

文章编号: 1001-3806(2003)02-0103-03

铝合金 2007 的激光焊接

王海林 黄维玲 周卓尤 曹红兵

(华中科技大学激光技术国家重点实验室, 武汉, 430074)

摘要: 研究了采用高功率 Nd:YAG 连续激光器焊接铝合金 2007 的方法和工艺参数。通过观察焊缝截面, 发现存在气孔和热裂纹。工艺实验表明, 采用填充焊丝 AlSi12 激光焊接可有效抑制热裂纹的产生。

关键词: 激光焊接; 铝合金; 气孔; 热裂纹

中图分类号: TG456.7 文献标识码: A

Laser welding of aluminum alloy 2007

Wang Hailin, Huang Weiling, Zhou Zhuoyou, Cao Hongbing

(National Laboratory of Laser Technology, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract: The processing parameters of laser welding of aluminum alloy 2007 with high power Nd:YAG CW laser are studied. Pores and hot cracks are found in the welding seam. The experiments show that laser welding with filler wire AlSi12 can minimize hot crack due to the smallest amount of heat input into the base material.

Key words: laser welding; aluminum alloy; porosity; hot crack

引 言

铝合金由于重量轻、无磁性、热导率和强度高、机械加工性能好等优点, 被广泛应用于飞机、汽车、船舶等领域。近年来, 随着大功率、高性能激光加工设备的出现, 铝合金激光焊接技术发展很快。与传统的 TIG, MIG 焊接相比, 激光焊接具有聚焦光斑功率密度高、热输入量低、焊缝窄、热影响区小、焊接变形小、速度快、熔深大等优点。

铝合金对激光束有很高的初始反射率, 对波长为 $10.6\mu\text{m}$ 的 CO_2 激光束的反射率大于 90%, 对波长 $1.06\mu\text{m}$ 的 Nd:YAG 激光束的反射率在 80% 左右; 另外, 铝合金热传导性能良好, 其热导率约为中碳钢的 3 倍。因此, 激光焊接铝合金有一定的难度。以前, 由于受 Nd:YAG 激光输出功率限制, 焊接铝合金主要采用 CO_2 激光器^[1~3]。

近几年, 随着高功率 Nd:YAG 激光器的发展, Nd:YAG 激光器越来越多地用来焊接铝合金。与 CO_2 激光相比, Nd:YAG 激光的优点主要有: (1) 波长短, 比 CO_2 激光波长小一个数量级, 因此金属材料对 Nd:YAG 激光反射率低, 易被材料吸收; (2)

Nd:YAG 激光束通过光纤传输, 可方便地将光束传输到远距离工位, 若利用计算机和机械手, 可实现焊接过程自动化^[4]。使用高功率 Nd:YAG 连续固体激光器对铝合金 2007 进行了焊接实验, 并对焊接结果进行了分析。

1 实验方法

1.1 焊接材料

铝合金 2007 (AlCuMgPb) 是一种铜铝合金, 铜作为硬化元素, 同时, 含有少量的镁以增加强度。2007 具有很高的强度和很低的延展性, 而且重量轻, 因此, 在航空航天领域得到广泛应用。其化学成分见表 1。

Table 1 Chemical components of aluminum alloy 2007/%

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Pb
0.8	0.8	3.3~	0.5~	0.4~	0.1	0.8	0.2	0.8~
		4.6	1.0	1.8				1.5

由于铝合金 2007 中含有较多的铜, 焊接性能较差。用常规的 TIG, MIG 方法焊接热量输入高, 热影响区宽, 在焊接过程中会产生大量热裂纹, 尤其是焊缝中心贯穿裂纹, 故在焊接手册中, 将其列为不可焊或不适合焊接材料。

焊接接头如图 1 所示, 两工件用机械夹具固定。焊前用丙酮清洗焊接部位。实验完毕后, 沿垂直于

作者简介: 王海林, 男, 1971 年 10 月出生。博士研究生。现主要从事固体激光器件及其应用的研究。

收稿日期: 2002-05-17

焊缝方向切割焊接工件,抛光后用金相显微镜观察焊缝质量。

1.2 实验装置

实验所用激光器为德国 HAAS 公司的一台最大输出功率为 6000W 的 Nd:YAG 连续激光器,激光束通过一根芯径 $D = 0.6\text{mm}$ 的光纤传输。激光束从光纤出射后,经焦距 $f_1 = 200\text{mm}$ 的透镜准直,再由焦距 $f_2 = 200\text{mm}$ 透镜会聚后垂直入射到焊接部位。由:

$$d = f_2 D / f_1 \quad (1)$$

可算出聚焦光斑直径为 0.6mm 。焊接运动轨迹由一台意大利的高精度 6 轴 Tricept 机器人手实现。

使用填充焊丝,调整焊缝金属成分,可有效抑制热裂纹的产生^[5~7],因此,在焊接过程中采用 AlSi12 作为填充焊丝,直径为 1mm 。焊丝经校直机构校直后,由送丝机构将焊丝送到工件焊接部位。激光深熔焊时不可避免地会产生光致等离子体,等离子体对激光束的吸收和散射将显著降低加工效率,因此,采用侧吹保护气体的方式抑制在焊接过程中形成等离子体,并保护焊缝。保护气体喷嘴与送丝机构的送丝嘴在焊接方向上相对布置,激光束、填充焊丝和焊接保护气体送入方向汇聚于焊接部位。焊丝送入方向与焊接方向相反且与水平成 45° ,保护气体送入方向与焊接方向相同且与水平成 30° ,如图 2 所示。保护气体为氩气,其压力为 0.3Mpa 。

在激光深熔焊过程中会产生大量金属蒸气及飞溅物,这些金属蒸气及飞溅物吸附在焊接镜头上,会污染透镜,从而造成透镜因吸收过多激光功率而炸裂。为保护焊接镜头,在焊接头侧下方放置一长条狭缝,缝宽为 1mm ,长 20mm ,如图 2 所示,高压空气从狭缝中高速喷出,将焊接过程中产生的金属蒸气和飞溅物吹走,高压空气压力为 $0.4\text{Mpa} \sim 0.6\text{Mpa}$ 。

2 焊接工艺参数

激光深熔焊的能量转换机制是通过“小孔”来完成的。在足够高功率密度的激光束照射下,材料开始蒸发,并沿工件厚度方向形成狭长小孔,小孔像一

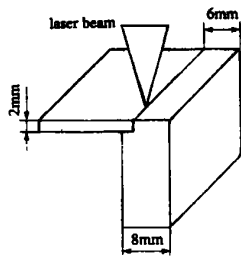


Fig. 1 Welding geometry

个黑体,几乎全部吸收入射激光并使孔腔周围的金属熔化,熔融金属的表面张力与小孔内连续产生的蒸气压力保持着动态平衡。当激光束移动时,小孔和四周熔融金属随着激光束一同移动,熔融金属填充着小孔移动后留下的空隙,冷却凝固形成焊缝。

在已知被焊材料及其厚度、接头方式、聚焦光斑直径、保护气体种类及流量的条件下,影响焊接质量的参数主要是激光功率、焦点位置、焊接速度和填充焊丝的送给速度。

2.1 激光功率

激光功率是决定焊缝熔深的主要因素。在常温状态,铝合金对 $1.06\mu\text{m}$ 波长的 Nd:YAG 的吸收率较低,约为 20% ,而在熔化状态时吸收率却很高,因此,存在一个阈值功率密度 ($10^6\text{W}/\text{cm}^2$),在激光功率密度未达到阈值时,仅在工件表面形成一道冲击痕迹。当激光功率密度达到或超过阈值时,铝合金的高反表面被破坏,对激光束的吸收率迅速升高,形成激光深熔焊。

在聚焦光斑直径一定的情况下,激光功率密度与激光功率成正比。激光功率越高,熔深越大,焊接速度越快。但过大的激光功率会使熔池严重过热,焊缝增宽,热影响区扩大,易产生热裂纹,同时,还会使焊接过程中飞溅增多,易污染焊接镜头。因此,在保证焊接熔深的前提下,激光功率不宜过大。经过实验,确定激光功率为 3500W 。

2.2 焦点位置

激光深熔焊时,为了保证工件表面有足够的功率密度,将材料蒸发并形成小孔,聚焦光斑的焦点位置很重要。当焦点位于工件表面上时,熔深较浅,不宜作深熔焊。当焦点位于工件表面以下时,工件内部功率密度比表面还高,易形成更强的熔化、汽化,使光能向工件更深处传递,形成较大熔深。

铝合金高反表面的破坏与功率密度有关,对光斑焦点位置很敏感,焦点位置不合适,则很难实现深熔焊。因被焊工件的厚度仅 2mm ,熔深不大,故在焊接过程中把焦点放在工件表面上,即离焦量为 0,这样使得工件表面功率密度最高,用较低的激光功率就可破坏铝合金 2007 的高反表面,形成深熔焊。

2.3 焊接速度

在其它参数保持不变的情况下,熔深随焊接速度的增加而减小。随着焊接速度的增加,焊接效率提高,但速度过快会使熔深达不到焊接要求;速度过慢又会导致材料过度熔化,焊缝增宽,热影响区过热,热裂纹倾向增大。通过实验,最后选取焊接速度

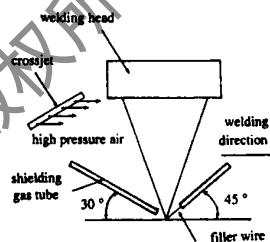


Fig. 2 Arrangement of welding head

为 4m/min。

2.4 送丝速度

铝合金中含有 Mn, Zn 等低沸点元素, 在焊接过程中低沸点元素的蒸发很剧烈, 这些元素的过度烧损, 将导致焊缝表面下凹, 使用填充焊丝可防止焊缝下凹。填充焊丝的送丝速度对焊缝质量有较大影响, 过大的送丝速度将导致焊缝余高过大, 影响焊接熔深, 而送丝速度太小则会产生不规则的焊缝成形。通过焊接实验确定送丝速度为 2.5m/min。另外, 焊丝末端相对激光焦点位置的偏移量不能太大, 应控制在 0.5mm 内, 否则焊丝将不能完全熔化, 造成焊缝不连续。

3 实验结果

焊接结束后, 在显微镜下观察焊缝表面, 未发现中心贯穿裂纹。图 3 是激光焊接铝合金 2007 的焊缝截面图, 由图可知, 焊缝宽度及熔深达到焊接要求, 焊缝中存在气孔, 这就会导致焊缝的力学性能下降, 如拉伸强度和致密性下降。



Fig. 3 Cross section of weld seam
 $P = 3500\text{W}$, $v_{\text{weld}} = 4\text{m/min}$,
 $v_{\text{filler}} = 2.5\text{m/min}$, $\text{defocus} = 0$

气孔产生的机理较为复杂, 主要为氢气孔。在熔融状态的铝合金中, 氢的溶解度很高, 熔池中吸收了大量氢气, 随着焊缝的冷却, 氢的溶解度迅速下降, 多余的氢气从熔融金属中逸出, 形成气泡。一部分气泡在焊缝凝固前上升到熔池表面, 从而释放到空气中, 而部分气泡未能在焊缝凝固前上升到熔池表面, 最终形成气孔。

(上接第 102 页)

通过三级激光放大器后, 激光输出能量达到 2.097J/pulse, 三级激光放大器的总泵浦能量为 135J/pulse。当基波能量为 2.1J/pulse 时, 通过 KTP 晶体倍频后, 滤除剩余基波, 532nm 激光输出能量为 1.015J/pulse, 倍频效率约为 48%。图 4 是二次谐波输出能量与基波入射能量的关系, 图 5 是倍频激光的脉冲波形, 脉冲宽度为 6~9ns。

3 结论

对脉冲闪光灯泵浦的 Nd:YAG 倍频激光器进行了研究, 采用 KTP 倍频晶体获得 532nm 激光输出能量大于 1J, 脉冲重复频率 1Hz, 脉冲宽度约 6ns

氢气的来源主要有: (1) 母材与填充焊丝中含有氢; (2) 焊接部位有油或油脂; (3) 周围空气中温度较大, 或保护气体不纯。

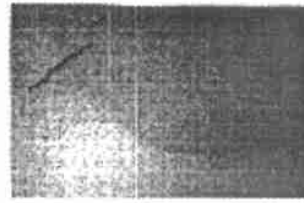


Fig. 4 Hot cracks in heat affected zone (HAZ) 60°

另外, 在金相显微镜下观察焊缝情况, 发现在热影响区内存在热裂纹, 如图 4 所示。由于采用高功率密度的激光焊接, 同时添加 AlSi12 填充焊丝, 而且焊接速度快, 使得注入到母材中的热量较小, 热影响区窄, 焊缝的抗裂性能明显要比 TIG, MIG 焊接要好。

4 结论

实验表明, 用高功率连续 Nd:YAG 激光添加填充焊丝焊接铝合金 2007 不仅工艺简单, 而且焊接速度快、效率高, 焊接热裂纹受到抑制。但由于不能完全避免热裂纹的产生, 以及还存在气孔, 因此, 激光焊接铝合金 2007 只能应用于气密性要求低、密封压力不高、拉伸强度较低的情况。

参考文献

- [1] 许国良. 中国激光, 2000, A27(2): 183~186.
- [2] Katayama S, Matsunawa A. J Light Metal & Construction, 1991, 29(8): 8~10.
- [3] 王希靖. 甘肃工业大学学报, 1994, 20(1): 18~23.
- [4] 关振中. 激光加工工艺手册. 北京: 中国计量出版社, 1998: 9~11.
- [5] Yamake H, Yuki M. 轻金属焊接, 1991, 29(11): 45~49.
- [6] 李晓梅. 南京航空航天大学学报, 1996, 28(2): 285~288.
- [7] 梅汉华, 肖诗荣. 北京工业大学学报, 1996, 22(3): 39~42.

~9ns, 倍频效率约为 48%。

感谢山东中晶光电子公司、福建 CASTECH 公司、北京士威奇电子技术研究所、中国计量科学院和本所有关部门对本工作的大力支持。

参考文献

- [1] Kogan R M, Crow T G. Appl Opt, 1978, 17(6): 927~930.
- [2] Tei K, Kato M, Matsuoka F. Appl Opt, 1999, 38(21): 4548~4551.
- [3] 姚建铨. 非线性光学频率变换及激光调谐技术. 北京: 科学出版社, 1995.
- [4] 何学东, 张世文, 闫连山 et al. 激光与红外, 1996, 26(10): 25~29.
- [5] Yariv A. Quantum electronics. 2nd, New York: John Wiley & Sons, Inc, 1975.