

# AL6061 铝合金厚板电子束焊接性能分析

乔红超, 赵吉宾

(中国科学院 沈阳自动化研究所 辽宁 沈阳 110016)

**摘要:**为了研究中厚板铝合金的真空电子束焊接性能,采用 THDW-6 真空电子束焊机对 AL6061-T6 铝合金中厚板进行焊接,研究了加速电压、工作距离和焊接速度对焊缝深宽比和金相组织的影响。分析了焊接参数为:工作距离 110mm、工作电压 70kV、电子束流 40mA、聚焦电流 638mA、焊接速度 540mm/min 的力学性能和显微组织结构,焊缝的抗拉强度约为母材的 87%,焊缝的显微组织晶界明显,晶粒呈立方化,焊接的铝合金箱体的漏率优于  $10^{-9}\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 。试验结果表明,焊接接头的力学性能高,宏观形貌和金相组织良好。

**关键词:** 铝合金; 电子束焊接; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TH16; TG456.3; TG113 文献标识码: A 文章编号: 1001-3997(2014)02-0091-03

## Analysis on Welding Properties of Electron Beam Welding of Al6061 Aluminum Alloy Slab

QIAO Hong-chao, ZHAO Ji-bin

(Shenyang Institute of Automation Chinese Academy of Science, Liaoning Shenyang 110016, China)

**Abstract** In order to study the vacuum electron beam welding properties of aluminum alloy slab, an AL6061-T6 alloy sample processed by THDW-6 vacuum electron beam welder were determined, and the effect of accelerating voltage, working distance, and welding speed on the ratio of depth to width were examined. The mechanical properties and microstructure were analyzed when welding parameters were at working distance 110mm, accelerating voltage 70kV, electron beam current 40mA, focus current 638mA, and welding speed 540mm/min, and the fracture strength of the joint reached 87% of base metal, and the microstructure grain boundary is obviously, the lattice is cubic, and the leak rate of the welding aluminum enclosure is better than  $10^{-9}\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ . The experiment results show that the satisfying weld appearance, good microstructure and mechanical properties can be achieved by vacuum electron beam welding.

**Key Words:** Aluminum Alloy; Electron Beam Welding; Microstructure; Mechanical Properties

## 1 引言

铝合金是工业中应用最广泛的一类有色金属结构材料,在航空、航天、汽车、机械制造、船舶及化学工业中已有大量的应用<sup>[1-3]</sup>。随着近年来科学技术以及工业经济的发展,对铝合金焊接结构件的需求日益增多,使铝合金的焊接性能研究也随之深入。但由于铝合金强的氧化能力、较大的热导率和比热容、热裂纹倾向大、易形成气孔和夹渣、变形等<sup>[4-6]</sup>,所以铝合金的焊接是目前存在的技术难点。

近年来发展起来的真空电子束焊接工艺是将被焊工件置于真空环境中,利用定向高速运动的电子束撞击工件使得工件熔化进行焊接的方法,由于电子束较高的能量密度,使得焊接速度较快,从而热影响区小、工件的变形较小,又由于置于  $10^{-2}\sim 10^{-3}$  的真空环境中,水分较少、氧气较少,从而气孔和夹渣较少。真空电子束焊接技术能够较好的解决铝合金焊接难的问题<sup>[7-10]</sup>。针对 AL6061 铝合金厚板电子束焊接工艺问题进行研究,由于焊缝成形是决定焊缝质量的主导因素,故这里重点研究通过调整焊接参

数来控制焊缝成形和焊接接头微观组织,探索厚板铝合金的焊接特性、如何得到良好的焊缝形貌以及如何评判焊缝成形质量。

## 2 试验材料及方法



图1 真空电子束焊机照片

Fig.1 Photo of Electron Beam Welding Machine

采用 THDW-6 型的真空电子束焊机进行焊接实验。电子枪的最大功率为 6kW,最大加速电压为 70kV,最大焊接束流为 100mA,最大聚焦电流为 800mA,焊接室的体积大小为  $(700\times 700\times$

来稿日期 2013-08-08

基金项目 国家自然科学基金项目(50605006) 国家 973 项目(2007CB714502) 国家科技重大专项(2011ZX02401)

作者简介 乔红超(1982-)男 河南商丘人 硕士 助理研究员 主要研究方向 高能束加工工艺研究;

赵吉宾(1971-)男 山东济南人 博士 教授 主要研究方向 高能束加工工艺研究

700)mm 焊接室的真空度可达  $7.5 \times 10^{-2}$ Pa 以上,焊接室内装有三轴联动运动平台,与 Z 方向的焊枪一起可构成四轴联动。焊接所使用的焊机照片如图 1 所示。两块(100×50×10)mm 的铝板对接成为“T”型对接接头,通过夹具(如图 2 所示)安装在真空室内,夹具夹紧后,保证两块铝板对接面间的最大间隙<0.2mm。

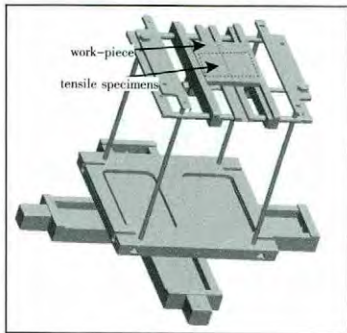


图 2 焊接夹具

Fig.2 Photo of Welding Fixture

AL6061-T6 试验件的化学成分如表 1 所示。在焊接前,用酒精和丙酮将其表面的油污去除干净,并放入 80℃的烘箱中烘干 30min。焊接结束等试件完全降温后(时间约为 25min)再从焊接室中取出试件,以防止高温的试件在潮湿的大气环境中氧化。利用线切割机从焊接试样中居中切取拉伸试样(切取形状和切取位置如图 2 所示。大小为(100×50×10)mm),采用长春某有限公司生产的 DDL-5 电子万能试验机测量抗拉强度,并在沿焊缝横断面上切取金相组织分析试样,金相试样经金相砂纸抛光后,采用 HNO<sub>3</sub>:HCL:HF=5:3:2 的混合溶液进行金相腐蚀,依次用水和酒精清洗并吹干,在上海某有限公司生产的 MR5000 金相显微镜对焊缝宏观形貌进行观察。

表 1 AL6061-T6 铝合金的化学成分(质量百分数,%)

Tab.1 Chemical Composition of Al6061-T6 Aluminum Alloy(mass percentage %)

Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al
0.15-0.4	0.4-0.8	0.7	0.15	0.8-1.2	0.25	0.04-0.35	0.15	Bal.

### 3 结果与讨论

#### 3.1 加速电压对焊缝深宽比的影响

在真空电子束焊接中,在维持最佳聚焦的条件下,电子束焊接的主要规范参数是加速电压、电子束电流、焊接速度、电子枪工作距离(简称工作距离)和焦点位置。采用工作距离为 110mm、电子束流 40mA,焊接速度为 580mm/min,加速电压分别为 30mm、40mm、50mm、60mm 和 70mm 进行焊接试验。

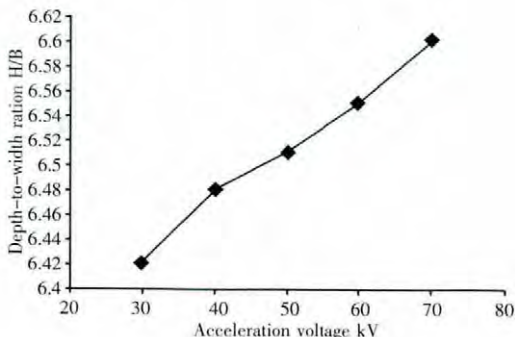


图 3 加速电压对焊缝深宽比的影响

Fig.3 Effect of Acceleration Voltage on Depth-to-Width

加速电压对焊缝深宽比影响的曲线如图 3 所示。从图 3 中可以看出,随着加速电压的增大,焊缝深宽比增大。这是由于加速电压增大了,除了增加电子束功率,进而提高功率密度外,还由于电子枪的电子光学系统的聚焦性能有了改善,进一步提高了电子束焦点的功率密度,增加了焊缝穿透深度。

#### 3.2 工作距离对焊缝深宽比的影响

在真空电子束焊接中,工作距离是一个重要参数,所谓的工作距离是指电子枪的工作距离,操作过程中,通常量取真空室顶部到工件的距离作为工作距离。工作距离的变化和聚焦电流的变化密切相关,改变工作距离就要改变聚焦电流,才能获得最佳的聚焦条件,工作距离增大,聚焦电流减小,反之亦然。采用加速电压 70kV、电子束流 40mA,焊接速度为 580mm/min,工作距离分别为 70mm、90mm、110mm、130mm 和 150mm 进行焊接试验,选择不同的工作距离进行焊接时,选用相应的聚焦电流使得电子束聚焦焦点正好处于工件表面。工作距离对焊缝深宽比的影响如图 4 所示。从图 4 中可以看出,随着工作距离的增大,深宽比减小。当工作距离增大后,在其他规范参数不变的前提下,聚焦电流要减小,则磁透镜的放大倍数增大,电子束流在非完全真空的环境中行走的距离增大,从而速度降低,另外,电子束流受周围磁场等的干扰也会显现,因而束斑点增大从而功率密度减小,焊缝熔深相应减小,熔宽相应增大。当工作距离<60mm 时,易造成偏压不稳带来焊接终断,故工作距离不能无限变小。

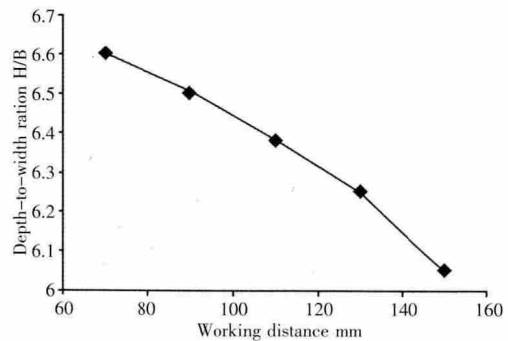


图 4 工作距离对焊缝深宽比的影响

Fig.4 Effect of Working Distance on Depth-to-Width

#### 3.3 焊接速度对焊缝深宽比的影响

采用工作距离 110mm、加速电压 70kV、聚焦电流 638mA、电子束流 40mA,焊接速度分别为 540mm/min、580mm/min、620mm/min、660mm/min、700mm/min 进行焊接。焊接后的试样背面照片,如图 5 所示。从左向右焊接速度依次变大,从图 5 中可以看出,随着焊接速度的增大,焊缝由刚好焊透变到焊缝的背面无焊接迹象。这是由于随着焊接速度的变大,焊缝逐渐变浅的缘故。



图 5 焊接后的试样背面照片

Fig.5 Photo of Work-Piece after Welding

焊接速度对焊缝深宽比的影响如图 6 所示。从图 6 中可以看出,随着焊接速度的增大,焊缝深宽比逐渐增大,这是由于焊接

速度增大 对试件的加热时间减少 热量来不及散失便已冷却 焊缝的热影响区变小、焊缝变窄 而焊缝的深度变小速度低于焊缝变窄的速度 从而使得焊缝深宽比变大。

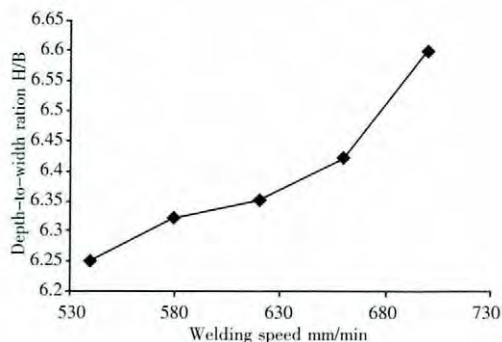


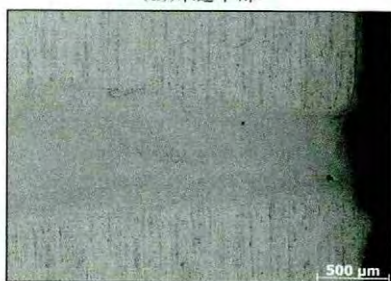
图6 焊接速度对焊缝深宽比的影响  
Fig.6 Effect of Welding Speed on Depth-to-Width

### 3.4 焊接的力学性能和微观组织结构分析

选择工作距离为 110mm、加速电压为 70kV、聚焦电流为 638mA、电子束流为 40mA、焊接速度为 540mm/min、对试件进行焊接。并按照图 2 所示切取拉伸试样 测得焊接接头的抗拉强度约为 275MPa 同时对相同形状和大小的母材试验进行拉伸 测得其抗拉强度约为 315MPa, 接头的抗拉强度约为母材抗拉强度的 87% 明显低于母材的抗拉强度。焊缝区域的金相显微照片 如图 7 所示。从焊缝的金相照片中可以看出 基板的轧制纹理较为清晰 晶格被压缩 晶粒呈纤维状 顺着轧制方向被拉长 组织呈条状有序排列。焊缝区内晶格变得立方化 晶界清晰 焊缝中间的晶粒较为细小 从中心向母材方向 晶粒逐渐变大。从金相组织上可以说明焊缝的抗拉强度低于母材的抗拉强度 焊缝的硬度低于母材的硬度。焊缝和母材之间界限清晰 热影响区较小 晶格畸变较大,有利于裂纹的萌生和扩展 如果能够经过时效去除应力或退火 将有利于焊缝强度的提高。焊缝底部较为平整 焊缝形貌较好。



(a)焊缝中部



(b)焊缝底部

图7 金相照片

Fig.7 Photo of Micrograph

使用上述工艺参数 焊接了大小为(200×200×200)mm 的箱体 如图 8 所示。板材的厚度为 10mm 焊缝形貌美观 利用沈阳

真空技术研究所的氦质谱检漏仪检验漏率, 漏率检验结果优于  $(10^{-9})\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 。

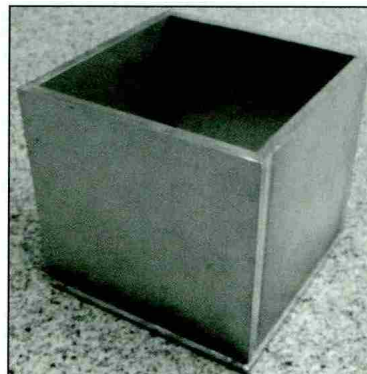


图8 焊接的箱体

Fig.8 Photo of Weld Case

## 4 结论

(1)增大加速电压 能够增大电子束功率 改善聚焦性能 增加电子束的穿透能力 从而提高焊缝的深宽比。(2)减小工作距离 能够减小电子束行走的距离、降低动能损耗 减小束斑点 降低磁场干扰 从而提高焊缝的深宽比。(3)增大焊接速度 能够减小热影响区, 减小对工件的加热时间 从而提高焊缝的深宽比。(4)选择工作距离为 110mm、加速电压为 70kV、聚焦电流为 638mA、电子束流为 40mA、焊接速度为 540mm/min、对试件进行焊接 焊接接头的抗拉强度约为母材的 87% 焊缝处的晶格立方化 焊接的腔体漏率优于  $(10^{-9})\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 。

### 参考文献

- [1] Emel T, Jerry E G, John C L. Dissimilar friction welding of 6061-T6 aluminum and AISI 1019 steel properties and microstructural characterization[J]. Materials and Design, 2010, 31: 2305-2311.
- [2] Bang H S, Bang H S, Jeon G H et al. Gas tungsten arc welding assisted hybrid friction stir welding of dissimilar materials Al6061-T6 aluminum alloy and STS304 stainless steel[J]. Materials and Design, 2012, 37: 48-55.
- [3] Moreira P, Figue M, Castro P. Fatigue behavior of FSW and MIG weldments for two aluminium alloys[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2007, 48: 169-177.
- [4] Wu Y, Kim G, Russell A. Effects of mechanical alloying on an AL6061-CNT composite fabricated by semi-solid power processing [J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 48: 164-172.
- [5] Zhang Z, Zhang H W. Numerical studies on controlling of process parameters in friction stir welding [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209: 241-270.
- [6] Qi Yunlian, Deng Ju, Hong Quan et al. Electron beam welding laser beam welding and gas tungsten arc welding of titanium sheet [J]. Materials Science and Engineering, 2010, A280: 177-181.
- [7] Jonghyun K, Y.Kawamura. Electron beam welding of the dissimilar Zr-based bulk metallic glass and Ti metal [J]. Scripta Materialia, 2007, 56: 709-712.
- [8] N. Arivazhagan, Surendra S, Satva P. Investigation on AISI 304 austenitic stainless steel to AISI 4140 alloy steel dissimilar joints by gas tungsten arc electron beam and friction welding [J]. Materials and Design, 2011, 32: 3036-3050.
- [9] I Magnabosco, P Ferro, F Bonollo. An investigation of fusion zone microstructures in electron beam welding of copper-stainless steel [J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 424: 163-173.
- [10] 王素惠, 王俊元. 2A12 铝合金真空电子束焊接气孔缺陷分析[J]. 机械设计与制造, 2008, 211: 143-145. (Wang Su-hui, Wang Jun-yuan. Study on the pore of vacuum electron beam welding 2A12 aluminum alloy[J]. Machinery Design & Manufacture, 2008, 211: 143-145.)