

铝钛异种合金电子束焊接接头组织与界面分析

曲树平^{1,2}, 许海鹰¹, 王晓军², 桑兴华¹

(1. 中国航空制造技术研究院高能束流发生器实验室, 北京 100024;

2. 兰州理工大学材料科学与工程学院, 兰州 730050)

[摘要] 采用真空电子束技术获得了 7075 铝合金和 TC4 钛合金异种接头。分别通过金相显微镜、扫描电镜和能谱分析仪等检测仪器观察了焊接接头的宏观形貌、微观组织特征和元素分布情况, 同时分析了过渡层中金属间化合物的形成过程及其影响因素。试验结果表明: 熔合区铝合金侧微观组织以柱状晶、等轴晶组织为主, 还有少量的细晶组织, 钛合金侧会析出呈针状或片层状的 α 相和 α' 相。由于 TiAl_3 的自由能最小, 在铝焊缝和钛焊缝的界面生成的金属间化合物主要成分为 TiAl_3 , 元素扩散不充分导致少量的 TiAl 、 TiAl_2 等中间相生成, 且随着热输入量的增加, 金属间化合物层逐渐变厚, 但化合物种类不变。试验结果为铝钛异种合金焊接界面研究提供了借鉴参考。

关键词: 电子束焊接; 铝钛异种合金; 金属间化合物; 微观组织; 界面成分

Analysis of Microstructure and Interface of Aluminum–Titanium Alloy Electron Beam Welded Joints

QU shuping^{1,2}, XU Haiying¹, WANG Xiaojun², SANG Xinghua¹

(1. Laboratory of Power Beam Generator, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;

2. College of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

[ABSTRACT] A heterojunction of 7075 aluminum alloy and TC4 titanium alloy was obtained by vacuum electron beam technique. The macroscopic morphology, microstructure and element distribution of the welded joints were observed by metallographic microscope, scanning electron microscope and energy spectrum analyzer. The formation process of intermetallic compounds in the transition layer and its influencing factors were also analyzed. The test results show that the microstructure of the aluminum alloy side of the fusion zone is dominated by columnar crystals and equiaxed grains, and a small amount of fine-grained structure is formed. The α -phase and α' phase of the needle-like or lamellar phase are precipitated on the titanium alloy side. Since the free energy of TiAl_3 is the smallest, the main component of the intermetallic compound formed at the interface between the aluminum weld and the titanium weld is TiAl_3 . The insufficient diffusion of elements leads to the formation of a small amount of intermediate phases such as TiAl and TiAl_2 , and increases with the heat input. The intermetallic compound layer gradually thickens, but the type of the compound does not change. The test results provide reference for the study of welding interface of aluminum–titanium dissimilar alloy.

Keywords: Electron beam welding; Aluminum–titanium dissimilar alloy; Intermetallic compound; Microstructure; Interface composition

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.16.074

随着航空航天、船舶、核能等尖端科技的迅猛发展, 对材料的服役性能提出了更高、更加苛刻的要求。因此, 多种材料组合代替单一材料, 已经受到广泛的重视^[1]。钛合金具有密度低、比强度高、抗腐蚀及断裂韧性强等优点, 使其在航空、石化、地质及医疗等领域得到了广泛的应用。由于钛合金价格昂贵, 又限制其进

一步的推广^[2]。而铝合金密度低, 具有良好的成形工艺性及较高的性价比^[3]。为了使铝合金和钛合金能够优势互补, 充分发挥两种材料的性能和经济效益, 铝钛复合结构得到了广泛的应用。例如飞机机翼中蜂窝夹层结构就是由钛合金蒙皮和翼盒中铝合金蜂窝夹层连接而成的复合结构。

相对于传统焊接方法,真空电子束焊接具有功率密度高、深宽比大、线能量小、控制精度高等特点,在真空环境中,避免了焊接过程中空气污染,减少了气孔的生成^[4],且电子束焊接加热冷却速度快,热影响区小,接头组织晶粒细小,有利于提高接头强度。因此,电子束焊接铝合金和钛合金具有广泛的应用前景。

本研究采用电子束对 7075 铝合金和 TC4 钛合金进行焊接试验。对铝合金和钛合金焊接接头的组织形貌、焊缝之间过渡层形貌、过渡层化学成分等开展了适应性研究,对接头的组织特点和元素分布规律以及影响因素等特点进行全面分析。

1 试验及方法

试验材料采用 7075 铝合金和 TC4 钛合金,7075 铝合金尺寸为 100mm×50mm×3mm,TC4 钛合金尺寸为 100mm×50mm×1mm,主要化学成分如表 1、表 2 所示。试验在中国航空制造技术研究院研制的真空电子束焊机 ZD60-4A CV0.8L 上进行,加速电压 60kV,最大输出功率 9kW,焊接真空度 1.0×10^{-3} Pa。焊接方式如图 1 所示。焊接接头采用搭接接头,铝合金在上钛合金在下,焊接采用偏铝熔焊方法。焊前试件表面用砂纸打

表 1 TC4钛合金的主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of TC4 titanium alloy %

Al	V	Fe	C	N	O	H	Ti
5.8	4.2	0.08	0.04	0.2	0.27	0.001	余量

表 2 7075铝合金的主要化学成分(质量分数)

Table 2 Main chemical composition of 7075 aluminum alloy %

Zn	Cu	Mg	Si	Cr	Ti	Fe	Mn	Al
5.83	1.42	2.37	0.05	0.22	0.03	0.07	0.30	余量

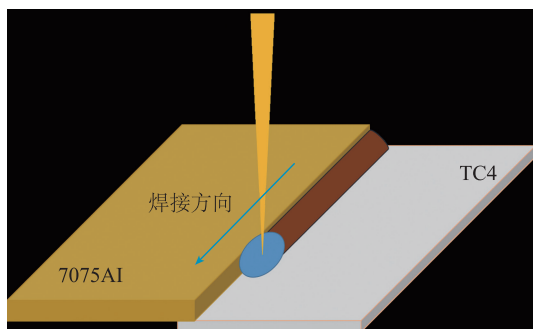


图1 钛/铝异种合金电子束焊接示意图

Fig.1 Schematic diagram of electron beam welding of titanium/aluminum dissimilar alloy

磨去除氧化膜和附着物,并用丙酮清洗表面去除油污,最后烘干。焊接工艺参数:工作距离 272mm,电子束流 18mA,焊接速度 20mm/s,聚焦电流 415mA。

2 结果与讨论

2.1 焊接接头宏观结构

图 2 为 7075 铝合金和 TC4 钛合金电子束焊接接头横断面形貌,钛合金基体和铝合金基体均发生了熔化,形成了 A、B、C 3 条熔合线和 1 条过渡线 D。A、B 为钛合金的熔合线,C 为铝合金的熔合线,D 为焊缝金属中钛合金与铝合金之间的过渡线。A、B、C 3 条熔合线均为圆弧状,D 为不规则的波浪形。整个焊缝中未出现明显的气孔裂纹等缺陷。

2.2 焊接接头的微观组织

图 3 所示为 7075 铝合金和 TC4 钛合金电子束焊接接头微观组织。图 3(a)所示为铝合金侧熔合线 C 处附近的组织,其中热影响区为粗大柱状晶组织,焊缝金属由细晶组织、等轴晶组织构成。由于热影响区未完全熔化,焊接时平行母材背离焊缝方向散热较快。过冷度比较小,不能形成新的晶核,但促进晶粒长大。晶体沿着与散热相反的方向生长,垂直于母材方向的晶粒会相互挤压,抑制晶粒在垂直于母材方向竞争生长,最终形成粗大柱状晶组织。焊缝内部液态金属受到束流剧烈的搅动作用,温度梯度越来越小,半熔化的母材进入焊缝,增加了异质形核核心。且热影响区有强烈的散热作用,靠近热影响区的一薄层液体冷却比较快,热影响区形成的粗大柱状晶可以作为非均匀形核的基底,因此这一薄层液体产生大量的晶核,并同时向各个方向生长。晶核数目多,相邻的晶核很快彼此相遇,不能继续生长,形成一薄层细晶组织。细晶组织形成后,冷却速率减缓,焊缝中心位置温度大致均匀,每个晶粒在生长各方向上也接近一致,因此形成了等轴晶组织^[5-7]。

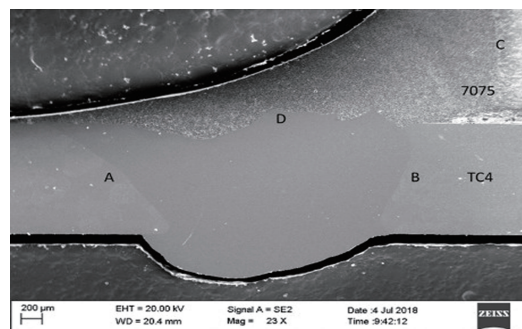


图2 钛/铝异种合金电子束焊接接头截面形貌

Fig.2 Cross-sectional morphology of titanium/aluminum dissimilar alloy electron beam welded joints

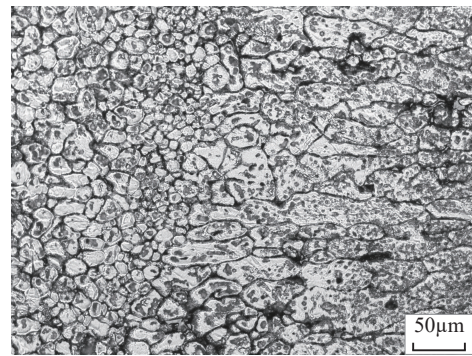
图3(b)为钛合金侧熔合线A和B附近的组织,TC4钛合金为 $\alpha + \beta$ 型双相钛合金,由于热影响区受热少,因此在 β 相中二次析出细小的 α 马氏体相。冷却过程中热影响区晶粒长大形成柱状晶。焊缝熔合区主要由粗大的 β 相组成,片状或针状的 α 相镶嵌其中。这是因为熔合区受热最多, α 相受热转变成 β 相, β 相晶粒受热长大;冷却凝固时,部分 α 相又从 β 相中呈针状或片层状析出 α' 相^[8-12]。

2.3 界面成分分析

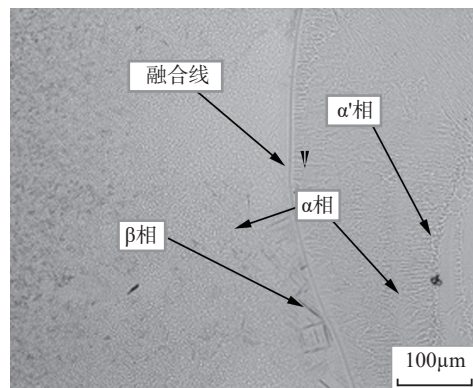
图4所示为钛铝二元平衡相图^[13]。Sujata^[14]研究表明:钛和铝之间可形成多种形式的金属间化合物,主要为 Ti_3Al , Ti_2Al , $TiAl$, $TiAl_2$, $TiAl_3$ 。由于钛合金熔点比铝合金熔点高,在液态焊缝冷却过程中,金属钛合金比铝合金先凝固,因此过渡层以钛合金为基体垂直向铝合金一侧生长。如表3所示,在0~1660℃温度范围内, $TiAl_3$ 的自由能最小,因此过渡层金属间化合物的主要成分是 $TiAl_3$ ^[15]。同时由于焊接过程使非平衡凝固过程,在最后相成分上可能会形成一些 $TiAl_2$ 等过渡相。

为了对结合界面进一步分析,选取图2中过渡线D进一步放大观测,并对过渡层进行EDS分析。图5(a)给出了热输入量为4.5J/mm时过渡区能谱线扫描位置图,图5(b)为线扫描数据结果,过渡层厚度约为3 μm 。图6为过渡区点分析示意图,表4为点分析结果。由图5(a)、(b)可知。在过渡层中,铝原子与钛原子存在互扩散过程,但扩散距离只限在整个过渡层中,并随着扩散距离的增加出现元素递减的现象。由图6和表4可知,金属间化合物层中的铝元素原子百分比大约为79%。钛元素约为19%。钛侧焊缝中含有27%的铝元素,68%的钛元素。铝侧焊缝中只有0.33%的钛元素,98%为铝元素。这是由于电子束焊接过程加热和冷却速度较快,钛合金的熔点为1668℃,铝合金的熔点为660℃。且焊接过程中铝合金在上,钛合金在下。因此铝原子所具有的自由能大于钛原子的自由能。当钛原子来不及扩散到过渡层中,铝原子已经大量扩散到过渡层中。因此,过渡层在凝固时铝原子占据很高的比例,根据两种原子相对数目分析过渡层中锯齿状的金属间化合物主要为 $TiAl_3$,除此之外还有一些其他过渡相生成^[16-18]。

图7(a)为热输入量为8.5J/mm时过渡区能谱线扫描位置图,图7(b)为线扫描数据结果,过渡层厚度约为20 μm 。图8(a)为热输入量增加时棒状金属间化合物EDS扫描位置图,图8(b)为扫描结果。由于热输入量较大,焊缝液态金属停留时间与热输入量小时相比,凝固时间较长,焊接过程中原子扩散数目增多,扩散距离变大,金属间化合物由锯齿状进一步生长相互挤



(a) 铝合金



(b) 钛合金

图3 钛/铝异种合金电子束焊接接头显微组织

Fig.3 Microstructure of titanium/aluminum dissimilar alloy electron beam welded joint

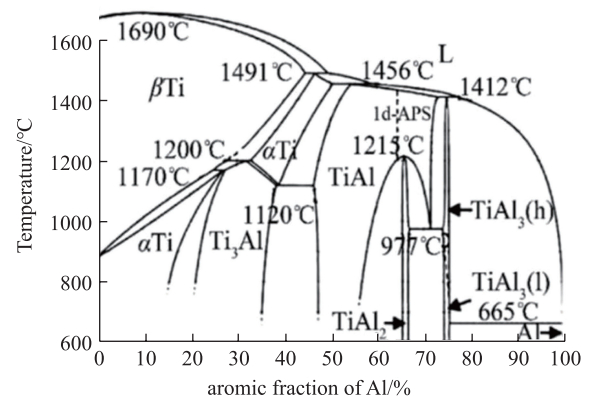
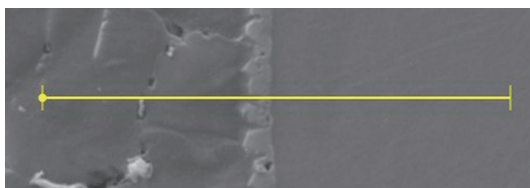


图4 钛/铝二元合金平衡相图

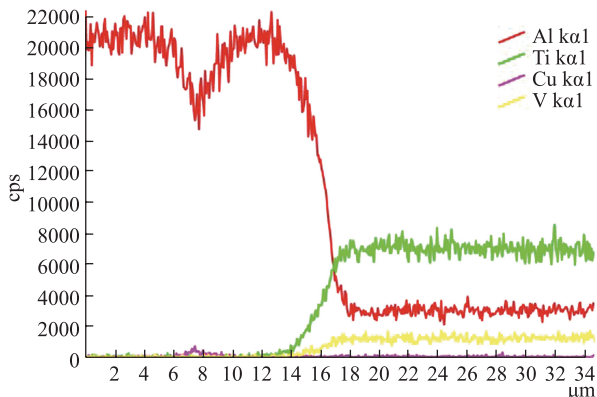
Fig.4 Titanium/aluminum binary alloy equilibrium phase diagram

表3 Ti_3Al 、 $TiAl$ 、 $TiAl_3$ 的自由能
Table 3 Free energy of Ti_3Al , $TiAl$, $TiAl_3$

化合物	自由能
Ti_3Al	$-29633.6+6.70801T$
$TiAl$	$-37445.1+16.79376T$
$TiAl_3$	$-40349.6+10.36525T$



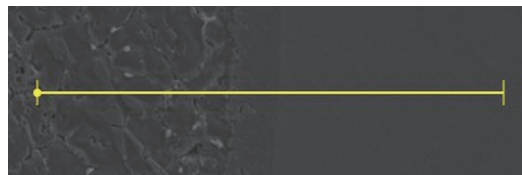
(a) 过渡层 EDS 线能谱示意图



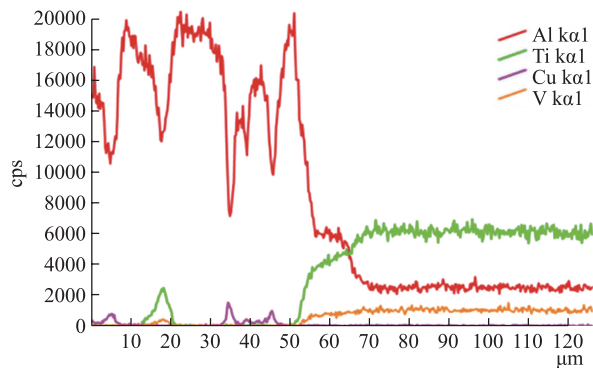
(b) 过渡层 EDS 线能谱数据结果

图5 热输入量为4.5J/mm EDS 结果

Fig.5 Heat input amount of 4.5 J/mm EDS line energy spectrum diagram and results



(a) 过渡层 EDS 线能谱示意图



(b) 过渡层 EDS 线能谱数据结果

图7 热输入量为8.5J/mm EDS 结果

Fig.7 Heat input amount of 8.5 J/mm EDS line energy spectrum diagram and results

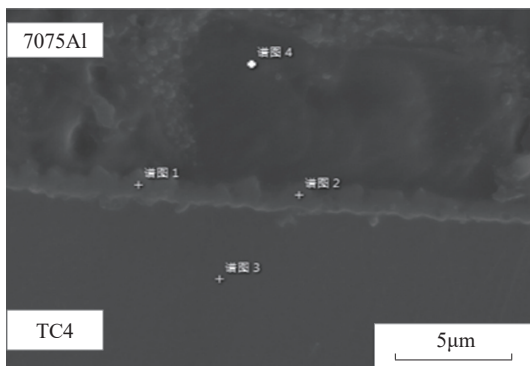


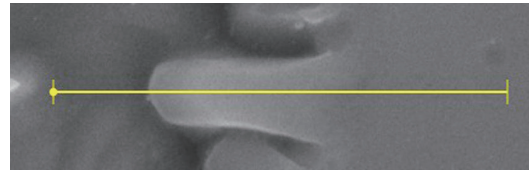
图6 EDS点能谱示意图 (4.5J/mm)

Fig.6 EDS point energy spectrum diagram (4.5J/mm)

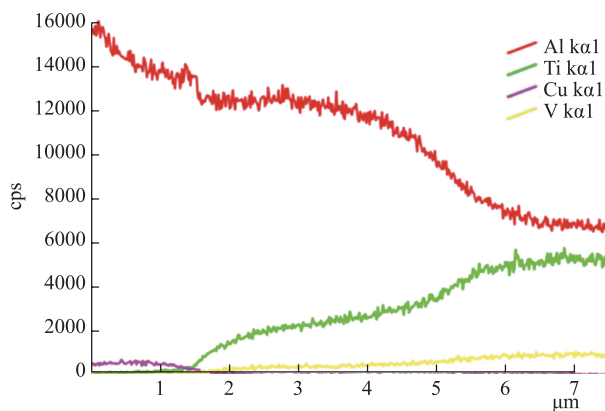
表4 EDS点能谱扫描结果 (4.5J/mm)

Table 4 EDS point energy spectrum scan results (4.5J/mm)

谱图标签	谱图 1	谱图 2	谱图 3	谱图 4
Al	78.24	79.70	27.43	97.98
Ti	20.29	18.89	68.44	0.33
V	0.89	0.78	3.28	—
Mn	—	—	—	0.34
Cu	0.58	0.63	0.85	1.35
总量	100.00	100.00	100.00	100.00



(a) 棒状组织 EDS 线能谱示意图



(b) 棒状组织 EDS 线扫描结果

图8 棒状组织EDS线扫描示意图及结果

Fig.8 Schematic Diagram and results of EDS line scanning of rod-shaped tissue

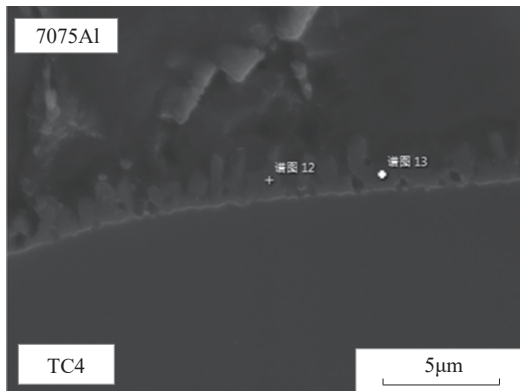


图9 EDS点能谱扫描示意图 (8.5J/mm)

Fig.9 Schematic Diagram of EDS point energy spectrum scanning (8.5J/mm)

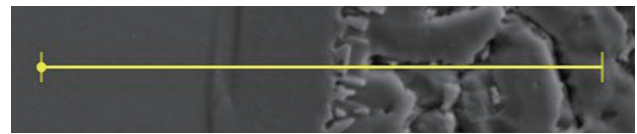
表5 EDS点能谱扫描数据结果 (8.5J/mm)

Table 5 EDS point energy spectrum scan data results (8.5J/mm)

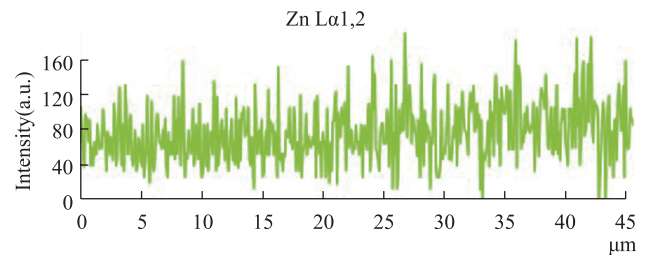
谱图标签	谱图 12	谱图 13
Al	71.37	69.80
Ti	27.18	28.49
V	1.09	1.15
Cu	0.36	0.56
总量	100.00	100.00

压形成连续的一薄层,并在此薄层的基础上以锯齿状或胞状继续生长。图9为过渡区点分析图,表5为点分析结果。

由分析数据结果可知,金属间化合物层中的铝元素原子百分比大约为70%,钛元素约为27%。过渡层中金属间化合物仍为TiAl₃,棒状的金属间化合物存在铝原子和钛原子互扩散过程,且随着扩散距离的增加原子数目逐渐减少。TiAl₃在过渡层的钛焊缝一侧开始形核向铝焊缝一侧长大,此时的钛原子充足,可以形成正常结构的TiAl₃金属间化合物,而随着TiAl₃向铝焊缝一侧的进一步生成,界面前沿的钛原子数目逐渐减少,铝原子数目增多。虽然可维持TiAl₃金属间化合物的继续生成,但部分TiAl₃晶体结构中钛原子缺失,直到生长到最后钛原子含量不足以维持TiAl₃晶体结构生长^[19]。由于电子束焊接的冷却过程较快,金属间化合物末端还将形成一些亚稳定的中间过渡相,如TiAl₂等。最后,在工件的持续冷却过程中,高温相转变为稳定相,从而形成一定的Ti₃Al、TiAl和TiAl₃等金属间化合物^[20]。其中,Zn元素扩散结果如图10所示,由于Zn元素活度比较大。在焊接过程中均匀地分布在铝焊缝中,不存在元素变化梯度。在钛焊缝中,随着距离铝焊缝的增加,Zn元



(a)EDS Zn元素线扫描示意图



(b)EDS Zn元素线扫描结果

图10 Zn元素扩散结果

Fig.10 Zn element diffusion results

素有减少趋势,但并不明显。

4 结论

(1)电子束焊接实现了7075铝合金和TC4钛合金的搭接工艺。铝合金侧从焊缝到母材依次为:等轴晶、细晶区、柱状晶区。钛合金侧从焊缝到母材依次为:针状或片层状α'、α相、α'+α+β混合相、α+β双相。

(2)在过渡层形成过程中,金属间化合物以钛为基体向铝侧生长,其成分TiAl₃为主,还会生成少量的Ti₃Al和TiAl等金属间化合物,以及中间相TiAl₂。

(3)电子束焊接焊缝中间存在一薄层过渡层,热输入量由4.5J/mm增加到8.5J/mm,过渡层厚度由3μm增加到20μm,但其化合物种类不发生变化。

参考文献

- [1] 黄伯云,李成功,石力开,等.中国材料工程大典(第4卷):有色金属材料工程(上)[M].北京:化学工业出版社,2006.
HUANG Boyun, LI Chenggong, SHI Likai, et al. China materials engineering dictionary (Volume 4): Nonferrous metal materials engineering (I)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [2] 张召,李宗全.纳米复合材料力学性能的研究[J].材料科学与工程,2001,19(4):122-126.
ZHANG Zhao, LI Zongquan. Research on mechanical properties of Nanocomposites[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2001, 19(4): 122-126.
- [3] ISLAMGALIEV R K, BUCHGRABER W, KOLOBOV Y R, et al. Deformation behavior of Cu-based nanocomposite processed by severe plastic deformation[J]. Materials Science and Engineering A, 2001, 752: 872-876.

(下转第101页)

ZHANG Huanchang. Exoerimental study on ultrasonic vibration drilling of difficult-to-cut material micro-hole[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2013.

[20] 肖子英, 陈学永. 超声振动钻削技术综述[J]. 机电技术, 2009, 32(S1): 1-4.

XIAO Ziyang, CHEN Xueyong. Review of ultrasonic vibration drilling technology[J]. Mechanical & Electrical Technology, 2009, 32(S1): 1-4.

[21] BREHL D E, DOWT A. Review of vibration assisted machining[J]. Precision Engineering, 2008, 32(3): 153-172.

[22] 王爱玲, 祝锡晶, 吴秀玲. 功率超声振动加工技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.

WANG Ailing, ZHU Xijing, WU Xiuling. Power ultrasound vibration machining technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.

[23] 李祥林, 薛万夫. 振动切削及其在机械加工中的应用[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1985.

LI Xianglin, XUE Wanfu. Vibration cutting and its application in machining[M]. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 1985.

[24] 李晓峰. 铝合金与钛合金超声振动辅助钻削工艺研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.

LI Xiaofeng. Process study of ultrasonic assisted vibration drilling aluminum and titanium alloys[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.

[25] 蔡晓江, 张余升, 刘普林, 等. 超声振动钻削 SiC_p/Al 的表面形成机理研究[J]. 机械设计与制造, 2014(2): 124-126.

CAI Xiaojiang, ZHANG Yusheng, LIU Pulin, et al. Research on surface formation mechanism in ultrasonic drilling SiC_p/Al[J]. Machinery Design & Manufacture, 2014(2): 124-126.

通讯作者: 董志刚, 博士, 副教授, 研究方向为难加工材料高效加工技术与装备/精密/超精密加工技术与装备, E-mail: dongzg@dltu.edu.cn.

(责编 大漠)

(上接第78页)

[4] GUO S, ZHOU Q, KONG J, et al. Effect of beam offset on the characteristics of copper/304 stainless steel electron beam welding[J]. Vacuum, 2016, 128: 205-212.

[5] KOU S, 闫久春. 焊接冶金学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.

KOU S, YAN Jiuchun. Welding metallurgy[M]. Beijing: Higher Education Press, 2012.

[6] 廖传清, 宿国友, 高艳芳, 等. 7075/5A06 异种铝合金 TIG 焊接头的显微组织和力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2015(1): 43-48.

LIAO Chuanqing, SU Guoyou, GAO Yanfang, et al. Microstructure and mechanical properties of 7075/5A06 dissimilar aluminum alloy TIG welded joints[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015(1): 43-48.

[7] 郭顺, 彭勇, 周琦, 等. 2195 铝锂合金和 TC4 钛合金异种金属电子束焊接行为研究[J]. 真空科学与技术学报, 2018, 38(2): 81-86.

GUO Shun, PENG Yong, ZHOU Qi, et al. Elec-tron beam welding behavior of dissimilar metals in 2195 Al-Li alloy and TC4 Titanium alloy[J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 2018, 38(2): 81-86.

[8] 都强, 倪家强, 刘艳梅, 等. TA15 大厚度电子束焊接头组织及性能分析[J]. 工具技术, 2016, 5(4): 65-67.

DU Qiang, NI Jiaqiang, LIU Yanmei, et al. TA15 large thickness electron beam welding head micro-structure and performance analysis [J]. Tool Technology, 2016, 5(4): 65-67.

[9] 张秉刚, 王廷, 陈国庆, 等. 大厚度 TC21 钛合金电子束焊接试验[J]. 焊接学报, 2009, 30(11): 5-8, 113.

ZHANG Binggang, WANG Ting, CHEN Guoqing, et al. Large thickness TC21 titanium alloy electron beam welding test [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2009, 30(11): 5-8, 113.

[10] 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, 60(3): 74-80.

GUAN Feng, NI Jiaqiang, LIU Guangxin, et al. Microstructure and mechanical properties of TC4-DT titanium alloy electron beam welded joints[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(3): 74-80.

[11] 宋庆军. 大厚度 TC4ELI 钛合金 EBW 质量控制及球壳变形预测[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.

SONG Qingjun. Large thickness TC4ELI titanium alloy EBW quality control and spherical shell deformation prediction [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.

[12] 左从进, 李晋炜, 余伟, 等. 高温钛合金 Ti-55 与 Ti-60 电子束焊接头力学性能[J]. 焊接学报, 2011, 32(4): 103-106.

ZUO Congjin, LI Jinwei, YU Wei, et al. Mechanical properties of Ti-55 and Ti-60 electron beam welded joints of high temperature titanium alloy[J]. Transactions of the China Welding Society, 2011, 32(4): 103-106.

[13] TURAN E. Fiber grating spectra[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1468-1488.

[14] SUJATA M, BHARGAVA S, SANGAL S. On the formation of TiAl₃, during reaction between solid Ti and liquid Al[J]. Journal of Materials Science Letters, 1997, 16(14): 1175-1178.

[15] DAVIS J R. ASM metals handbook, welding, brazing and soldering[M]. Ohio: ASM International, 1993.

[16] WANG T, LI X, ZHANG Y, et al. Regulating the interfacial morphology of electron beam welded pure Ti/2024Al dissimilar joint[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 245: 227-231.

[17] REN J W, LI Y J, FENG T. Microstructure characteristics in the interfacezone of Al/Ti diffusion bonding[J]. Materials Letters, 2002, 56(5): 64-52.

[18] CHANG S Y, TSAO L C, LEI Y H, et al. Brazing of 6061 aluminum alloy/Ti-6Al-4V using Al-Si-Cu-Ge filler metals [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212: 8-14.

[19] 孙军浩, 曹睿, 陈剑虹. 铝/钛异种金属冷金属过渡熔钎焊接头分析[J]. 焊接学报, 2015, 36(3): 51-55.

SUN Junhao, CAO Rui, CHEN Jianhong. Analysis of aluminum/titanium dissimilar metal cold metal transition fusion brazed joints [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2015, 36(3): 51-55

[20] ZENG H, LUO G Q, SHEN Q, et al. Preparation of TC4-LY12 joint by vacuum diffusion welding[J]. Advanced Materials Research, 2009, 66(66): 242-245.

通讯作者: 许海鹰, 博士, 研究员, 主要研究方向为电子束源技术, E-mail: xhyxy@126.com.

(责编 大漠)