

文章编号: 1001-3806(2011)02-0152-04

## 镁合金厚板激光焊缝组织及抗拉强度研究

唐海国, 高明\*, 曾晓雁

(华中科技大学 光电子科学与工程学院 武汉光电国家实验室, 武汉 430074)

**摘要:** 为了提高镁合金激光焊接认识程度, 采用高功率 CO<sub>2</sub> 激光焊接了 10mm 厚 AZ31 镁合金, 并对焊缝微观组织和接头抗拉强度进行了研究。在高温作用下, 因为镁元素的高温蒸发与烧损, 焊缝表面会形成难以克服的凹坑缺陷。在实验条件下, 焊缝熔合区微观组织为等轴枝晶, 且随着焊接热输入的减少, 晶粒细化。抗拉强度测试表明, 表面凹坑和焊缝内气孔缺陷是影响接头抗拉强度的主要因素; 在表面凹坑缺陷存在时, 接头抗拉强度最高仅为母材的 74%, 但是, 通过补焊消除该缺陷后, 接头抗拉强度达到母材的 91%。焊缝气孔则是补焊接头表面凹坑缺陷消除后抗拉强度仍然低于母材的主要原因。结果表明, 采用适当方法消除表面凹坑及气孔缺陷是提高厚板镁合金激光焊接接头力学性能的必要方法。

**关键词:** 激光技术; 镁合金; 激光焊接; 抗拉强度; 微观组织; 补焊

**中图分类号:** TG456.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.02.003

### Tensile strength and microstructure of laser welding of AZ31 magnesium alloy thick plates

TANG Hai-guo, GAO Ming, ZENG Xiao-yan

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, School of Optoelectronics Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** To deepen the understanding of laser welding of magnesium alloys, a high power CO<sub>2</sub> laser was employed to join AZ31 magnesium alloy in 10mm thick. Its microstructure and tensile strength of laser welds were studied. Obvious concaves appeared on the welding surface because of serious burning-lost of magnesium at high temperature. Under the experimental conditions, the microstructure of the welding zone was equiaxed dendrites and the grains were refined with the decrease of the welding heat. The tensile test results showed surface concaves and porosities were two main factors affecting the tensile strength. The maximum tensile strength was only 74% of the substrate metal if the surface including concaves. However, it reached 91% of the substrate metal after surface concaves were eliminated by laser repair welding. Besides, the porosities were the main affecting factor inducing the tensile strength of laser repair weld is lower than that of the substrate metal. The results show it is necessary to eliminate the surface concaves and weld porosities in order to increase the mechanical property of laser welding joints.

**Key words:** laser technique; magnesium alloys; laser welding; tensile strength; microstructure; repair welding

## 引言

随着工业上减轻结构质量、降低能耗需求的日益增加, 镁合金因为低密度和优异性能成为关注焦点<sup>[1-2]</sup>。但是, 镁合金较差的冷成形性能限制了其应用。焊接技术能够通过连接简单的铸件制造复杂结构, 是提高镁合金在现代制造中应用范围的必要手段。

当前, 已有多种焊接方法, 比如电弧焊、搅拌摩擦焊、激光焊等应用于镁合金焊接研究并有显著进展<sup>[3-12]</sup>。其中, 激光焊接因为热输入控制精确、接头熔深大、变形小等优点, 成为镁合金焊接关注的焦点<sup>[13-16]</sup>。

现有镁合金激光焊接研究主要集中于厚度小于 3mm 的薄板焊接。即使是其它工艺方式, 也只有电子束焊接用于厚板焊接<sup>[6]</sup>。实际上, 随着板厚的增加, 激光小孔穿透深度和光致等离子体强度的增加将导致工艺稳定性下降, 这导致因镁合金固有物理化学特性而造成的焊缝冶金缺陷, 如表面凹坑、气孔和裂纹等将更为突出, 这些缺陷对接头力学性能有显著影响。另一方面, 重型机车、装甲、铁路等装备的轻型化趋势对镁合金厚板焊接结构件有迫切需求。因此, 镁合金厚

基金项目: 教育部博士点新教师基金资助项目 (200804871013)

作者简介: 唐海国 (1983-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光焊接及激光复合焊接技术的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: mgao@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2010-05-25; 收到修改稿日期: 2010-07-19

板激光焊接对加强镁合金焊接理解和现代工业都具有重要意义。但迄今为止,类似研究还相当缺乏。本文中对10mm厚商用AZ31镁合金激光焊接接头的力学性能和微观组织进行了研究,并针对焊缝表面缺陷对接头力学性能的显著影响,开展了补焊研究。

## 1 试验方法

试验中所采用的激光器为TEM<sub>01</sub>模式的Rofin Sinar TR050 CO<sub>2</sub>激光器,最大功率5kW。激光束反射聚焦,焦距为286mm,聚焦光斑直径为0.6mm。试验材料为挤压成形的变形AZ31镁合金板,厚度10mm,尺寸为100mm×100mm,材料的化学成分(质量分数)为: $w(\text{Al})=0.035\sim 0.045$ , $w(\text{Zn})=0.008\sim 0.014$ , $w(\text{Mn})=0.003\sim 0.006$ ,余量是Mg。采用对接平焊,不预留接头间隙。补焊采用的填充焊丝为冷拔AZ31镁合金焊丝,直径2mm,其成分和母材相同。试验装置如图1所示。同轴喷嘴出口直径为8mm,距离激光焦点

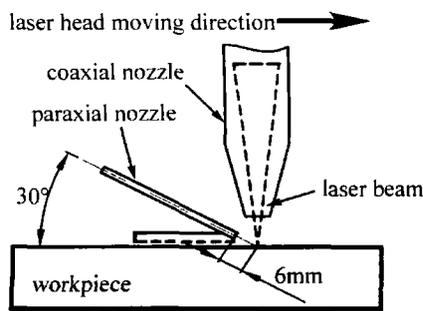


Fig. 1 The set-up of laser welding

35mm;旁轴喷嘴直径为6mm,和工件表面夹角为30°。旁轴喷嘴采用流量为10L/min的He气,同轴喷嘴采用流量为7.5L/min的Ar气。激光补焊工艺以和焊缝No.1所用参量完全相同的接头为基础,然后在焊缝表面的凹坑缺陷内并排放置两根直径2mm的AZ31B焊丝并采用光斑直径为3mm的激光扫描熔化焊丝,形成补焊接头(repair weld, RW)。需要说明的是,本文中所采用的激光焊及补焊工艺参量都基于大量工艺试验进行了优化,具体如表1所示。

Table 1 Welding parameters of laser weld (No. 1 & No. 2) and repair weld

welding parameters	No. 1	No. 2	repair weld
laser power/kW	3.5	4.5	2.5
welding speed/(m·min <sup>-1</sup> )	1.0	2.0	1.5
laser defocused distance/mm	-1	-1	15
laser spot diameter/mm	0.6	0.6	3
heat input/(J·mm <sup>-1</sup> )	210	135	100

金相试样采用苦味酸-乙醇溶液(4.2g苦味酸、10mL醋酸、20mL水、100mL乙醇)腐蚀,金相显微镜观测焊缝微观组织,扫描电镜观察断面形貌,X射线荧光(X-ray fluorescence, XRF)分析方法测量焊缝微区

成分,X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)检测焊缝物相结构。拉伸试样按照GB/T 228-2002制备并在常温下按照标准程序进行测试。所有结果均为同一焊缝上截取的3个拉伸试样测试结果的平均值。

## 2 试验结果及讨论

### 2.1 焊缝形貌

如图2a和图2b所示,激光接头表面存在凹陷缺

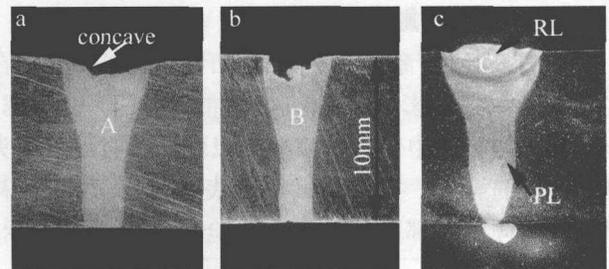


Fig. 2 Weld transverse morphologies

a—No.1 b—No.2 c—RW

陷,这种缺陷决定于焊接过程中焊缝金属的损耗。首先,焊缝熔透后,根部下垂会消耗部分焊缝金属。其次,镁合金具有低沸点(1100℃)、高蒸气压的特性,在激光小孔的高温作用下会蒸发烧损并造成焊缝金属的减少。再者,镁合金的高凝固收缩率会造成焊缝金属凝固后体积缩小。最后,单纯激光焊接缺乏填充材料的有效补充。研究发现,这种决定于镁合金固有物理化学特性的缺陷很难通过简单的工艺参量调整得到消除,尤其是本研究所焊接的厚板材料。作者在前期工作中虽然经过大量的工艺优化手段,包括提高接头对接面的加工精度、采用背部衬垫、改变工艺参量等方法,但是,因为激光小孔及等离子的高温作用,镁元素烧损相当严重,焊缝表面的这种凹陷或凹坑缺乏有效的抑制方法。实际上,在以往开展的镁合金薄板和小功率激光焊接研究中,这种现象也非常明显<sup>[8-11]</sup>。

但是,如图2c所示,经过补焊后该缺陷消除,焊缝饱满。此外,因为成形过程不同,激光补焊焊缝分为两层。为了后续讨论,将其分别定义为补焊层(repair layer, RL)和熔透层(penetrated layer, PL)。

### 2.2 微观组织

如图3所示,熔合区微观组织表现为树枝晶结构,由亮色 $\alpha$ -Mg枝晶轴和轴间暗色组织组成。因为激光焊接熔池的快速凝固,部分 $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>相会在非平衡凝固过程中形成于轴间暗色组织中。其次,熔合区晶粒大小和热输入有很好的对应关系。随着热输入的降低,熔池凝固速率加快,焊缝No.1, No.2和补焊层晶粒依次变小,尺寸范围分别约为35 $\mu\text{m}\sim 50\mu\text{m}$ , 20 $\mu\text{m}\sim 30\mu\text{m}$ 和10 $\mu\text{m}\sim 12\mu\text{m}$ 。

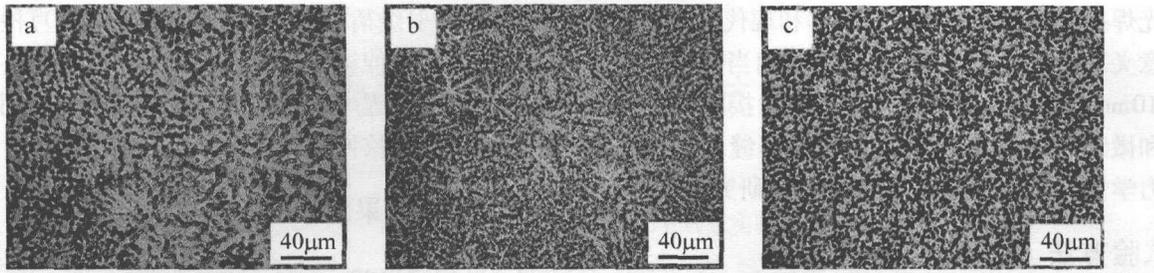


Fig. 3 Microstructure of weld metal (corresponding to the boxes marked in Fig. 2)

a—No. 1 b—No. 2 c—RL

### 2.3 抗拉强度及影响机理分析

如图2所示,激光焊缝表面凹陷深达1.5mm,在实际生产中必然影响结构机械性能,必须予以考虑。作者在拉伸测试中保留了该缺陷以验证其对焊接接头拉伸性能的影响。拉伸测试结果表明,激光焊接及补焊接头拉伸试样都断裂于焊缝熔合区。如图4所示,

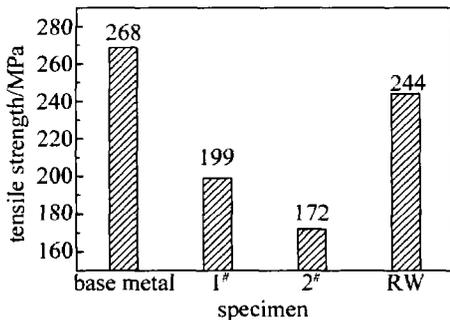


Fig. 4 Tensile strength of laser weld and repair weld

激光焊接接头抗拉强度最高仅为199MPa(No. 1),为母材的74%;而补焊接头的抗拉强度远高于激光焊缝,达到244MPa,为母材的91%。如图5a和图5b所示,表面凹坑缺陷处有明显的断裂痕迹,断面上有大量

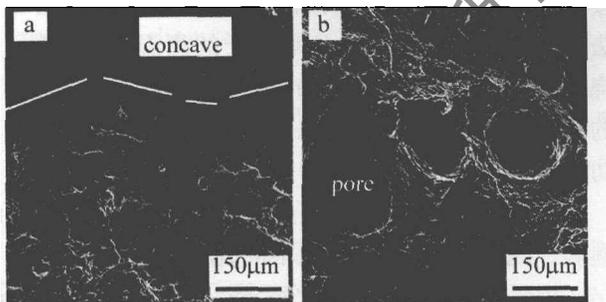


Fig. 5 Fracture morphologies of laser weld No. 2

气孔出现。结合拉伸强度测试结果,这两种缺陷应该是激光焊接接头拉伸强度降低的主要原因。

**2.3.1 表面凹坑的影响** 对激光焊缝来说,表面凹坑缺陷相当于一个缺口。因为镁合金对缺口敏感性很强,在拉伸过程中,该位置因为应力集中成为裂纹扩展源,导致激光焊接接头拉伸强度急剧降低。比较接头No. 1和补焊接头可以发现:在消除表面凹坑缺陷后,补焊接头拉伸强度提升幅度达22.6%。

**2.3.2 焊缝气孔的影响** 在同样具有凹坑缺陷的情况下,焊缝No. 2的晶粒比焊缝No. 1更为细小,根据

Hall-Petch原理,其拉伸强度应该高于No. 1,但结果恰恰相反。通过图6所示的断口形貌可以发现,焊缝

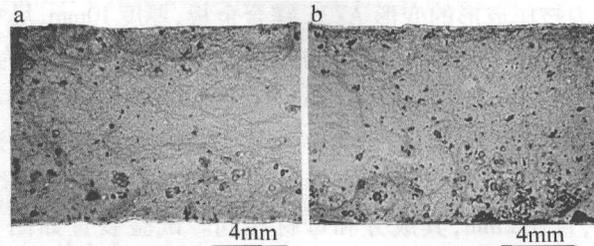


Fig. 6 Macro morphologies of fracture surfaces

a—No. 1 b—No. 2

No. 2更高的气孔率是导致这种现象的主要原因。焊缝No. 1和No. 2的气孔率分别为0.853个/mm<sup>2</sup>和1.588个/mm<sup>2</sup>。

研究表明<sup>[17-18]</sup>,气孔是镁合金激光焊缝的主要缺陷。因为更低的热输入和更高的焊接速率,焊缝No. 2具有比No. 1更快的凝固速率和稳定性更差的激光小孔。这造成其熔池内气泡更多且逸出难度更大,最终气孔率更高。对焊缝来说,气孔率越高,裂纹形核数目越多,扩展速率越快,接头强度越低。这也是补焊接头在消除凹坑缺陷后,其拉伸强度仍然低于母材的主要原因。

**2.3.3 补焊接头强度增强机理探讨** 首先,补焊层使得焊缝金属和母材过渡更为圆滑自然,消除了焊缝表面缺陷因应力集中对接头强度的影响。其次,激光补焊属于热传导焊,熔池内不存在小孔、光致等离子体等不稳定性因素,其气泡形成倾向降低。而且,原来存在于熔透层顶部的部分气孔,会在补焊重熔过程中再次形核长大并逸出熔池。导致焊缝内气孔有所减少,有利于接头强度的提高。最后,补焊工艺类似于激光熔覆,热输入很小,其快速熔化凝固过程使得补焊层形成细小晶粒。根据Hall-Petch原理,这有助于接头力学性能的提高。

### 2.4 接头断面特征

如图7所示,激光焊缝无论是熔透层还是补焊层都表现为韧-脆混合断裂形式,断面有韧窝和脆性撕裂棱。这和焊缝微观结构有很好的对应关系。熔和区主要组织为塑性良好的 $\alpha$ -Mg,形成韧窝;脆性 $\beta$ 相在枝

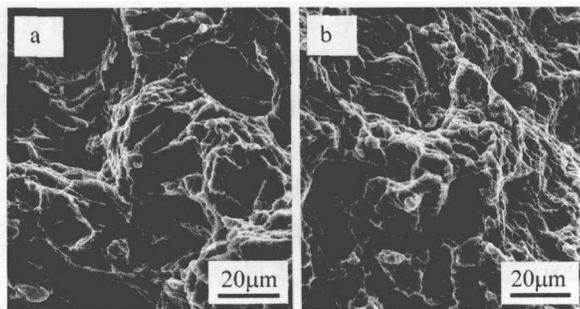


Fig. 7 Scanning electronic microscope photos of joint fracture surfaces of repair weld

a—PL b—RI.

晶轴间的析出会割裂基体,形成脆性撕裂棱。但是,补焊层内的韧窝和撕裂层更细小。这和两者的晶粒尺寸有很好的对应关系:补焊层的细小晶粒增加了该区域的断裂难度,从而获得更细小的韧窝和撕裂棱。

### 3 结论

(1) 因为镁合金的高温蒸发烧损,镁合金厚板激光焊缝表面极易形成凹坑缺陷,且在纯激光焊接中难以通过参量调整得到有效消除。但是,激光补焊工艺能对厚板镁合金激光焊缝的表面缺陷进行有效修补,且补焊区晶粒细小,无气孔缺陷。

(2) 焊缝微观组织为等轴枝晶,主要有  $\alpha$ -Mg 和少量  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 相组成。其次,降低焊接热输入有利于焊缝组织细化。

(3) 表面凹坑和焊缝内气孔缺陷是影响焊接接头抗拉强度的主要因素。在存在表面凹坑缺陷时,接头抗拉强度最高仅为母材的 74%。但是,通过补焊消除该缺陷后,接头抗拉强度提高至母材的 91%。焊缝气孔则是补焊接头表面凹坑缺陷消除后抗拉强度仍然低于母材的主要原因。

#### 参考文献

- [1] FRIEDRICH H E, MORDIKE B L. Magnesium technology [M]. Berlin: Springer, 2006: 63-107.
- [2] CHEN Z H, YAN H G, CHEN J H, *et al.* Magnesium alloys [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 1-25 (in Chinese).
- [3] LIU L M, WANG J F, SONG G. Hybrid laser-TIG welding, laser beam welding and gas tungsten arc welding of AZ31B magnesium alloy [J]. Materials Science and Engineering, 2004, A381(1/2): 129-133.
- [4] WOHLFAHRT H, RETHMEIER M, BOUAIFI B, *et al.* Metal-inert gas welding of magnesium alloy [J]. Welding and Cutting, 2003, 55(2): 80-84.
- [5] XING L, KE L M, SUN D C, *et al.* Friction-stir eelding of MB8 magnesium alloy sheet [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 22(6): 18-21 (in Chinese).
- [6] CHI C T, CHAO C G, LIU T F, *et al.* A study of weldability and fracture modes in electron beam weldments of AZ series magnesium alloys [J]. Materials Science and Engineering, 2006, A435/436: 672-680.
- [7] SUN Z, PAN D, WEI J. Comparative evaluation of tungsten inert gas and laser welding of AZ31 magnesium alloy [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2002, 7(6): 343-351.
- [8] LIU L M, WANG J F, SONG G. Hybrid laser-arc welding of AZ31B Mg alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(2): 1523-1526 (in Chinese).
- [9] FENG J C, WANG Y R, ZHANG Z D. Status and expectation of research on welding of magnesium alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(2): 165-178 (in Chinese).
- [10] KANNAN M B, DIETZEL W, BLAWERT C, *et al.* Stress corrosion cracking behavior of Nd: YAG laser butt welded AZ31 Mg sheet [J]. Materials Science and Engineering, 2007, A444(1/2): 220-226.
- [11] QUAN Y J, CHEN Z H, YU Z H, *et al.* Microstructure and properties of joints of wrought magnesium alloy AM60 plates welded by laser beam welding [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(4): 525-529 (in Chinese).
- [12] QUAN Y J, CHEN Z H, GONG X S, *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.
- [13] WU Q, XU L Y, CHEN G Y, *et al.* Experimental study about CO<sub>2</sub> laser welding of galvanized sheet [J]. Laser Technology, 2007, 31(6): 571-574 (in Chinese).
- [14] CAO X, JAHAZI M, IMMARIGEON J P, *et al.* A review of laser welding techniques for magnesium alloys [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 171(2): 188-204.
- [15] WU Q, XU L Y, CHEN G Y, *et al.* Corrosion property of the laser welded joint of high-strength galvanized sheet [J]. Laser Technology, 2008, 32(3): 334-337 (in Chinese).
- [16] YU Y C, WANG C M, DENG Y P, *et al.* Microstructure and properties of YAG-MIG hybrid welding joint of ZL-114A aluminum alloy [J]. Laser Technology, 2008, 32(6): 601-604 (in Chinese).
- [17] ZHAO H, DEBROR T. Pore formation during laser beam welding of diecast magnesium alloy AM60B-mechanism and remedy [J]. Welding Journal, 2001, 80(8): 204-210.
- [18] PASTOR M, ZHAO H, DEBROY T. Continuous wave Nd: yttrium-aluminium-garnet laser welding of AM60B magnesium alloys [J]. Journal of Laser Application, 2000, 12(3): 91-100.