

文章编号: 1001-3806(2016)01-0015-05

## 高功率光纤激光非熔透焊接 5A06 铝合金

陈根余<sup>1,2</sup>, 黎长邹<sup>2</sup>, 周 聪<sup>1,2</sup>, 张 焱<sup>2</sup>, 夏海龙<sup>2</sup>

(1. 湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082; 2. 湖南大学 激光研究所, 长沙 410082)

**摘要:** 为了解决高功率光纤激光非熔透焊接 5A06 铝合金过程中, 焊接熔深的控制、合金元素的烧损、焊缝表面质量的改善等方面难以兼顾的问题, 采用固定激光功率和正面焊接保护气的方法, 通过改变单一焊接参量, 研究了焊接速率、离焦量、搭接板间间隙的变化对焊缝表面质量的影响, 并对焊缝内部镁元素的分布规律进行了理论分析和实验验证。结果表明, 焊缝的硬度与镁元素的分布相一致; 由于熔合线附近晶粒细化和母材镁元素扩散的共同作用, 使熔合线附近的硬度高于其它部位; 优化参量后的非熔透激光焊接头强度大于电弧铆焊接头, 间隙为 0.2mm 的时候, 激光焊接头强度最大, 为母材抗拉强度的 68.1%。这一结果对指导工业中的铝合金非熔透激光焊接是有帮助的。

**关键词:** 激光技术; 激光焊接; 非熔透焊接; 5A06 铝合金

中图分类号: TG456.7 文献标志码: A doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.01.004

## Partial penetration welding of 5A06 aluminum alloy with high power fiber laser

CHEN Genyu<sup>1,2</sup>, LI Changzou<sup>2</sup>, ZHOU Cong<sup>1,2</sup>, ZHANG Yan<sup>2</sup>, XIA Hailong<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Institute for Laser Research, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** In order to solve the problems such as the control of welding penetration, the loss of alloy element and weld surface quality in the process of partial penetration welding of 5A06 aluminum alloy with high power fiber laser, the effects of welding speed, defocusing amount, and lap plate gap on the quality of weld surface were studied by changing one of the welding parameters at fixed laser power and positive welding protective gas. The distribution rule of magnesium element was analyzed theoretically and verified experimentally. The test results show that weld hardness is consistent with the distribution of magnesium element. Due to the common effect of grain refinement and magnesium element diffusion of parent metal, the hardness near fusion line is greater than the other parts. The strength of laser partial penetration welding joint with optimized parameters is greater than the strength of arc riveting joint. When the clearance is 0.2mm, the strength of laser welding joint is highest and can reach 68.1% of the tensile strength of the parent material. The results are helpful to guide the partial penetration laser welding of aluminum alloy.

**Key words:** laser technique; laser welding; partial penetration welding; 5A06 aluminum alloy

### 引 言

5A06 铝合金为 Al-镁系合金, 具有耐蚀性好、比强度高、退火后焊接性能好等优点, 在航空、航天、汽车、化学工业等场合得到广泛应用<sup>[1]</sup>。为保证箱体内部元器件的工作环境, 箱体外的加强筋都采用非熔透焊接, 较为普遍的是电弧铆焊, 通过填充焊丝改善焊点的性能, 但是焊点表面会有很大的凸起, 箱体内部容易产

生变形, 加强筋与箱体的搭接边尺寸大, 不仅浪费材料, 还增加了箱体的重量。激光具有优良的传输和聚焦性能, 聚焦后可以达到很高的功率密度, 而且作用时间短、焊接速度快、热影响区小、焊缝组织细小致密, 接头可以达到很高的性能和极小的变形。使用激光不仅可以点焊, 而且可以很容易实现快速的连续缝焊, 达到比单个焊点强度高得多的焊接接头。随着激光焊接技术在工业中的应用越来越普遍<sup>[2]</sup>, 铝合金激光焊接技术也成了各行业的研究热点<sup>[3-9]</sup>, 但这些研究都是针对熔透焊的情况, 非熔透激光焊接鲜有报道<sup>[10-11]</sup>, 暂未见到激光非熔透焊接 5A06 铝合金的研究。

光纤激光器体积小、效率高、易于集成, 对环境的要求低于传统的 CO<sub>2</sub> 激光器和固体激光器, 光束质量好、使用光纤传输很容易实现柔性加工。光纤激光器近年来发展迅猛, 是激光焊接领域的热点之一, 在激光

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51175165); 湖南省自然科学基金资助项目(14JJ3057)

作者简介: 陈根余(1965-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为激光技术及其数字化加工装备、汽车车身激光制造技术、激光微细加工技术。

E-mail: hdgychen@163.com

收稿日期: 2014-12-17; 收到修改稿日期: 2015-01-28

加工领域得到了广泛的青睐<sup>[12]</sup>。本文中采用 6kW 高功率光纤激光器对 5A06 铝合金进行了非熔透搭接焊研究,分析了焊接参量对接头形貌及合金元素烧损的影响规律,对接头的性能进行了检测,并与传统电弧钨焊接头强度进行了对比。

## 1 试验条件及方法

铝合金激光焊接系统如图 1 所示。使用 YLS-6000-CW 光纤激光器配合 KUKA 6 轴联动机器人,激光器最大输出功率为 6.0kW,连续输出方式,波长为 1.07 $\mu\text{m}$ ,模式为 TEM<sub>01</sub>。激光束经过焦距为 150mm 准直镜和焦距为 200mm 的聚焦镜组成的准直聚焦系统后,聚焦光斑直径为 0.4mm。

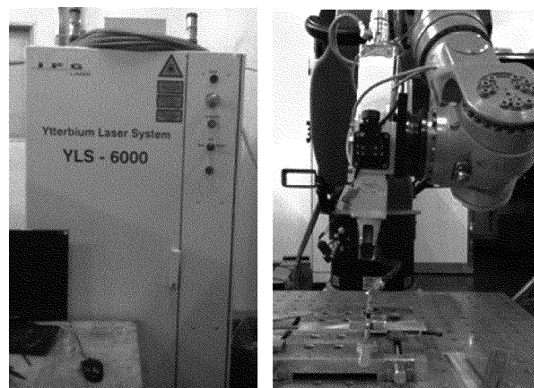


Fig. 1 Laser welding equipment

试验板材为 5A06 铝合金,材料尺寸为 150mm × 50mm × 2mm 和 150mm × 50mm × 3.5mm。材料化学成分见表 1。

Table 1 Chemical composition (mass fraction) of welding materials

material	w(Si)	w(Cu)	w(Mg)	w(Zn)	w(Mn)	w(Ti)	w(Fe)	w(Fe)	w(Al)
5A06	0.004	0.001	0.058 ~ 0.068	0.002	0.005 ~ 0.008	0.0002 ~ 0.001	0.00001 ~ 0.00005	0.004	balance

为使试验结果尽量准确,焊接前用棉球蘸上丙酮清洗、擦拭板材表面,去除板材表面的污迹、油脂,然后用钢丝刷刷去表层氧化膜,直到露出金属光泽,最后用无水乙醇清洗掉钢丝刷刷下来的粉末。焊接过程中的固定参量如下:激光功率 6kW,采用高纯氩气进行侧吹保护,侧吹角度为 60°,保护气体流量为 20L/min。考虑到铝合金的高反射率,为保护焊接头内聚焦系统,试验中焊接头逆着焊接方向偏转 15°,试验参量变化见表 2。

Table 2 Experimental parameters

parameters	value
welding speed/(m · min <sup>-1</sup> )	4.8, 5.4, 6, 6.6, 7.2
defocus/mm	-3, 0, +3, +5
lap gap/mm	0, 0.2, 0.4, 0.6

## 2 焊接参量对焊缝形貌的影响

### 2.1 焊接速率

5A06 铝合金激光焊接时,焊接速率是影响熔池形状和焊缝表面质量的重要参量,采用较高的焊接速率可以得到成形良好的焊缝,不同焊接速率下的焊缝表面形貌如图 2 所示。其它参量为:激光功率 6kW,离焦量为 +5mm,保护气流量 20L/min。焊接速率为 4.8m/min 时,由于线能量输入较大,材料气化损失大,所以焊缝边沿存在咬边,而且有轻微飞溅产生,焊缝表面凹凸不平。随着焊接速率提高到 7.2m/min,线能量输入减小,熔化材料减少,导致焊缝熔宽变窄,材料气化量也进一步减小,没有飞溅、咬边缺陷,焊缝表面成形良好。但是焊接速率过高,会过大削减焊缝的熔深

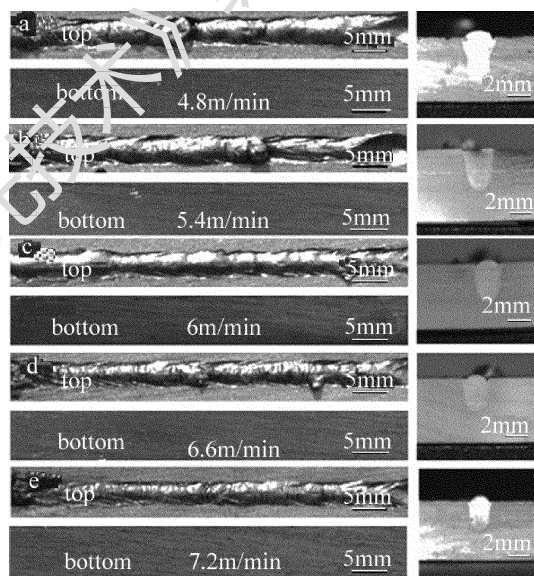


Fig. 2 Welding surface morphology at different welding speeds

和结合面宽度,由于非熔透接头主要承受剪切载荷,结合面宽度的降低会削弱接头的承载能力,所以焊接过程中要综合考虑结合面熔宽和咬边、飞溅等缺陷的控制,选取合适的焊接速率,不仅可以使焊缝强度达到最优,而且可以把表面缺陷抑制到最低程度。

### 2.2 离焦量

离焦量与光斑尺寸关系密切,决定着到达焊接材料表面及小孔内的能量密度,正离焦焊接时,小孔壁多重反射菲涅耳吸收主要发生在小孔开口附近,此时激光束的穿透能力有限,大部分能量被表层材料吸收,所以焊缝呈现宽而浅的特征。负离焦焊接时,入射激光被小孔壁多重反射深入到小孔深处,能量大部分被小孔壁吸收,此时激光束的穿透能力强,所得到的焊缝

窄而深。图 3 所示是不同离焦量时的焊缝形貌,其它参量为:激光功率 6kW,焊接速率 7.2m/min,保护气流量 20L/min。在离焦量为 -3mm 的时候,材料被烧穿,背面出现不连续的焊缝,由于 5A06 铝合金熔化状态时流动性强,此时焊缝上表面出现了严重的塌陷、咬边,下表面出现了喷射状的驼峰。考虑到非熔透搭接接头的承载特点,应取正离焦焊接,以提高接头的抗拉剪能力。

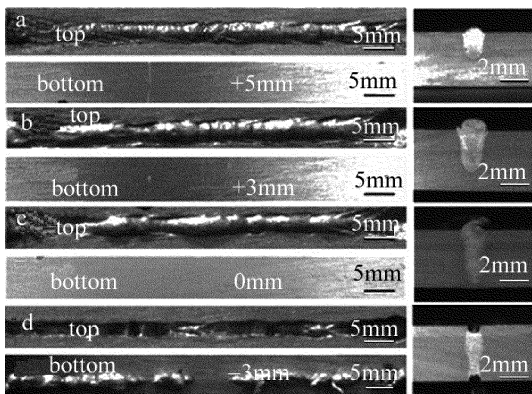


Fig. 3 Welding surface morphology under different defocuses

### 2.3 搭接间隙

激光搭接焊时,在两板之间预留一定量的间隙,不仅有利于抑制焊缝中气孔等缺陷的产生,而且由于重力的作用,上层材料熔化后融入间隙,有利于增大两板熔合区的面积,提高接头的承载能力。固定激光功率 6kW,焊接速率  $v = 5.4\text{m/min}$ ,离焦量为 +5mm,保护气流量为 20L/min,通过改变搭接板间的间隙,研究接头形貌的变化情况。从图 4 中可以发现,零间隙的时候,焊缝表面凹凸不平,有少许驼峰和凹坑缺陷,预留 0.2mm 间隙之后,焊缝表面平整,没有塌陷、咬边、飞溅等缺陷。这主要是因为激光焊接铝合金时,空气和保护气中的水分以及氧化膜中吸附的水分会逐步分解产生氢,这些氢溶入过热的焊接熔池,随后在熔池的冷却结晶过程中析出,产生气泡,部分气泡在熔池中会上浮溢出,零间隙情况下,气泡只能从熔池上部逸出,气泡逸出的过程中熔池迅速冷却,所以会导致焊缝表面凹凸不平,甚至出现凹坑。但是预留一定量间隙之后,

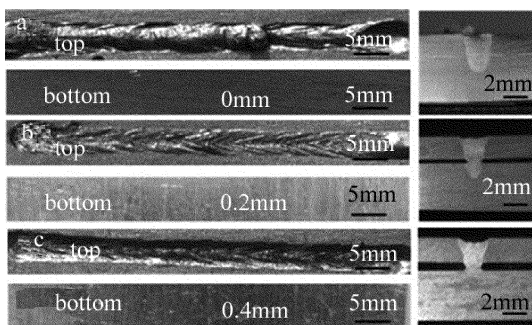


Fig. 4 Effect of plate gap on weld surface morphology

气泡不仅可以从熔池上面溢出,还可以从两板之间的间隙溢出,所以焊缝表面更加平整<sup>[13-14]</sup>。

由于间隙的存在,上层板吸收激光热量后不能将能量立即传递给下层板,下层板只能通过上板的熔滴和形成小孔后深入小孔的激光束吸收能量,由于激光焊接的速率很快,下层板吸收能量的时间有限,所以导致熔深变浅,过大的间隙会使上板熔池内的金属表面张力无法克服自身重力,引起焊缝塌陷,如图 4c 所示。

### 3 镁元素在焊缝中的分布

铝的沸点为 2467℃,而镁的沸点为 1107℃,远低于铝的沸点,激光焊接 5A06 铝合金的时候,不可避免会有一些镁元素被烧损,从而与母材相比,焊缝中的镁元素含量会有所降低。图 5 所示为焊缝能谱采样点位置,其它焊接参量为:焊接速率 7.2m/min、离焦量 +5mm、板间间隙为 0mm。结果见表 3,由焊缝中心线向两侧热影响区方向,镁元素的烧损程度逐渐降低,沿焊缝表面往熔深方向,镁元素的烧损程度逐渐降低。

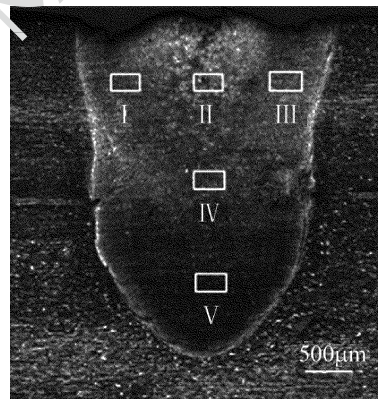


Fig. 5 Sample of weld spectrum

Table 3 Magnesium content (mass fraction) of different welding parts

base metal	I	II	III	IV	V
0.060	0.0425	0.0345	0.0401	0.0377	0.0471

焊缝中镁元素的分布情况与焊接过程中熔池内液态金属的流动状态有关。激光深熔焊接的特点在于存在小孔效应,焊接过程中,激光照射到小孔前沿孔壁使前沿孔壁材料熔化,熔化材料在气化反冲力和蒸汽流作用力的驱动下流向小孔后方,形成熔池后沿。熔池沿焊接速率反方向被拉长,小孔周围的温度梯度分布不均匀,小孔前沿温度梯度大于小孔后沿温度梯度,根据 Mrangoni 效应,表面温度梯度会引起表面张力梯度,熔融金属会从表面张力低的地方流向表面张力高的地方,所以小孔周围的液体金属不断流向熔池两边,小孔前沿的液态金属不断流向小孔后沿。焊接过程中,熔池表面和内部液态金属的流动不断搅拌熔池,导致熔池底部的物质不断被带到熔池上部<sup>[15]</sup>。

小孔深熔焊接时,与激光束直接接触的材料表面镁元素最先被烧损,而后由于熔池的搅动,熔池底部镁元素一部分被带到熔池表面,一部分则被多重反射深入小孔内部的激光能量烧损掉,在高速焊接条件下,熔池迅速凝固,熔池中的镁元素便形成了表3所示的分布格局。

#### 4 焊接接头的力学性能检测

##### 4.1 焊缝的金相组织

高功率激光焊接是一个快速加热和冷却的过程,短暂的加热过程之后,热源迅速远离,熔池快速冷却,凝固成焊缝,继续冷却过程中会发生固态相变。由于冷却速率快,焊缝组织和成分会出现不均匀现象,因此分析焊缝的冷却过程和组织具有重要意义。

图6所示为焊缝的金相组织,焊接过程中,焊缝中心过冷度大,形核率高,散热均匀,所以组织致密,为等轴树枝晶。由于基体导热能力强,熔合线附近冷却时有较大过冷度,导致基体与熔池之间晶粒具有很强的方向性,且热影响区晶粒大于焊缝中心区晶粒。

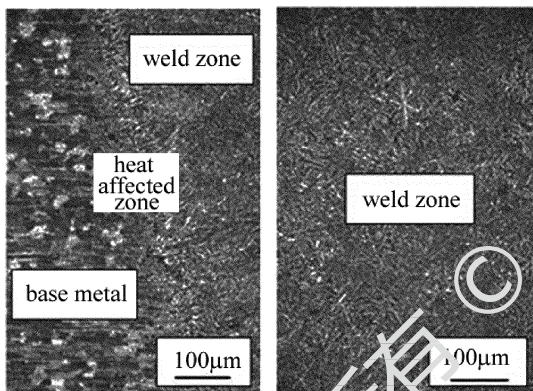


Fig. 6 Microstructure of weld seam

##### 4.2 焊缝的显微硬度

焊缝的显微硬度与其显微组织以及镁元素的分布密切相关,对焊缝进行显微硬度测试,载荷300g,加载时间10s,每间隔0.2mm采样一次。结果如图7所示。焊缝垂直方向,靠近表面的硬度值最低,这是因为高功率激光焊接条件下,焊缝表面镁元素烧损最为严重,虽然熔池搅拌能补充一部分镁元素,但是并不能完全抵消烧损的影响,远离焊缝表面的位置,由于激光束能量的衰减,镁元素的烧损量有所减少,所以在熔深方向,焊缝的硬度呈增加趋势。

在水平方向,焊缝中心线的硬度最低,远离焊缝中心线,硬度逐渐升高,熔合线附近的硬度值高于母材和焊缝,与金相组织分析的结果有差异,这是因为镁元素在液态铝中的溶解度较大,焊接过程中焊缝边沿母材的镁元素会向熔池中扩散,导致熔合线附近的镁元素

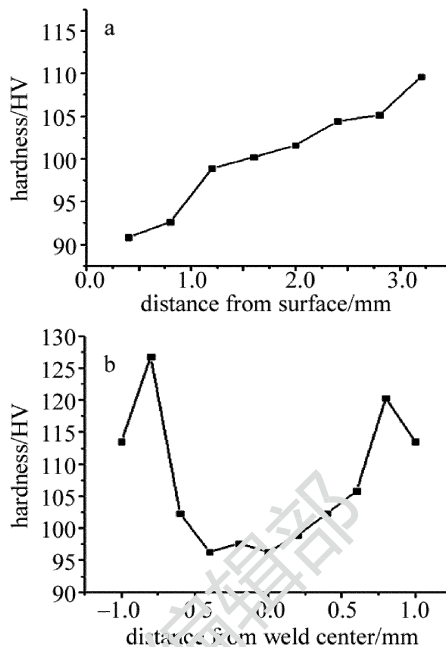


Fig. 7 Weld hardness

a—vertical distribution b—horizontal distribution

烧损量减少,而且激光焊接能量密度高,熔合线附近温度梯度大,焊缝冷却速率快,焊缝晶粒细小,对提高焊缝的硬度也有很大的作用<sup>[5]</sup>。

##### 4.3 焊缝的拉伸性能

为使试验结果尽量与工业生产情况相近,采用非标准拉伸试样在Rager拉伸试验机上进行剪切拉伸试验,力的加载速率为2mm/min,接头的强度用最大拉剪载荷除以结合面的面积计算得出。由于板厚相差较大,为抵消剪切拉伸试验过程中的偏心力矩作用,在夹头处分别垫上与另一块板厚度相同的垫片。取激光功率6kW,焊接速率5.1m/min,离焦量+5mm,保护气流量20L/min,激光焊接试样焊缝长度统一为45mm,剪切拉伸试验结果如图8、图9、图10所示。电弧铆焊断口面积为113mm<sup>2</sup>,激光焊断口面积为90mm<sup>2</sup>,计算得到电弧铆焊的接头强度为108.1MPa,约为母材抗拉强度的34.3%;零间隙条件下,激光焊接头强度为164.89MPa,约为铝合金母材抗拉强度的52.3%;预留0.2mm间隙的时候,接头强度达到214.67MPa,为母材抗拉强度的68.1%。焊前预留一定量的间隙有助于提高搭接接头的抗剪强度,是因为预留间隙不仅降

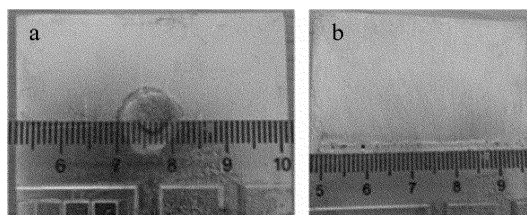


Fig. 8 Tensile fracture of shear specimens

a—rivet weld joint b—laser weld joint

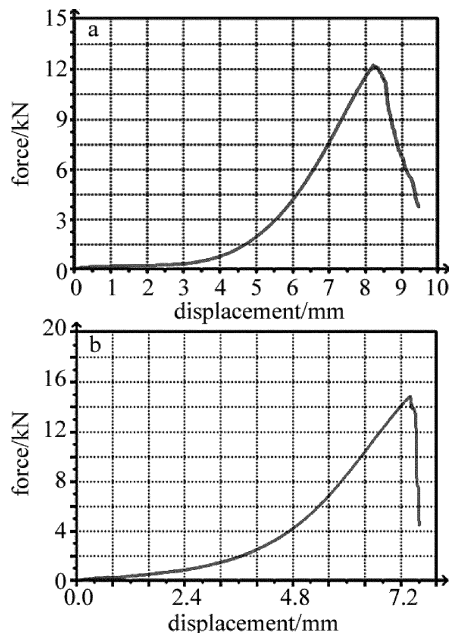


Fig. 9 Curve of tensile force and displacement  
a—rivet weld joint b—laser weld joint with 0mm gap

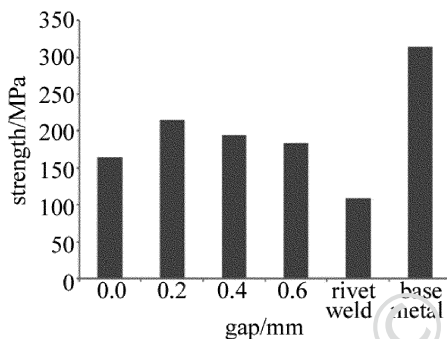


Fig. 10 Results of shear test

低了结合面间镁元素的烧损率,同时也降低了焊缝的气孔率<sup>[15]</sup>。但是间隙增大到 0.6mm 时,焊接过程中上板熔融金属下落,流向间隙两边,使焊缝表面产生比较严重的塌陷和咬边缺陷,所以抗拉剪能力也会有所下降。考虑到工件焊接时的装夹误差,应把工件之间的间隙控制在 0.2mm 以内。

## 5 结论

焊缝中心靠近表面镁元素的烧损最严重,硬度也最低,熔合线附近由于母材中镁元素的扩散和晶粒细化的双重作用,硬度最高。在本文中的实验条件下,使用优化后的参量焊接,电弧铆焊断口面积为 113mm<sup>2</sup>,激光焊断口面积为 90mm<sup>2</sup>,电弧铆焊的接头强度为 108.1MPa,约为母材抗拉强度的 34.3%,激光焊接头强度为 164.89MPa,约为铝合金母材抗拉强度的 52.3%,非熔透激光焊接头强度大于电弧铆焊。工业

生产中,焊接时的装夹间隙不大于 0.2mm 情况下,可以得到表面质量良好、接头强度满足要求的非熔透焊接接头。

## 参 考 文 献

- [1] TAO W, MA Y N, CHEN Y B, *et al.* Laser spot welding of LF6 aluminum alloy with filler wire[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(11):120-127 (in Chinese).
- [2] ARIF A F M. Effect of input variability on the quality of laser shock processing[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2009, 23(10):2603-2611.
- [3] KAWAGUCHI I, TSUKAMOTO S, ARAKANE G, *et al.* Suppression of porosity by laser power modulation—Study on prevention of porosity in high power CO<sub>2</sub> laser welding (report 3)[J]. Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 2007, 25(2): 328-335.
- [4] YANG Ch Y, CHUN M W, HU X Y, *et al.* Porosity in fiber laser formation of 5A06 aluminum alloy[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2010, 24(5): 1077-1082.
- [5] NIU R F, LIN B H, WANG Y N, *et al.* Magnesium loss and hardness distribution of joint in pulse laser welding of aluminum alloy[J]. Welding Journal, 2010, 31(3):81-84 (in Chinese).
- [6] EL-BATANCY A, KUTSUNA M. Laser beam welding of AA5052, AA5083, and AA6061 aluminum alloys[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2009, 2009:974182.
- [7] KUO T Y, LIN H C. Effects of pulse level of Nd-YAG laser on tensile properties and formability of laser weldments in automotive aluminum alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2006, A416(1): 281-289.
- [8] SIERRA G, PEYRE P, DESCHAUX-BEAUME F, *et al.* Steel to aluminium key-hole laser welding[J]. Materials Science and Engineering, 2007, A447(1): 197-208.
- [9] AL-KAZAZ H, MEDRAJ M, CAO X, *et al.* Nd:YAG laser welding of aerospace grade ZE41A magnesium alloy: modeling and experimental investigations[J]. Materials Chemistry and Physics, 2008, 109(1): 61-76.
- [10] CHEN G Y, CHEN M, LI Sh Ch, *et al.* Research of partial penetrated laser overlap welding of thin steel sheet[J]. Laser Technology, 2011, 35(5): 577-581 (in Chinese).
- [11] ZHANG L Q, ZHOU M Zh, CHEN Zh J, *et al.* Technique of non-penetration laser lap welding on galvanized steel and AISI 304 stainless steel[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(6): 148-153 (in Chinese).
- [12] MEI L F, CHEN G Y, JIN X Zh, *et al.* Study on fiber laser overlap-welding of automobile aluminum alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(8):2091-2097 (in Chinese).
- [13] ZUO T Ch. Laser processing of high strength aluminum alloy[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2008: 47-48 (in Chinese).
- [14] WANG G Zh. Study on the formation and porosity of 5754 aluminum alloy by laser lap welding with filler wire[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012: 43-52 (in Chinese).
- [15] CHEN G Y, ZHOU Y, ZHANG M J, *et al.* Study on improving the surface quality of the weld of autogenously laser welding of the thick plate with high power fiber laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(11): 137-142 (in Chinese).