1.3 疲劳性能实验

参照国标 GB/T 13816—1992 中不去除余高的对

接接头试样(2 号试样),将焊接试板加工为保留焊缝 余高的疲劳试样,试样厚度与焊缝位置与拉伸试样相 同。图 4 为疲劳试样规格示意图。



图 4 铜-钢电子束焊接疲劳试样示意图 Fig. 4 Diagram of copper-steel electron beam welding fatigue specimen

疲劳实验使用 GPS200 高频疲劳试验机。实验过 程按照国标 GB/T 13816—1992 进行。本工作选取的 循环载荷应力比为 0.1,疲劳循环基数为 10⁷,即当试 样所承受的循环载荷超过 10⁷ 周次时,认为试样在该 循环载荷作用下不会发生断裂。所有实验的加载频率 均在 100~120 Hz。本工作完成了 25 组疲劳实验,其 中 15 组在较低应力下进行,用以完成升降图的绘制和 平均疲劳极限的计算;另外 10 组在较高应力下进行。 根据实验结果绘制 S-N 曲线。图 5 为断裂前后疲劳 试样典型实物照片。



图 5 铜-钢电子束焊接疲劳试样实物图 (a)断裂前;(b)断裂后 Fig.5 Photos of copper-steel electron beam welding fatigue specimens

(a) before fracture: (b) after fracture

2 结果与讨论

2.1 焊缝组织观察

制备铜-钢异种金属焊接接头金相试样^[20],图 6 为焊缝处的宏观形貌,可以看出焊缝上表面呈 U 字 形,焊缝下表面较为平直。在焊接过程中,由于铜合金 的熔点较低且厚度较大,导致其在熔化过程中的含量 较多,对钢侧基体产生了包裹。图 7 为钢基体-焊缝界 面组织,整体来说,钢侧焊接熔合区的面积较小,但是 存在局部熔合区面积较大且由钢基体伸入到焊缝中的现象。

2.2 拉伸与疲劳测试分析

拉伸实验表明铜-钢电子束焊接试样的平均抗拉 强度为 224.43 MPa,且所有试样均断裂于焊缝最小截 面处,该截面对应于焊缝上部 U 型表面的底部。造成 以上结果主要有两个原因,一是焊缝处整体强度相对 于基体偏低,二是由于此处的厚度为焊缝区域的最小 值,所以导致此处为整个焊接结构的薄弱区域。疲劳



图 6 铜-钢电子束焊焊缝宏观形貌

Fig. 6 Weld macroscopic feature of copper-steel electron beam welding

试样大部分断裂于焊缝处,局部区域断裂于铜基体,由 此可见焊缝处的结合强度与铜基体强度为影响疲劳断 裂的主要因素。表 3 为低应力疲劳实验结果,σ_{max}为该 组疲劳实验中所施加的最大应力,N 为疲劳断裂周 次。图 8 为据此实验结果绘制的升降图。根据 GB/T 24176—2009 计算得到铜-钢电子束焊接试样的平均 疲劳极限为 48.04 MPa。在置信度为 95%时,不同存 活率下的条件疲劳极限如表 4 所示。所有应力值均以 铜合金基体的横截面积为基准。

高应力疲劳实验结果见表 5,结合所得到的平均 疲劳极限值,绘制出铜-钢电子束焊接试样的S-N曲



图 7 铜-钢电子束焊钢基体-焊缝界面组织

Fig. 7 Microstructure of steel matrix-weld interface in copper-steel electron beam welding

表 3 铜-钢电子束焊接试样低应力疲劳实验结果

Table 3 Results of low stress fatigue test of copper-

steel electron beam welding specimens

Sample	$\sigma_{ m max}/ m MPa$	$N/10^3$ cycle	Sample	$\sigma_{\rm max}/{ m MPa}$	$N/10^3$ cycle
1	50.0	Unfaulted	9	45.0	Unfaulted
2	52.5	4695	10	47.5	1119
3	50.0	2880	11	45.0	Unfaulted
4	47.5	2093	12	47.5	Unfaulted
5	45.0	Unfaulted	13	50.0	1123
6	47.5	Unfaulted	14	47.5	Unfaulted
7	50.0	6481	15	50.0	4611
8	47.5	917			



表 4 不同存活率下铜-钢电子束焊疲劳试样的疲劳极限

Table 4 Fatigue limits of fatigue specimens under different survival rates

Survival rate/%	$\sigma_{ m max}/{ m MPa}$				
90	43.25				
95	42.10				
99	39.90				
99.9	37.38				

表 5 铜-钢电子束焊接试样高应力疲劳实验结果

 Table 5
 Results of high stress fatigue test of copper-steel

 electron beam welding specimens

			0 1		
Sample	$\sigma_{ m max}/1$	MPa $N/10^3$ cycle	Sample	$\sigma_{ m max}/{ m MPa}$	$N/10^3$ cycle
16	170	8.5	21	110	38.7
17	160	10.6	22	95	27.7
18	150	32.4	23	80	62.1
19	140	33.1	24	65	604.5
20	130	28.8	25	60	361.9

线,如图 9 所示。将高应力下的应力-循环周次关系进 行线性拟合,可以得到:当最大应力 $\sigma_{max} > 48.04$ MPa 时,最大应力 σ_{max} 与疲劳断裂周次 N 近似有如下关系: $\sigma_{max} = -58.69 \lg N + 390.79$ (1)

2.3 疲劳断裂机制分析 选取几个典型疲劳断口进行扫描电镜观察,发现





Fig. 9 S-N curve of fatigue sample of copper-steel electron beam welding

裂纹基本上都起源于焊缝最小截面处。裂纹源数量与 应力的关系如表 6 所示。当应力低于 65 MPa 时,试 样发生较高周次的疲劳断裂。此时疲劳过程中萌生裂 纹源数量较少,均出现在焊缝上表面的边缘附近。当 应力在 50 MPa 左右时,只出现一个裂纹源,该裂纹源位 于焊缝上表面的端点处。当应力高于 80 MPa 时,试样 萌生较多数量裂纹源,且在焊缝上下表面及焊缝内部区 域均有出现。不同应力下裂纹源的位置如图 10 所示, 其中黄色截面为焊缝最小截面。由此可见,随着应力的 增加,裂纹的萌生截面没有发生改变,均位于焊缝最小 截面处,但是裂纹源数目在增加,裂纹萌生位置也由焊 缝上表面的端点位置扩散到焊缝上下表面及内部。

表 6 铜--钢电子束焊接疲劳试样在不同应力下的裂纹源数量

Table 6 Number of crack sources of fatigue specimens of copper-steel electron beam welding under different stresses

Sample	$\sigma_{\rm max}/{ m MPa}$	$N/10^3$ cycle	Number of crack sources	Location of crack source(in minimum section of weld)
2	52.5	4695	1	Endpoint of weld top surface
16	170	8.5	More	Surface and interior of weld
21	110	38.7	More	Surface and interior of weld
22	95	27.7	More	Surface and interior of weld
23	80	62.1	More	Surface and interior of weld
24	65	604.5	4	Endpoint of weld top surface (1) and around (3)
25	60	361.9	5	Endpoint of weld top surface (1) and around (4)



图 10 不同应力下铜--钢电子束焊接疲劳试样裂纹源位置示意图

(a)σ_{max}≈50 MPa;(b)σ_{max}<65 MPa;(c)σ_{max}>80 MPa

Fig. 10 Diagrams of crack source location in copper-steel electron beam welding fatigue specimens under different stresses

(a)_{σmax}≈50 MPa;(b)_{σmax}<65 MPa;(c)_{σmax}>80 MPa

分别选取典型的高周断裂试样(2 号试样)和低周 断裂试样(16 号试样)进行扫描断口分析,其中图 11 为高周断裂试样扫描断口图。在较低应力作用下,试 样在焊缝最小截面图 10(a)所示位置发生起裂(图 11 (a)),裂纹扩展方向如图中箭头所示(图 11(b))。断 口中部存在水平方向的疲劳条纹,其扩展方向为竖直 向上(图 11(c))。在断口上部观察到典型的解理断裂 形貌(图 11(d)),说明该区域为最终断裂区。图 12 为 该断裂试样的侧面宏观形貌,解理断口状形貌位于最 右边,可以看出最终断裂区位于铜合金基体中。

图 13 为低周断裂试样断口扫描图,试样起裂截面

同样为焊缝最小截面,起裂位置为焊缝上下表面,并且 存在多处裂纹源,裂纹均由试样表面向内部扩展,裂纹 源位置如图 10(c)。在焊缝表面萌生的裂纹在垂直断 口方向有扩展趋势,其方向由焊缝指向铜合金基体(图 13(a),(b))。焊缝下表面疲劳裂纹间距随着裂纹扩展 逐渐增大,这是由于裂纹前端在扩展过程中逐渐由焊 缝位置转移到铜合金基体位置,而铜合金的延展性较 好,在一个疲劳循环载荷作用下疲劳条纹运动的远。 断口内部存在少数裂纹源(图 13(c))。断口中部为光 滑平台,该区域为最终断裂区(图 13(d))。

图 14 为高周和低周疲劳断裂机制分析,其中左侧



图 11 铜-钢电子束焊接高周断裂试样疲劳断口扫描图 (a)裂纹源;(b)裂纹源附近扩展区;(c)断口中部裂纹扩展区;(d)断口上部瞬断区 Fig. 11 Scanning images of fatigue fracture of copper-steel electron beam welding high-cycle fracture specimen (a)crack source;(b)crack propagation zone near crack source;(c)crack propagation zone in the middle of fracture;(d)transient area above fracture



图 12 铜-钢电子束焊接高周断裂试样断口宏观形貌
 Fig. 12 Macroscopic feature of high-cycle fracture specimen of copper-steel electron beam welding

面为焊缝上表面,右侧面为焊缝下表面。在较低应力 作用下,试样发生高周断裂,裂纹在焊缝最小截面萌 生,其位置及扩展方向如图 14(a)所示,最终在铜合金 基体中发生断裂。在较高应力作用下,试样发生低周 断裂,裂纹同样在焊缝最小截面处萌生,其位置遍布焊 缝上下表面。同时在内部也存在少量裂纹源,这些裂 纹源一般位于夹杂物或者气孔处。与较低应力作用下 的断裂情况相同,裂纹向铜合金基体扩展并最终在铜 合金基体处发生瞬时断裂(图 14(b))。

综合而言,无论是在较低还是较高应力作用下,裂

纹均易在焊缝最小截面处萌生,这与拉伸实验中得到 的该处为薄弱区域的结论相对应。不同的是,较低应 力作用下试样只有一个裂纹源且出现在焊缝上表面的 端点处,由于焊缝上表面相对于下表面粗糙度较高,所 以这里是试样应力集中最为严重的区域,在扫描图片 中并未明显观察到由于焊接缺陷导致的裂纹源,所以 基本可以确定该裂纹源是由应力集中导致的。而较高 应力作用下裂纹源在整条焊缝表面均有出现,且有少 量裂纹源出现在试样内部的缺陷处。这可能与裂纹尖 端强度因子幅度 ΔK 有关,当应力较小时,试样中存在 裂纹的 ΔK 值普遍较小,由于应力集中,只有焊缝上表 面端点处裂纹的 ΔK 值高于疲劳门槛值 ΔK_{th} ,因此只 有该处萌生的疲劳裂纹才能顺利扩展。同理,在较高 应力作用下,较多数量的焊缝表面裂纹与内部缺陷处 裂纹的 ΔK 值高于疲劳门槛值 ΔK_{th} ,因此可以在焊缝 表面和内部观察到较多裂纹源[21]。相对于低周疲劳 断裂而言,高周疲劳裂纹扩展区的面积较大,最后断裂 区的面积较小。这是因为随着疲劳裂纹的扩展,材料 的有效承载截面面积在减小,在承载能力相同的情况 下,高周疲劳的施加载荷较低,发生最终断裂时的有效 承载截面面积就越小。两种断裂情况下,裂纹均会从 焊缝位置向铜合金基体扩展,并且均在铜合金基体处 发生最终断裂,这可能与两种金属基体的相对强度有



图 13 铜-钢电子束焊接低周断裂试样疲劳断口扫描图 (a)焊缝上表面;(b)焊缝下表面;(c)内部裂纹源;(d)断口中部瞬断区

Fig. 13 Scanning images of fatigue fracture of copper-steel electron beam welding low cycle fracture specimen (a)top surface of weld; (b)bottom surface of weld; (c)internal crack source; (d)transient zone in the middle of fracture



(a)高周断裂机制;(b)低周断裂机制

Fig. 14 Analysis of two different types of fatigue fracture mechanism

(a) high cycle fracture mechanism; (b) low cycle fracture mechanism

关,对于异种金属焊接,裂纹会向强度较低的金属基体 进行扩展。

3 结论

(1)对于铜-钢电子束焊接试板,焊缝上表面呈 U

字形,下表面较为平直。钢侧焊接熔合区面积较小,但 是存在局部熔合区面积较大且由钢基体伸入到焊缝中 的现象。

(2)当实验频率为 100~120 Hz,应力比为 0.1,疲 劳循环基数为 1×10⁷时,铜-钢电子束焊接试样的平均 疲劳极限为 48.04 MPa;当应力大于疲劳极限时,最大 应力与疲劳断裂周次近似有如下关系:

 $\sigma_{\rm max} = -58.69 \lg N + 390.79$

(3)焊缝与铜基体处的强度为影响该焊接材料疲 劳性能的主要因素。无论在何种应力情况下,试样均 起裂于焊缝最小截面处。当应力小于 65 MPa 时,裂 纹源数目较少且集中在焊缝上表面的边缘;当应力增 大到 80 MPa 时,裂纹源数目显著增加且由焊缝上表 面端点发散到焊缝上下表面及焊缝内部。不论在何种 应力状态下,裂纹均由焊缝处向铜基体扩展。由此得 到不等厚异种金属电子束焊接疲劳断裂的一般规律: 裂纹容易在焊缝最小截面处(特别是焊缝上表面的端 点处)萌生,在疲劳过程中有向异种金属中强度较低的 金属基体扩展的倾向。

参考文献

 [1] 刘岩,姚宇,周桂申. 航空航天用异种金属焊接接头性能和数值模 拟研究[J]. 热加工工艺,2019,48(13):5-8.
 LIU Y,YAO Y,ZHOU G S. Study on properties and numerical

simulation of dissimilar metal welded joints for aerospace[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(13): 5-8.

- [2] 谢美蓉,张益坤,王炜,等. 航天产品异种金属电子束焊接研究与应用[J]. 航天制造技术,2015(1):1-4.
 XIE M R, ZHANG Y K, WANG W, et al. Study and application of heterogeneous metal EBW in aerospace products[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2015(1):1-4.
- [3] 马继山,孟宪国,于海平,等. QCr0. 8 铜合金动态力学性能研究
 [J]. 火箭推进,2016,42(6):57-61.
 MA J S, MENG X G, YU H P, et al. Research on dynamic mechanical properties of QCr0. 8 copper alloy[J]. Journal of Rocket Propulsion,2016,42(6):57-61.
- [4] 王强松,黄国兴,娄花芬,等. QCr0.8 铜合金的组织和性能[J].材
 料热处理学报,2012,33(5):95-100.
 WANG Q S, HUANG G X, LOU H F, et al. Microstructure and properties of QCr0.8 copper alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment,2012,33(5):95-100.
- [5] 袁傲明,任学平.固溶时效对 1Cr21 Ni5Ti 双相不锈钢组织的影响
 [J].材料导报,2021,35(増刊 1):443-446.
 YUAN A M,REN X P. Effect of solid solution and aging on the microstructure of 1Cr21Ni5ATi duplex stainless steel[J]. Materials Reports,2021,35(Suppl 1):443-446.
- [6] 曹征宽,朱斌,张全新.1Cr21Ni5Ti双相不锈钢不同温度时效脆化 倾向研究[J].失效分析与预防,2021,16(5):309-313.
 CAO Z K, ZHU B, ZHANG Q X. Embrittlement tendency of 1Cr21 Ni5Ti duplex stainless steel aged at different temperatures
 [J]. Failure Analysis and Prevention,2021,16(5):309-313.
- [7] 桑桑.Ta/GH3128 异种金属电子束焊接研究[D].上海:上海工程 技术大学,2020.

SANG S. Study on the dissimilar joints of Ta and GH3128 welded

by electron beam welding[D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2020.

- [8] 郭顺,罗添元,彭勇,等. Ti/Cu 异种金属电子束焊接界面行为[J].
 焊接学报,2019,40(8):26-32.
 GUO S,LUO T Y,PENG Y, et al. Interface behavior of Ti/Cu dissimilar metals by electron beam welding[J]. Transactions of the China Welding Institution,2019,40(8):26-32.
- [9] 江畅. Ti40/TC4 异种钛合金电子束焊接工艺及组织性能研究
 [D]. 南昌:南昌航空大学,2017.
 JIANG C. Electron beam welding procedure of Ti40/TC4 dissimilar titanium alloy joint and microstructure and properties of welded joints[D]. Nanchang; Nanchang Hangkong University,2017.
- [10] NIU H,JIANG H C,ZHANG M J,et al. Effect of interlayer addition on microstructure and mechanical properties of NiTi/stainless steel joint by electron beam welding[J]. Journal of Materials Science & Technology,2021,61:16-24.
- [11] 郭绍庆,袁鸿,谷卫华,等. ZL101A/SiC_P/20p 电子束焊接工艺研究[J]. 材料工程,2004(12):16-20.
 GUO S Q, YUAN H, GU W H, et al. Investigation on electron beaming welding of ZL101A/SiC_P/20p[J]. Journal of Materials Engineering,2004(12):16-20.
- [12] SILVALIMA C V, VERDIER M, ROBAUT F, et al. Evolution of a low-alloy steel/nickel superalloy dissimilar metal weld during post-weld heat treatment[J]. Welding in the World, 2021, 65 (10):1-15.
- [13] LI S, HU L, DAI P, et al. Influence of the groove shape on welding residual stresses in P92/SUS304 dissimilar metal butt-welded joints[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 66: 376-386.
- [14] 孙浈,杨涛,俞照辉,等.316L/S32101 异种金属焊接接头的显微 组织与力学性能研究[J].精密成形工程,2021,13(6):138-144.
 SUN Z,YANG T,YU Z H, et al. Investigation on microstructures and mechanical properties of 316L/S32101 dissimilar lap joints[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2021, 13 (6):138-144.
- [15] 孟凡刚,王严,谢吉林,等.高熵合金中间层对 TiNi/TC4 电子束 焊接头组织及性能影响[J].精密成形工程,2021,13(6):130-137.

MENG F G, WANG Y, XIE J L, et al. Effect of high-entropy alloy interlayer on microstructure and properties of TiNi/TC4 electron beam welded joints[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2021, 13(6): 130-137.

- [16] 王勇,王敬. Al/Ti 异种金属 TIG 熔钎焊接头的显微组织及力学 性能[J]. 金属热处理,2017,42(2):44-48.
 WANG Y, WANG J. Microstructure and mechanical properties of TIG welded-brazed joint of dissimilar Al/Ti alloy[J]. Heat Treatment of Metals,2017,42(2):44-48.
- [17] GU S D, ZHAO J P, OUYANG R J, et al. Microstructural characterization and tensile behavior of TA1 titanium alloy sheet welded by electron beam welding [J]. Materials Science Forum,

2021,6244:149-154.

- [18] MOKHTARISHIRAZABAD M, SIMPSON C, KABRA S, et al. Evaluation of fracture toughness and residual stress in AISI 316L electron beam welds[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2021, 44(8): 2015–2032.
- [19] 陈新红. 铜合金 QCr0. 8 和不锈钢 1Cr21Ni5Ti 的电子束焊接 [J]. 火箭推进,2003(4):40-42.

CHEN X H. Electron beam welding of copper alloy QCr0.8 and stainless steel 1Cr21Ni5Ti[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2003(4):40-42.

[20] 王少刚,王蕾.异种金属焊接接头金相试样的制备[J].实验室研 究与探索,1998(2):40-41.

WANG SG, WANG L. Preparation of metallographic sample of dissimilar metal welded joint [J]. Research and Exploration in

Laboratory, 1998(2): 40-41.

[21] 李嘉骞,沈海军.复合材料层合板疲劳寿命形状参数与门槛值分析方法[J]. 国防科技大学学报,2021,43(3):38-44.
 LI J Q.SHEN H J. Analysis method of life shape parameter and fatigue threshold of composite laminates[J]. Journal of National University of Defense Technology,2021,43(3):38-44.

基金项目:西安市科技创新计划(201805064ZD15CG48) 收稿日期:2021-12-18;修订日期:2022-11-14 通讯作者:张权明(1970—),男,高级工程师,博士,研究方向为材料检 测技术,联系地址:西安航天发动机有限公司(710100),E-mail:zhquan-

ming@sina.com

(本文责编:解 宏)