

文章编号: 0258-7025(2007)Supplement-0293-05

AA6063-T6 铝合金激光焊接实验研究

吴世凯¹, 杨武雄¹, 肖荣诗¹, 朱 宏²

¹北京工业大学激光工程研究院, 北京 100022

²中国电子科技集团公司第十四研究所, 江苏 南京 210013

摘要 采用 3500 W Slab CO₂ 激光器, 对厚度为 5 mm 的 AA6063-T6 铝合金板材进行了激光填丝对接焊接实验研究。测定了 AA6063 铝合金激光焊接的功率阈值, 探讨了激光填丝焊接工艺参数对焊缝成型的影响, 并对不同填充焊丝焊接接头的强度及拉伸断口形貌进行了分析。研究结果表明, 在合适的工艺参数下, 可以获得表面光洁、正反面焊缝成型良好的对接接头; 焊态下, 单面焊接不填充焊丝的接头强度为 180.7 MPa; 单面焊接填充 AlSi12, AlMg4.5MnZr 焊丝的接头强度最低为 190 MPa, 且两种填充焊丝接头的拉伸强度无明显差异; 双面焊接填充 AlMg4.5MnZr 焊丝的接头强度达到 200.7 MPa, 约为母材的 90%。对于单面焊接接头, 由于填充材料难以进入焊缝内部及根部存在气孔加剧了拉伸强度较低的程度。

关键词 激光技术; 激光焊接; AA6063-T6 铝合金; 参数优化; 接头性能; 气孔

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A

Experimental Study on CO₂ Laser Beam Welding of AA6063-T6 Aluminum Alloy

WU Shi-kai¹, YANG Wu-xiong¹, XIAO Rong-shi¹, ZHU Hong²

¹ Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China

² The 14th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing, Jiangsu 210013, China

Abstract Bead-on-plate and butt welding of AA6063-T6 aluminum alloy plates with a thickness of 5 mm is carried out by applying a 3500 W Slab CO₂ laser. The penetration welding threshold is measured, and the influences of welding parameters on the process stability are studied. Meanwhile, the different joint tensile strength and appearances are tested. The results demonstrate that welds with good appearances could be obtained when welding with the appropriate processing parameters. The as-welded joint tensile strength without filler wire is 180.7 MPa, while the tensile strength is 190 MPa when welding by one side with the filler wire of AlSi12 or AlMg4.5MnZr. However, the joint tensile strength increases up to 200.7 MPa when welding by both sides with the filler wire of AlMg4.5MnZr, which is about 90% of the base-metal tensile strength. The main reasons for the lower tensile strength when welding by one side are that the filler metal can not totally enter the bottom of the weld and there are porosities at the root of weld.

Key words laser technique; laser welding; AA6063 aluminum alloy; parameter optimization; joint tensile strength; porosity

1 引 言

6063 铝合金是 Al-Mg-Si 系中具有中等强度的可热处理强化铝合金, 具有良好的冲击韧性、热塑性和阳极氧化着色性以及理想的焊接性能与抗腐蚀

性, 广泛应用于汽车、高速列车、高速舰船、航空航天和军事工业等领域。由于 6063 铝合金存在焊接裂纹敏感性较高, 焊接接头力学性能明显下降等加工难题^[1,2], 一直以来采用钎焊的方法实现连接。但该合

基金项目: 北京市教委科技发展计划(KM200410005014)资助课题。

作者简介: 吴世凯(1976—), 男, 山西朔州人, 博士研究生, 主要从事激光材料加工方面的研究。

E-mail: wushikai@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 肖荣诗(1965—), 男, 理学博士, 教授, 博士生导师, 主要从事激光与材料相互作用, 先进材料激光加工, 激光加工新工艺、新方法 & 外围技术与系统的研究。E-mail: rsxiao@bjut.edu.cn

金的熔点较低(固相线温度 615 °C),与 Al-Si-Mg 钎料的液相线温度(577 °C)接近,使钎料的选择受到限制。同时,其接头的结构设计和钎焊工艺复杂,不容易保证焊接质量。随着应用范围的扩展,钎焊接头强度已不能满足使用要求,同时残留的大量钎剂也使耐蚀性能变差。近来有采用搅拌摩擦焊接 6063 铝合金的应用报道^[1]。

由于激光焊接所具有的技术和经济上的优势,早在 20 世纪 80 年代,铝合金的激光焊接的研究就引起了广泛关注。与传统焊接工艺相比,铝合金激光焊接具有能量密度高、热输入量低、速度快、热影响区小、焊接变形小、焊缝组织细小及接头力学性能优良等特点,特别对热处理强化铝合金有较大的应用优势。通过添加合适的填充材料,亦可以有效控制焊接裂纹的形成^[2~4]。本文采用 3500 W Slab CO₂ 激光器,针对 5 mm 厚度的 6063-T6 铝合金板材进行了填充 AlSi12, AlMg4.5MnZr 焊丝对接焊接实验研究。

2 实验设备及材料

实验采用德国 Rofin-Sinar 公司 DC035 Slab CO₂ 激光器,光束模式为 TEM₀₀ 模,光束质量参量 $K \geq 0.95$,最大输出功率为 3500 W,光束由导光系统传输到加工位置,经焦距为 300mm 的抛物铜镜反射聚焦,聚焦光斑直径为 0.26 mm。焊接时由双层喷嘴侧向送入保护气,焊丝经送丝喷嘴从保护气对称方向送入。实验装置布置简图如图 1 所示。

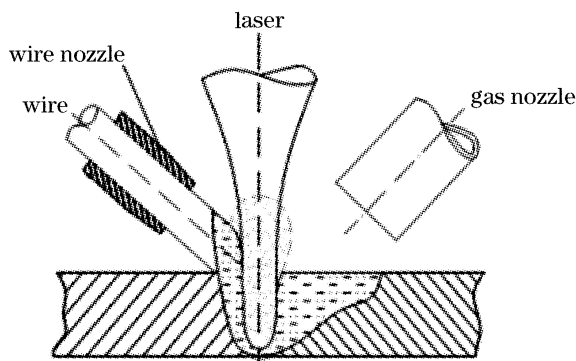


图 1 实验装置布置简图

Fig. 1 Experimental setup of laser welding

实验用材料为 6063 铝合金,其热处理状态为 T6。焊接试样尺寸为 100 mm×70 mm×5 mm,采用平板对接方式。试样装配面经铣削加工,焊接时将接头部分用丙酮清洗干净。填充焊丝为 AlSi12 和 AlMg4.5MnZr,直径为 1.2 mm。实验材料及化学成分如表 1 所示。

表 1 实验材料及化学成分

Table 1 Components of experimental materials

	6063	AlSi12	AlMg4.5MnZr
Si	0.20~0.60	11.0~13.0	0.25
Fe	≤0.35	0.80	0.40
Cu	≤0.10	0.30	0.05
Mn	≤0.10	0.15	0.7~1.1
Mg	0.45~0.90	0.10	4.5~5.2
Cr	≤0.10	—	—
Zn	≤0.10	0.20	0.25
Zr	—	—	0.05~0.25
Ti	≤0.10	—	0.15
Other	≤0.15	0.15	0.15
Al	bal	bal	bal

3 实验结果及讨论

3.1 6063 铝合金激光焊接阈值

由于铝合金对 CO₂ 激光的吸收率非常低,室温下,CO₂ 激光焊接铝合金时,约有 99% 的激光能量将被材料表面反射掉,另外材料表面在不同功率密度的激光束的辐照下,将发生表面温度升高、熔化、气化、形成小孔以及产生光致等离子体等各种不同的变化。材料表面在一定功率密度的光束照射下,产生蒸发形成小孔,此时材料对激光的吸收率可以高达 80% 以上,同时激光能量向材料内部的传递不再受热传导的限制,形成深熔焊接过程。这一临界功率密度被定义为这种材料的激光焊接的功率密度阈值。图 2 为 6063 铝合金激光焊接熔深随功率密度的变化曲线,由图 2 可知 6063 铝合金激光深熔焊接的阈值约为 1.2×10^6 W/cm²,比较容易实现深熔焊接。

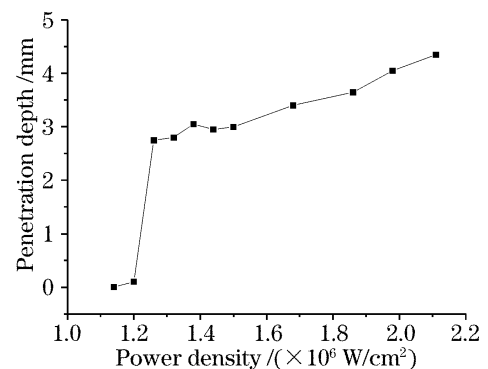


图 2 6063 铝合金激光焊接熔深随功率密度的变化

Fig. 2 Variation of penetration depth as a function of power density in 6063 aluminum alloy

(DC035 CO₂ laser, $f=300$ mm, $\Delta f=0$ mm,

He: 30 L/min, $v=3$ m/min)

3.2 激光焊接工艺参数对焊缝成型的影响

对铝合金的激光焊接来说,影响焊缝成型的主

要参数有功率密度、焊接速度、保护气配比与流量以及送丝速度等。由于铝合金对激光较低的吸收率及自身高的热导率,为保证完全焊透,实验中使用光束功率为 3500 W,聚焦镜焦距 300 mm,这样作用于材料的功率密度则主要由离焦量决定。

3.2.1 离焦量(Δf)

实验中首先采用平板扫描焊接,在其他工艺条件相同的条件下,不同 Δf (焦点在材料表面上为正,反之为负)得到的焊缝表面成型见图 3。



图 3 不同离焦量时的焊缝表面成型

Fig. 3 Weld shaping of various defocuses (Δf)
($P=3500\text{ W}, f=300\text{ mm}, \text{He}:20\text{ L/min}, v=3\text{ m/min}$)

从图 3 中可以看出,在 $\Delta f=0$ 时,焊缝中容易出现较大的凹坑,并且焊缝表面不均匀,焊接过程不稳定。而在 $\Delta f=+2\text{ mm}, +4\text{ mm}$ 时,焊缝表面光洁,鱼鳞纹清晰均匀,焊接过程比较稳定,不同之处在于, +4 时焊缝较宽,熔深略浅(+2 时完全焊透)。当 Δf 增大到 +6 或减小到 -2 时,焊缝表面的波动又趋向剧烈,焊接过程不再稳定;在 $\Delta f=-4$ 时,已经不能实现深熔焊接。这是由于当焦点位于板面时,作用于材料的能量密度高,小孔上方的等离子体振动剧烈,随离焦量的增加,能量密度逐渐减小,等离子体趋于稳定,但是当能量密度减小到一定程度时(+6),又使小孔变得不稳定,促使焊接过程出现波动,甚至不能出现深熔焊接过程。

3.2.2 保护气的配比及流量

铝合金的激光焊接一般采用 He 或 Ar, He 混合气作为保护气体。实验中对比了不同 He 流量及 Ar/He(内层/外层)配比时的熔深及焊缝表面成型。当采用纯 He 时,焊接过程比较稳定,焊缝表面成型有一定的波动,在流量大于 15 L/min 时即可实现完全焊透。当采用 Ar/He 混合气体时,在总流量为 20 L/min 的条件下,随 Ar 比例的增加,焊接过程的

稳定性向恶化的方向发展。不同 Ar/He 比例时的焊缝表面成型见图 4。在 Ar/He(内层/外层)流量为(2.5/17.5) L/min 时,焊缝表面平滑,鱼鳞纹清晰均匀,成型比较理想。

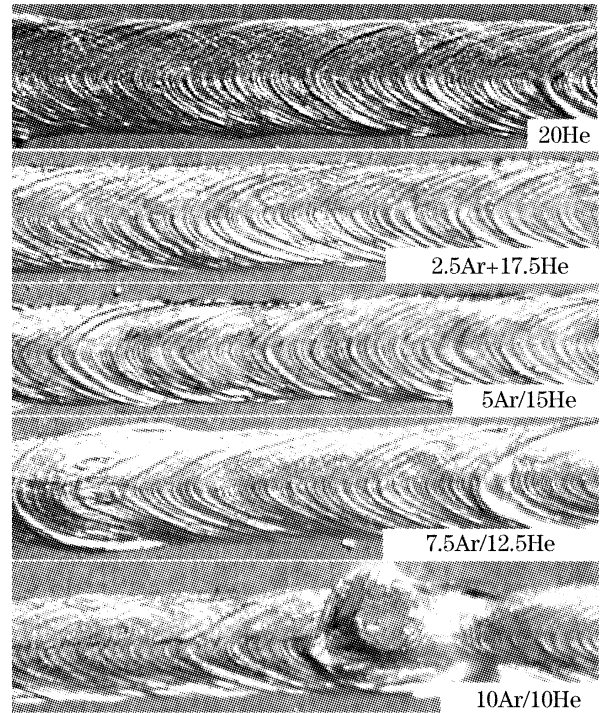


图 4 不同保护气条件下的焊缝成型

Fig. 4 Weld shaping of various shielding gas conditions
($P=3500\text{ W}, f=300\text{ mm}, \Delta f=+2\text{ mm}, v=3\text{ m/min}$)

3.2.3 焊接速度

焊接速度对熔深、熔宽有显著的影响,随焊接速度的提高,熔深和熔宽都呈减小趋势,如图 5 所示。由于 6063 铝合金中低熔点的 Mg 元素含量较低,金属蒸发程度较弱,在较高的焊接速度时,焊缝表面成型的变化不明显,而在焊接速度较低时($<2\text{ m/min}$),由于单位时间输入熔池的能量较多,金属蒸发加剧,小孔波动严重,熔池出现塌陷。如图 6 所示。

3.2.4 送丝速度

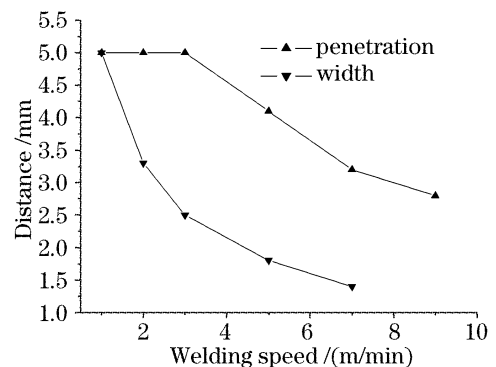


图 5 焊接速度对熔深和熔宽的影响

Fig. 5 Influence of speed on penetration and width of weld
[$P=3500\text{ W}, f=300\text{ mm}, \Delta f=+2\text{ mm},$
Ar/He: (2.5/17.5) L/min]

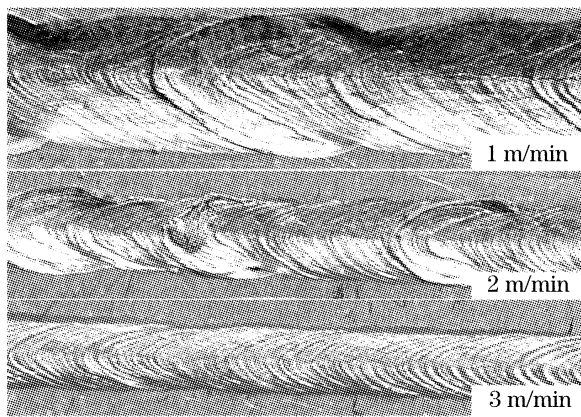


图 6 焊接速度对焊缝成型的影响

Fig. 6 Influence of welding speed on shaping of weld

[$P=3500\text{ W}$, $f=300\text{ mm}$, $\Delta f=+2\text{ mm}$,
Ar/He: (2.5/17.5) L/min]

在不填充焊丝情况下,铝合金的激光焊接可以获得较好的焊缝成型,但也存在一些诸如热裂纹、接头软化等问题^[5],大大限制了其在工业生产中的应用。对 6063 铝合金来说,填充焊丝的使用,可以抑制热裂纹的形成,改善焊缝的力学性能,同时填充焊丝的加入可以大大增加焊接过程的稳定性^[6]。在其

表 2 理想的焊接工艺参数

Table 2 Result laser welding parameters

No.	v /(mm/min)	v_s /(mm/min)	Wire	Description
A	2000	—	—	Welding by one side
B	1700	1300	AlSi12	Welding by one side
C	1700	1300	AlMg4.5MnZr	Welding by one side
D	3000	1300	AlMg4.5MnZr	Welding by both sides

3.3 6063-T6 铝合金激光焊接接头性能

在平板对接激光焊接试样及母材上各取 2 个标准拉伸试样进行拉伸实验,实验结果如表 3 所示。

表 3 拉伸实验结果

Table 3 Results of tensile test

No.	Tensile strength /MPa	Elongation/%	Description
A1	184.5	4.3	without wire
A2	180.7	3.8	without wire
B1	197.9	4.6	AlSi12
B2	192.8	3.8	AlSi12
C1	192.4	3.7	AlMg4.5MnZr(one side)
C2	190.0	3.8	AlMg4.5MnZr(one side)
D1	200.7	2.8	AlMg4.5MnZr(both sides)
D2	199.2	2.9	AlMg4.5MnZr(both sides)
E1	218.1	15.1%	Base metal
E2	223.2	15.1	Base metal

拉伸实验结果表明:焊态时,添加焊丝的焊接接头的抗拉强度较没有填充材料时有明显的增加,而对

他焊接工艺参数确定的情况下,送丝速度和焊接速度的合理匹配是决定焊缝成型的关键因素。当激光功率 $P=3500\text{ W}$, $\Delta f=+2\text{ mm}$, 保护气流量为 (2.5/17.5) L/min(Ar/He)时,通过实验确定平板对接焊接时,理想的焊接速度和送丝速度匹配见表 2。焊缝表面宏观照片如图 7 所示。

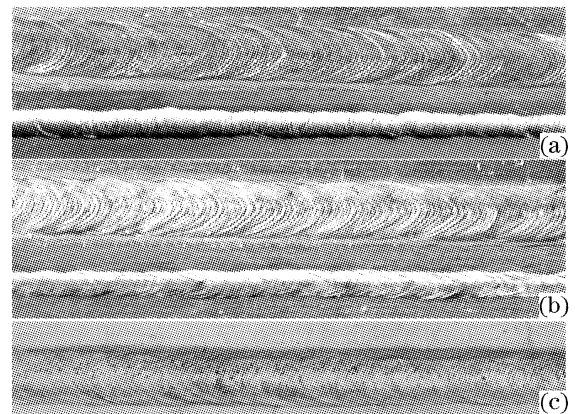


图 7 焊缝正反面宏观照片。(a)无填充焊丝;(b)单面填充焊丝;(c)两面填充焊丝

Fig. 7 Macro-photos of weld beads. (a) Without wire; (b) one side with wire; (c) both sides with wire

于单面填充 AlSi12 或 AlMg4.5MnZr 焊丝的接头,其拉伸强度没有明显区别;双面填充 AlMg4.5MnZr 焊丝的接头强度比单面填充时提高了约 5%,达到母材的 90%左右,但是其延伸率明显下降。这是由于在焊态时,尽管有 AlMg4.5MnZr 焊丝的加入,但由于强化相并不能完全析出,所以其接头的抗拉强度与添加 AlSi12 的接头基本相当^[7],同时由于单面填充焊丝时,焊丝不能有效进入熔池底部,而双面填充时,焊丝成分可以完全进入整个熔池,从而导致接头强度有明显提高。焊缝中心区域的硬度检测结果也表明,单面填充的焊丝并不能进入熔池底部。

如图 8 所示,填充材料的焊接接头的硬度比未添加材料时有所提高,同时在单面填充 AlSi12 或 AlMg4.5MnZr 焊丝的接头中,焊缝底部的硬度明显降低,而双面填充 AlMg4.5MnZr 焊丝的接头并不存在这种现象。另外可以看出,没有填充材料焊缝的显微硬度明显低于添加了焊丝的焊缝,这也从侧面说明

了没有添加焊丝的焊接接头强度较低。

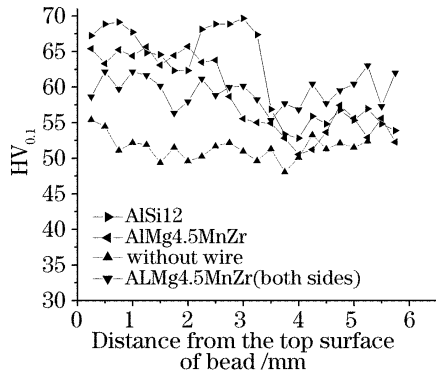


图8 焊缝中心纵向显微硬度分布

Fig. 8 Micro-hardness distribution along the weld center

对拉伸断口的宏观形貌观察,可以看到断裂位置都位于熔合线附近,同时,在未填充焊丝和单面填充焊丝的焊接接头的根部存在连续的气孔,而在双面填充焊丝的接头中基本不存在宏观的气孔,如图9所示。



图9 焊接接头拉伸断口宏观照片

(a) AlMg4.5MnZr; (b) AlSi12; (c)无焊丝; (d) 双面 AlMg4.5MnZr

Fig. 9 Macro fracture pattern of tensile sample

(a) AlMg4.5MnZr; (b) AlSi12; (c) without wire; (d) both sides with AlMg4.5MnZr

根部气孔的存在也是接头强度较低的一个重要原因。

4 结 论

采用双层喷嘴,通过合理匹配的焊接工艺参数,采用激光填充焊丝焊接 5 mm 厚的 6063-T6 铝合金板材,可以得到正反面成型良好的焊接接头。焊态下,填充材料的焊接接头的抗拉强度较未填充材料的接头有明显的提高,最高可达到母材的 90% 左右。分析认为填充焊丝不能有效进入熔池底部和焊缝根部的连续气孔加剧了接头强度较低的程度。

参 考 文 献

- 1 Chai Peng, Jian Bo, Ji Yajuan *et al.*. Impact properties of 6063 Al alloy FSW weld [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2005, **26**(9): 27~30
柴 鹏,简 波,季亚娟等. 6063 铝合金搅拌摩擦焊接头冲击断裂分析 [J]. *焊接学报*, 2005, **26**(9): 27~30
- 2 Li Rui. Study on the welding property of 6063 (LD31) aluminum alloy profile [J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 1999, **27**(4): 41~44
李 睿. 6063 铝合金型材焊接性能的研究 [J]. *轻合金加工技术*, 1999, **27**(4): 41~44
- 3 Xiao Rongshi, Chen Kai, Zuo Tiechuan. Development of laser beam welding of high strength aluminum alloys [J]. *Applied Laser*, 2002, **22**(2): 206~208
肖荣诗,陈 铠,左铁钊. 高强铝合金激光焊接新进展 [J]. *应用激光*, 2002, **22**(2): 206~208
- 4 Xia Jinan, Cheng Zhaogu, Xu Guoliang *et al.*. Butt weld of aluminum alloy plates 6063 and LY12 by laser beam [C]. *SPIE*, 2000, **3888**: 717~724
- 5 Zuo Tiechuan. Laser Materials Processing of High Strength Aluminum Alloy [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001. 102~110
左铁钊. 高强铝合金的激光加工 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2001. 102~110
- 6 H. Hugel, M. Beck, J. Rapp *et al.*. Laser welding of aluminum [C]. *SPIE*, 1997, **3092**: 516~521
- 7 Akio Hirose, Kojiro F. Kobayashi. Characteristics of laser beam welds of age-hardenable 6061-T6 aluminum alloy [C]. *SPIE*, 2003, **4831**: 313~318