

# 镁合金激光焊的研究现状及发展趋势

全亚杰

(湖南大学材料科学与工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要** 镁合金具有质轻、环保等特性,被誉为 21 世纪绿色工程材料,在汽车、摩托车、航天航空等领域有着广泛的应用前景,但焊接问题已经成为制约其应用的关键。和其他熔焊方法相比,激光焊具有焊缝熔深大、接头性能优良等特点,是镁合金焊接的理想方法之一。目前,两类典型的工业激光器,即 CO<sub>2</sub> 和 Nd:YAG 激光器都已用于镁合金焊接的研究。系统分析了镁合金激光焊的工艺方法、焊接材料、接头性能(主要为力学性能与耐腐蚀性能)以及冶金缺陷(主要有气孔和裂纹),综述了近年来国内外镁合金激光焊接的研究现状,并对镁合金激光焊研究及应用的发展趋势进行了展望。

**关键词** 激光技术; 焊接; 镁合金

**中图分类号** TG456.7      **文献标识码** A      **doi:** 10.3788/LOP49.050001

## Research Status and Development Trends of Laser Welding of Magnesium Alloy

Quan Yajie

(School of Material Science and Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

**Abstract** Because of the characteristics of low density and good recycle, magnesium alloys are praised of the green engineering material, which have a widely applied prospect in the fields of automobile, motorcycle, aerospace and other industries. But the welding problem has become a key constraint on their application. Laser welding will be an important joining technique for magnesium alloys with their increasing applications. Compared with other fusion welding techniques, laser welding is one of the ideal methods for magnesium alloy because of its characteristics such as deep penetration of welds and excellent performance of joints. To date, two types of industrial lasers, i. e., CO<sub>2</sub> and Nd:YAG lasers, have been used to investigate the weldability of magnesium alloys. In this paper, the process methods, welding materials, joint properties (mainly for mechanical properties and corrosion resistance) and metallurgical defects (mainly including porosity and cracking) of laser welding of magnesium alloys are analyzed. The research status of laser welding of magnesium alloys at home and abroad is summarized. The development trends of research and application of laser welding of magnesium alloy are reviewed.

**Key words** laser technology; welding; magnesium alloy

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 350.3850

## 1 引言

镁及镁合金具有密度小、比强度和比刚度高、阻尼性和导热性优良、导电性强、电磁屏蔽性好等特点,被广泛应用于冶金、建材、航空航天、化工、电子等领域。镁合金作为工程应用中最轻的金属结构材料,其零部件的使用可有效地实现汽车、轨道车辆等交通工具的轻量化目标。目前,上海汽车集团公司、一汽集团、东风汽车集团、江铃汽车公司等国内大的汽车公司均已开始镁合金汽车零部件的铸造生产<sup>[1]</sup>。但镁合金型材的应用则相对滞后,其中很重要的一个制约因素就是焊接技术。镁合金的化学成分和物理性质决定了其焊接性能较差,尤其是与冶金过程密切相关的熔化焊。与传统熔焊方法相比,激光焊具有热输入低,焊缝残余应力和变形小,熔化区和热影响区窄,冷却速度快,焊缝组织细小,接头性能优良等优点。因此,作为镁合金焊接研究最早使用的方法之一<sup>[2]</sup>,近年来激光焊在镁合金焊接的深入研究方面发挥着重要作用。本文主要对镁合金激光焊接的研究现状进行综述,以便相关研究人员更好地了解其今后的发展趋势。

**收稿日期:** 2011-11-18; **收到修改稿日期:** 2011-12-30; **网络出版日期:** 2012-04-01

**基金项目:** 中央高校基本科研业务费(531107040189)资助课题。

**作者简介:** 全亚杰(1974—),女,硕士,讲师,主要从事激光材料处理方面的研究。E-mail: quanyj\_2006@yahoo.com.cn

## 2 工艺方法

### 2.1 激光焊

激光焊是利用高能量密度的激光束作为热源进行的焊接方法。由于激光器种类的不同,输出激光束的波长存在差异,而根据

$$\alpha = 0.365 \sqrt{\rho/\lambda} \quad (1)$$

可知,激光的波长会影响材料表面的吸收率,因此不同类型激光束热源的焊接效果肯定也不同<sup>[3]</sup>。式中 $\alpha$ 为材料对激光的吸收率, $\rho$ 为材料的电阻率, $\lambda$ 为激光的波长。

适用于材料加工用的两种主要类型的激光器,即波长为 $10.6 \mu\text{m}$ 的 $\text{CO}_2$ 激光器和波长为 $1.06 \mu\text{m}$ 的Nd:YAG激光器都已经被用于镁合金的焊接研究。其中 $\text{CO}_2$ 激光一般以连续波的形式工作,具有高功率输出、高效率、出色的可靠性和安全性,在镁合金焊接研究的早期应用较为广泛。如文献[4~6]中镁合金的激光焊采用的均为 $\text{CO}_2$ 激光,结果表明镁合金易于实现激光焊接,且焊缝窄、熔深大。

另一方面,随着输出功率的提高、光束质量的改善以及光纤传输的可能,目前Nd:YAG激光器已经进入了以 $\text{CO}_2$ 激光为主的激光焊接领域。由于Nd:YAG激光波长短,镁合金表面的吸收率得到了提高,所以可以降低深熔焊的临界功率密度(一台800 W的Nd:YAG激光器的有效功率相当于3 kW的 $\text{CO}_2$ 激光器的功率<sup>[3]</sup>),焊缝熔池更稳定,焊接效果更好。Nd:YAG激光器能以脉冲和连续两种方式工作,前者可以在较低的平均功率条件下实现小热输入的高速焊接,是Nd:YAG激光器的主要工作方式。如大连理工大学的王继锋等<sup>[7,8]</sup>、日本大学的Taguchi等<sup>[9,10]</sup>都采用脉冲Nd:YAG激光焊对镁合金成功地实现了连接,且焊缝变形小,成型美观。Pan等<sup>[11,12]</sup>则专门针对激光束的脉冲波形对焊接质量的影响进行了研究,得出图1所示的3种脉冲波形中第3类焊接效果良好。Nd:YAG激光器也能以连续方式工作于激光焊接<sup>[13,14]</sup>,但此时对功率的要求要高于脉冲工作方式。

此外,随着半导体激光技术的发展,这种仅限于微波、通信等行业的激光器开始在材料焊接领域崭露头角。Zhu等<sup>[15]</sup>对AZ31镁合金采用 $\text{CO}_2$ 激光和半导体激光焊进行了对比研究,发现由于两种激光束输出质量的不同(图2),前者在合适的工艺参数匹配条件下可以实现深熔焊,而后者只能实现传导焊。Wahba等<sup>[16]</sup>也采用高功率的半导体激光实现了镁合金AZ91D和非金属材料的连接。近年来,最新研制出来的光纤激光器也被人们引入到了镁合金的焊接研究,如文献[17]对AZ31B镁合金的光纤激光与 $\text{CO}_2$ 激光焊接特性进行了对比研究,文献[18]则对AZ31镁合金的光纤

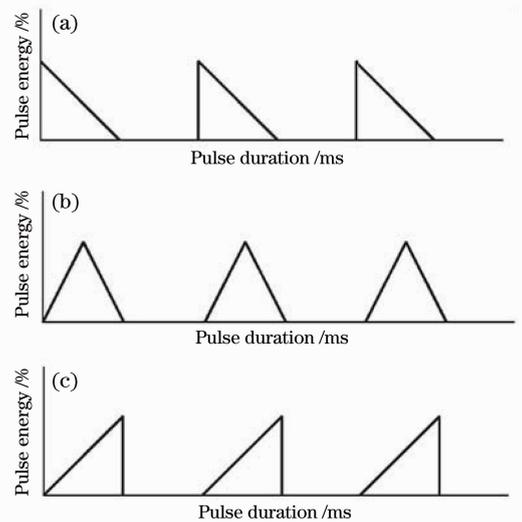


图1 脉冲Nd:YAG激光的三种不同波形  
Fig. 1 Different pulse shapes of Nd:YAG laser beam

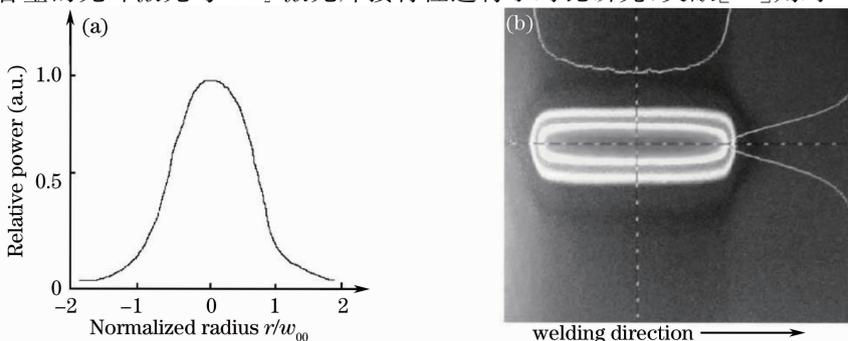


图2  $\text{CO}_2$ 和半导体激光的光束形貌。(a)2 kW  $\text{CO}_2$ 激光;(b)1.5 kW 半导体激光

Fig. 2 Beam profiles of  $\text{CO}_2$  and diode lasers. (a) 2 kW  $\text{CO}_2$  laser beam; (b) 1.5 kW diode laser beam

激光与半导体激光焊接进行了对比研究。

## 2.2 激光-电弧复合焊

激光-电弧复合热源用于焊接是 20 世纪 70 年代后期首次提出的<sup>[19]</sup>,与单独焊接方法相比,该工艺成本可降低 50%,而生产效率可提高 50%<sup>[20]</sup>,因此尤其适用于焊接高导热率金属,如铝、镁、铜等。该方法通过激光和氩弧之间的相互协调,提高了激光的吸收率,增强了氩弧的稳定性,热源热量集中,穿透力强,可以进行镁合金优质、高效焊接。宋刚等<sup>[21]</sup>对镁合金 AZ31B 激光-TIG 复合焊接工艺进行了研究,发现复合焊接工艺的熔深可达 TIG 单独焊接熔深的 2 倍,激光单独焊接熔深的 4 倍。但这种 Nd:YAG 激光与 TIG 电弧的复合难以实现填充材料的添加,无法从根本上解决镁合金焊接过程中出现的合金元素烧损、气孔、表面凹陷等冶金缺陷问题,且焊缝熔深仍然有限,所以仅适用于镁合金薄板的焊接。而 CO<sub>2</sub> 激光与 MIG 电弧的复合可以实现 10 mm 厚 AZ31 镁合金的成功连接,焊接熔深比 MIG 焊提高近 10 倍,而焊接速度比激光焊增加 50%,上述的冶金缺陷也能得到有效消除<sup>[22]</sup>。

## 3 焊接材料

用于激光焊接的镁合金母材,目前主要分为两类:同种材质和异种材质。前者是指被连接的两部分母材化学成分相同;而后者则是不同的,其根据材料成分差异的大小不同又可分为异种镁合金之间的焊接和镁合金与其他材料的焊接,包括与铝合金、钢、钛合金甚至非金属材料之间的焊接。

### 3.1 同质镁合金

目前,同质镁合金的激光焊涉及到的材料以 Mg-Al 系为主,包括变形 AZ31、AZ61 和铸造 AZ91、AM60 合金等。由于铝的含量低于 10%(质量分数)时具有细化晶粒、提高可焊性的作用,所以这类合金的焊接性能优良。图 3(a)所示为典型的 AZ31 镁合金激光焊接头横截面形貌<sup>[23]</sup>,除了焊缝的上部和根部有轻微咬边出现外,整体成型良好,焊缝狭窄,近缝区没有明显的热影响区(HAZ)存在。图 3(b)~(d)给出了对应各区域的微观组织<sup>[23]</sup>,焊缝为细小的等轴枝晶,并出现了大量母材中没有的析出相小颗粒,研究表明这些析出颗粒应为 Mg<sub>17</sub>(Al,Zn)<sub>12</sub>相<sup>[24]</sup>。母材和焊缝界面处存在明显的外延生长形成的柱状晶条带区。此区域的宽度与焊接参数有关,焊接速度不变时,随着激光功率的增大,柱状晶的条带区域变窄;在相同的激光功率条件

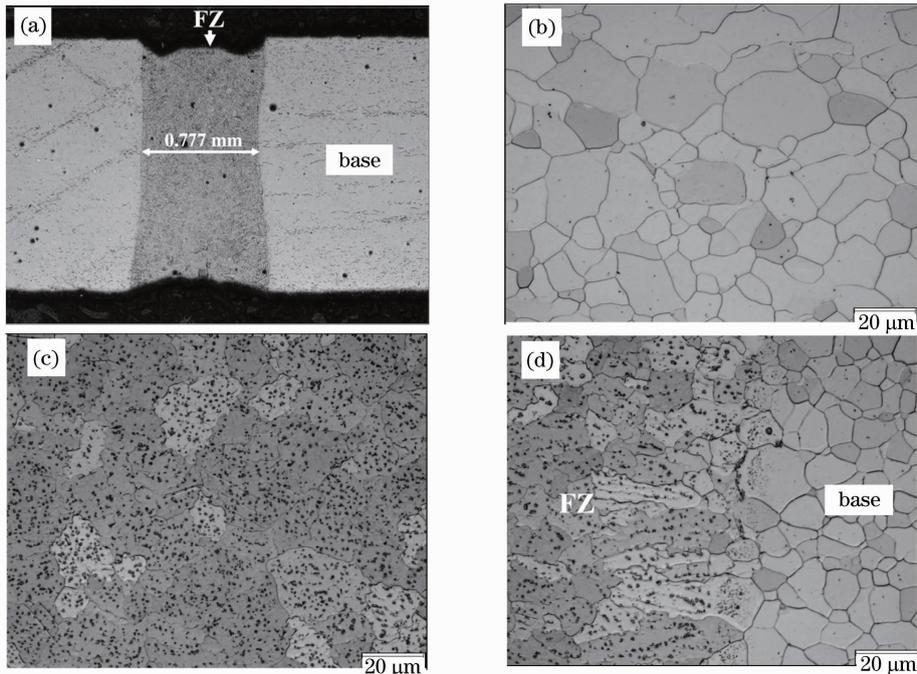


图 3 AZ31 镁合金激光焊接头的金相组织。(a) 焊接头截面;(b) 母材;(c) 熔化区;(d) 过渡区

Fig. 3 Optical micrograph of the welded joint of AZ31 magnesium alloy. (a) cross section of the joint; (b) base metal; (c) fusion zone; (d) transition zone

下,焊接速度的下降会使柱状晶区变宽<sup>[25]</sup>。另外,随着 Mg-Al 合金中 Al 含量的增加,材料的凝固温度范围增大,从而在焊缝两侧会出现固液两相并存的区域,称之为“半熔化区”(PMZ)。图 4 所示为 AZ31 镁合金激光焊接接头中的 PMZ<sup>[26]</sup>,其宽度直接受焊接热输入的影响,当热输入由 85.7 J/mm 降到 48 J/mm 时,PMZ 由图 4(a)所示的一个晶粒宽变得如图 4(b)所示的很窄,当热输入降到 44 J/mm 时则缩小成了熔化区(FZ)和母材之间的一条熔合线。

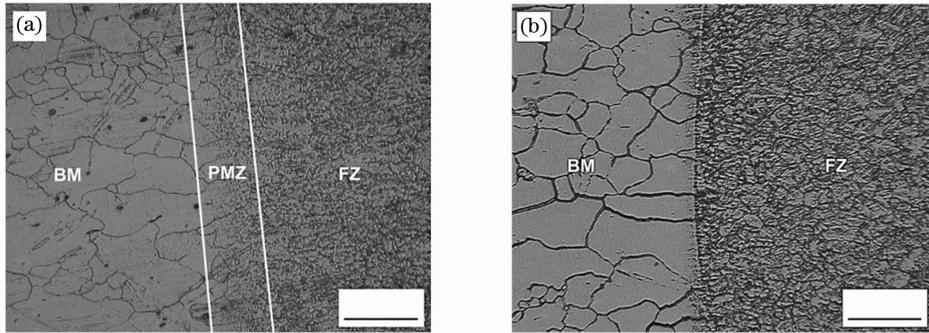


图 4 不同热输入时的 PMZ 显微组织。(a) 85.7 J/mm; (b) 48 J/mm

Fig. 4 PMZ microstructure of the welds with different heat input. (a) 85.7 J/mm; (b) 48 J/mm

目前也有文献对激光焊 Mg-Zn 及 Mg 稀土合金等进行了少量的研究。文献[27]对 Zn 含量不同的 ZK21、ZK40 和 ZK60 进行了激光焊接的对比研究,得出自熔焊条件下 ZK21 和 ZK40 焊接性良好,而 ZK60 热裂倾向严重,这主要与熔化区沿晶界析出的  $Mg_{51}Zn_{20}$  相呈网状分布有关。Al-Kazzaz 等<sup>[28]</sup>对航空镁合金 ZE41A 的 Nd:YAG 激光焊过程中形成的匙孔和焊缝几何形状进行了计算模拟,并与实验获得的焊缝宽度、熔深和焊缝形状吻合很好。Dhahri 等<sup>[5,6]</sup>对车辆和航空用镁合金 WE43 和 ZE41 采用  $CO_2$  激光进行了焊接工艺研究。戴军等<sup>[29,30]</sup>对 Mg-Nd 稀土合金中的 NZ30K 厚板采用高功率  $CO_2$  激光进行了焊接工艺研究,发现只要工艺合适焊缝成形良好,焊缝区组织细小,HAZ 的宽度和晶粒大小则与热输入相关。高明等<sup>[31]</sup>对 Mg-Mn 合金中的 MB8 进行了  $CO_2$  激光焊研究,结果表明:焊缝熔合区组织主要由粗大的等轴晶组成,晶粒内有连续析出的条纹状  $\beta$ -Mn,晶粒尺寸约为  $60 \mu m$ ;HAZ 组织为相对细小但大小不一的等轴晶,晶粒尺寸为  $15 \sim 40 \mu m$ 。

对于镁合金的激光焊一般采用不加填充材料的自熔焊,但这时往往会产生合金元素烧损、气孔、裂纹及表面凹陷等冶金问题。为了消除这些问题,一般选用与母材成分相同的材料做填充金属,但加入方式各有不同。Wang 等<sup>[32]</sup>采用的是填丝焊工艺,发现选用 AZ31 或 AZ61 焊丝能使 AZ31 镁合金  $CO_2$  激光焊的焊缝成形更加美观。但这种具有自动填丝功能的激光焊接试验系统结构复杂,对送丝的精度要求较高,难以达到。因此,华中科技大学的唐海国等<sup>[33]</sup>提出了一种较为简单的激光补焊工艺来加入填充材料,即先进行自熔焊,然后在焊缝表面的凹坑缺陷内并排放置两根直径 2 mm 的焊丝并采用光斑直径为 3 mm 的激光扫描,熔化焊丝形成补焊接头。另外还有一种填充金属的预置加入方式<sup>[34,35]</sup>,如图 5 所示。图 5(a)<sup>[34]</sup>是在连接界面上表面处预置填充薄带材,适合于薄板的焊接;而图 5(b)<sup>[35]</sup>的预置位置是在连接界面的间隙处,适用于较

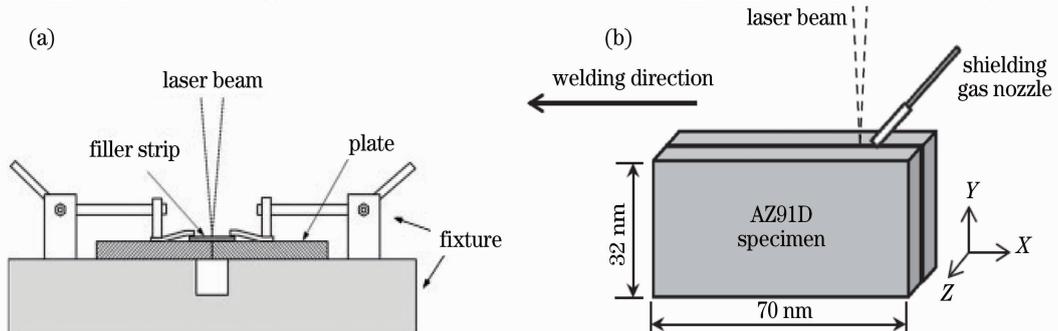


图 5 填充材料的预置方式。(a) 预置在连接界面上表面处; (b) 预置在连接界面间隙处

Fig. 5 Presetting of fill metal. (a) adding on the face; (b) adding in the fitting gap

厚一点的板材。

### 3.2 异质镁合金

随着镁合金的推广应用,出现了异质镁合金之间以及镁合金和其他种类材料之间的焊接要求。文献[36]采用 3 kW 的  $\text{CO}_2$  激光束对 AZ31、AM60、ZK60 异种镁合金进行了焊接研究。结果表明,焊速较快时,熔合区内会出现严重的分层现象,尤其是母材之一为成分差异较大的 ZK60 时这一现象更加显著。只有 AM60/ZK60 接头的熔合区内出现了主要合金元素 Al、Zn 的浓度梯度,其余的 Al、Zn 浓度分布比较均匀。文献[37]则对 AZ31 与 NZ30K 异种材料之间的  $\text{CO}_2$  激光焊接进行了研究,结果发现焊缝在宏观上两种母材成分未完全混合在一起,且相应成分的组织区域呈波浪状夹杂态。刘黎明等<sup>[38]</sup>采用激光-TIG 复合热源对 AZ31B 和 AZ61、AZ31B 和 AZ91D 进行焊接研究,发现接头在整体形态上几乎一致,不存在异质镁合金之间的明显界面,能够完全良好熔合。

### 3.3 镁合金-铝合金

目前,镁合金与其他异质金属材料的激光焊主要集中在镁合金和铝合金之间的焊接。由于两种材料成分和性能的差异,要实现直接的熔化焊比较困难,其中最难解决的问题就是金属间化合物的形成。镁和铝的熔点相差不大(纯镁的熔点为  $651\text{ }^\circ\text{C}$ ,纯铝的熔点为  $660\text{ }^\circ\text{C}$ ),在熔焊时很难控制两者之间生成金属间化合物。但高的焊接速度可以大大减少形成金属间化合物的时间,从而减少金属间化合物的量<sup>[39]</sup>;同时如果采用搭接接头形式,则可以通过减小搭接焊缝熔深来减小金属间化合物层的厚度<sup>[40]</sup>。因此,近年来关于镁和铝异种金属之间的熔化焊方法均以激光焊或激光-电弧复合焊为主,接头形式则几乎都采用搭接。

柳绪静等<sup>[39]</sup>采用激光-TIG 复合热源。在 AZ31B 镁合金与 6061 铝合金板材之间实现了镁合金在上、铝合金在下的搭接焊,结果表明,由于复合热源焊接速度快且对熔池有快速搅拌作用,使镁和铝形成的金属间化合物由连续的层状变成弥散的状态,改善了异种金属镁和铝的焊接性能,焊缝成形均匀、美观。文献[40]对 AZ31B 镁合金和 5052 铝合金的连续 Nd:YAG 激光焊进行了如图6所示的中心搭接焊和边缘搭接接头的数值模拟和对比试验,结果表明:边缘搭接焊可以使底板熔深浅、金属间化合物层薄,并且无论是镁合金在上还是铝合金在上都能焊接成功。文献[41]则对 AZ31B 镁合金和 6061 铝合金的  $\text{CO}_2$  激光焊接进行了两种搭接接头的对比试验,结果表明,中心搭接焊接头易在铝板内的焊缝近缝区和镁、铝板界面的焊缝部位出现凝固裂纹,而边缘搭接焊接头中多种 Mg-Al 系金属间化合物在焊缝中弥散分布,采用适当的激光加工参数可以得到无裂纹的焊缝。

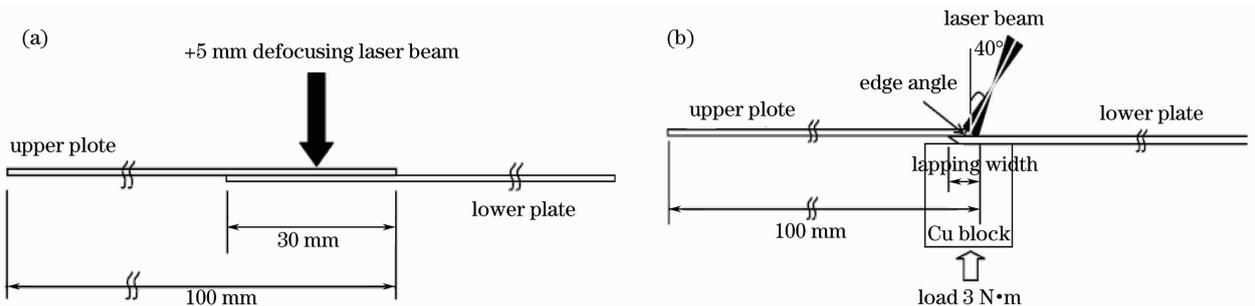


图6 两种搭接接头形式。(a)中心搭接灶焊;(b)边缘搭接焊

Fig. 6 Two types of welding lap joints. (a) center-line welding lap joint; (b) edge-line welding lap joint

为了进一步改善镁合金与铝合金异种材料激光-TIG 复合焊时焊缝的成形和提高接头的性能,有研究者采用了在搭接界面加中间层的方法。文献[42]用 Ce 箔作中间层,虽然 Ce 的加入没有阻止金属间化合物的形成,但可使熔化区的组织均匀,并消除了镁铝过渡区域的裂纹。文献[43]采用加 Fe 中间层的方法来抑制 Mg-Al 金属间化合物的形成,但会形成有害的 Fe-Al 化合物。文献[44]则采用热固化的环氧树脂作中间层,研究结果表明焊缝熔深比激光焊有所增加,原因为:粘接剂的存在增加了铝合金对激光的吸收;粘接剂分解产生的气体可以沿激光扫描方向压紧底板;O 元素改变了液态金属的表面张力从而影响了熔池金属的流动。

### 3.4 镁合金-其他材料

镁和钢熔点差异大,钢的熔点(约为  $1500\text{ }^\circ\text{C}$ )比镁的沸点( $1107\text{ }^\circ\text{C}$ )还高,所以这两种金属很难同时达到

熔融态。而且镁是密排六方结构,钢在熔融态是体心立方结构,它们在液态下极难互溶。另外,镁铁之间也不能形成化合物。因此,要实现镁合金与钢之间的熔化焊几乎不可能。目前只有文献[45]采用激光-氩弧复合热源焊接工艺对 AZ31B 变形镁合金与 304 钢进行了直接的搭接熔化焊试验,在焊接过程中 Fe 被激光脉冲瞬间的高能量密度及其搅拌作用熔化,从而由在 Mg、Fe 过渡区域形成的“竹节状”MgO 相、连续的  $Mg_xFe_yO_z$  复合相等实现了镁、钢异种金属间的有效连接,接头连续、表面成形良好。文献[46]则采用 Ni 作中间层,利用 Ni 与 Mg 之间能生成  $Mg_2Ni$  金属间化合物、Ni 能固溶于 Fe 的特性改变接头的形成机理,从而实现了 AZ31B/Q235 之间的搭接焊。另外,目前的研究还采用了一种所谓的“激光钎焊”方法,即利用两种材料的熔点差,尽量保持熔点高的 Fe 为固态,而仅熔点低的 Mg 熔化后凝固形成焊缝金属。如文献[47]就是在 AZ31B/Q235 对接焊时,采用激光束向镁合金侧偏置(图 7)来限制钢的熔化(仅在焊缝上部出现了 Fe 的少量熔化,中、下部均未熔),从而由熔融的镁合金充当填充材料凝固实现焊接。文献[48]采用的也是激光-TIG 复合热源向镁合金侧偏置的方法,实现了 AZ31B 和 304L 钢之间的焊接。

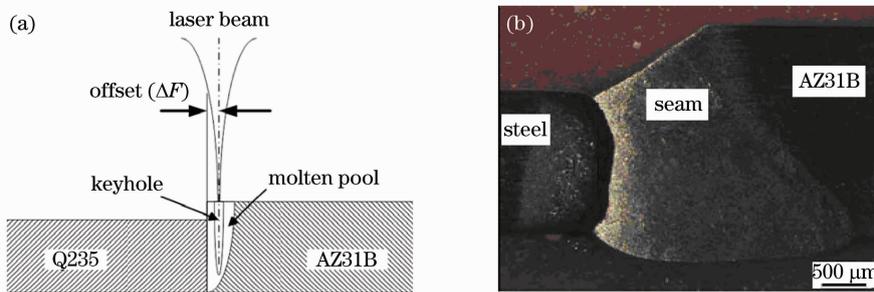


图 7 (a) 激光钎焊结构示意图及 (b) 接头形貌

Fig. 7 (a) Schematic diagram of laser penetration brazing and (b) macrostructure of the joint

除此之外,Wahba 等<sup>[16]</sup>更是实现了镁合金和非金属材料之间的连接,他们采用半导体激光直接对镁合金 AZ91D 和非晶态聚对苯二甲酸乙二酯(PET)搭接接头成功地进行了连接,但是对焊接工艺要求较复杂,尤其要注意 PET 受热分解产生的气体的影响。

## 4 接头性能

### 4.1 力学性能

镁合金通过焊接制成结构件要真正用于实际生产,首先其力学性能应达到使用要求。目前的研究表明,同质镁合金激光焊接头的力学性能较好,即使在不加填充金属的情况下,抗拉强度基本可达到母材的 90% 以上,显微硬度接近或高于母材。王红英等<sup>[49,50]</sup>的研究结果显示,即使不加填充金属,AZ31 和 AZ61 镁合金薄板激光焊接头的力学性能也很好,焊缝区域的显微硬度和抗拉强度都出现了明显高于母材的情况。文献[51]的研究结果表明,AZ31 镁合金激光自熔焊接头的抗拉强度接近母材,断裂源自熔合边界附近的焊缝区产生的缩颈部位,然后裂纹沿焊缝金属-HAZ 扩展;而加 AZ61 焊丝的激光焊接头断裂发生在远离焊缝的母材区。但深入的研究发现焊缝的力学性能表现出明显的各向异性,如文献[24]报道 AZ31B 镁合金 Nd:YAG 激光焊在焊接方向上(与板材轧制方向一致)屈服强度和抗拉强度与母材相当,但伸长率低于母材;而在垂直于焊接方向上接头的屈服强度明显下降,抗拉强度与母材相当,伸长率也低于母材。

异质镁合金焊接接头的力学性能也较好。当 ZK60 与另外两种镁合金连接时,接头的抗拉强度略低于 ZK60 母材;其中一种母材为 AZ31 时,接头的抗拉强度高于母材<sup>[36]</sup>。文献[37]的研究结果显示,AZ91-AM50 激光焊接头拉伸试验时断裂发生在远离熔化区的 AZ91 母材一侧,而静态弯曲试验表明接头的塑性应介于母材 AZ91 与 AM50 之间。对于镁合金与其他材料之间的焊接,接头力学性能不仅与焊接参数有关,而且与工艺方法有很大关系。文献[44]采用热固化的环氧树脂作中间层实现的镁合金与铝合金之间的焊接研究表明,接头的拉剪强度明显高于单一激光焊或胶接的接头,T 型剥离强度也高于胶接接头。

### 4.2 腐蚀性能

众所周知,镁合金对应力腐蚀开裂(SCC)很敏感,这也是限制镁合金工程应用的主要问题之一。因此,

作为焊接结构,镁合金激光焊接头的 SCC 问题也不容忽视。目前已有研究者在关注此问题。文献[23]的对比研究结果显示:AZ31 镁合金激光焊试样在腐蚀环境下具有高的 SCC 敏感性,且在腐蚀介质中,试样的破坏发生在焊缝边界;而在空气中,试样的破坏出现在焊缝或母材区。图 8 给出了不同环境下破坏试样的形貌。Srinivasan 等<sup>[51]</sup>的研究表明,在慢应变速率拉伸(SSRT)试验中,AZ31 母材和两种激光焊接头(加或不加填充金属)在 ASTM D1384 溶液中都对 SCC 敏感,且焊接接头比母材更严重。应力腐蚀裂纹的形成主要是由于试样暴露在腐蚀环境中,表面形成的氢氧化镁/氧化镁层在拉应力作用下造成局部损伤而导致的。盐雾试验表明,焊接接头中的焊缝金属区耐蚀性更好,而加 AZ61 填充金属时在焊缝金属中形成的 Al 富集会形成熔合边界附近的 HAZ 产生电化学破坏。文献[52]的研究则发现等离子电解氧化处理(PEO)可以使母材和接头的断裂延迟,改善其抗 SCC 性能。文献[53]对 AZ31、AZ91 母材及 AZ31-AZ31、AZ31-AZ91 激光-TIG 复合焊接头的抗腐蚀性能开展了对比研究,发现焊缝金属由于晶粒细化使耐蚀性得到了改善,且 AZ31-AZ91 异种材质接头的耐蚀性要好于 AZ31-AZ31 同种材质接头,这主要是由于连续分布的网状  $\beta$  相可以起到降低腐蚀速率、改善接头耐蚀性的作用。

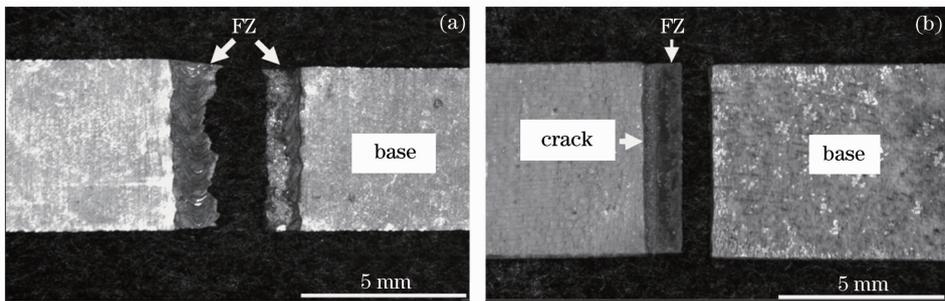


图 8 SSRT 破坏的激光焊 AZ31 试样宏观形貌。(a)空气中;(b)ASTM D384 溶液中

Fig.8 Macrographs of SSRT laser welded AZ31 Mg samples failing. (a) in air; (b) in ASTM D1384 solution

## 5 冶金缺陷

由于镁合金熔点低,线膨胀系数及导热率高,与氧、氮的结合力强,虽然采用激光焊可以解决部分熔化冶金问题,但仍然在焊缝金属中存在一些冶金缺陷。

### 5.1 气孔

在镁合金激光焊的试验中发现,气孔是其产生的主要缺陷之一。目前,关于铝合金激光焊气孔产生机理的研究相对较为成熟,根据其产生原因的不同可分为氢气孔、不稳定匙孔坍塌引起的气孔、熔池表面紊流捕获气体导致的气孔等几种。而镁合金与铝合金的性质相近,其激光焊工艺和过程也基本类似。因此,对于镁合金激光焊气孔的产生原因也可以从上述几方面来考虑。但是镁是低熔点高蒸汽压的元素,相比铝合金激光焊来说,形成的小孔更加稳定,所以匙孔形气孔并不是造成镁合金激光焊气孔的主要原因。而熔池表面紊流捕获的气体是可以保护方式的完善避免的。因此,镁合金激光焊中的气孔主要是氢气孔。镁合金中氢的溶解度在镁由液态转向固态的过程中有一个突变,溶解度降低 60%<sup>[54]</sup>,即在镁合金凝固的过程中,当氢的析出量达到一定程度时,就会以气泡的形式析出,同时激光焊的冷却速度很快,凝固前气泡来不及浮出就会导致气孔产生。另外在特定牌号及工艺下可能会出现镁、锌等低熔点、高蒸汽压元素蒸发导致的气孔<sup>[13]</sup>。

熔池中的氢主要来源于母材中原始含氢量(原始小气孔、扩散氢以及母材表面吸附水)及焊接过程中由周围气氛中溶入的氢(取决于焊接工艺)。后者可以通过工艺调整和参数优化(激光功率、焊接速度、正背面气保护角度及流量、焊前预热等)得到控制<sup>[55]</sup>。也就是说,镁合金激光焊的气孔倾向程度主要取决于母材中的原始含氢量。因此,在工艺参数合适的条件下,变形及砂型铸造镁合金均可获得气孔很少甚至无气孔的焊缝,而压铸镁合金的气孔问题仍然严重。针对此问题,文献[56]的研究发现,压铸镁合金激光焊时获得低气孔率的关键是抑制焊缝金属中原子氢的析出,使其继续以原子形式固溶于焊缝中。单际国等<sup>[57]</sup>提出了如下措施:随焊加热使焊缝及周围区域温度梯度减小,导致最后凝固的熔池金属中氢聚集程度减小而使气孔率降

低;使用含气量低的填充材料对焊缝中的氢进行“稀释”以及提高氢固溶度,可以在较大程度上降低焊缝中的气孔率。利用合金中的氢与 Zr 反应形成稳定化合物  $ZrH_2$  可以显著抑制气孔的产生<sup>[58]</sup>。Zhao 等<sup>[59]</sup>提出的焊后重熔也可以消除压铸镁合金激光焊的部分气孔,降低焊缝中的气孔率。Yu 等<sup>[60]</sup>的研究也表明母材的原始气孔是镁合金激光焊产生气孔的主要原因,但发现触变注射成形 AE42 和 AS41 合金的气孔主要由母材制备过程中捕获的空气引起,成分主要是氮,而氢的影响并不大,同时发现稀土元素对降低气孔率有利,其机理则有待进一步研究。

## 5.2 裂纹

镁合金属于典型的共晶型合金,具有较大的裂纹敏感性,在焊接的不均匀加热及冷却过程中,容易在焊缝和近缝区产生热裂纹,前者为结晶裂纹,后者则为液化裂纹。两者一般呈沿晶扩展,其产生与合金成分有着直接的关系。一般说来,高固溶度和低分配系数的元素(如 Zn 等)会加大凝固温度范围,增加结晶裂纹敏感性,而稀土元素有利于减小裂纹倾向。因此含 Zn 镁合金的激光焊表现出的裂纹问题比较突出。文献[13]的研究发现 ZE41A 镁合金 Nd:YAG 激光焊时在焊缝上表面附近和焊根附近都出现了结晶裂纹。文献[34]的研究表明,ZK60 在激光焊过程中也表现出了较强的裂纹敏感性,自熔焊时在焊缝表面会产生明显的结晶裂纹,如图 9(a)所示。另外在其他镁合金的焊接过程中,由于工艺或材料的原因,也会产生结晶裂纹<sup>[61,62]</sup>,如图 9(b)、(c)所示。HAZ 液化裂纹的产生则直接与晶界低熔点共晶有关。当焊接过程中热输入较大时,靠近焊缝熔化边界处的 HAZ 会产生明显的 PMZ,而 PMZ 中低熔点共晶发生熔化后重新凝固过程中由于拉应力的作用也会产生沿晶界开裂。图 10 所示为两种不同镁合金在激光焊时产生的液化裂纹形貌<sup>[13,62]</sup>。

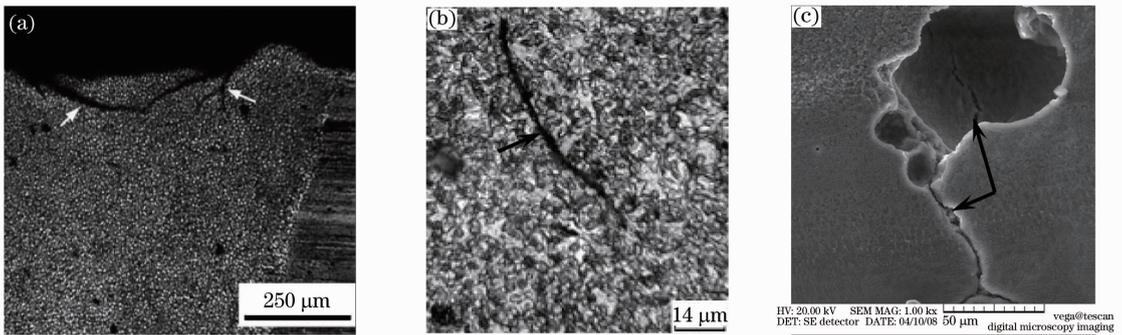


图 9 镁合金激光焊产生的结晶裂纹。(a) ZK60 焊缝表面裂纹;(b) AZ31 焊缝中心裂纹;(c) AZ61 汽孔导致的裂纹  
Fig. 9 Solidification cracking of laser welded magnesium alloy. (a) surface cracks in weld of ZK60; (b) cracks in weld center of AZ31; (c) cracks induced with pore of AZ61

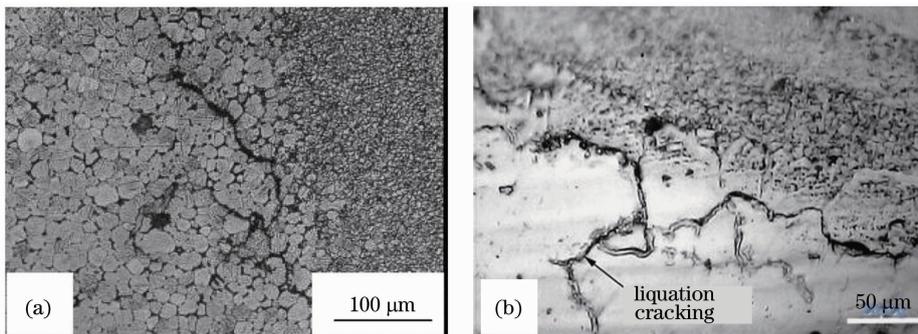


图 10 镁合金激光焊产生的液化裂纹。(a) ZE41A; (b) AZ61  
Fig. 10 Liquation cracking of laser welded magnesium alloy. (a) ZE41A; (b) AZ61

目前关于裂纹的防止措施主要是从焊接工艺的调整和规范参数的优化来考虑的,效果并不太明显。尤其是这方面的系统研究还很少,只有文献[34]对加填充金属的影响进行了研究,结果表明,填充金属的加入可以很好的消除 ZK60 镁合金激光焊焊缝中的结晶裂纹。

## 6 结束语

虽然近年来开展了大量的关于镁合金激光焊接的研究,但离实际的生产应用还有很大一段距离,因此今后应该更深入地进行系统研究。归纳起来,镁合金激光焊接的研究重点主要体现在如下几个方面:

1) 扩大激光焊研究的镁合金材料范围。除了开展常用 Mg-Al 系合金的研究外,更多的关注应投向新开发出的高强、耐热等特殊性能的镁合金;同时加强研究镁合金与异种材料的激光焊研究;对于焊件的厚度也应从薄板扩展到厚大件。

2) 加强镁合金激光焊的理论研究。通过各种模拟软件的应用,建立起对焊接过程温度场的模拟,研究焊接过程中的传热传质、熔池流动以及相应的凝固、相变、热处理及强化机制,以便更好地控制整个凝固过程,并利用模拟技术对接头性能、使用寿命等进行预测。

3) 深入研究激光焊接方法与其他焊接方法复合的焊接技术。通过调整适当的工艺,充分发挥各自优点,进一步提高焊接接头的综合性能。

4) 研制高质量的镁合金焊接材料。加填充金属的镁合金激光焊可以解决自熔焊时的表面成型和内部冶金缺陷问题,但目前由于受到填充金属加入方式的限制还很难应用于实际生产。

5) 建立一套质量评价标准。最好能针对镁合金激光焊接头应用的不同环境制定出不同的性能标准,尤其是除了常规的硬度和抗拉强度外,还应加强对疲劳性能、腐蚀性能等的研究。

## 参 考 文 献

- Zhang Songyang. Forming Technique of Casting-Rolling for Semi-Solid Magnesium Alloy [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008  
张颂阳. 半固态镁合金铸轧成形技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008
- W. A. Baeslack, S. J. Savage, F. H. Froes. Laser-weld heat-affected zone liquation and cracking in a high-strength Mg-based alloy[J]. *J. Mater. Sci. Lett.*, 1986, **5**(9): 935~939
- Liu Qibin. Laser Processing Technology and Its Applications [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007  
刘其斌. 激光加工技术及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007
- A. Weisheit, R. Galun, B. L. Mordike. CO<sub>2</sub> laser beam welding of magnesium-based alloys[J]. *Welding Journal*, 1998, **77**(4): 149~154
- M. Dhahri, J. E. Masse, J. F. Mathieu *et al.*. CO<sub>2</sub> Laser welding of magnesium alloys[C]. *SPIE*, 2000, **3888**: 725~732
- M. Dhahri, J. E. Masse, J. F. Mathieu *et al.*. Laser welding of AZ91 and WE43 magnesium alloys for automotive and aerospace industries[J]. *Adv. Eng. Mater.*, 2001, **3**(7): 504~507
- Wang Jifeng, Liu Liming, Song Gang. Microstructure character of YAG laser welding AZ31B Mg alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2004, **25**(3): 15~19  
王继锋, 刘黎明, 宋刚. 激光焊接 AZ31B 镁合金接头微观组织特征[J]. 焊接学报, 2004, **25**(3): 15~19
- Song Gang, Liu Liming, Wang Jifeng *et al.*. Study of YAG laser welding process on wrought magnesium[J]. *Applied Laser*, 2003, **12**(6): 327~329  
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): 327~329
- S. Taguchi, T. Asahina, H. Tokisue. Microstructure and mechanical properties of pulse YAG laser butt welded of AZ61 magnesium alloy joints[C]. The National Meeting of JWS, 2004. 329~330
- T. Asahina, H. Tokisue. Weld crack and micro structure of YAG laser welded wrought magnesium alloy [C]. The National Meeting of JWS, 2003. 215~216
- L. K. Pan, C. C. Wang, Y. C. Shih *et al.*. Optimising multiple qualities of Nd:YAG laser welding onto magnesium alloy via grey relational analysis[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2005, **10**(4): 503~511
- Pan Lung Kwang, Wang Che Chung, Hsiao Ying Ching *et al.*. Optimization of Nd:YAG laser welding onto magnesium alloy via Taguchi analysis[J]. *Opt. Laser Technol.*, 2004, **37**(1): 33~42
- X. Cao, M. Xiao, M. Jahazi *et al.*. Continuous wave Nd:YAG laser welding of sand-cast ZE41A-T5 magnesium alloys[J]. *Mater. Manufact. Process.*, 2005, **20**(6): 987~1004
- K. Abderrazak, S. Bannour, H. Mhiri *et al.*. Numerical and experimental study of molten pool formation during continuous laser welding of AZ91 magnesium alloy[J]. *Comput. Mater. Sci.*, 2009, **44**(3): 858~866
- Zhu Jinhong, Li Lin, Liu Zhu. CO<sub>2</sub> and diode laser welding of AZ31 magnesium alloy[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2005, **247**(1-4): 300~306
- M. Wahba, Y. Kawahito, S. Katayama. Laser direct joining of AZ91D thixomolded Mg alloy and amorphous polyethylene terephthalate[J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2011, **211**(6): 1166~1174
- Tan Caiwang, Li Liqun, Chen Yanbin *et al.*. Characteristics of fiber laser and CO<sub>2</sub> laser welding of AZ31B magnesium

- alloys[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0603015
- 檀财旺, 李俐群, 陈彦宾等. AZ31B 镁合金的光纤激光与 CO<sub>2</sub> 激光焊接特性[J]. 中国激光, 2011, **38**(6): 0603015
- 18 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*, 2011, **42**(7): 1974~1989
- 19 W. M. Steen. Arc augmented laser processing of materials[J]. *J. Appl. Phys.*, 1980, **51**(11): 5636~5641
- 20 C. J. Page, T. Devermann, J. Biffin *et al.*. Plasma augmented laser welding and its applications[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2002, **7**(1): 1~10
- 21 Song Gang, Liu Liming, Wang Jifeng *et al.*. Laser tungsten inert-gas arc hybrid welding process on wrought magnesium alloy AZ31B[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2004, **25**(3): 31~35
- 宋刚, 刘黎明, 王继锋. 激光-IG 复合焊接镁合金 AZ31B 焊接工艺[J]. 焊接学报, 2004, **25**(3): 31~35
- 22 Gao Ming, Tan Bing, Feng Jiecai *et al.*. Effects of welding parameters on weld shape of laser-MIG hybrid welding of AZ31 magnesium alloy[J]. *The Chinese J. Nonferrous Metals*, 2009, **19**(2): 222~227
- 高明, 谭兵, 冯杰才等. 工艺参数对 AZ31 镁合金激光-MIG 复合焊缝成形的影响[J]. 中国有色金属学报, 2009, **19**(2): 222~227
- 23 K. M. Bobby, W. Dietzel, C. Blawert *et al.*. Stress corrosion cracking behavior of Nd:YAG laser butt welded AZ31 Mg sheet[J]. *Mater. Sci. Eng. A*, 2007, **444**(1-2): 220~226
- 24 R. S. Coelho, A. Kostka, H. Pinto *et al.*. Microstructure and mechanical properties of magnesium alloy AZ31B laser beam welds[J]. *Mater. Sci. Eng. A*, 2008, **485**(1-2): 20~30
- 25 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]. *Materials Characterization*, 2008, **59**(10): 1491~1497
- 26 Wang Zemin, Gao Ming, Tang Haiguo *et al.*. Characterization of AZ31B wrought magnesium alloy joints welded by high power fiber laser[J]. *Materials Characterization*, 2011, **62**(10): 943~951
- 27 Z. H. Yu, H. G. Yan, J. H. Chen *et al.*. Effect of Zn content on the microstructures and mechanical properties of laser beam-welded ZK series magnesium alloys[J]. *J. Mater. Sci.*, 2010, **45**(14): 3797~3803
- 28 H. Al-Kazzaz, M. Medraj, X. Cao *et al.*. Nd:YAG laser welding of aerospace grade ZE41A magnesium alloy: Modeling and experimental investigations[J]. *Mater. Chem. Phys.*, 2008, **109**(1): 61~76
- 29 Dai Jun, Huang Jian, Wu Yixiong. Influence of laser welding parameters on Mg-rare earth alloy welding seam[J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2010, **38**(7): 53~56
- 戴军, 黄坚, 吴毅雄. 激光焊接工艺参数对稀土镁合金焊缝成形的影响[J]. 轻合金加工技术, 2010, **38**(7): 53~56
- 30 Dai Jun, Huang Jian, Li Zhuguo *et al.*. Microstructure and mechanical properties of high power CO<sub>2</sub> laser welded joint of Mg-rare earth alloy NZ30K[J]. *Physics Procedia*, 2010, **5**(A): 511~516
- 31 Gao Ming, Zeng Xiaoyan, Tang Haiguo. Process characterization and joint mechanical properties of CO<sub>2</sub> laser welding of MB8 magnesium alloy[J]. *The Chinese J. Nonferrous Metals*, 2011, **21**(5): 939~945
- 高明, 曾晓雁, 唐海国. MB8 镁合金 CO<sub>2</sub> 激光焊接工艺及接头性能[J]. 中国有色金属学报, 2011, **21**(5): 939~945
- 32 Wang Hongying, Li Zhijun. Effect of filler wire on the joint properties of AZ31 magnesium alloys using CO<sub>2</sub> laser welding[J]. *China Welding*, 2007, **16**(2): 16~21
- 33 Tang Haiguo, Gao Ming, Zeng Xiaoyan. Tensile strength and microstructure of laser welding of AZ31 magnesium alloy thick plates[J]. *Laser Technology*, 2011, **35**(2): 152~157
- 唐海国, 高明, 曾晓雁. 镁合金厚板激光焊缝组织及抗拉强度研究[J]. 激光技术, 2011, **35**(2): 152~157
- 34 Z. H. Yu, H. G. Yan, S. J. Chen *et al.*. Method for welding highly crack susceptible magnesium alloy ZK60[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2010, **15**(5): 354~361
- 35 M. Wahba, M. Mizutani, Y. Kawahito *et al.*. Laser welding of die-cast AZ91D magnesium alloy[J]. *Materials and Design*, 2012, **33**: 569~576
- 36 Quan Yajie, Chen Zhenhua, Gong Xiaosan *et al.*. CO<sub>2</sub> laser beam welding of dissimilar magnesium-based alloys[J]. *Materials Science and Engineering*, 2008, **A496**(1-2): 45~51
- 37 Wei Chengcheng, Huang Jian, Dai Jun *et al.*. Analysis of laser-welded joint of dissimilar magnesium alloys AZ31 and NZ30K[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(12): 1203002
- 魏成澄, 黄坚, 戴军等. 异种镁合金 AZ31 与 NZ30K 激光焊接接头分析[J]. 中国激光, 2011, **38**(12): 1203002
- 38 Liu Liming. Interface behavior and weldability of magnesium alloy and different materials[J]. *Welding and Joining*, 2009, **7**(7): 42~48
- 刘黎明. 镁合金与异质材料焊接接头界面行为及研究焊接性[J]. 焊接, 2009, (7): 42~48
- 39 Liu Xujing, Liu Liming, Wang Heng *et al.*. Microstructure of laser-TIG hybrid welding joint of dissimilar metals of Al and Mg[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2005, **26**(8): 31~34
- 柳绪静, 刘黎明, 王恒等. 镁铝异种金属激光-TIG 复合热源焊接性分析[J]. 焊接学报, 2005, **26**(8): 31~34
- 40 R. Borrisutthekul, Y. Miyashita, Y. Mutoh. Dissimilar material laser welding between magnesium alloy AZ31B and aluminum alloy A5052-O[J]. *Sci. Technol. Adv. Mater.*, 2005, **6**(2): 199~204
- 41 Li Hui, Qian Ming, Li Da. The effect of intermetallic compounds on laser weldability of dissimilar metal joint between

- magnesium alloy AZ31B and aluminum alloy 6061[J]. *Laser Journal*, 2007, **28**(5): 61~63
- 李慧, 钱鸣, 李达. 金属间化合物对 AZ31B 镁/6061 铝异种金属激光焊接性的影响[J]. 激光杂志, 2007, **28**(5): 61~63
- 42 Liu Liming, Liu Xujing, Liu Shunhua. Microstructure of laser-TIG hybrid welds of dissimilar Mg alloy and Al alloy with Ce as interlayer[J]. *Scripta Materialia*, 2006, **55**(4): 383~386
- 43 Qi Xiaodong, Liu Liming. Fusion welding of Fe-added lap joints between AZ31B magnesium alloy and 6061 aluminum alloy by hybrid laser-tungsten inert gas welding technique[J]. *Materials and Design*, 2012, **33**: 436~443
- 44 Liu Liming, Wang Heng, Song Gang *et al.*. Microstructure characteristics and mechanical properties of laser weld bonding of magnesium alloy to aluminum alloy[J]. *J. Mater. Sci.*, 2006, **42**(2): 565~572
- 45 Zhao Xu, Song Gang, Liu Liming. Microstructure of dissimilar metal joint with magnesium alloy AZ31B and steel 304 for laser-tungsten inert gas lap welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2006, **27**(12): 53~56
- 赵旭, 宋刚, 刘黎明. 镁和钢异种金属熔焊接头微观组织分析[J]. 焊接学报, 2006, **27**(12): 53~56
- 46 Qi Xiaodong, Song Gang. Interfacial structure of the joints between magnesium alloy and mild steel with nickel as interlayer by hybrid laser-TIG welding[J]. *Materials and Design*, 2010, **31**(1): 605~609
- 47 Miao Yutang, Han Duanfeng, Yao Jingzheng *et al.*. Effect of laser offsets on joint performance of laser penetration brazing for magnesium alloy and steel[J]. *Materials and Design*, 2010, **31**(6): 3121~3126
- 48 Zeng Zhi, Li Xunbo, Miao Yutang *et al.*. Numerical and experiment analysis of residual stress on magnesium alloy and steel butt joint by hybrid laser-TIG welding[J]. *Comput. Mater. Sci.*, 2011, **50**(5): 1763~1769
- 49 Wang Hongying, Li Zhijun, Chen Feiming. Properties of the CO<sub>2</sub> laser welded joint of AZ31 magnesium alloy sheet[J]. *Welding and Joining*, 2006, (2): 47~50
- 王红英, 李志军, 陈斐明. AZ31 镁合金薄板的 CO<sub>2</sub> 激光焊接接头性能[J]. 焊接, 2006, (2): 47~50
- 50 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): 1388~1393
- 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): 1388~1393
- 51 P. B. Srinivasan, S. Riekehr, C. Blawert *et al.*. Mechanical properties and stress corrosion cracking behaviour of AZ31 magnesium alloy laser weldments[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, **21**(1): 1~8
- 52 P. B. Srinivasan, S. Riekehr, C. Blawert *et al.*. Slow strain rate stress corrosion cracking behaviour of as-welded and plasma electrolytic oxidation treated AZ31HP magnesium alloy autogenous laser beam weldment[J]. *Mater. Sci. Eng. A*, 2009, **517**(1-2): 197~203
- 53 Liu Liming, Xu Rongzheng. Investigation of the corrosion behaviour of laser-TIG hybrid welded Mg alloys[J]. *Corrosion Science*, 2010, **52**(9): 3078~3085
- 54 T. Zeng, T. Klassen, W. Oelerich. Critical assessment and thermodynamic modeling of the Mg-H system [J]. *International J. Hydrogen Energy*, 1999, **24**(10): 989~1004
- 55 Guo Yanbing, Tong Yangang, He Xiaona *et al.*. Effect of laser welding parameters on porosity rate in magnesium alloy[J]. *Hot Working Process*, 2011, **40**(3): 173~176
- 郭彦兵, 童彦刚, 贺晓娜等. 工艺参数对激光焊接镁合金气孔率的影响[J]. 热加工工艺, 2011, **40**(3): 173~176
- 56 Zhang Jing, Shan Jiguo, Wen Peng *et al.*. Formation regularity of pores during laser welding of die-cast magnesium alloys and its mechanism[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0603006
- 张婧, 单际国, 温鹏等. 压铸镁合金激光焊气孔形成规律及原因[J]. 中国激光, 2011, **38**(6): 0603006
- 57 Shan Jiguo, Zhang Jin, Zheng Shiqin *et al.*. Experimental study on pores in laser welding of magnesium alloys[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2009, **38**(S3): 234~239
- 单际国, 张婧, 郑世卿等. 镁合金激光焊接气孔问题的实验研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, **38**(增刊3): 234~239
- 58 Shan Jiguo, Zhang Jin, Zheng Shiqin *et al.*. Experimental study on the reason of pore formation in laser welding of die-cast magnesium alloy[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2009, **45**(8): 1006~1012
- 单际国, 张婧, 郑世卿等. 压铸镁合金激光焊气孔形成原因的实验研究[J]. 金属学报, 2009, **45**(8): 1006~1012
- 59 H. Zhao, T. Debroy. Pore formation during laser beam welding of die-cast magnesium alloy AM60B-mechanism and remedy[J]. *Welding Journal*, 2001, **80**(8): 204~210
- 60 L. Yu, K. Nakata, J. Liao. Weld porosity in fibre laser weld of thixomolded heat resistant Mg alloys[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2009, **14**(6): 554~558
- 61 Min Dong, Shen Jun, Lai Shiqiang *et al.*. Effects of heat input on the low power Nd:YAG pulse laser conduction weldability of magnesium alloy AZ61[J]. *Opt. Lasers Eng.*, 2011, **49**(1): 89~96
- 62 Quan Yajie, Chen Zhenhua, Li Mei *et al.*. Microstructure and properties of wrought magnesium alloy AM60 sheets welded with laser beam[J]. *The Chinese J. Nonferrous Metals*, 2007, **17**(4): 525~529
- 全亚杰, 陈振华, 黎梅等. 变形镁合金 AM60 薄板激光焊的组织与性能[J]. 中国有色金属学报, 2007, **17**(4): 525~529