

文章编号: 1001-3806(2010)04-0459-04

## AZ91 镁合金的 YAG 脉冲激光焊接

刘顺洪, 柳家良, 刘辉, 段元威, 权雯雯

(华中科技大学 材料科学与工程学院, 武汉 430074)

**摘要:** 为了研究 AZ91 镁合金的焊接性, 采用 YAG 脉冲激光焊单面焊双面成型的工艺对厚 1.5mm 的 AZ91 变形镁合金进行了焊接试验研究, 由试验研究结果可知, 焊缝中的组织主要是细小的等轴晶区, 熔合线清晰, 无明显的热影响区, 缺陷较少, 焊缝的晶粒尺寸明显小于母材; 由于 Mg 的蒸发, 最终导致了焊缝区 Al 和 Zn 含量的相对增加, 使得焊缝的显微硬度都高于母材。结果表明, 采用合理的工艺措施, AZ91 镁合金具有良好的 YAG 脉冲激光焊接性。

**关键词:** 激光技术; 激光焊接; 单面焊双面成型; AZ91 镁合金

**中图分类号:** TG456.7 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2010.04.008

## AZ91 magnesium alloy welding based on YAG pulsed laser

LIU Shun-hong, LIU Jia-liang, LIU Hui, DUAN Yuan-wei, QUAN Wen-wen

(College of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In order to study the weldability of magnesium alloy AZ91, 1.5mm thick AZ91 magnesium alloy was welded with YAG pulsed laser through the art and craft of one side welding with back formation. Analysis showed that the organization of the joint were mainly fine equiaxed grains, with clear fusion line, no significant heat-affected zone and fewer defects. The grain size of the joints was significantly smaller than the base material's. And because of a large number of Mg evaporation which eventually leads to a corresponding increase of Al and Zn in the welding zone, the micro-hardness of the joint was higher than that of the base material. The results show that AZ91 magnesium alloy has good weldability for YAG pulsed laser based on reasonable technological measures.

**Key words:** laser technique; laser welding; one side welding both sides formation; magnesium alloy AZ91

### 引言

镁合金具有质量轻、刚性好、耐腐蚀性好、尺寸稳定性、抗冲击、耐磨、衰减性能好及易于回收的特点, 并且来源广泛、原料的生产成本低, 越来越受到人们的重视, 在汽车、电子、电器、交通、航天、航空和国防军事工业领域具有极其重要的应用价值和广阔的应用前景, 被称之为 21 世纪的绿色工程材料<sup>[1-2]</sup>。

本文中选择了变形镁合金 AZ91 作为焊接母材, 这种镁合金常用于制作电器产品的壳体。试验中采用 YAG 脉冲激光器对其进行了焊接, 通过对焊缝形貌、微观组织、力学性能、组织成分的分析, 研究了 AZ91 镁合金的可焊性; 并对焊接过程中出现的缺陷进行了分析, 提出了一些解决方案以提高焊缝的质量。

作者简介: 刘顺洪(1954-), 男, 教授, 现主要从事激光材料加工和焊接力学行业的科研和教学工作。

E-mail: liusang@hust.edu.cn

收稿日期: 2009-08-26; 收到修改稿日期: 2009-09-07

### 1 试验

#### 1.1 试验材料

本次试验中所用材料为 AZ91 镁合金, 将由铸造方式制成的 AZ91 块体, 用线切割制成适合焊接的板材。焊接试验所用板材的尺寸为: 50mm × 40mm × 1.5mm。AZ91 镁合金的化学成分见表 1, 微观组织如图 1 所示。

Table 1 Chemical compositions of AZ91 Mg alloy (mass fraction)

Al	Zn	Mn	Si
0.085 ~ 0.095	0.0045 ~ 0.0090	0.0017 ~ 0.004	≤ 0.0005
Cu	Ni	Fe	Mg
≤ 0.00025	≤ 0.00001	≤ 0.00004	balance

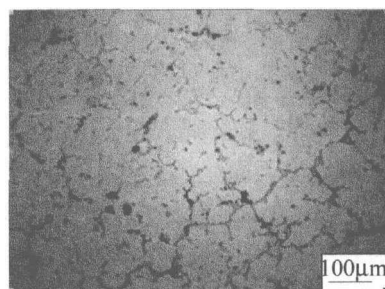


Fig. 1 The microstructure of AZ91

## 1.2 试验方法

本试验中采用的是华中科技大学激光技术与工程研究院自主研发的500W脉冲YAG固体激光器配合CNC2000数控(numeral control, NC)系统工作台进行焊接,加工系统如图2所示。

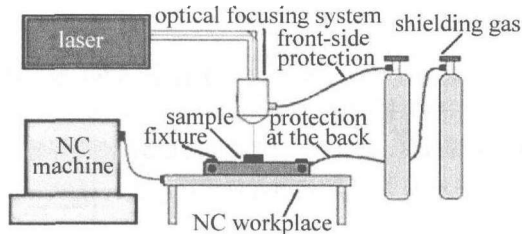


Fig. 2 Schematic diagram of welding equipment

在焊接之前需要对母材进行严格的表面处理,用砂纸打磨接口以及焊缝周围平面,并用超声清洗机对母材进行清洗,所用洗涤剂为丙酮,洗涤完成后立刻进行试验,避免镁合金被氧化。试验工艺参量是通过初步探求试验获得相应参量区间:电流200A~300A,脉宽1.5ms~2.5ms,频率20Hz~25Hz,焊接速率100mm/min~300mm/min,气体流量20L/min。

试验中采用单面焊双面成型。焊后在焊缝中间截取部分焊道,包括焊缝及部分母材,依照规定程序制备用于金相分析的试样,腐蚀液是硝酸质量分数为0.04的硝酸酒精溶液,腐蚀时间为5s。焊缝的显微组织利用光学显微镜及扫描电镜加以分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 焊缝宏观形貌分析

焊缝表面形貌是判断焊接质量的最直观的依据,由于本研究是面向工业应用的,所以焊接接头不仅要满足一定的力学性能,而且接头的外部宏观质量等外观因素也必须控制在合理的范围内。而镁合金薄板激光焊缝表面形貌主要观察是否存在氧化、未焊透、焊缝不连续、宏观气孔、宏观裂纹或者烧穿的现象。图3则是试验中的相应工艺参量下的焊缝宏观形貌照片。

从图3中可以看出,采用激光焊接AZ91镁合金,焊缝正面为鱼鳞状,焊道平直,颜色为银白色,呈现金属光泽,气体保护良好,无明显氧化,无宏观裂纹存在。接头变形很小,能够满足常见的工程应用。背面同样呈鱼鳞状,焊道平直,无宏观裂纹,由于热输入小于正面,所以背面熔宽比正面小。

当然,焊缝中也会出现如图3a中的少许宏观气孔,这是因为焊接过程中焊接速率较快,焊接过程中产生的气体到达焊缝表面时,焊缝正好凝固,来不及溢出便留在表面形成了宏观气孔。同时焊接过程中出现飞溅,这是由于镁合金沸点很低,焊接过程中易剧烈沸腾

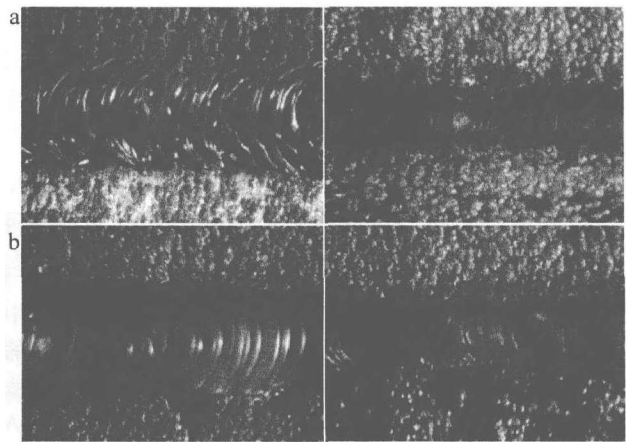


Fig. 3 Different macro-feature of weld under corresponding welding parameters a—current is 280A, width of pluse is 1.5ms, frequency is 23Hz, welding speed is 100mm/min, air flow is 20L/min b—current is 280A, width of pluse is 2ms, frequency is 23Hz, welding speed is 100mm/min, air flow is 20L/min

而造成<sup>[3]</sup>。

### 2.2 显微组织分析

图4所示分别是母材和焊缝的场扫显微组织图。

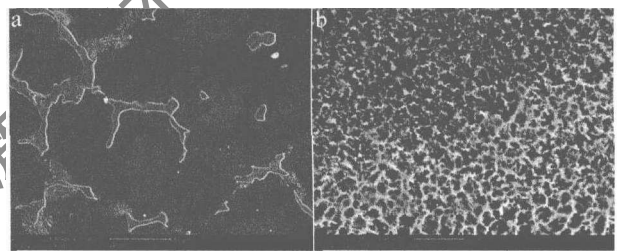


Fig. 4 Micro-organization charts of the base material and the weld a—micro-structure of the basic material b—micro-structure of the weld zone

母材中主要是由Mg-Al形成的两相组织,面积区域较大并呈现块状的为 $\alpha$ 相( $\alpha$ -Mg),面积区域小并呈现带状的为 $\beta$ - $Mg_{17}Al_{12}$ 。由于 $\alpha$ -Mg的凝固点较高,在凝固过程中会先析出并长大,然后才析出由 $\alpha$ -Mg和 $\beta$ - $Mg_{17}Al_{12}$ 组成的共晶组织,由于铸造过程中冷却速度很缓慢,后析出的共晶 $\alpha$ -Mg会依附在初生相 $\alpha$ -Mg上生长,而 $Mg_{17}Al_{12}$ 则会在 $\alpha$ -Mg的晶界之间分布。因此,母材中形成的是粗大的 $\alpha$ -Mg和带状的 $Mg_{17}Al_{12}$ 。焊缝组织中的主要成分是 $\alpha$ -Mg和( $\alpha$ -Mg +  $\beta$ - $Mg_{17}Al_{12}$ )共晶体<sup>[4]</sup>,这是因为镁的蒸气压远高于铝,因此,在焊接过程中镁的蒸发量要远高于铝,导致焊缝中铝的含量要高于母材,会生成( $\alpha$ -Mg +  $\beta$ - $Mg_{17}Al_{12}$ )共晶体(见图5)。

从图4a中也可以发现,在 $\alpha$ 相之间不完全只存在 $\beta$ 相,也存在另一些黑色的物质,这是由于偏析出现的镁-铝-锌三元化合物<sup>[5]</sup>。

另外,在母材中的 $\alpha$ 相和 $\beta$ 相之间还发现了一些共晶组织,这些组织较少。这些组织的形成是由于母材在凝固的过程中出现偏析产生的。见图6。

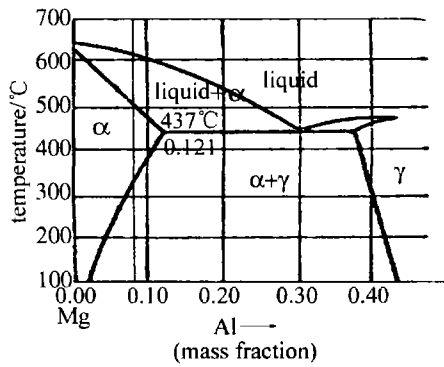


Fig. 5 Alloy phase diagram for Mg-Al

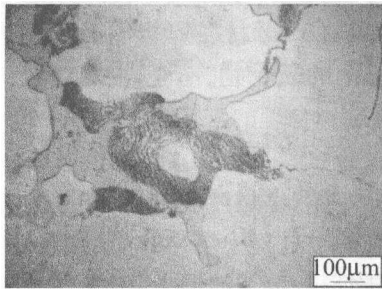


Fig. 6 Eutectic structure of the base material

在激光焊接过程中,激光作用面积小,热量集中,激光作用于工件表面时,激光的能量被工件吸收后,达到材料熔点熔化。但激光光斑小,作用面积有限,激光能量高度集中,受激光照射的部分发生迅速熔化,并融合在一起完成焊接的过程。激光光斑移走后,受热的部分由于面积较小,相对于整个所焊接的母材而言,所吸收的热量的绝对值较小,热量会迅速地散发到其它的地方,因此会造成焊接区域迅速冷却。由于镁的导热性能极好,焊缝里温度梯度很小,形成成分过冷区,在该区域里形核率会大幅提高,能够形成大量的晶核,晶粒沿各个方向长大的速率相近,就形成了焊缝区均匀分布的细小等轴晶组织<sup>[6]</sup>。焊缝区晶粒细化的另一个原因是由于在熔化的过程中镁的大量蒸发,使焊缝中铝的含量要大于母材中铝的含量,镁合金中的铝有细化晶粒的作用,导致焊缝中晶粒小于母材。

从图 7 中可以看出,焊缝与母材之间没有明显的热影响区,并且熔合线凹凸不平,主要是由于焊接时镁会剧烈沸腾,造成熔池里压力的不均衡,熔池壁受压力大的地方会突出,而压力小的地方则会凹进去。

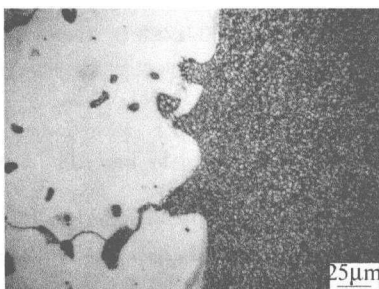


Fig. 7 Grain comparison between both sides of fusion line

### 2.3 显微硬度分析

研究中对焊接接头的显微硬度做了测量,通过显微硬度的变化规律,研究了接头的力学性能。

以焊缝中心为起点,以 0.25mm 为间隔,向母材一侧取点测量显微硬度,依次穿过焊缝区、热影响区和母材区,直至所测硬度趋于一致,数值无明显变化为止。图 8 所示为试样激光焊缝水平位置的显微硬度曲线,图中竖线是焊缝边缘所在位置。

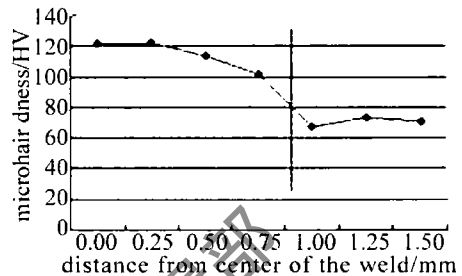


Fig. 8 The relationship between micro-hardness and position

从数据容易看出,焊缝区的硬度显著高于母材,焊缝中心的硬度约为母材硬度的 2 倍,并且随着距离焊缝中心的距离增大,显微硬度值越来越低。造成这种现象的原因有两点:其一,因为焊缝区域晶粒较母材区域的晶粒细小,细小的晶粒对材料的硬度提高有很明显的作用。其二,由于镁的大量蒸发而引起焊缝区铝的相对含量增加,当铝在镁中溶解度达到饱和后能起到弥散强化的作用<sup>[7]</sup>。因此,通过选择合适的焊接工艺参量,激光焊接 AZ91 变形镁合金能获得具有优良力学性能的焊接接头。刚经过焊缝的边缘,硬度就下降到和母材相当的水平,这是因为焊缝冷却速度很快,接头中无明显的热影响区。

### 2.4 组织成分分析

本研究选择焊接接头良好的试验,用场发射电子显微镜对其进行了扫描分析,结果见图 9。

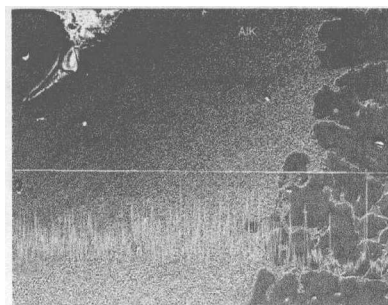


Fig. 9 The result of field emission scanning (200 ×)

由图 9 可知,焊缝区域的 Al 含量高于母材中的含量,这印证了前文微观组织中的分析。而 Mg 的蒸气压远高于铝,所以在激光的作用下,温度升高时镁蒸发得更多。由于 Mg 的大量蒸发,最终导致了焊缝区 Al 和 Zn 含量的相对增加<sup>[8]</sup>。这样不仅焊接接头的力学性能有明显的提高,而且对晶粒也有一定的细化效果。

## 2.5 缺陷分析及解决方案

通过对焊缝微观组织的观察发现:在 AZ91 镁合金 YAG 脉冲激光单面焊接试验中,出现的缺陷主要是气孔和塌陷。

AZ91 镁合金激光焊缝中气孔的产生主要受两方面影响。首先,镁合金母材是以铸造的方式成形的,自身含有很多气孔,焊接时受热的部分母材熔化,而气孔成为熔池中的气泡,在焊接的过程中,气泡自身会聚集、长大,部分气泡在凝固前来不及排出,就会留在焊缝里形成缺陷;其次,在焊接过程中,由于装备的原因,气体保护不够完好,镁在激光的作用下,容易与空气中的水分发生化学反应,生成 MgO 和氢气。而氢气在镁中的溶解度随着温度下降而急剧降低<sup>[9]</sup>。所以,镁合金熔化的过程中溶入的大量氢气,在激光移走后,熔池急剧降温,氢气析出,但来不及排出焊缝,以气体的形式留在焊缝里,形成气孔。并且,母材焊接前表面残留的氧化物也能吸附水分并带入焊缝,尤其是镁合金表面的氧化膜 MgO 不如氧化铝致密,更容易吸附水分。

镁合金中的气孔(见图 10)因为镁合金的特性而

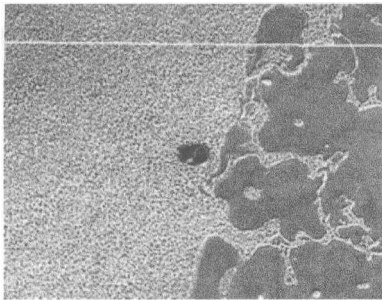


Fig. 10 Existing pore in the weld(400 $\times$ )

具有其独特的特点,由于镁和铝都极易氧化,而且其氧化物颜色和母材很接近,肉眼不容易分辨出来。焊接过程中进入焊缝后,对焊接过程中产生的气泡有吸附的作用,使之不易析出,而且这种气泡形成很早,所以其自身能够不断聚集、长大,最后来不及溢出,在焊缝中形成气孔。由于这种类型的气孔是吸附在氧化物上的,所以形状往往不如普通气孔规则<sup>[10]</sup>。

塌陷(见图 11)也是镁合金激光焊接中常见的缺

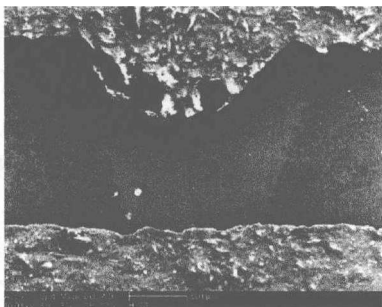


Fig. 11 Collapse of weld

陷,产生的原因是由于镁的沸点很低,在激光焊接的过程中,熔池中会发生剧烈的沸腾,金属的蒸发量很大,并容易飞溅到熔池外,最终造成焊缝中金属减少,形成塌陷。

针对这两种常见的缺陷,提出以下几种解决方法:(1)在实验材料的选择上,应该选择质量好、气孔少的母材,这样能减少焊接时气体的来源,减小焊缝中气孔产生的概率;(2)应该选择干燥的保护气体,并采用合适的气体流量,既能减少保护气体中带入焊缝中的水分,防止其与镁反应产生氢气,而且能保护焊缝与空气中的水分隔离;(3)母材在焊接前必须经过严格的预处理,去除表面的氧化物,防止将 MgO 吸附的水分带入焊缝;(4)选择合理的工艺参量,在保证焊接接头强度的前提下,减少镁的蒸发量,防止塌陷的产生;(5)焊接前接头的缝隙也是产生塌陷的重要原因,倘若接头留有缝隙,焊接过程中熔化的镁合金必须填补缝隙,这样造成塌陷量和熔宽的增大。

## 3 结论

(1)通过合理控制 YAG 脉冲激光焊的工艺参量可以通过单面焊双面成型焊透 1.5mm 的变形镁合金 AZ91,得到外观形貌较好的焊缝。

(2)焊缝微观组织是细小的等轴晶,熔合线清晰,无明显的热影响区。主要原因是激光焊接过程中热输入很集中,当激光移开后,热量很快被母材吸收,温度急剧下降,熔池快速冷却,由于镁合金散热性良好、温度梯度小而造成成分过冷,因形核率高而形成细小的晶粒组织;而被母材吸收的热量不足以对母材晶粒造成影响。

(3)显微硬度测试表明,焊缝区域硬度明显高于母材,而且随着到焊缝中心的距离增加,硬度程下降趋势。

(4)焊缝的主要缺陷有飞溅、气孔、裂纹、塌陷这几种,飞溅产生的原因是镁合金沸点很低,焊接过程中易剧烈沸腾;气孔的主要来源是母材中气孔的聚集、长大和焊接过程中产生的氢气孔;塌陷的主要原因是焊接过程中镁的大量蒸发。

## 参 考 文 献

- [1] AGHION E, BRONFIN B, ELIEZER D. The role of the magnesium industry in protecting the environment[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 117(3): 381-385.
- [2] XU R J, ZHANG Y K, CHEN J F. Microstructure change of AZ91 magnesium alloy surface melted by laser[J]. Laser Technology, 2008, 32(5): 487-489 (in Chinese).
- [3] DRAUGELATES U, BOUAIFI B, STEINBORN S, et al. Simulation of laser beam welding of magnesium alloys[J]. Magnesium Science and Technology, 1998, 4(12): 309-314.

噪声设为高斯型,即  $n \sim N(0, \sigma^2)$ 。对于一条给定的信道:  $\{X, P(y/x), Y\}$ , 转移概率  $\{P(y/x)\}$  已经给定。信道容量  $C$  定义为当输入分布  $P(x)$  变化时,互信息  $I(X;Y)$  的极大值,即:

$$C = \max_{\{P(x)\}} I(X;Y) \quad (8)$$

考虑  $M$  进制的信号,  $\{X_m(t), m = 1, 2, \dots, M\}$  是等信号间隔的有限能量波形,每个波形可在一组标准正交集上展开:

$$x_m(t) = x_m \varphi(t), (m = 1, 2, \dots, M) \quad (9)$$

每个信号波形  $x_m(t)$  和它的坐标矢量  $\mathbf{x}_m = (x_1, x_2, \dots, x_m)$  之间建立起一一对应关系。由(8)式得到:

$$C = \max_{P(x_{m,m=1,2,\dots,M})} \sum_{m=1}^M \int_{-\infty}^{\infty} P(x) P(y/x) \times \left[ \log_2 \frac{P(y/x_m)}{P(y)} \right] dy \quad (10)$$

$$C = \log_2 M - \frac{1}{M(2\pi\sigma^2)^{1/2}} \times \sum_{m=1}^M \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{|y-x_m|^2}{2\sigma^2}\right] \times \log_2 \left[ \sum_{i=1}^M \exp\left(-\frac{|y-x_i|^2 + |y+x_m|^2}{2\sigma^2}\right) \right] dy \quad (11)$$

最后,得出:

$$C_{4FSK} = 2 - \frac{1}{4\sqrt{\pi}} \sum_{m=1}^4 \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{(y-x_m)^2}{2\sigma^2}\right] \times \log_2 \left\{ \sum_{i=1}^4 \exp\left[-\frac{(y-x_i)^2 + (y+x_m)^2}{2\sigma^2}\right] \right\} dy \quad (12)$$

### 5 结束语

设计了4FSK 调制解调系统,采用高斯和瑞利衰

落信道进行了大气信道模拟,对所设计的4FSK 调制解调系统进行了仿真。给出了两种解调方法的系统误比特率公式推导和仿真对比结果。最后分析推导了4FSK 系统信道容量,对基于4FSK 的大气激光通信系统的研究奠定了一定的理论基础。

### 参 考 文 献

- [1] KE X Zh. Introduction to wireless laser communication[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press,2004:10-26 (in Chinese).
- [2] PAN J J, JIA Zh H. Performance analysis of subcarrier atmospheric laser communication system over Gamma-Gamma channel[J]. Journal of Xinjiang University,2007,24(1):92-96 (in Chinese).
- [3] DAT P T, SHAH A M, KAZAURA K A, et al. Investigation of suitability of RF signal transmission over FSO links[DB/OL]. (2007-11-18) [2009-08-06] <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&number=4600248&isnumber=4600238>.
- [4] DAT P T, SHAH A M D, KAZAURA K A, et al. A study on transmission of RF signals over a turbulent free space optical link[DB/OL]. (2008-09-09) [2009-08-06]. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&number=4666664&isnumber=4666616>.
- [5] DAT P T, SHAH A M D, KAZAURA K A, et al. An Innovative technology for ubiquitous communication using radio on FSO links[DB/OL]. (2008-10-06) [2009-08-06]. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&number=4666664&isnumber=4666616>.
- [6] CHEN D, WANG G Zh. Research on modulation and demodulation system of 4FTSK based on DSP[J]. Journal of Suzhou University of Science and Technology,2009,22(1):68-71 (in Chinese).
- [7] QIU P L. Digital communication foundation[M]. Beijing: Electronics Industry Press,2007:176 (in Chinese).
- [8] SHI X H, LI K, ZHANG E Y. On the analysis and calculation of the channel capacity for the  $M$ -ary  $N$ -dimensional signal sets[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications,2002,14(3):77-81 (in Chinese).

(上接第462页)

- [4] HUANG Zh H, GUO X F, ZHANG Zh M. Study on microstructures of rapidly solidified AZ91D magnesium alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment,2005,26(1):32-35 (in Chinese).
- [5] ASAHINA T, KOTOH K, TOKISUE H. Fatigue strength of friction welding joints of AZ31 magnesium alloy[J]. International Journal of Fatigue,1995,17(5):376-376.
- [6] FENG J C, WANG Y R, ZHANG Zh D. Status and expectation of research on welding of magnesium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2005,15(2):165-176 (in Chinese).
- [7] GUAN Zh Zh. The working manual of laser processing[M]. Beijing:

- China Metrology Publishing House,1998:55-71 (in Chinese).
- [8] GAO Q. A complete of latest nonferrous metal phase diagram graph [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005:971-997 (in Chinese).
- [9] WANG J F, LIU L M, SONG G. Microstructure character of YAG laser welding AZ31B Mg alloy[J]. Transactions of The China Welding Institution,2004,25(3):15-18 (in Chinese).
- [10] DU H B, HU L J, HU X Y. Technology of laser filler wire welding [J]. Aeronautical Manufacturing Technology,2002(11):60-63 (in Chinese).