

文章编号: 0258-7025(2010)05-1404-05

铝合金激光-电阻复合焊接特性研究

张新戈 李俐群 陈彦宾 雷正龙

(哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 采用激光-电阻复合焊接 LF6 铝合金, 对焊接特性进行研究。通过激光和电阻热源相互作用, 接头熔深和焊缝面积显著增加, 实现了在小功率激光条件下铝合金熔透焊接, 提高了焊接生产率, 降低了焊接成本。与激光焊接相比, 激光-电阻复合焊接铝合金接头中的气孔数量大幅下降。激光-电阻复合焊接的焊缝区的强化 $\beta(\text{Al}_3\text{Mg}_5)$ 相弥散分布, 呈铸态组织特征, 热影响区(HAZ)的强化 β 相聚集长大。接头在焊缝断裂, 呈韧性剪切断裂, 平均抗拉强度可达 292 MPa, 约为母材的 83.4%。

关键词 激光技术; 激光-电阻复合焊接; 焊缝成形; 气孔; 抗拉强度

中图分类号 TG456.7 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103705.1404

Study on Characteristics of Laser-Resistance Hybrid Welding for Aluminum Alloy

Zhang Xin'ge Li Liqun Chen Yanbin Lei Zhenglong

(State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract Laser-resistance hybrid welding is used to weld LF6 aluminum alloy plates and the process characteristics are analyzed. Thanks to the interaction between laser and resistance heat, the weld depth and cross section area increase evidently. The aluminium alloy joints with full penetration are achieved with low laser power, resulting in the welding efficiency increasing and production cost reducing. The amount of pore in hybrid welding joints decrease compared with that of laser welding. Microstructure observation indicates that the $\beta(\text{Al}_3\text{Mg}_5)$ strengthen phase in weld zone is typical as-cast structure and dispersal distribution, and in heat-affected zone (HAZ) the β strengthen phase clusters grow up together. During tensile test, the hybrid welding joint ruptures at weld zone with ductile shear characteristic. The average tensile strength of hybrid welding joints is 292 MPa, about 83.4% of base metal.

Key words laser technique; laser-resistance hybrid welding; weld cross section; pore; tensile strength

1 引言

铝合金具有比强度高、塑性好、耐腐蚀性好和可循环使用等优点, 在航空航天、国防和交通运输等工业领域得到广泛的应用。激光焊接由于具有深宽比大、热影响区(HAZ)窄、焊接热变形小和易于实现自动化等优势, 在铝合金生产中具有很大的应用潜力。但是, 铝合金的高热导性和对激光的高反射特征使得铝合金激光焊接对激光器的功率要求较高, 提高了焊接成本, 同时容易产生焊接气孔和裂纹等缺陷^[1~3]。为了解决铝合金激光焊接存在的问题,

Salminen 等^[4]采用激光填丝焊接铝合金, 改善激光焊接的适应性, 通过调整焊缝成分以获得性能更好的焊缝。Xie^[5]和 Haboudou 等^[6]分别研究了双光束激光焊接铝合金, 结果发现, 焊缝表面成形更光滑, 焊缝宽度增加, 而气孔明显减少。Diebold 等^[7~9]分别采用不同的激光和电弧复合方式焊接铝合金, 提高了能量的利用率和焊接效率, 同时改善了焊接接头的质量。李勇强等^[10]采用激光-电阻复合焊接铝合金搭接接头, 改善焊缝截面形状和接头的拉剪力。激光-电阻复合焊接过程中, 激光与电阻焊

收稿日期: 2009-11-09; 收到修改稿日期: 2009-12-02

基金项目: “十一五”装备预研项目(51318050)资助课题。

作者简介: 张新戈(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事激光焊接方面的研究。E-mail: zhangxinge@yahoo.com.cn

导师简介: 陈彦宾(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光加工基础方面的研究。E-mail: chenyb@hit.edu.cn

的复合方式对焊接效果影响较大,为此,本文对此进行了研究。采用自行搭建的激光-电阻复合焊接系统对铝合金进行扫描焊接,研究工艺参数对焊缝成形和气孔缺陷的影响,并对复合焊接接头的组织特征和力学性能进行分析。

2 实验材料与方法

实验材料为 3.6 mm 厚的 LF6 铝合金板,其化学成分如表 1 所示。激光-电阻复合焊接系统包括 2 kW CO₂ 激光器(光斑聚焦直径为 0.3 mm,光束模式为 TEM₀₁),4轴 CNC 数控系统和自主研制的

表 1 LF6 铝合金化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of LF6 (mass fraction, %)

Element	Mg	Mn	Fe	Si	Al
Content	6~6.8	0.5~0.8	≤0.4	≤0.4	Bal.

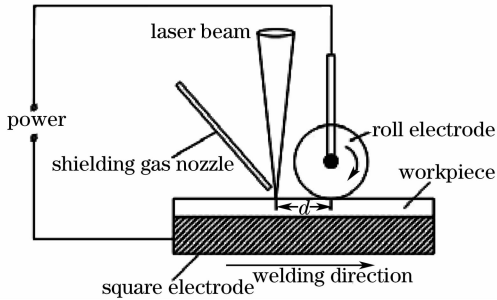


图 1 激光-电阻复合焊接示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser-resistance hybrid welding

电阻焊设备组合而成,焊接过程如图 1 所示。上滚轮电极(直径为 25 mm)绕固定轴转动,激光位于滚轮后($d=14$ mm)保持不动并聚焦于工件表面,行走机构带动工件和下方方形电极运动,同时采用氩气后保护,气体流量为 25 L/min。激光功率保持为 1800 W 不变,电流值为 2~4 kA,焊接速度为 1 m/min。

采用 X 射线对焊接接头进行气孔缺陷检测,选取成形良好的熔透试样进行力学拉伸试验,拉伸试样尺寸如图 2 所示。分别借助 OLYMPUS 金相显微镜和 S-4700 型扫描电镜(SEM)对焊接接头的微观组织和拉伸断口进行观察分析。

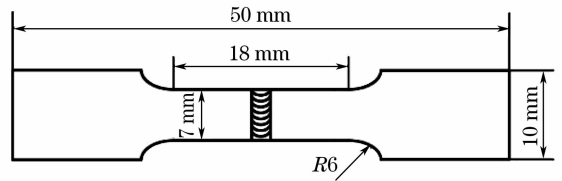


图 2 拉伸试样尺寸

Fig. 2 Dimensions of tensile specimen

3 实验结果与分析

3.1 焊缝成形

为了降低激光焊接铝合金对高激光功率的要求,通过激光与电阻热源的相互作用来改善焊缝成形。图 3 所示为典型的激光焊接和复合焊接的接头形貌。

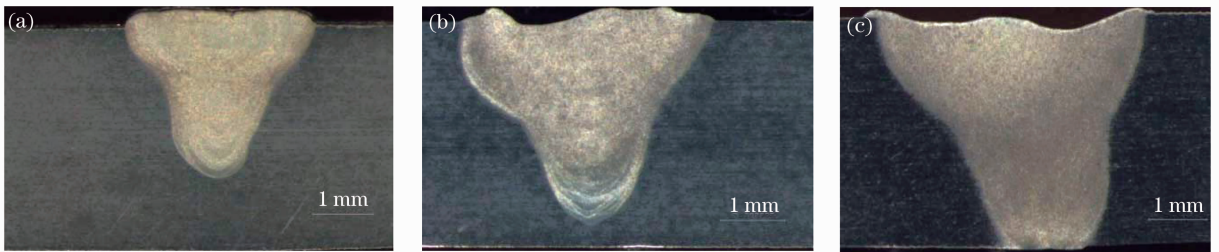


图 3 两种焊接方法的接头形貌。(a) 激光焊接;(b) 复合焊接($I=2$ kA);(c) 复合焊接($I=4$ kA)

Fig. 3 Cross sections of two welding methods. (a) laser welding; (b) hybrid welding ($I=2$ kA); (c) hybrid welding ($I=4$ kA)

由于铝合金良好的导电和导热性能,电流为最大 4 kA 时,电阻焊不能形成单独的焊核。由图 3 可以看出复合焊接的熔深,上部熔宽和焊缝面积与激光焊接相比都明显增加,在较高电流条件下,工件被完全熔透。因此可以在较小激光功率条件下,通过激光-电阻复合焊接,实现工件的熔透,而较小的激光功率带来焊接成本的降低。因此激光-电阻复合焊接铝合金,既发挥了激光焊接的优势,又拓展

了其应用范围。

图 4 所示为电流值 2~4 kA 时,熔深和焊缝面积的变化趋势。可以看出,随电流值的增加,熔深和焊缝截面面积均呈增加趋势。当电流达到 3 kA 时,工件已熔透,此时焊缝的截面面积是单独激光焊缝的 2 倍多,继续增加电流值到 4 kA 时,焊缝截面面积继续增大,此时焊缝的底部宽度增加明显,如图 3 (c) 所示。

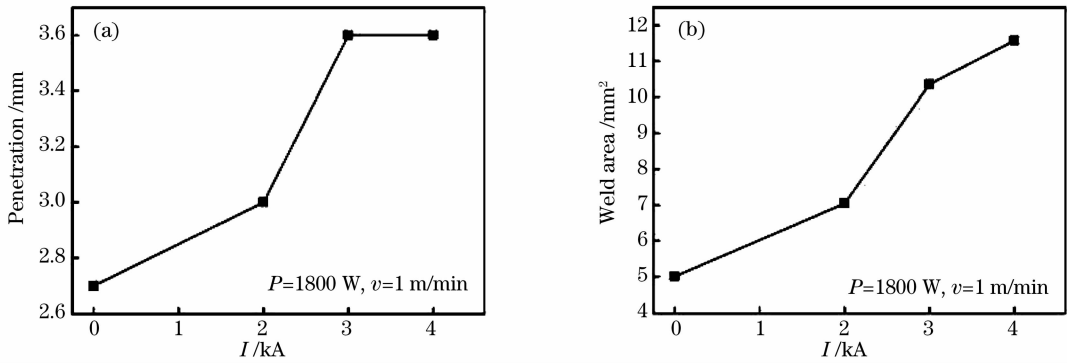


图4 (a)熔深和(b)焊缝面积与电流大小的关系

Fig.4 Relation of penetration (a), weld area (b) and current

激光-电阻复合焊接铝合金过程中,较大的电流流过工件,电阻热使工件温度升高,相当于对母材进行了预热作用,大大提高了铝合金对激光的吸收率;较大的电流进入焊接熔池后会对熔池提供额外的焦耳热,提高熔池的温度,有利于增加熔深和焊缝面积;由电磁场理论,电流流过导体时,会在导体中产生感应磁场,而感应磁场又会与导体中的电流相互作用产生磁场力,此磁场力将对液态焊接熔池进行搅拌作用,改变焊接熔池的流动状态。

3.2 焊缝气孔

气孔的存在对焊接接头的强度、密封性能和抗腐蚀能力均不利,严重影响构件的正常使用。采用X射线检测焊缝中的气孔缺陷,如图5所示。可以发现,铝合金激光焊接焊缝中存在一定数量的气孔,而复合焊接焊缝中的气孔在数量和尺寸上都明显减小。当电流为4 kA时,工件已经焊透,接头的X射线图片显示几乎无气孔存在。

激光-电阻复合焊接时,由于电阻热对工件的预热作用,使熔池与母材间温度梯度变小,熔池凝固冷

却速率变慢,有助于熔池中气孔的上浮。由于焊接的收焊坑可以近似地反映熔池的形状,由图6所示的不同条件下的焊缝末端收焊坑形状可以看出,复合焊接的熔池尺寸明显增大,拖尾变长,有利于匙孔的稳定和气孔的上浮逸出,从而使复合焊接接头中的气孔数量大幅度减少。

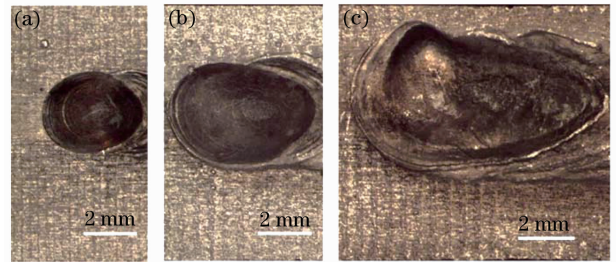


图6 焊缝末端弧坑。(a)激光焊接;

(b)复合焊接($I=2$ kA);(c)复合焊接($I=4$ kA)Fig.6 Crater of weld tail. (a) laser welding; (b) hybrid welding ($I=2$ kA); (c) hybrid welding ($I=4$ kA)

3.3 接头组织特征

在焊接接头上截取包括焊缝、热影响区和母材三个部分的金相试样,依次进行磨制、抛光和腐蚀后进行观察分析。图7(a)所示为电流值 $I=3$ kA的复合焊接接头,可以发现热影响区宽度较窄,与铝合金单独激光焊接接头类似。在熔合线附近,组织较为粗大且非常不均匀,可能会导致熔合区性能下降,成为接头的薄弱地带。图7(b)所示为母材组织, α 固溶体基体上弥散分布着 $\beta(\text{Al}_3\text{Mg}_5)$ 相质点,黑色块状是 Mg_2Si 相,灰色和浅灰色块状为 $\text{Al}_6(\text{Fe},\text{Mn})$ 相。热影响区的 β 相聚集长大在基体的晶界处,且有少量的 $\text{Al}_6(\text{Fe},\text{Mn})$ 相存在。焊缝区的 β 相比较均匀,细小弥散分布在基体上,呈典型铸造组织。这是由于焊接过程中的主要热源是激光,激光的能量密度集中,加热和冷却速度均较快,因此焊缝组织均匀细小。

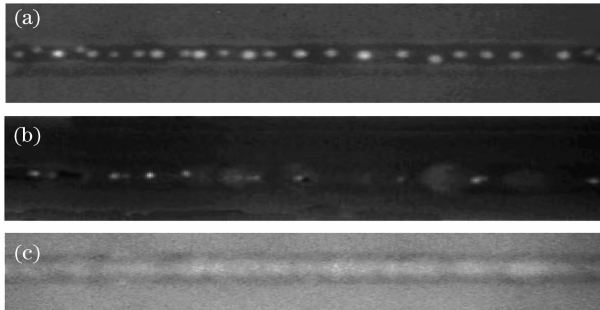


图5 焊接接头X射线图像。(a)激光焊接;

(b)复合焊接($I=2$ kA);(c)复合焊接($I=4$ kA)Fig.5 X-ray inspection images of welded joints. (a) laser welding; (b) hybrid welding ($I=2$ kA); (c) hybrid welding ($I=4$ kA)

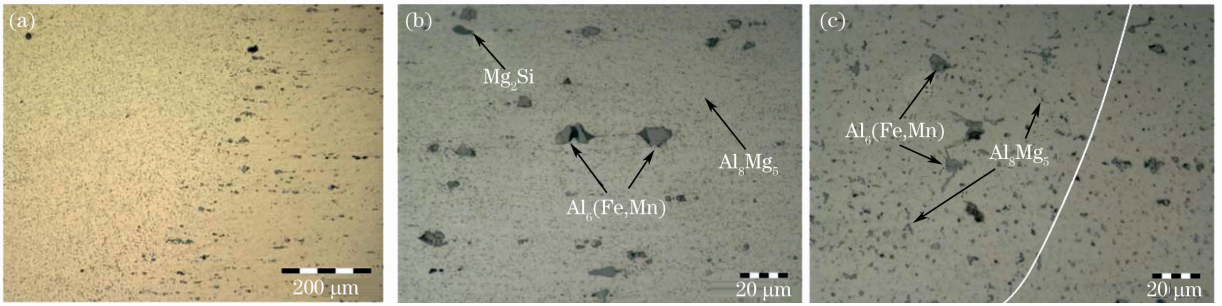


图 7 焊接接头微观组织。(a) 焊缝/热影响区/母材;(b) 母材;(c) 热影响区/母材

Fig. 7 Microstructure of welded joint. (a) weld/HAZ/base metal; (b) base metal; (c) HAZ/base metal

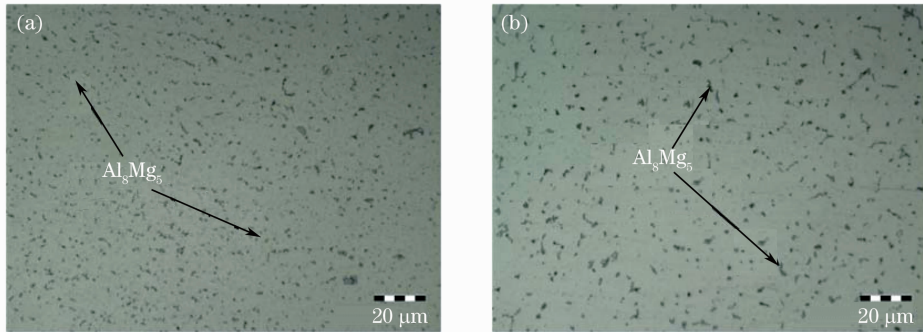


图 8 焊缝的微观组织(复合焊接)。(a) $I=3\text{ kA}$;(b) $I=4\text{ kA}$

Fig. 8 Microstructure of weld zone (hybrid welding). (a) $I=3\text{ kA}$; (b) $I=4\text{ kA}$

对比不同电流参数下焊缝中心的组织可以发现,随电流值的增大, β 相聚集长大。因为随着电流值的增加,焊接热输入增加,冷却速度变小,过冷度变小,从而使 β 相在焊缝凝固过程中析出时间变长,造成 β 相有所长大,如图 8 所示。

3.4 接头力学性能

借助 INSTRON-5569 万能拉伸试验机对完全熔透且成形较好的焊接接头进行拉伸试验。每个实验参数的结果取 3 个试样的平均值,如表 2 所示。表中 $\sigma_b, \sigma_{\text{base metal}}$ 分别为复合焊接接头和母材拉伸强度。图 9 所示为拉伸试样的断裂后的宏观形貌。

表 2 拉伸试验结果

Table 2 Results of tensile test

$P / \text{kW},$ I / kA	Average tensile strength σ_b / MPa	Fracture zone	$(\sigma_b / \sigma_{\text{base metal}}) / \%$
$P=1.8, I=3$	292	Weld	83.4
$P=1.8, I=4$	281	Weld	80.3
Base metal	350	Base metal	100

激光-电阻复合焊接头的抗拉强度最高可达到 292 MPa,约为母材强度的 83.4%,随复合焊接电流值的增加,抗拉强度相应有所减小。焊接接头断裂从焊缝一侧的热影响区附近开始,穿过焊缝中心,延展到焊缝背面另一侧的热影响区附近,断裂面与受力方向夹角约为 45° ,呈剪切型韧性断裂,如图 9 所

示。接头强度比母材强度低的主要原因是由于焊接过程中 Mg 元素的蒸发以及强化组织破坏变为铸态结构。而且随电流值的增加,热输入增加,使 Mg 元素的蒸发增加, β 相长大,因而接头的强度降低。



图 9 焊接接头拉伸试样的宏观断口形貌

Fig. 9 Tensile macro fracture appearance of welded joint

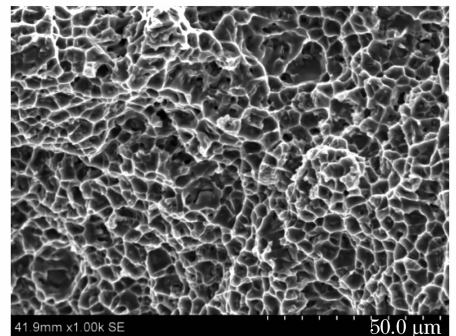


图 10 拉伸断口的扫描电镜形貌

Fig. 10 Tensile fracture surface of SEM

对焊接接头断口形貌进行 SEM 分析,如图 10 所示。可以发现,接头断口呈塑性断裂的形貌特征,断口存在大量的韧窝,韧窝周边形成的塑性变形突

起撕裂棱非常明显,由于焊缝组织为典型的铸造组织,因此韧窝的尺寸比较均匀。

4 结 论

激光-电阻复合焊接铝合金时,激光和电阻热源相互作用使接头的熔深和焊缝截面面积显著增加,实现了在小功率激光条件下铝合金熔透焊接,降低了焊接成本。复合焊接可以降低焊接熔池的凝固梯度,增大熔池面积,有利于熔池中气泡的上浮,与激光焊接相比,激光-电阻复合焊接接头中的气孔数量大幅下降。接头焊缝区的 $\beta(\text{Al}_3\text{Mg}_5)$ 强化相弥散分布,呈铸态组织特征,HAZ的 β 强化相聚集长大,且分布不均匀。复合焊接接头在焊缝断裂,呈剪切型韧性断裂,抗拉强度可达母材的83.4%。

参 考 文 献

- Xu Lianghong, Tian Zhiling, Peng Yun *et al.*. Microstructure and mechanical properties of high strength aluminum alloy laser welds [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3):456~461
许良红,田志凌,彭云等. 高强铝合金的激光焊接头组织及力学性能[J]. 中国激光, 2008, **35**(3):456~461
- Qi Junfeng, Niu Zhen, Zhang Dongyun *et al.*. Control of shaping of welds for CO₂ laser welding shipbuilding T-section aluminum alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2):297~302
祁俊峰,牛振,张冬云等. CO₂激光焊接船用铝合金T型材的焊缝成形控制[J]. 中国激光, 2008, **35**(2):297~302
- Li Liqun, Chen Yanbin, Tao Wang. Research on dual-beam welding characteristics of aluminum alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11):1783~1788
李俐群,陈彦宾,陶汪. 铝合金双光束焊接特性研究[J]. 中国激光, 2008, **35**(11):1783~1788
- A. S. Salminen, V. P. Kujanpaa. Effect of wire feed position on laser welding with filler wire [J]. *Journal of Laser Applications*, 2003, **15**(1):2~10
- J. Xie. Dual-beam laser welding [J]. *Welding J.*, 2002, **81**(9):223~230
- A. Haboudou, P. Peyre, A. B. Vannes. Reduction of porosity content generated during Nd:YAG laser welding of A356 and AA5083 aluminum alloys [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2003, **363**(1,2):40~52
- T. P. Diebold, C. E. Albright. "Laser-GTA" welding of aluminum alloy 5052 [J]. *Welding J.*, 1984, **63**(6):18~24
- T. Shida, M. Hirokawa, N. Fujikura *et al.*. Welding of aluminum alloys by using high power CO₂ laser in combination with MIG arc [C]. *6th International Conference on Welding and Melting by Electron and Laser Beam*, Toulon, France, 1998:339~406
- Chen Yanbin, Miao Yugang, Li Liqun *et al.*. Characteristics of laser-TIG double-side welding for aluminum alloys [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12):1716~1720
陈彦宾,苗玉刚,李俐群等. 铝合金激光-钨极氩弧双面焊的焊接特性[J]. 中国激光, 2007, **34**(12):1716~1720
- Li Yongqiang, Zhao Xihua, Zhao He *et al.*. Study on the effect of welding current during laser beam-resistance seam welding of aluminum alloy 5052 [J]. *China Welding*, 2008, **17**(2):42~46