

# 铝合金的激光焊接

骆 红 胡伦骥 黄树槐 刘建华 胡席远  
(华中理工大学材料科学与工程系, 武汉, 430074)

摘要: 综述了铝合金激光焊接中存在的诸如小孔的诱导和稳定, 焊缝与母材的等强性、气孔等问题, 指出了几种解决上述难题以获得良好焊接质量的方法。

关键词: 铝合金 激光焊接

## Laser welding of aluminum alloys

Luo Hong, Hu Lunji, Huang Shuhuai, Liu Jianghua, Hu Xiyuan  
(Department of Materials Science & Engineering, HUST, Wuhan, 430074)

**Abstract:** The aluminum alloy is a wide used materials, especially in industrial products. But in laser welding, the many problem exist, such as inducing and stabilizing of keyholes, equivalent strength between base and welding seam, porosity et al. Based on the analysis on these problems, this paper points out the solutions to overcome these problems. The gas flow of gas shield welding should hold the situation of level flow at the pressure of 58.6Pa~ 78.0Pa, and the technique of wire fillet welding should be employed.

**Key words:** aluminum alloys laser welding

## 引 言

铝合金重量轻、韧性好,有一定强度,在工业生产特别是在汽车和航天工业一些复杂结构中的应用日益广泛。铝是较为活泼的金属,铝及其合金导热性很高,表面极易形成难熔性质的氧化膜,使用普通的焊接方法在焊缝中容易形成未熔合、夹杂、气孔、结晶裂纹等缺陷。与钨极氩弧焊或熔化极氩弧焊相比,激光焊铝的速度快、焊缝窄、热应变小,搭接接缝减少,可大大降低重量。因此,很多科学工作者开始探讨对铝合金进行激光焊接的可能性。

### 一、激光焊铝合金的焊接性研究

铝合金激光焊接中存在的问题主要有:

#### 1. “小孔”的诱导和稳定

在激光焊接过程中小孔的出现可大大提高材料对激光的吸收率,焊件可获得更多的能量耦合,这是获得良好焊接质量的前提条件。

在铝合金的激光焊接中首要的问题是“小孔”的诱导和维持稳定的困难,这是由于铝合金的材料特性和激光束的光学特性造成的。

$\text{CO}_2$  激光波长为  $10.6\mu\text{m}$ , 因此激光束中能量是由  $E = hc/\lambda \approx 0.1\text{eV}$  的光子携带的,光子的能量很低,使激光束易受外界因素的偏析。而固态情况下铝合金内部自由电子的密度很高,易与光束中的光子作用而将能量反射掉,这就使得铝合金成为对激光的反射率最高的金属之

一。另一方面铝的导热性能好,被吸收的能量容易散失。因此,要想诱导出小孔就需要更高的能量密度阈值。

在不同铝合金的激光焊接中都发现存在一个激光能量密度阈值,低于此值,熔深很浅,而一旦达到或超过此值,熔深会大幅度提高<sup>[1]</sup>。

文献[2]指出,当工件上激光功率密度达到 $3.5 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ (对应于激光功率 $P=3.8 \text{ kW}$ )时,等离子体才会产生,这标志着深熔焊的进行。如果激光功率低于此阈值,工件仅发生表面熔化,也即焊接以热传导型进行。而在过渡区( $P=3.3 \text{ kW} \sim 3.8 \text{ kW}$ ),深熔焊和传热焊交替进行,导致熔深波动很大。

(1) 经研究表明,功率密度阈值与焊接速度关系不大<sup>[1]</sup>。焊速从 $3 \text{ m/min}$ 到 $7 \text{ m/min}$ 变化中,所需功率密度阈值无明显变化。因此降低焊速对诱导小孔产生无甚效果,反而会带来副作用,如合金元素烧损严重而引起接头强度下降。

(2) 阈值与合金的平均热导率关系存在不相一致的现象<sup>[1]</sup>。研究表明,Al+Mg合金热导率低,其相应的阈值也低。Al+Mg-Si-1的热导率大于Al+Zn合金,其阈值也高于Al+Zn合金的阈值。同样Al+Mg-Si-1的热导率大于Al+Mg-Si-2,其阈值也相应地高些。但Al+Zn合金的热导率比I.P. Al(工业纯铝)和Al+Mg-Si-2的热导率大,其阈值却低不少。这就说明小孔的产生与铝合金的热导率有一定的关系,但不是决定因素。

(3) 诱导小孔所需阈值的高低主要和铝合金中某些合金元素(如Mg, Zn等)含量成反比。如图1所示。合金元素含量越高,其阈值越低,这是因为:a. 合金元素Mg, Zn的沸点大大低于铝的沸点。例如Mg的沸点为 $1090^\circ\text{C}$ , Zn的沸点低于 $1000^\circ\text{C}$ ,而Al的沸点则为 $2467^\circ\text{C}$ 。合金元素的大量蒸发产生的蒸气压有利于小孔的产生。b. 有些合金元素如Li的加入使得铝合金易焊<sup>[3]</sup>,如Al+Li合金6061比其它铝合金要好焊些。一方面由于锂的沸点低,易于大量蒸发,另一方面Li原子重量轻,运动速度更快,导致其等离子体蒸气压提高,更有利于小孔的产生。

(4) 有研究表明<sup>[4]</sup>,在相同条件下,在激光焊接铝合金时使用 $\text{N}_2$ 气时可较容易地诱导出小孔,而使用He气则不能诱导出小孔,并作了如下分析:a.  $\text{N}_2$ 和Al之间可发生放热反应。b. 由上述反应而生成的Al+N-O三元化合物,对激光能量的吸收率要高些。c. 在高性能密度激光作用下,He,  $\text{N}_2$ 可能电离,由于He质量低,运动速度快,易与等离子体中的电子复合,而起到“冷却”等离子体的作用,使等离子体难以维持。

综上所述,由于铝合金材料自身性质的影响,加上激光的光学特性,使获得小孔所需能量密度更高,而能量密度阈值的高低本质上主要受其合金成分的控制。另外还受到保护气体种类的影响。

另一方面,尽管Al合金中的合金元如Mg, Zn, Li由于其沸点低,易于蒸发,蒸气压大,对诱导小孔的产生起到促进作用,但是由于其电离能低,如: $E_{\text{Fe}}=7.83 \text{ eV}$ ,  $E_{\text{Al}}=5.96 \text{ eV}$ ,  $E_{\text{Mg}}=7.61 \text{ eV}$ ,  $E_{\text{Li}}=6.94 \text{ eV}$ ,因此,铝合金激光焊时,金属蒸气就易于电离,使等离子体中的电子密度大大提高,而如前所述,激光能量的载体光子能量小,易与电子相互作用,导致等离子体本身

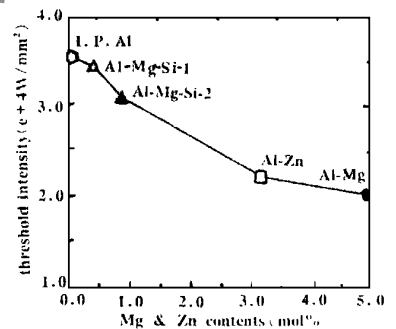


Fig. 1 Threshold intensity vs. Mg & Zn contents

吸收过多的激光能量,也即等离子体“过热”,使小孔不能维持连续地存在。可见,正是由于铝合金的材料特性和激光束的光学特性,使得小孔的诱导和稳定性成为铝合金激光焊接的特有困难。

## 2. 焊缝的机械性能

铝合金的强化机制一般有合金元素的固溶强化和时效沉淀强化两种。无论是固溶还是沉淀强化,由于合金元素 Mg 在激光焊接过程中的大量蒸发,必然导致焊缝硬度和强度的下降。另外,在焊接的熔化过程中,强化组织遭到完全的破坏,而变成了铸态结构,这也会使其硬度、强度下降<sup>[5]</sup>。如图 2 所示。

另外,由于焊缝中气孔的存在,也会降低焊缝的抗拉强度。总之,铝合金激光焊接焊缝强度下降难以与母材匹配,即焊缝与母材的等强性问题是铝合金激光焊接中存在的又一个难题。

## 3. 气孔

在铝合金的激光焊接过程中存在两类气孔:氢气孔和由于小孔的破灭而产生的气孔。

(1) 氢气孔 铝合金表面的氧化膜容易吸附环境中的湿气,而氢在液态铝中的溶解度约为其在固态铝中溶解度的 20 倍。当焊接过程中熔化冷却时,氢就析出,在向上逸出过程中会形成氢气,激光焊接的冷却速度比常规的焊接方法快得多,因此氢气来不及逸出而形成气孔的可能性大大增加。这类气孔一般形状规则,尺寸大于树枝晶尺寸,在其内表面可见有树枝晶结晶凝固花样<sup>[6]</sup>。

(2) 由于“小孔”塌陷而形成的孔洞 主要是由于小孔中的动力学因素,如果表面张力大于蒸气压力,小孔将不能维持稳定而塌陷,液态金属来不及填充就造成孔洞,形态一般不规则。

总之,由于激光焊接的冷却速度太快,使得氢气孔问题更加严重,而且在激光焊接中还多了一类由于小孔的塌陷而产生的孔洞。

## 4. 焊缝组织和成分的变化

熔合区的显微组织比母材要细小得多,这主要是因为激光束是高能密源,熔融金属温度上升很高,与母材间的温度梯度很大导致冷却速度很快,从而使焊缝的微观组织很细小。

焊缝合金元素含量在激光焊接过程中也会发生相应变化。其中 Mg 元素含量下降,如附表所示<sup>[5]</sup>。

文献认为 Mg 和 Al 的沸点分别是 1090℃和 2467℃,相差 1377℃,而 Mn 和 Cr 的熔点分别是 1244℃和 1857℃,它们的沸点分别是 1962℃和 2672℃。因此,当 Mg 达到其沸点时,其它合金元素甚至还未熔化。因此 Mg 在焊接过程中烧损严重,焊速越慢,烧损越严重。铝的重量百分比的增加是由于 Mg 含量的减少。而 Mn, Cr 的含量百分比的增加一方面是由于 Mg 的减少,另一方面是由于溶质在凝固过程中的偏析。

## 二、铝合金激光焊接工艺

为了实现激光对铝合金的焊接,解决上述存在的问题,目前工艺上主要从以下几个方面加以解决。

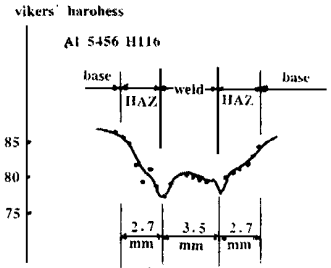


Fig. 2 Hardness traverse of Al 5456 laser weld

	Experimentally obtained composition, wt%	
	base metal	weld center
Al	94.15	95.07
Mg	5.30	4.40
Mn	0.45	0.55
Cr	0.10	0.13

### 1. 气体保护装置

激光难以对铝进行焊接,一方面是由于材料和光束的光学特性,使得“小孔”很难被诱导出来;另一方面是由于等离子体产生后易过热而使小孔不能稳定连续存在。必须诱导出小孔同时对等离子体加以适当的抑制,这主要受到保护气体流动状态的影响。保护气体的流动应维持在层流状态。

铝合金激光焊接中另一个主要问题是 Mg 的蒸发。研究<sup>[7]</sup>认为对 Mg 损失影响最大的因素是气体从喷嘴喷出时的压力,其它因素如:激光功率,焊接速度及喷嘴角度也有一定的影响。

为了诱导并维持小孔,减少 Mg 的损失,主要取决于保护装置几何形状、喷嘴直径、气体的压力和流动速率。故特设计了一专用保护装置<sup>[7]</sup>。通过计算,使用这种保护装置,当主喷嘴阀门上气压超过 2.15kPa 时,气体流动雷诺数 > 2000,气体流动会从层流变为湍流。一般控制主喷嘴阀门处压力小于 2.15kPa,而且气体从主喷嘴喷出时压力维持在 58.6Pa 和 78.0Pa 之间。使用上述装置,对工艺参数优化后进行焊接,可获得较满意焊缝,焊接过程稳定,Mg 的损失也很小。

### 2. 接头设计

一般认为工件对激光吸收率的提高是由于小孔的形成,而焊接接头形状如造成较陡的 V 型坡口可看作是一个人工“小孔”,从而有利于对激光功率的吸收。实验表明,同样功率条件下,30°角 V 型坡口焊缝熔深较堆焊和对接接头有明显提高<sup>[8]</sup>。

### 3. 填丝

这种方法<sup>[2]</sup>在焊接过程中以适当速度送丝。丝和喷嘴同轴安置,与光轴角度 35°。首先,填丝可改善对激光的吸收情况,使得整个焊接过程稳定,可以避免深熔焊和传热焊交替出现现象,获得均匀的焊缝。而且在激光焊接过程中,由于填丝材料抑制了细长突出枝晶的生长,晶体组织得到细化,可避免热裂纹的形成。另外,填丝激光焊接铝合金时焊缝硬度也有所提高<sup>[2]</sup>。

### 4. 其它工艺方法

最近又提出一种超声振动激光焊接铝合金<sup>[9]</sup>。这种方法将工件置于一以 10kHz 共振频率振动的压电传感器上。据研究,这种方法可获得更大的熔深,而且可较大程度地抑制焊缝中的周边和纵向裂纹。当熔深小于 1mm 时还可大大降低气孔数目。

其它还有用脉冲 Nd:YAG 激光器或将连续 CO<sub>2</sub> 激光调制成脉冲形式对铝合金进行激光焊接的探讨。

### 参 考 文 献

- 1 Sakamoto H, Shibata K, Dausinger F. Laser welding of different aluminum alloys. Proc SPIE V. 1990: ICALEO' 92, Laser Materials Processing, Florida USA, 1992, USA: Laser Institute of America, 1993: 523~ 528
- 2 Zuo T Ch, Xiao Y H, Wang W Q. Laser beam welding with filler material of aluminium alloys. Proceeding of the Pre-Assembly Symposium of 47th Annual Assembly of IIW, Vol. I, Welding, Joining, Coating and surface modification of Advanced Materials, Beijing, China, 1995, Beijing: IIW, 1995: 19~ 24
- 3 Molian P A, Srivatsan T S. Laser welding of high modulus, low density Al-Li alloys. Proceedings of the 7th International Congress on Applications of Lasers and Electrooptics, ICALEO' 88, Laser Materials Processing, Santa Clara, CA, USA, 1988, Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo Hongkong, Springer Verlag IFS(Publication)Ltd. UK, 1989: 238~ 248

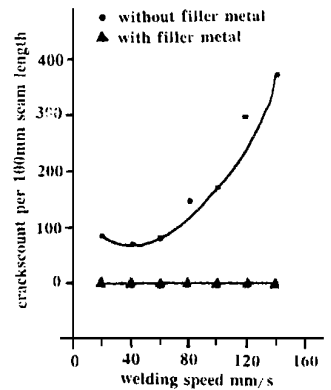


Fig. 3 Influence of filler material on crack susceptibility

# 深孔激光加工研究

李又生

(华中理工大学激光技术与工程研究院, 武汉, 430074)

摘要: 研究了深孔形成的物理过程, 提出了一种新型的深孔加工的激光脉冲波形, 用光锥方程和能量平衡关系式推导出孔深、孔径及有关激光参数, 与实验结果基本相符。

关键词: 激光打孔 峰值功率 脉冲形状

## Study on laser deep-hole drilling

Li Yousheng

(Institute of Laser Technology & Engineering, HUST, Wuhan, 430074)

**Abstract:** Now the laser drilling is a useful technique in industry products. A very important problem is how to obtain the high quality deep-hole drilling. Starting from the selection of laser parameters and the instantaneous energy balance in the gasification and melting process, the engineering design of deep-hole drilling was presented, in this paper, and pointed the selection of ratio of depth and diameter, the design of the laser pulse shape. The calculation results are close to the experimental data.

**Key words:** laser drilling peak power pulse shape

### 引 言

通过把激光束聚焦在金属上使其气化, 可进行打孔加工。激光几乎可对所有材料打孔, 而要得到精度一致的加工孔是不容易的, 因为激光参数、材料性质等因素稍有变化均将影响打孔的质量。而难度最大的还是深孔的激光加工。所谓深孔即深径比很大的孔。目前尚未看到有关深孔的确切定义, 我们认为深度比直径大数倍以上的孔, 即可认为是深孔。深孔的形成是由加热、气化、熔化和孔壁的破坏等许多因素决定的, 涉及到蒸汽的凝聚、飞溅物流束与孔壁之

- 4 Klans B, Eckhard B, Rolf S. Laser welding of aluminum. 同 3: 249~ 258
- 5 Moon D W, Metz Bower E A. Welding Journal, 1983; 62(2): 53S~ 58S
- 6 Calder N, Whitaker I, Mecartney D *et al.* Laser welding of aluminum lithium alloy 8090. 同 1: 565~ 573
- 7 Blake A, Mazumder J. Transaction of the ASME Journal of Engineering for Industry, 1985; 107(3): 275~ 281
- 8 Huntington C A, Eagar T W. Welding Journal, 1983; 62(4): 105S~ 107S
- 9 Ki M J S, Watanabe T, Yoshida Y. Improvement of laser beam welding quality of aluminum alloys. Proceedings ICALEO'93 Laser Materials Processing, Florida USA, 1993, USA: Laser Institute of America, 1994: 640~ 650
- 10 Cieslak M J, Fuerschbach. Metallurgical Transactions B, 1988; 19B(2): 319~ 329
- 11 Gopinathan S, Murthy J, McCay T D *et al.* The autogenous laser welding of Al 2219 to Al 6061. 同 9: 794~ 804
- 12 Eberle H G, Richter K, Schobbert H. Welding of aluminum alloys with modulated lasers. Proc SPIE 2207, Laser Matenals Processing: Industrial and Microelectronics Applications, Vienna, Austria, 1994, USA: The International Society for Optical Engineering(SPIE), 1994: 185~ 191

作者简介: 骆红, 女, 1966 年 12 月出生。硕士, 讲师。现从事激光焊接质量监控及熔池模拟方面的研究工作。