

专题综述

铝合金激光焊接研究现状

哈尔滨工业大学(150001) 陈彦宾

佳木斯大学(154007) 曹丽杰

摘要 概述了铝合金激光焊接的难点,分析了铝合金激光焊接的质量问题。针对质量问题提出了解决措施,并论述了铝合金激光焊接在国内外的应用。

关键词: 铝合金 激光焊接

STATE OF THE STUDY OF LASER WELDING OF ALUMINIUM ALLOYS

Harbin Institute of Technology Chen Yanbin

Jiamusi college

Cao Lijie

Abstract This paper describes the difficulties of laser beam welding of aluminium alloys, and analyses the problems of the welding quality. Meanwhile, points out the improving measures of quality and the applications of laser beam welding aluminium alloys.

Key words: aluminium alloys, laser beam welding

0 前言

铝合金由于重量轻、无磁性、热导率和强度高、良好的成形性、低温性能、耐腐蚀性能,被广泛地应用于各种焊接结构和产品之中,采用铝合金代替钢板材料焊接,结构重量可减少50%以上。

与传统的TIG焊、MIG焊相比,激光焊接是一种功能多、适应性强、可靠性高的精密焊接方法。由于高的功率密度,焊接时热输入量低,在保证熔深的基础上,焊接热影响区小,焊接变形小,激光焊接不需要真空装置,因此激光焊接具有质量高、精度高、速度高的特点。

激光焊接根据熔深的不同分为热导焊(功率密度在 $10^5 \text{ W/cm}^2 \sim 10^6 \text{ W/cm}^2$ 之间)和深熔焊(功率密度在 $10^6 \text{ W/cm}^2 \sim 10^7 \text{ W/cm}^2$ 之间),热导焊时浅层金属主要靠表面吸收激光能量后向下的热传导而被加热至熔化,形成的焊缝近半圆型。这种焊接方法可焊接厚度在2.54 mm以下的材料。深熔焊时,由于材料瞬时熔化、汽化,在激光束中心形成匙孔,激光可以透过匙孔

通过金属蒸气而直接射入到孔底,称为匙孔效应。焊缝窄而深,深宽比可达12:1。

铝合金激光焊的难点在于铝合金对 CO_2 激光束(波长为 $10.6 \mu\text{m}$)极高的表面初始反射率(超过90%以上),对YAG激光束(波长 $1.06 \mu\text{m}$)反射率接近80%。由于反射率大、热导率高,在实际铝合金的激光焊接过程中,一定要保证良好的光束聚焦,同时,还要用高功率密度的高能激光进行照射。实验证明,深熔焊的临界功率密度为 $4.0 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 。铝合金激光焊焊缝还易产生气孔,对6000系列的铝-镁-硅合金,裂纹的敏感性较大,焊缝成形不良。这样,会造成焊缝的力学性能往往低于母材。

在我国由于受大功率激光器限制,激光焊接工艺研究较国外起步晚,关于铝合金激光焊的研究远远落后于发达国家。在国外,日本在这方面的研究比较成熟,人们研究的侧重点主要是铝合金激光焊接的熔化特性、气孔和裂纹的成因机理、焊接缺陷对力学性能的影响及激光焊接铝合金的等离子体现象等等。

1 影响铝合金对激光的吸收率的因素及提高吸收率的措施

材料对激光吸收率由公式 $\epsilon_{\lambda}(T) = 0.365 \{ \rho [1 + \beta (T - 20)] \lambda \}^{1/2}$ 决定。

式中 ρ ——铝合金 20℃ 的直流电阻率 $\Omega \cdot m$

β ——电阻温度系数 $^{\circ}C^{-1}$

T ——温度 $^{\circ}C$

λ ——激光束的波长 μm

对于铝合金来说,吸收率是温度的函数,当铝合金表面一旦熔化、汽化时,其对激光的吸收率迅速增大到 90% 以上,反射率下降。

为了提高铝合金对激光的吸收,可以改变材料表面状态,即对材料表面黑化(涂石墨)或阳极氧化处理。实验证明,对 3 mm 厚的 A6063 铝合金,当表面形成一层薄的氧化膜时,比 1 mm 厚的表面光洁的 A6063 铝合金对激光的吸收率显著增大^[2]。

光束经透镜聚焦后,其光斑尺寸由 $d = f \cdot \theta$ 决定。

式中 f ——光学透镜焦距 mm

θ ——光束发散角 $mrad$

因此,选用短焦距透镜和利用低阶模输出可使光斑尺寸减小,这样激光功率密度增大,铝合金对激光的吸收率也增大^[1]。

在铝合金表面人工制孔或采用光收集器形式接头,开 V 形坡口或采用拼焊(拼接间隙相当于人工制孔)方法,都可以增加铝合金对激光的吸收,获得较大的熔深。

2 铝合金激光焊接的气孔问题

铝合金激光焊接的气孔问题至今还未弄清楚^[3],一般认为激光焊接在冷却过程中氢的溶解度急剧下降形成氢气孔,低熔点高蒸汽压合金元素蒸发导致气孔;激光束引起熔池金属波动匙孔不稳定,熔池金属紊流导致气孔生成。

Maneharu Katsuna 和 Qu Yan 对 A3003、A6061、A6N01、A5052、A5182 进行 CO_2 激光焊接,利用气体光谱分析法对微孔中气体成分进行分析,发现气孔中气体成分为 90% 的 H_2 和 10% 的 N_2 ,微孔产生与氢在高温大量溶入有关;对于不规则气孔,借助 SEM 观察和孔内 EDX 分析,结果表明孔内壁镁的含量是焊缝附近的 4 倍,估计不规则大气孔与镁的蒸发烧损有关。

从另一方面,为弄清焊接过程中匙孔不稳定和气孔的关系,Akira Matsunawa 等人利用两台超高速扫描摄

像机观察脉冲 Nd:YAG 激光器点焊时匙孔与等离子体行为(脉冲持续时间 20 ms,最大脉冲能量 100 焦/脉),指出脉冲消失的一瞬间,匙孔将下塌,这样保护气体和金属蒸气被围困在匙孔底部,形成气孔。通过优化脉冲波形,增加尾脉冲的方式,进行熔池凝固过程热控制,使这一问题解决^[4]。优化的脉冲波形见图 1。

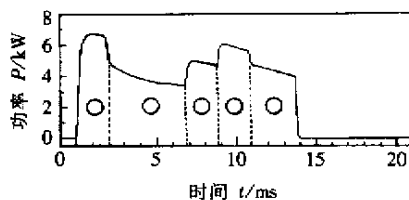


图 1 减少气孔优化脉冲波形

气孔的存在,会导致焊缝的力学性能下降,在文献[3]中,作者对 A5182 铝合金激光焊缝人为制孔,孔径为 1 mm 和 2 mm,孔间距 L 分别为 0.5 mm、1 mm 和 2 mm,然后对焊缝进行拉伸,利用微聚焦 X 射线图像检测系统观察焊缝的变形过程。拉伸时变形首先出现在孔附近,进而出现裂纹,然后断裂,拉伸强度和延伸率相对于无孔洞的焊缝有所下降,利用有限元(FEM)分析孔附近应力应变分布,当孔的间距为 0.5 mm 时,产生高度应变,孔之间的相互作用增强。产生的应力应变集中,随着孔间距增大而减小。

3 铝合金激光焊缝的裂纹

6000 系列 Al-Mg-Si 合金其裂纹敏感性大。Hiroto Yamaoka Mashiyo Yaki 利用 ITTech 公司生产的 ITL-C500 CO_2 激光器焊接 A6063 铝合金(用于压力容器),分别在填丝(A-4043-WY, A-4047-WY)和不填丝情况下对焊缝进行以氦气为载体的密闭气压试验,考查裂纹敏感性。填丝时,焊缝的泄漏率达到了标准要求(标准为 $1.3 \times 10^{-10} Pa \cdot m^3/s$),不填丝时,其泄漏率为 $9.31 \times 10^{-10} Pa \cdot m^3/s$ 。因此可以认为调整焊缝金属成分,添加 Si 对减少裂纹有一定好处^[5]。

铝合金激光焊产生的结晶裂纹是由于焊缝金属结晶时在柱状晶边界形成 Al-Si 或 Mg-Si、Al-Mg₂Si 等低熔点共晶导致的^[6]。

除采用填丝外,在脉冲点焊时,调节脉冲波形,控制热输入,同样可以减少结晶裂纹,优化脉冲的波形见图 2。

采用此波形,使焊缝熔化凝固重复进行,以降低熔池凝固时的凝固速度,即在凝固过程中增加适当热循

环,减少固液共存区。

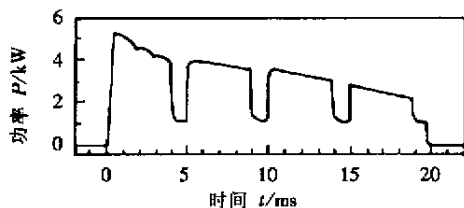


图2 减少结晶裂纹的优化脉冲波形

4 铝合金激光焊接合金元素镁的烧损

铝合金中合金元素 Mg、Zn 等强化元素在激光焊接时,由于这些低熔点合金元素烧损,严重影响焊缝强度。Mg 的沸点为 1 380 K,比 Al 的 2 727 K 低,Mg 首先蒸发烧损。相同工艺条件下,合金种类不同则 Mg 的损失程度不同,A5083 比 A5052 合金镁的烧损严重,利用 EPMA 分析,A5083 焊缝上部合金元素 Mg 的烧损较下部严重,焊缝中心比热影响区附近 Mg 的烧损严重。传导模式的焊缝 Mg 的烧损比匙孔模式焊缝 Mg 的烧损严重^[6]。

对 A5754-0 和 A6111-T4 合金进行焊缝断面努氏硬度测试,A5754-0 焊缝硬度为 HK 68,低于母材的 HK 73;A6111-T4 合金焊缝硬度为 HK 69,低于母材的 HK 82。由此可见,相同工艺条件下,6000 系列合金焊缝硬度下降比 5000 系列合金硬度下降的多。

采用连续波 Nd:YAG 激光焊接 A5182,由于 Mg 的损失,焊缝的屈服强度明显下降了 22%~25%。由于焊接速度的选择使之成为匙孔模式焊缝,在传导模式焊缝 Mg 的损失时少。

另外,采用 CO₂ 激光器焊接 A5083、A5052、A5182、A6061、A7N01,发现在焊缝表面和热影响区沉积黑色物质,对这些物质分析发现在热导型焊缝中 Mg 含量高达 90%,是 Al 含量的 1.4 倍,这是由于 Mg 的沸点和蒸发热比 Al 的一半还低的缘故^[7]。

5 铝合金激光焊的等离子体

5.1 等离子体产生

激光束照射到工件上时,工件迅速蒸发形成光束腔而产生匙孔。由于激光在孔中多次反射,激光的能量吸收率提高,铝合金中低熔点合金元素,如 Mg、Zn 等蒸发,产生更多的金属蒸汽,这样光束腔中的金属蒸汽或熔化金属释放出许多电子,电子吸收激光能量,并不

断积聚,以高速从腔内向腔外喷出。由于蒸发电离作用产生冲击波,冲击波向腔外冲出。由于冲击波的压缩作用,电离程度提高,光束腔中所有粒子变为等离子体。等离子体从光束腔中以高速喷射出来,频率为 100 Hz。保护气体在激光的作用下也可电离为等离子体。

5.2 等离子体对焊接过程的影响

等离子体吸收激光能量,改变光束聚焦形态,使激光束发生折射、偏转,激光束偏转角度取决于等离子体的电子密度和长度,等离子体使焊缝深宽比减少。等离子体由匙孔中向外喷射时,排斥周围液体,使光束到达匙孔内,这样又会使熔深增大,对于每一次等离子体的冲击,都会产生冲击波或尖峰,尖峰频率由焊接速度决定^[8]。

5.3 铝镁合金激光焊等离子体成分分析

在文献[9]中,作者 Dong-Do Kim 和 Akira Alatsunawa 利用脉冲 Nd:YAG 激光分别在空气和氩气中焊接 Al-Mg 合金,对等离子体进行了波谱分析。同时在假定局部热平衡条件下,利用谱线相对强度的波尔兹方法,测定了等离子体温度和电子数浓度。等离子谱线为 Al、Mg、Cr、Mn、Cu、Fe、Zn 的原子谱线和单一的 Mg 离子谱线以及分子 AlO、MgO 和 AlH 的分子谱线。氩保护时,没有 AlO、MgO 谱线。低功率密度下,MgO 谱线较强,高功率时,则 AlO 谱线强。在空气中,当光束能量密度为 $1.0 \times 10^{10} \text{ W/m}^2$ 时,测得的等离子体温度为 $3280 \text{ K} \pm 150 \text{ K}$,电子数密度为 $1.85 \times 10^{19} \text{ 1/m}^3$,即激光诱导 Al-Mg 合金等离子体是温度低且非常弱的等离子体,其温度比铝的沸点稍高^[9]。

6 铝合金激光焊如何获得深熔焊

利用输出功率为 5.5 kW 的 CO₂ 激光器,焦距为 254 mm 的抛物镜聚焦焊接 A5052、A5083、A5182、A6061、A7N01 合金^[7]。当激光器功率为 3 kW~5 kW 时,对易熔合金如 A5083、A5182、A7N01,都能获得较大熔深。另一方面对 A5052、A6061 难熔合金,则需要更高的输出功率才能获得大的熔深。深熔焊的获得与铝合金中合金元素的沸点、蒸汽压及蒸发热有关。离焦量在 -1 mm 时,几种合金都能获得足够熔深,当离焦量在正负方向绝对值增大时,熔深变浅,但负的离焦量比正的离焦量能获得更大熔深。焊速增加,焊缝变为热导型焊缝且焊缝表面观察到未焊透现象。

由保护气压力公式

$$P = \frac{1}{2} \rho v^2 \propto \frac{\rho r_s^2}{d^4}$$

式中 ρ ——气体密度
 v ——气体流速
 r_g ——气体流率
 d ——喷嘴直径

当喷嘴直径减小,气体流率增加时,气体压力增加,这时熔深将增大。高速焊时使用氦气做保护气体比使用氩气获得的熔深小,其原因是,氦气与氩气相比,重量轻、气压低,对凹陷熔池的作用小;氦的热传导系数大,对熔池的冷却作用大,氦的离子化能量高,等离子体温度低,难于对熔池表面加热。但当采用高功率激光器(20 kW ~ 30 kW)进行低速焊时,用氦气又可获得深熔焊。氦为保护气时,即使焊速很高,也能获得深熔焊,但焊缝表面易产生未焊透,焊缝成形不良^[8]。

利用 YAG 激光与 TIG 电弧(直流或交流)并用,可以在小输出激光下获得与大输出激光同等的熔深^[3]。利用 CO₂ 激光与 MIG 电弧复合热源焊接 A5083、A6061 合金时,首先用 MIG 电弧将铝合金表面熔化,然后用 10 kW CO₂ 激光束照射到液态铝合金表面。从提高铝合金对激光的吸收率及增大熔深的角度来说,这种复合热源的焊接方法是非常有发展前途的^[10]。

7 铝合金激光焊缝组织及热影响区软化

铝合金激光焊缝组织,由于激光焊缝快速凝固为等轴晶居多,有时也有柱状晶^[6]。对 A6061 和 A7N01 合金在 Ar 和 He 及 Ar-He 保护下焊接,焊缝的微观组织随焊速的增加,等轴晶逐渐增多,采用氮气保护时,对焊缝断面进行 SEM 分析、EPMA 分析及焊缝表面 X 射线分析,焊缝内富 N,有 AlN 生成,且 AlN 相是膜状,不是针状^[10]。

采用激光焊接铝合金,热影响区同样也存在软化问题。用 2.5 kW 的 CO₂ 激光器焊接 1 mm 厚的 A6061-T6 当表面坡口抛光时,气孔比率小于 20%。同 TIG 焊缝相比,激光焊缝软化区窄,利用 Kinetic 等式,计算热影响区硬度分布和软化区宽度。焊接能量密度高、焊速高,则软化区窄。对激光焊缝在 448 K 温度下,人工时效时间为 28.8 ks,则软化全部消失。而采用 TIG 焊接铝合金,在相同条件下人工时效,软化区只能部分恢复^[5]。

8 结束语

从以上分析可以看出,铝合金激光焊接的吸收率问题和质量问题还是可以克服和解决的,激光焊接不

仅工艺简单,而且焊速快、效率高,易于实现计算机控制。近年来,随着千瓦级激光器开发的进步,伴随着高输出化的实现,铝合金激光焊接正逐渐被人们所瞩目。在应用方面,日本的 CO₂ 激光焊接 A6063 铝合金已在巨大同步加速器幅射装置中得到应用^[9]。此外,铝合金激光焊在建材、装璜材料中已获得应用,随着研究的深入,铝合金激光焊接的工艺参数将得到进一步优化,其应用领域也将逐步扩大。

参 考 文 献

- 1 许国良. LF4, LF11, LF21, LY12 铝合金激光焊接研究. 应用激光, 1999(10)
- 2 许国良. CO₂ 激光焊接铝合金工艺研究. 中国激光, 2000, A27(2)
- 3 M Kotsuna, QuYan. Study on porosity formation in laser welds in aluminium alloys (Report 1): effects of hydrogen and alloying elements. Welding International, 1998, 12(12)
- 4 Akira Matsunawa, Jong-Do KIM. Reduction of porosity and hot cracking by pulse shaping in laser spot welding of aluminium alloys. IIW Doc-681-97.
- 5 Hirto Yamaka, Masahiro Yuki. CO₂ laser welding of aluminium A6063 alloys. 轻金属溶接, 1991, 29(11)
- 6 杉本 光央. Laser welding for aluminium alloy. 溶接技术, 1999(12)
- 7 S Katayama, A Matsunawa, K Kojima. CO₂ laser weldability of aluminium alloy (Report 1): effect of welding conditions on melting characteristics. Welding International, 1998, 12(7)
- 8 Mono, Knakada, S Kosuge. Effect of ambient pressure and gas on penetration depth and laser-induced plasma behaviour - Study on CO₂ laser welding phenomena. Welding International, 1993, 7(1): 15~20
- 9 Dong-Do Kim, Akira Matsunawa. Plasma analysis in laser welding of aluminium alloys. IIW Doc IV-96-662.
- 10 Tomohi Keoshida, Masatoshi Hirokawa, Shoichi Sato. CO₂ laser welding of aluminum alloys (No. 1) - Welding of aluminium alloys using CO₂ laser beam in combination with MIG Arc. Quarterly Journal of Japan Welding Society, 1997, 15(1)

(收稿日期 2000 11 15)

作者简介: 陈彦宾, 1962 年生, 硕士, 副教授。