

# AZ31B 镁合金的光纤激光与 CO<sub>2</sub> 激光焊接特性

檀财旺<sup>1</sup> 李俐群<sup>1</sup> 陈彦宾<sup>1</sup> 郭伟<sup>1</sup> 王威<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)  
<sup>2</sup>哈尔滨焊接研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 采用光纤激光和 CO<sub>2</sub> 激光对 AZ31B-H24 镁合金进行堆焊和对接焊试验研究。从接头的焊缝成形、微观组织和力学性能等角度, 对比分析两种激光的镁合金焊接特性。结果表明, 镁合金光纤激光对接焊能够获得较好的焊缝成形, 具有较好的工艺适应性, 接头强度达到母材的 95% 以上, 断口显示为韧性断裂, 韧窝大且深; 镁合金 CO<sub>2</sub> 激光对接焊容易产生气孔缺陷, 接头强度大幅降低, 仅为母材的 47.6%, 断口为混合型断裂方式。

**关键词** 激光技术; 镁合金; 光纤激光; CO<sub>2</sub> 激光; 波长

**中图分类号** TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0603015

## Characteristics of Fiber Laser and CO<sub>2</sub> Laser Welding of AZ31B Magnesium Alloys

Tan Caiwang<sup>1</sup> Li Liquan<sup>1</sup> Chen Yanbin<sup>1</sup> Guo Wei<sup>1</sup> Wang Wei<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)  
<sup>2</sup> Harbin Welding Institute, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** The study on bead on plate (BOP) and butt laser welding characteristics of AZ31B-H24 magnesium alloys are carried out by using two lasers, fiber laser and CO<sub>2</sub> laser. The effect of different lasers on characteristics is analyzed, from the point of the weld appearances, microstructures and mechanical properties. The results show that fiber laser welded joint has good weld appearance and better suitability. Tensile strength of it can reach 95% of that of base metal, fracture is typically ductile feature, in which dimple is big and deep, while CO<sub>2</sub> laser welded joint tends to arise porosity, which sharply decreases its tensile strength, only 47.6% of that of base metal. Fracture mode is mixed mode including ductile and cleavage mode.

**Key words** laser technique; magnesium alloys; fiber laser; CO<sub>2</sub> laser; wavelength

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 350.3850

## 1 引 言

镁合金具有密度低, 比强度、比刚度高, 阻尼性、导热性好, 电磁屏蔽能力强等优点, 在航天航空、汽车、摩托车、电子等领域拥有广阔的应用前景, 若要真正实现镁合金在工业结构中的大量应用, 其焊接技术必将成为影响镁合金发展的一个关键因素<sup>[1~3]</sup>。因此, 对镁合金焊接技术的研究具有较大的工程意义和实际应用价值。

镁合金熔点低, 热导率和电导率大, 热膨胀系数

大, 化学活泼性很强, 易氧化, 且氧化物的熔点很高, 使镁合金自身在焊接过程中会产生一系列的困难, 如粗晶、氧化和蒸发、热应力、焊缝下塌、气孔等。因此, 镁合金的焊接较一般材料更加困难, 对焊接工艺的要求也更高<sup>[4]</sup>。高能密度激光焊接镁合金还会因 Mg 蒸发、合金元素烧损等问题带来缩孔、过烧等缺陷。由于不同波长激光与材料的耦合特性不同, 其镁合金的焊接质量也有明显的差异<sup>[5]</sup>。

A. Weisheit 等<sup>[6]</sup>采用 CO<sub>2</sub> 激光研究了几种铸

**收稿日期**: 2011-04-06; **收到修改稿日期**: 2011-04-26

**作者简介**: 檀财旺(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事镁合金激光焊接方面的研究。E-mail: tancaiawang@163.com

**导师简介**: 李俐群(1970—), 女, 博士, 副教授, 主要从事激光加工技术基础与应用等方面的研究。

E-mail: liliquan@hit.edu.cn(中国光学学会会员号: S040111759)

造镁合金的焊接性。结果表明,对于相同成分和不同成分的镁合金,均可利用激光焊接,得到窄焊缝和大熔深,接头焊缝区为细晶组织,焊缝的硬度和热影响区(HAZ)硬度基本相同。但由于CO<sub>2</sub>激光的波长(10.6 μm)大,对镁、铝等材料的反射率高,能量损失严重。为此,考虑采用波长更短的固体激光器。宋刚等<sup>[7,8]</sup>利用最大功率500 W的YAG激光器,研究了焊接工艺参数对厚度为1.2 mm的AZ31B镁合金接头组织和性能的影响,接头强度达到母材的95%。K. H. Leong等<sup>[9]</sup>采用高功率连续和脉冲Nd:YAG激光器研究了AZ31B镁合金的激光焊接特性。结果发现,YAG激光焊接镁合金优于CO<sub>2</sub>激光焊,全熔透时热输入小,接头对装配的适应性更好。Z. Sun等<sup>[10]</sup>发现Nd:YAG激光器焊接AZ31B镁合金时比CO<sub>2</sub>激光器容易导致裂纹。和CO<sub>2</sub>激光器以及Nd:YAG激光器相比,半导体激光器的能量转换效率和吸收率更高,J. H. Zhu等<sup>[11]</sup>采用半导体激光器和CO<sub>2</sub>激光器对比研究1 mm厚AZ31B镁合金薄板焊接特性时,发现半导体激光焊接的熔宽及热影响区宽度较CO<sub>2</sub>激光要大,但内部气孔少于CO<sub>2</sub>激光。

光纤激光器成为近年来激光焊接领域关注的热点,受到全世界工业加工领域广泛的青睐。与传统的CO<sub>2</sub>激光器和固体激光器相比,光纤激光器体积更小,效率更高,成本更低,易于系统集成,且光纤传

输更易于实现柔性加工<sup>[12,13]</sup>。但目前光纤激光焊接镁合金的工作开展较少<sup>[14]</sup>,尤其在和CO<sub>2</sub>激光对比研究镁合金激光焊接,考察不同激光对焊接特性的影响等方面,尚未见报道。

本文采用光纤激光、CO<sub>2</sub>激光进行镁合金的激光焊接特性研究,从焊缝成形特点、微观组织、接头性能等方面对两种不同波长激光器焊接镁合金的工艺特性进行了系统分析,为激光焊在镁合金上的应用提供了试验基础和理论依据。

## 2 试验材料及方法

焊接设备分别采用光纤激光器和CO<sub>2</sub>激光器。光纤激光器为德国IPG公司生产的YLR-6000光纤激光器,主要参数为:最大功率6 kW,聚焦焦距200 mm,焦斑直径0.2 mm;CO<sub>2</sub>激光器为德国ROFIN-SINAR公司生产的扩散冷却射频激励激光器,主要参数为:波长10.6 μm,最大功率3 kW,聚焦焦距190 mm,焦斑直径0.2 mm。两次焊接试验尽量保持试验条件和装置的一致性。

试验采用尺寸为100 mm×30 mm×1.5 mm的AZ31B-H24变形镁合金薄板,其化学成分及室温力学性能如表1所示。

表2为镁合金中各元素的热物理参数。由于焊接过程中涉及到铝,镁,锌等元素的熔化和蒸发,因此需要考察各热物理性能,以便对结果进行分析。

表1 AZ31B镁合金化学成分(质量分数,%)及力学性能

Table 1 Chemical composition (mass fraction, %) and mechanical properties of AZ31B alloy

Al	Zn	Mn	Si	Mg	Tensile strength /MPa	Elongation ratio /%
2.92	1.09	0.3	0.01	Bal.	273	22.4

表2 铝,锌,镁,铁等元素的热物理参数

Table 2 Thermophysical properties of Al, Zn, Mg, and Fe

	Al	Zn	Mg	Fe
Melting point $T_m$ /K	933	693	923	1808
Boiling point $T_b$ /K	2333	1203	1380	3003
Vapor pressure at $T_m$ /Pa	10 <sup>-6</sup>	23	360	2.3
Vapor pressure at 1000 K/Pa	0.000012	12000	1360	0
Surface tension at $T_m$ /(N/m)	0.91	0.78	0.56	1.87
Thermal conductivity of solid at $T_m$ /(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	210	9	130	30
Absorptivity at $T_m$ , 1.06 μm /%	11	42(300 K)		36(300 K)
Absorptivity at $T_m$ , 10.6 μm /%	3	10	3	5(300 K)

试验前采用丙酮去除油污等杂质,然后机械打磨,表面处理完毕后进行焊接。试验先在平板上堆焊,进行工艺探索,待优化激光焊接镁合金的工艺后,进行平板对接,对接焊时采用氩气进行双面保

护,不填充焊丝,单面焊双面成型,焊接过程如图1所示。

焊后将接头进行垂直切割,将镶好的试样用水砂纸按800、1000、1500、2000号逐级磨光,然后用粒

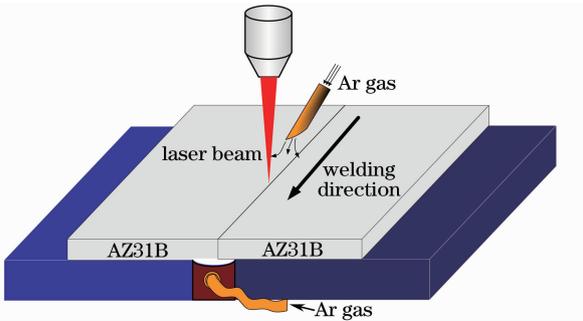


图 1 激光焊接过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser welding process

径为 1 μm 的金刚石抛光剂抛光, 抛光后的试样母材及焊缝采用腐蚀剂(苦味酸 5 g+冰醋酸 5 g+蒸馏水 10 mL+无水乙醇 80 mL)腐蚀 4~8 s。

利用 OLMPIUS 金相显微镜对接头成形、微观组织进行观察和分析; 拉伸试验在 INSTRON-5569 电子万能材料试验机上进行, 拉伸速度 1.0 mm/min, 数据采集频率 5 point/s, 测试前利用砂纸将焊缝磨平; 利用 HVS-1000Z 型数显显微硬度计对焊接接头进行

硬度试验, 加载载荷 0.98 N, 保持时间 15 s。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 焊缝成形

在镁合金激光焊接过程中, 由于工艺参数选择不当会产生各种缺陷, 其中气孔、下塌是主要问题。镁合金焊缝气孔数量、下塌量都与热输入密切相关, 热输入越大, 气孔与下塌现象越严重, 可通过减少激光功率、增大焊接速度或控制焊缝重熔等方法来控制<sup>[15]</sup>。这是因为 Mg、Zn 的熔点低, 较其他金属更容易蒸发, 同时镁合金表面张力小、粘性低, 在高功率激光照射下容易造成气化和熔化物抛出。因此, 若要解决激光焊接镁合金过程中上述问题, 热输入控制尤为重要, 激光功率  $P$ , 焊接速度  $V$ , 离焦量  $\Delta f$  等是决定焊缝成形的关键参数。

表 3 给出了几组典型焊接参数下激光堆焊的焊缝表面与截面形貌, 以进行对比分析不同热输入对焊缝成形的影响。

表 3 典型激光焊接镁合金表面与截面形貌

Table 3 Typical weld appearances and cross sections of laser welding for magnesium alloys

Laser	Parameters	Appearance	Cross sections
Fiber laser	$P=1.5$ kW, $V=2$ m/min		
	$P=1.3$ kW, $V=2$ m/min		
	$P=0.7$ kW, $V=2$ m/min		
	$P=0.4$ kW, $V=2$ m/min		
CO <sub>2</sub> laser	$P=1.5$ kW, $V=1.5$ m/min		
	$P=1.5$ kW, $V=2$ m/min		
	$P=1.0$ kW, $V=2$ m/min		
	$P=0.8$ kW, $V=2$ m/min		

相对于压铸镁合金,变形镁合金自身材料内部缺陷少,激光焊接产生气孔的几率小很多。从表 3 可以看出,大功率光纤激光焊接时,焊缝表面出现下塌,采用 CO<sub>2</sub> 激光焊接,正面、背面均存在下塌,而且有时背面还出现了内凹缺陷。试验发现,合理调整焊接工艺,可以获得成形良好、下塌量小的焊缝。根据实验结果,大致的工艺窗口为:离焦量 0,焊接速度 2 m/min 时,光纤激光功率 0.7~1 kW,CO<sub>2</sub> 激光功率 0.8~1 kW。

需要指出的是,对接焊时,不同波长激光对材料的边缘、间隙情况反应有很大的差别。试验中发现,光纤激光对边缘表面的起伏变化和微小间隙有着较好的适应能力,焊接参数和堆焊基本相同;CO<sub>2</sub> 激光对接焊的表现较堆焊则明显不同,即使在焊缝间隙非常小,边缘很平整的情况下,仍然十分敏感,焊接过程不够稳定,所获得的参数也与堆焊参数有很大差异。对于光纤激光,对接接头的工艺范围与堆焊时相差不大,光纤激光功率 800~1000 W,焊接速度 1.5~2 m/min,离焦量-2 mm。对于 CO<sub>2</sub> 激光,同等功率条件下,焊接速度要降低很多才能实现全熔透,工艺规范为:功率 1000~1300 W,焊接速度 1~1.5 m/min,离焦量-2 mm。镁合金材料对 CO<sub>2</sub> 激光的高反射率是主要影响因素。

图 2 分别给出了典型光纤激光和 CO<sub>2</sub> 激光焊接镁合金对接焊缝成形。从外观上看,光纤激光焊缝表面宽度均匀、成形美观、焊缝成银白色,无气孔、夹渣、未熔合等缺陷;CO<sub>2</sub> 激光焊缝表面波动较大、气孔和飞溅较多、熔化金属喷溅到焊缝两侧。从截面上看,光纤激光焊缝内部无任何明显缺陷;CO<sub>2</sub> 激光焊缝在堆焊时没有气孔产生,对接时内部却存

在气孔,这主要与 CO<sub>2</sub> 激光对接头的适应性差有关。

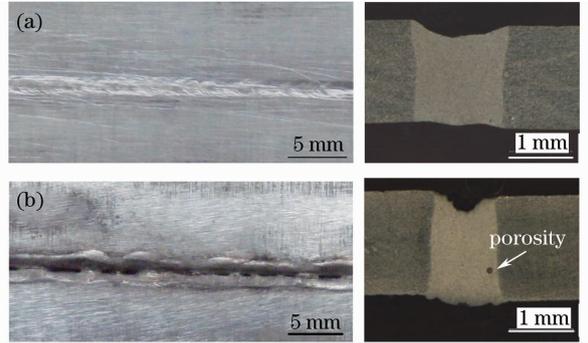


图 2 激光焊接镁合金表面成形与焊缝截面。(a) 光纤激光 ( $P=0.8\text{ kW}, V=2\text{ m/min}, \Delta f=-2\text{ mm}$ ), (b) CO<sub>2</sub> 激光 ( $P=1\text{ kW}, V=1\text{ m/min}, \Delta f=-2\text{ mm}$ )

Fig. 2 Weld appearances and cross sections of laser welded AZ31B alloys. (a) fiber laser ( $P=0.8\text{ kW}, V=2\text{ m/min}, \Delta f=-2\text{ mm}$ ), (b) CO<sub>2</sub> laser ( $P=1\text{ kW}, V=1\text{ m/min}, \Delta f=-2\text{ mm}$ )

### 3.2 接头微观组织

图 3 是母材的组织形貌,其组织为典型的变形镁合金等轴晶组织,平均晶粒尺寸为 7.5 μm,母材中含有一定数量强化相,能谱(EDS)分析显示为 Al-Mn 相,如图 3(b)所示。图 4 为光纤激光和 CO<sub>2</sub> 激光焊接镁合金的焊缝组织。光纤激光焊缝和 CO<sub>2</sub> 激光焊缝均为细小的等轴晶组织,与母材相比,镁合金的焊缝晶粒明显得到细化,在焊缝晶粒中析出了大量的第二相 β-Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>,呈弥散分布状态,且光纤激光焊缝晶粒的平均尺寸要远小于 CO<sub>2</sub> 激光焊缝晶粒,焊缝中第二相要多于 CO<sub>2</sub> 激光的第二相。在光纤激光和 CO<sub>2</sub> 激光熔合线附近均没有发现粗大晶粒形成。

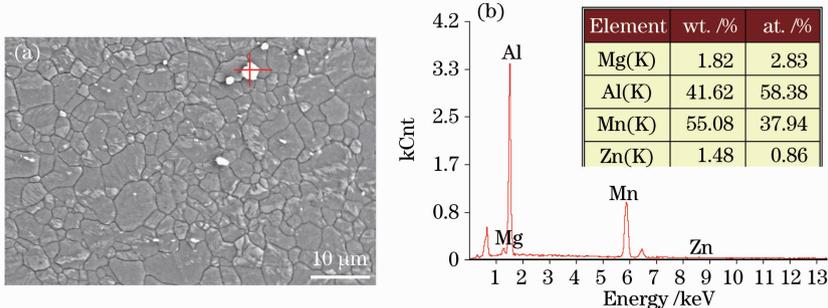


图 3 母材微观组织与 EDS 分析结果。(a)母材微观组织,(b)母材第二相 EDS 分析结果  
Fig. 3 Microstructure of base metal and EDS analysis. (a) microstructure of base metal,

(b) EDS analysis of the second particle

在 AZ 系列镁合金焊缝和热影响区晶粒大小方面,基本取得了共识,无论采用光纤激光<sup>[13]</sup>、YAG 激光<sup>[7,8]</sup>或是 CO<sub>2</sub> 激光<sup>[16]</sup>,接头热影响区均不明

显,熔合线附近无晶粒粗大现象,这和本文得到的结果一致。分析认为,接头的这种组织与它的受热状态和镁合金自身的物理特性密切相关,激光焊接能

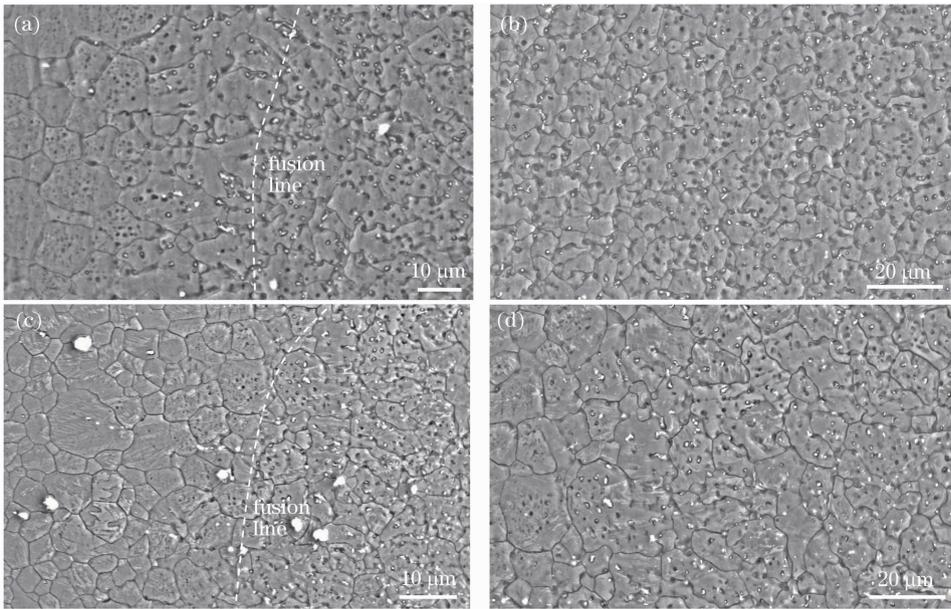


图 4 光纤和 CO<sub>2</sub> 激光焊接镁合金的焊缝组织。(a)光纤激光熔合线,(b)光纤激光焊缝,(c) CO<sub>2</sub> 激光熔合线,(d) CO<sub>2</sub> 激光焊缝

Fig. 4 Weld microstructures of fiber laser welded and CO<sub>2</sub> laser welded AZ31B magnesium alloys.

(a) fiber laser fusion line, (b) fiber laser weld, (c) CO<sub>2</sub> laser fusion line, (d) CO<sub>2</sub> laser weld

量密度大,镁合金导热系数高,致使焊接接头处的温度梯度很大,焊后冷却速度和结晶速度快,另外 AZ 镁合金中存在像铝这种细化晶粒元素也限制了晶粒的长大<sup>[16]</sup>。

不同的是,对于熔合线附近的晶粒形态有着不同的研究结果。S. M. Chowdhury 等<sup>[14,17]</sup>均发现柱状晶沿着熔合线向焊缝内部生长;而宋刚等<sup>[7,8,16]</sup>以及本试验在焊接时没有发现柱状晶的存在。对比几位研究可知,焊后接头组织形貌和母材原始组织有着密切的关系,若原始组织为加工硬化态(轧制、挤压、锻造),即母材组织处于变形状态,在随后的焊接过程中,热影响区经历了相当于退火处理的工艺条件,晶粒发生回复再结晶,焊缝金属沿这些发生再结晶的晶粒方向形核,容易出现枝状晶向焊缝内生长的现象。

### 3.3 接头元素含量分析

表 4 为两者焊缝和母材 EDS 分析结果。可以看出,两种激光焊接镁合金焊缝元素分布具有同样规律,Mg、Al 含量增加,Zn 含量减少。由于在较合适的工艺范围内,元素的蒸发烧损并不严重,导致含量变化不大。焊缝区元素成分的变化与各元素的物性有很大关系,由表 2 数据可知,Zn 的沸点低,蒸气压高,所以在高能量密度激光的辐照下,Zn 元素被气化蒸发。Al 的蒸气压相对 Mg、Zn 来说可以忽略,在焊接过程中基本没有损耗。因此可以判断,激

光焊接镁合金过程中,由于 Zn 的蒸发,最终导致了焊缝区 Mg、Al 含量的相对增加。这样,提高了焊缝中第二相  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 的含量,但若出现连续的  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 相,将导致接头力学性能的下降。同时,大量 Zn 元素的蒸发,易引起焊缝表面缺陷的产生(下塌、气孔),尤其是在 CO<sub>2</sub> 激光焊接时,造成焊接过程不稳定,进而产生大量的氢气孔,大大降低了接头强度。

表 4 EDS 微区元素含量分析(质量分数,%)

Table 4 Composition analysis of AZ31B weld joint by EDS (mass fraction, %)

Element content	Mg	Al	Zn
Base metal	94.63	2.69	1.96
Weld metal of fiber laser	95.51	3.17	1.32
Weld metal of CO <sub>2</sub> laser	95.62	3.10	1.28

### 3.4 接头力学性能

#### 3.4.1 焊接接头显微硬度

对光纤激光和 CO<sub>2</sub> 激光焊接接头进行硬度测试,从焊缝中心开始分别测量了焊缝区(FZ)、热影响区、母材(BM)等部位的显微硬度值,在每个部位分别选取 4 个不同位置进行测量。图 5 为光纤激光和 CO<sub>2</sub> 激光焊接接头维氏硬度分布。从图中可以看出,光纤激光和 CO<sub>2</sub> 激光的焊接接头硬度均无明显变化。但从趋势上看,光纤激光焊缝硬度稍高,这和焊缝晶粒细小,析出大量的强化相,使焊缝组织得到强化有关。

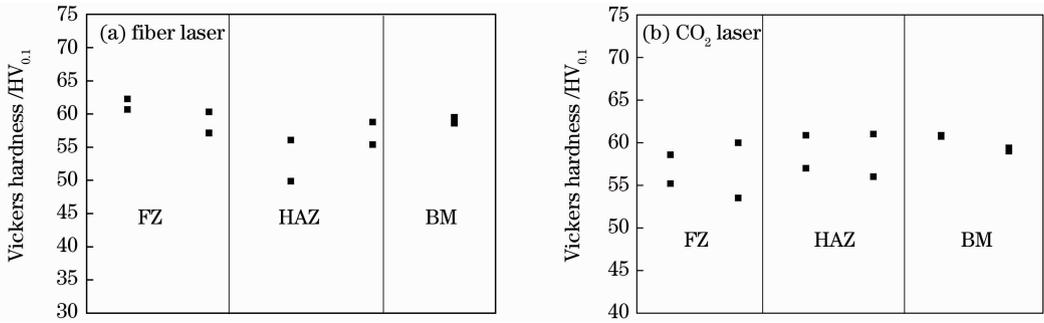


图 5 接头不同区域的显微硬度

Fig. 5 Microhardness in different zones of laser welded joints

### 3.4.2 焊接接头拉伸性能

拉伸试验表明两种激光焊接接头均断裂于焊缝处,图 6 为接头强度值。由图可知,光纤激光焊接接头的平均抗拉强度为 260 MPa 左右,达到母材抗拉强度的 95.2%(母材抗拉强度为 273 MPa),高于目前已知的光纤激光焊接强度<sup>[13]</sup>(母材强度 91%)。CO<sub>2</sub> 激光焊接接头平均抗拉强度为 130 MPa 左右,达到母材抗拉强度的 47.6%。且光纤激光的接头强度值分布比较均匀,整体的焊接质量较好;CO<sub>2</sub> 激光的接头强度值分布则较为离散,整体焊接质量较差。为寻求 CO<sub>2</sub> 激光抗拉强度损失的原因,利用扫描电镜观察了两者的断口形貌。从图 7 可以看出,光纤激光的断口韧窝较大且深,为典型的韧性断裂;而 CO<sub>2</sub> 激光的断口韧窝则相对较少较浅,部分属于脆性断裂,整体呈混合型断裂特征。同时还可以发现,CO<sub>2</sub> 激光断口存在大小不一的气孔。气孔

的类型主要为氢气孔,气孔的存在是由于 CO<sub>2</sub> 激光焊接过程不稳定导致周围空气卷入焊缝中。空气中的水蒸气与镁反应生成氢( $Mg + H_2O \rightarrow MgO + H_2 \uparrow$ )。氢在熔池凝固过程中溶解度急剧减小,焊缝冷却后有一部分氢由于来不及逸出而形成气孔。分析认为,接头组织与缺陷(裂纹、气孔)对接头强度与断裂行为有着重要的影响。和轧制态母材相比,CO<sub>2</sub> 激光焊缝为铸态组织,且未明显细化,其强度较低,容易受到内部缺陷(主要为气孔)的影响,在载荷作用下,气孔处成为薄弱环节,裂纹优先从此处萌生、扩展直至开裂,这大大降低了接头的强度<sup>[14]</sup>。采用填丝焊取代平板对接焊,可以大大降低材料本身(表面平整度,坡口对中度等)对 CO<sub>2</sub> 激光工艺的要求,提高焊接过程的稳定性,避免空气的混入。下一步将开展相关的工作,提高 CO<sub>2</sub> 激光焊接的质量。

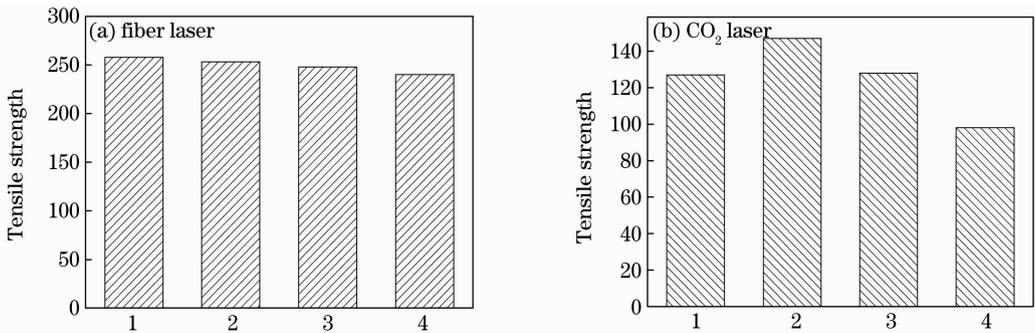


图 6 激光焊接 AZ31B 镁合金接头抗拉强度。(a) 光纤激光, (b) CO<sub>2</sub> 激光

Fig. 6 Tensile strength of laser welded AZ31B alloys joint. (a) fiber laser, (b) CO<sub>2</sub> laser

综上所述,无论在工艺稳定性上还是焊缝质量上,光纤激光焊接镁合金时,都具有绝对的优势。

## 4 结 论

实验表明光纤激光焊接镁合金的外观成形和内部均好于 CO<sub>2</sub> 激光。和 CO<sub>2</sub> 激光相比,光纤激光表面光滑,无飞溅等缺陷,焊缝内部无气孔,对接头适

应性要好。光纤激光和 CO<sub>2</sub> 激光熔合线附近的组织晶粒并未发生粗大。光纤激光焊缝组织较 CO<sub>2</sub> 激光焊缝组织要细小,焊缝中弥散分布的  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 第二相多于 CO<sub>2</sub> 激光焊缝。光纤激光接头强度达到母材抗拉强度的 95.2%,断口为典型韧性断裂,韧窝大且深;CO<sub>2</sub> 激光接头抗拉强度为母材的 47.6%,断口呈韧性和脆性并存的混合型断裂特征,

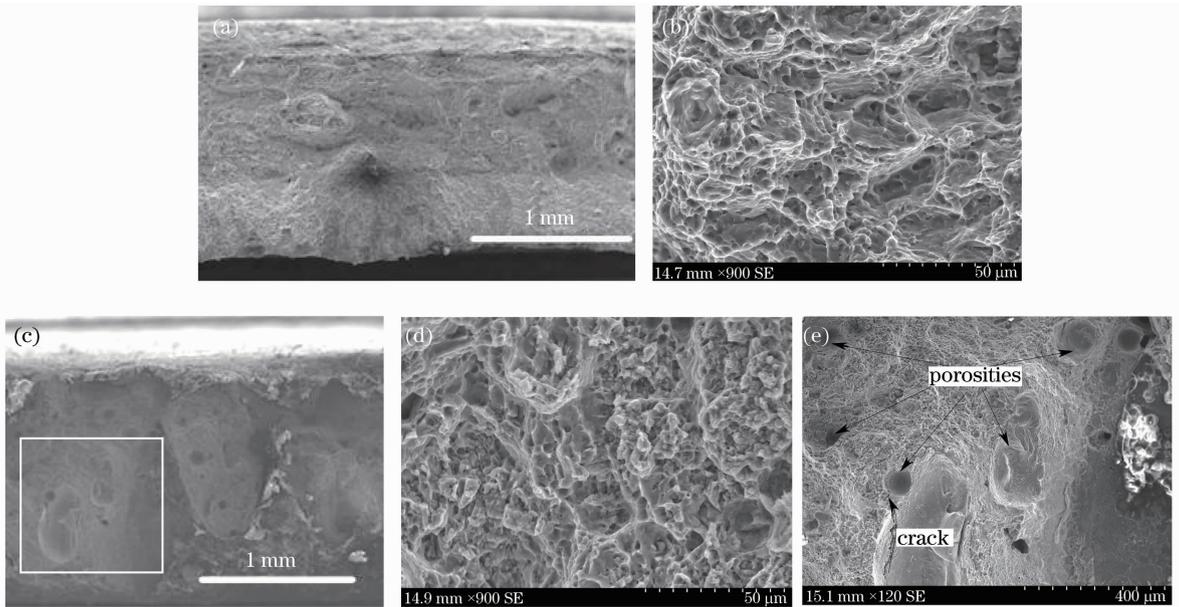


图 7 激光焊接 AZ31B 镁合金接头断口形貌。(a) 光纤激光断口低倍, (b) 光纤激光断口高倍, (c) CO<sub>2</sub> 激光断口低倍, (d) CO<sub>2</sub> 激光断口高倍, (e) 是 (c) 中矩形选区

Fig. 7 Fracture morphologies of laser welded AZ31B joints. (a) fiber laser in low magnification, (b) fiber laser in high magnification, (c) CO<sub>2</sub> laser in low magnification, (d) CO<sub>2</sub> laser in high magnification, (e) rectangular zone in (c)

断口表面存在气孔缺陷, 是抗拉强度降低的重要原因。

### 参 考 文 献

- X. Cao, M. Jahazi, J. P. Immarrigeon *et al.*. A review of laser welding techniques for magnesium alloys[J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2006, **171**(2): 188~204
- Y. J. Quan, Z. H. Chen, X. S. Gong *et al.*. CO<sub>2</sub> laser beam welding of dissimilar magnesium-based alloys[J]. *Mater. Sci. Engng. A*, 2008, **496**(1-2): 45~51
- K. Amelaberrazak, W. B. Salem, H. Mhiri *et al.*. Nd:YAG laser welding of AZ91 magnesium alloy for aerospace industries [J]. *Meta. Mater. Trans. B*, 2009, **40**(1): 54~61
- Yuan Ze, Li Dequan, Fu Tao. The present situation and development trend of the welding technology of magnesium alloy [J]. *Modern Welding Technology*, 2008, **3**: 1~5  
袁 择, 李德全, 付 涛. 镁合金焊接技术的现状和发展趋势 [J]. *现代焊接*, 2008, **3**: 1~5
- H. Hitoshi, I. Takashi, K. Shigeharu *et al.*. Effect of shielding gas and laser wavelength in laser welding of magnesium alloy sheet[J]. *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 2001, **19**(4): 591~599
- A. Weisheit, R. Galun, B. L. Mordike. CO<sub>2</sub> laser beam welding of magnesium-based alloys[J]. *Weld. J.*, 1998, **77**(4): 149.s~154.s
- Song Gang, Liu Liming, Wang Jifeng *et al.*. Study of YAG laser welding process on wrought magnesium [J]. *Applied Laser*, 2003, **12**(6): 327~330  
宋 刚, 刘黎明, 王继锋 等. 变形镁合金 AZ31B 的激光焊接工艺研究[J]. *应用激光*, 2003, **12**(6): 327~330
- Liu Liming, Wang Jifeng, Song Gang. Hybrid laser-arc welding of AZ31B Mg alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12): 1523~1526  
刘黎明, 王继锋, 宋 刚. 激光电弧复合焊接 AZ31B 镁合金[J]. *中国激光*, 2004, **31**(12): 1523~1526
- K. H. Leong, G. Kornecki, P. G. Sanders *et al.*. Laser beam

- welding of AZ31B-H24 magnesium alloy [J]. *Proceedings of Laser Institute of America*, 1998, **85**: 28
- Z. Sun, D. Pan, J. Wei. Comparative evaluation of tungsten inert gas and laser welding of AZ31 magnesium alloy [J]. *Sci. Technol. Weld. Joi.*, 2002, **7**(6): 343
- J. H. Zhu, L. Li, Z. Liu. CO<sub>2</sub> and diode laser welding of AZ31 magnesium alloy [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2005, **247**(1-4): 300~306
- Peng Biao. All-round performance of fiber laser applying in the entire processing industry [J]. *Laser Technology & Applications*, 2008, (2): 5~7  
彭 彪. 光纤激光器在工业加工领域的全方位表现[J]. *激光技术与应用*, 2008, (2): 5~7
- Mei Lifang, Chen Genyu, Jin Xiangzhong *et al.*. Study on fiber laser overlap welding of automobile aluminum alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 2091~2097  
梅丽芳, 陈根余, 金湘中等. 车用铝合金光纤激光搭接焊的研究 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 2091~2097
- S. M. Chowdhury, D. L. Chen, S. D. Bhole *et al.*. Microstructure and mechanical properties of fiber-laser-welded and diode-laser-welded AZ31 magnesium alloy [J]. *Metal. Mater. Trans. A*. DOI: 10.1007/s11661-010-0574-y
- Xu Hu. CO<sub>2</sub> Laser Welding with Wire of Wrought Magnesium Alloys [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006, 8~10  
徐 虎. 变形镁合金的 CO<sub>2</sub> 激光填丝焊研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006, 8~10
- Wang Hongying, Li Zhijun. Microstructure and properties of AZ61 magnesium alloy joints produced by laser welding method [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2006, **16**(8): 1389~1393  
王红英, 李志军. AZ61 镁合金激光焊接接头的组织与性能 [J]. *中国有色金属学报*, 2006, **16**(8): 1389~1393
- Y. J. Quan, Z. H. Chen, X. S. Gong *et al.*. Effects of heat input on microstructure and tensile properties of laser welded magnesium alloy AZ31 [J]. *Mater. Charact.*, 2008, **59**(10): 1491~1497