

文章编号: 1001-3806(2008)06-0601-04

# YAG-MIG 复合焊接 ZL-114A 铝合金的接头组织与性能研究

余阳春<sup>1</sup>, 王春明<sup>1\*</sup>, 邓玉平<sup>1</sup>, 余圣甫<sup>1</sup>, 刘 刚<sup>2</sup>, 王志敏<sup>2</sup>, 顾 兰<sup>2</sup>

(1. 华中科技大学 材料科学与工程学院, 武汉 430074 2 北京航星机器制造公司, 北京 100013)

**摘要:** 为了研究 ZL-114A 铝合金 YAG 激光-熔化极惰性气体保护 (MIG) 电弧复合焊接接头性能, 采用拉伸试验和扫描电子显微镜对其力学性能和显微组织进行了测试分析。由于焊接固有的快速冷却特性及进口 4047 焊丝中细化晶粒元素 (Ti) 的存在, 焊缝金属组织普遍较铸造组织细小, 而且与采用的焊接线能量有关; 靠近熔合线附近的晶粒粗化及固溶相的析出导致其硬度陡降, 成为所谓的“软化区”, 是接头最脆弱部分, 但其宽度及粗化程度较一般 MIG 电弧焊小, 接头拉伸强度为母材的 80% 左右, 断口呈脆性断裂特征。实验结果表明, 采用适当的工艺参量, YAG-MIG 复合焊接可以在较高的速率下得到高质量的焊接接头, 是一种理想的铝合金高效焊接技术。

**关键词:** 激光技术; ZL-114A 铝合金; YAG-MIG 复合焊接; 显微组织; 拉伸强度; 软化区

**中图分类号:** TG456.7 **文献标识码:** A

## Microstructure and properties of YAG-MIG hybrid welding joint of ZL-114A aluminum alloy

YU Yang-chun<sup>1</sup>, WANG Chun-ming<sup>1</sup>, DENG Yu-ping<sup>1</sup>, YU Sheng-fu<sup>1</sup>, LIU Gang<sup>2</sup>, WANG Zhi-min<sup>2</sup>, GU Lan<sup>2</sup>

(1. Material Science and Technology College, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China 2. Beijing Hangxing Machinery Manufacturing Corporation, Beijing 100013, China)

**Abstract** In order to study the performance of YAG-MIG (metallic inert gas) arc hybrid welding joint of ZL-114A aluminum alloy, the tensile test and scanning electronic microscope were adopted to analyze the mechanical properties and microstructure of welded joint. The microstructure of the bead was smaller than that of base metal because of the inherent splat cooling of welding and the beneficial effect of titanium (Ti), and the microstructure was smaller when the heat input was smaller. The crystal of heat affected zone (HAZ) was coarsening, and had a softened zone near the bond line because of the precipitation and dissolution of the solid solution phase in base metal. The softened zone was the worst mechanics in the joint, which in the YAG-MIG hybrid welding was usually much narrower than that in the single MIG welding. The tensile strength of the YAG-MIG hybrid welding joint was up to 80% of the base metal, the fracture characteristic belonged to brittle fracture. The results show that the high quality joint can be achieved in a high welding speed when the welding parameter is appropriate, so the YAG-MIG hybrid welding is an ideal welding technique for aluminum alloy with high efficiency.

**Key words** laser technique; ZL-114A aluminum alloy; YAG-MIG hybrid welding; microstructure; tensile strength; softened zone

## 引 言

激光焊接技术与传统的电弧焊相比, 具有功率密度大、热输入总量低、熔深大、热影响区小、焊接变形小、速度快、易于工业自动化等优点, 已经成功地应用于钢、铁等黑色金属的连接<sup>[1-3]</sup>。

用激光焊接铝合金同样具有上述很多优点, 尤其是采用激光焊时的高效率, 对提高生产效率具有十分重要的意义。但由于铝合金自身的特性, 导致其和激

光之间的相互作用更加复杂, 从而对接头质量控制更加困难, 综合起来主要存在以下一些问题, 如: 铝合金对激光能量的吸收率低; 合金元素烧损严重, 易产生气孔、裂纹等焊接缺陷以及设备成本高、接头间隙允许度小、工件准备工序要求严等<sup>[4]</sup>。为了更有效地焊接铝合金, 尤其是对铝合金厚板的焊接, 人们发展了激光复合焊接工艺<sup>[5-6]</sup>。激光复合主要是激光与钨极惰性气体保护电弧、熔化极惰性气体保护 (metallic inert gas MIG) 电弧及等离子体的复合等<sup>[7-9]</sup>。激光与 MIG 复合焊接, 由于焊丝的添加, 不仅可以大大降低对接头间隙允许度的要求, 而且通过调整焊丝成分还可以对焊缝进行合金化, 弥补合金元素烧损, 从而降低气孔的发生及焊缝的裂纹敏感性。因此, 这种复合焊接方法得

作者简介: 余阳春 (1975-), 男, 博士研究生, 主要从事激光加工工艺及焊接材料方面的研究工作。

\* 通讯联系人。E-mail: anwang@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2007-10-29; 收到修改稿日期: 2008-04-28

到了较快的发展和应用。

本文中采用优化的 YAG-MIG 复合焊工艺填加进口 4047 焊丝,进行了 ZL114A 铸造铝合金的焊接,并对其微观组织、机械性能进行了测试。

## 1 实 验

### 1.1 试验材料及工艺

试验母材为 8mm 厚的 ZL114A 铸造铝合金,试板的尺寸为 300mm×100mm×8mm,采用平板对接,开 U 形坡口,圆弧半径 1.5mm,钝边 3mm,上边宽 5mm,图

1 为坡口示意图。为保证焊透,共焊接两道,每道焊接采用的焊接工艺参量如表 1 所示,试验过程中采用的焊丝为进口焊丝 4047,焊丝及母材化学成分如表 2 所示。

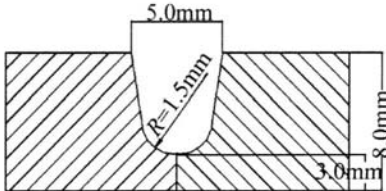


Fig 1 Sketch of welding joint

Table 1 YAG-MIG hybrid welding parameters

|             | laser power | wire feed rate         | welding rate             | arc power |     | gas flow rate           |
|-------------|-------------|------------------------|--------------------------|-----------|-----|-------------------------|
|             | /kW         | /(mm·s <sup>-1</sup> ) | /(mm·min <sup>-1</sup> ) | I/A       | U/V | /(L·min <sup>-1</sup> ) |
| first bead  | 4.5         | 120                    | 1000                     | 85        | 20  | 25                      |
| second bead | 1.5         | 210                    | 700                      | 220       | 32  | 25                      |

Table 2 Chemical composition of ZL114A & 4047 welding wire mass fraction

| material | alloying element fractions |               |        |        |        |               |
|----------|----------------------------|---------------|--------|--------|--------|---------------|
|          | w (Si)                     | w (Mg)        | w (Cu) | w (Mn) | w (Fe) | w (Al)        |
| ZL114A   | 0.065~0.075                | 0.0045~0.0075 | 0.001  | 0.001  | 0.002  | 0.0008~0.0025 |
| 4047     | 0.11~0.13                  | 0.003         | 0.001  | 0.0015 | 0.008  | 0.002         |

### 1.2 实验方法

拉伸试验按照国家标准 GB265089 进行。焊接接头的硬度测试从接头一侧的母材开始,每隔 0.5mm 取点测量,一直延伸到接头另一侧母材,加载载荷 100g 加载时间为 15s,取点位置为距焊缝表面 1/4 处。利用扫描电镜对接头的显微组织及拉伸试样断口形貌进行了观察、分析。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 焊缝外观形貌

由于本试验拼接试样较厚(达到 8mm),一般激光和电弧均难以单道焊透,所以采取开单面坡口两道焊接的工艺,在考虑采用何种形式坡口时,主要考察了 V 形和 U 形两种最常用的坡口形式。根据对 V 形坡口和 U 形坡口的试验研究,发现采用 V 形坡口时,焊接过程很不稳定,焊缝成形很差,这可能与 V 形坡口对等离子体的抑制能力较差以及由此导致的电弧稳定性不好有关<sup>[10]</sup>;当采用 U 形坡口(尺寸见图 1)时,焊接过程稳定,焊缝成形良好。

综合考虑激光和电弧能量的各自特点,在打底焊时,采用了高能量密度激光(功率 4.5kW)为主要热源、而采用较低的电弧能量为辅的方式,保证其对 3mm 厚的钝边的完全熔透,避免能量不足时易出现的

未熔合缺陷,并尽量得到较大熔深,以减少焊接道次,提高焊接效率;而对第 2 道焊缝,根据 U 形坡口特征,从底部往上,宽度不断增加,其正好适合电弧焊缝较宽的特征,所以采用较高的电弧能量和较低激光能量 1.5kW 的热源组合,考虑到其需要填加焊丝量的增加,所以相应的焊接速度有所减低,从 1000mm/min 降低到 700mm/min 最后得到的焊缝良好成形也正好验证了这种热源组合的合理性,焊缝宏观形貌见图 2。这

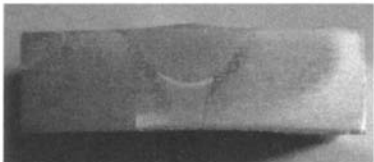


Fig 2 Macrograph of a hybrid weld joint

是一种介于激光焊和电弧焊缝形貌特征之间的特殊形貌。其形成原因主要在于,复合焊时激光可以起引导电弧的作用,防止电弧的漂移,使电弧能够稳定集中于激光加热中心周围的熔池上;同时复合焊焊接过程中激光形成的等离子体为电弧提供了导电通路,使弧柱电阻减小从而使电弧被压缩,造成其熔宽减小。

### 2.2 接头微观组织观察

复合焊接头不同区域微观组织形貌见图 3。由图 3a 和图 3c 可以看出, YAG-MIG 复合焊接接头和单一 MIG 一样,接头存在一个晶粒比较粗大的热影响区,但

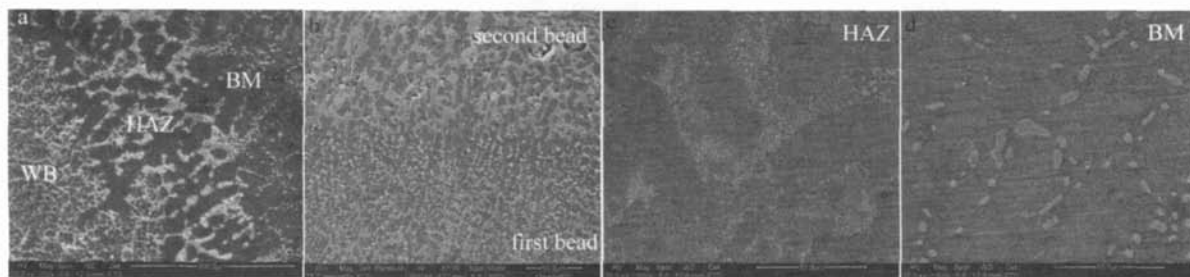


Fig 3 Microstructures of welded joint of ZL-114A aluminum alloy at different area

和单纯 MIG 焊过程相比,其热影响区相对较窄,只有  $100\mu\text{m} \sim 150\mu\text{m}$ ; 图 3b 为两道焊缝组织分界处微观组织图,由图可以看出两道焊缝组织的分界线十分明显,第 2 道焊缝的组织为树枝状形态的 AFS 共晶组织,靠近分界线较细小,远离分界线相对粗大;这是由于靠近分界线处第 2 道焊缝金属凝固时,热量可以通过第 1 道焊缝金属快速导出,从而冷却速度更快,故晶粒相比较上部更加细小,其长大方向大致呈垂直于分界面方向,这正好和其散热方向一致,也符合晶粒沿散热最快方向优先生长的规律;第 1 道焊缝的组织也为细小的树枝状形态 AFS 共晶组织,其分布趋势和上部相同,越靠近分界面处晶粒越细,这是由于第 2 道焊接相当于对第 1 道焊缝的热处理作用,所以,晶粒相当于又经历了一次重熔再结晶过程,故得到了进一步的细化,同样晶粒长大方向也是和散热方向大致相同,垂直于分界面。但第 1 道焊缝晶粒均较第 2 道焊缝细小得多,这主要是由于两道焊缝采用的焊接工艺的差别(见表 1)所致,第 1 道焊缝虽然激光功率较第 2 道大很多,但电弧能量相对较小,并且其焊接速度较第 2 道焊缝快近 43%,经过计算,第 1 道焊缝的焊接线能量只有第 2 道焊缝的一半左右,线能量的差异直接导致了焊缝组织上的明显不同。另外,焊丝中的细化晶粒元素(Ti)的存在及焊接固有的快速冷却特性也起到细化组织的作用,所以,焊缝金属组织普遍较铸造母材组织细小(见图 3a 图 3b 和图 3d)。图中有母材(base metal, BM),热影响区(heat affect zone, HAZ)和焊缝(welding bead WB)。

### 2.3 焊缝微观硬度测量

复合焊接 ZL114 铝合金板材焊接接头沿垂直焊缝方向的硬度分布如图 4 所示。图 4 中“0”表示焊缝中心,“0~5mm”与“0~-5mm”为焊缝熔化区。由图可以看出,焊缝区的宽度约 10mm,焊缝中心部位硬度最低( $\text{HV}_{90}$ ),远离焊缝中心,硬度逐渐增加,但在热影响区中距焊缝中心 5mm 左右处,硬度再次降低,进入软化区,软化区的最低硬度为  $\text{HV}_{88}$ ,此后,硬度逐渐增加,在距焊缝中心约 10mm 处,硬度达到原始基材的硬度,两个试样的硬度分布基本一致。其主要原因是因

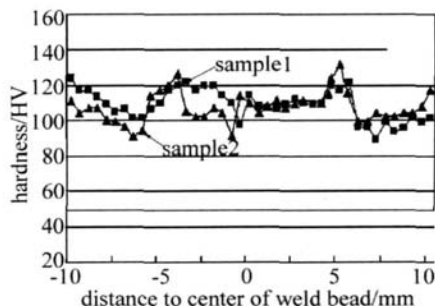


Fig 4 Distribution of hardness of welded joint

为在经过激光焊的过程中,母材一样会经历一个温度快速升高,到达最高点后又快速冷却的热循环过程,其最高温度往往随其距离焊缝的远近而不同,最高可以达到合金的熔点以上,对于靠近焊缝的母材,当其局部区域的峰值温度到达了液相线温度点以上时,就会出现部分熔化,晶粒有足够多的能量进行长大,形成晶粒粗化(见图 3c);另外由于母材 ZL114A 是通过 T6 热处理来获得高强度的,即其中的强化相主要为 Si 元素的饱和固溶体,在焊接热循环作用下,热影响区固溶体的溶化和析出将大大降低该区的机械性能(包括硬度及拉伸强度),在硬度性能上就对应为图 4 所示的软化区。其相对于单一 MIG 焊而言,由于激光复合焊接的加热和冷却速度较快,所以其熔宽较小,热影响区也较小,故形成的软化区也较窄。

### 2.4 试样拉伸试验及断口电镜扫描

图 5 为 ZL114 铝合金板材焊接接头拉伸断裂试样,拉伸强度达到  $230\text{MPa} \sim 240\text{MPa}$  最后破坏于热影



Fig 5 Damage at heat affected zone

响区,焊缝强度达到母材强度(ZL-114A 铝合金经过 T6 处理后拉伸强度  $280\text{MPa} \sim 300\text{MPa}$ ) 的 80% 左右,其破坏位置正好对应于微观组织的热影响区晶粒粗化(见图 3a)和硬度曲线距焊缝中心 5mm 左右的软化区(见图 4)。由于固溶处理铝合金焊接时会导致固溶相的溶化和析出,所以一般焊缝接头强度总是低于母材强度,尤其是在焊缝热影响区的晶粒粗化区,其性能最

差;所有能减少焊缝热影响区晶粒粗化程度和降低粗化区宽度的焊接工艺均可提高焊接接头的机械强度性能,这也是 YAG-MIG 复合焊接接头最终拉伸强度达到母材的 80%、远远高于一般 MIG 焊 60% 的原因。

由于该试验 ZL-114A 合金采用 T6 热处理工艺,本身即为靠牺牲塑性得到最高强度,故其塑性变形能力很差。其宏观断口形貌见图 6 由图可以看出,断口比较整齐,呈脆性断裂,进一步的微观形貌(见图 7)观



Fig. 6 Macrograph of the fracture

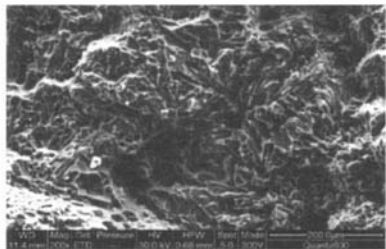


Fig. 7 Micrograph of the fracture

察证实,断口基本没有明显的塑性变形区,属典型的脆性断裂,呈现出铸态断口特征。

### 3 结 论

(1)通过激光 电弧复合焊接 ZL-114A 铝合金,由于激光与电弧的互补作用,采用适当的焊接工艺参量,可以在较高的速率下得到较 MIG 焊等传统焊接方法更高质量的焊接接头,其接头强度达母材的 80% 左右。

(上接第 597 页)

### 3 结 论

通过对方解石的 XRF 光谱分析得知,浅黄色方解石中含有微量的锶和镁元素,浅紫色方解石中含有微量的锰、锶和镁元素,但微量元素含量较低,由 XRD 光谱无法确定其具体存在化合形态;晶体的偏振透射谱曲线表明,浅黄色方解石比浅紫色方解石的截止波长更短,大约在 210nm,更适合于制作紫外偏光器件;偏光棱镜消光比的测试结果表明,由于微量元素含量较低,偏光棱镜的消光比性能并没有明显得降低,一般可达  $10^{-6}$  量级,完全可在测试精度要求不很高的光学系统中使用。

#### 参 考 文 献

[1] GAO H G, PEI Q K. The design of GlairTay brpolarizing prism [J]. LaserTechnology, 1994 18(3): 185-189( in Chinese).

(2)由于焊接固有的快速冷却特性及细化晶粒元素(Ti)的存在,焊缝金属组织较铸造组织细小很多,而且采用的焊接线能量越小,焊缝组织越细小。

(3)由于焊接热循环导致的晶粒粗化及固溶相的溶化和析出,YAG-MIG 复合焊接 ZL-114A 铝合金接头一样存在一个软化区;但热影响区晶粒粗化程度及软化区宽度均较一般 MIG 小,接头强度远高于一般 MIG 焊(母材的 60% 左右)。

#### 参 考 文 献

- [1] LIL J. Modern lasermaterialprocessing and equipment [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1993: 213-214 ( in Chinese).
- [2] WANG J Ch. Development and expectation of laserwelding technology [J]. Laser Technology, 2001, 25(1): 48-54( in Chinese).
- [3] LIU J H, ZHANG Q L, HU L J. New technology of on-line laser joining for hot rolled high silicon steel sheets [J]. LaserTechnology, 2004, 28(1): 16-19( in Chinese).
- [4] YANG Sh F, LOU S M, XUE X H. Welding technology of alumin alloy [J]. Marine Technology, 2003(5): 25-28( in Chinese).
- [5] STEEN W M, EBBO M. Arc augmented laserwelding [J]. Metal Construction, 1979, 11(7): 332-333.
- [6] BAGGER C, OLSEN F O. Review of laserhybrid welding [J]. Journal of Laser Applications, 2005, 17(1): 2-14.
- [7] GAO M, ZENG X Y, HU Q W. CO<sub>2</sub> laserpulsedMAG hybridwelding of mild steel [J]. Laser Technology, 2006, 30(5): 498-500( in Chinese).
- [8] WANG Ch M, HU L J, HU X Y, et al. Laser/high frequency induction hybrid welding [J]. LaserTechnology, 2004, 28(5): 452-454( in Chinese).
- [9] LIU J Ch, LIL J, ZHU X D, et al. Discussion on laserwelding combined with other heat resource [J]. Laser Technology, 2003, 27(5): 486-489( in Chinese).
- [10] HILLPS R H. Laser beam welding of HY80 and HY100 steels using hot welding wire addition [J]. Welding Journal, 1992, 71(7): 201-208.
- [2] REN Sh F, WU F Q. Ternary parallel beam splitter combined of iceland and glass [J]. LaserTechnology, 2006, 30(3): 311-316( in Chinese).
- [3] LI G H, LI J Zh. Designing and measuring of calcite infrared polarization prisms [J]. Journal of Qufu Normal University, 1989, 15(3): 59-64( in Chinese).
- [4] WU F Q, LI G H. Research and manufacture about the iceland spar polarizing prism [J]. Journal of Qufu Normal University, 1994, 20(4): 54-57( in Chinese).
- [5] ZHAO Ch. Discussion on principle and application of X-ray fluorescence spectrometer [J]. Electronics Quality, 2007(2): 4-7( in Chinese).
- [6] KONG W J, WU F Q. The ultraviolet band spectrochemical analysis of iceland crystal material [J]. LaserTechnology, 2003, 27(3): 214-219( in Chinese).
- [7] MU T K, LI G H, PENG H D. Study of the attenuator for the high extinction ratio testing system [J]. LaserTechnology, 2007, 31(1): 71-73( in Chinese).