

异种镁合金 AZ31 与 NZ30K 激光焊接接头分析

隗成澄¹ 黄坚¹ 戴军¹ 董杰²

(¹上海交通大学上海市激光制造与材料改性重点实验室, 上海 200240)
(²上海交通大学轻合金精密成型国家工程研究中心, 上海 200240)

摘要 为研究 NZ30K 稀土镁合金和 AZ31 镁合金的异种材料激光焊接,对采用 CO₂ 激光焊成的 AZ31 与 NZ30K 异种对接焊接接头组织和性能进行了分析。在激光功率为 4~5 kW,焊接速度为 4 m/min 时获得了成形良好的异种镁合金焊接接头。对获得的焊接接头进行了接头组织分析、焊缝区合金元素分布及析出相的分析及接头硬度和拉伸性能的测量。金相观察发现,异种镁合金激光焊缝是两种母材的熔合,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。X 射线衍射(XRD)检测显示焊缝中存在 α -Mg、Mg₁₇Al₁₂ 及 Mg₁₂Nd 等相组织。扫描电镜(SEM)观察进一步显示了焊缝区存在着不同化学成分区域,焊缝晶粒显著细化。接头元素分布情况表明焊缝合金元素的分布由一侧熔合线至另一侧熔合线存在明显的浓度梯度。焊缝硬度不低于母材硬度;接头抗拉强度为 169 MPa,低于两种母材的抗拉强度。

关键词 激光技术;异种接头;微观组织;AZ31 镁合金;NZ30K 镁合金

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1203002

Analysis of Laser-Welded Joint of Dissimilar Magnesium Alloys AZ31 and NZ30K

Wei Chengcheng¹ Huang Jian¹ Dai Jun¹ Dong Jie²

¹ Shanghai Key Laboratory of Laser Processing and Material Modification, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China
² National Engineering Research Center of Light Alloy Net Forming, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China

Abstract In order to research laser welding of dissimilar magnesium alloys NZ30K and AZ31, the microstructure and property of the joint of AZ31 and NZ30K welded with a CO₂ laser is analyzed. A sound weld is formed with the laser power of 4~5 kW and the welding speed of 4 m/min. The joint microstructure, the precipitated phase and weld element distribution are analyzed, the hardness and tensile strength of the joint are also measured. The optical microscope (OM) observation shows that the weld metal is a fusion of the two different alloys, which presents an incomplete mixture and the alloys interweave in wave-form with each other. By X-ray diffraction (XRD) analysis, α -Mg, Mg₁₇Al₁₂ and Mg₁₂Nd phases are identified in the joint. The scanning electron microscope (SEM) shows further fine structure and regions of different chemical compositions in the weld. An obvious concentration gradient of alloying elements crossing the joint is observed too. The hardness of the joint is not lower than that of the base metal. The tensile strength of the joint is 169 MPa, which is lower than those of the base metals.

Key words laser technique; dissimilar joint; microstructure; magnesium alloy AZ31; magnesium alloy NZ30K

OCIS codes 140.3390; 160.3900

1 引 言

镁合金因为其比重小、比强度及比刚度高、切削

加工性好、可回收性好等优点,在工业中的应用越来越广泛。AZ31 镁合金为目前较常见并在工程中得

收稿日期: 2011-07-12; **收到修改稿日期**: 2011-09-04

作者简介: 隗成澄(1986—),女,硕士研究生,主要从事镁合金激光焊接方面的研究。

E-mail: weichengcheng1207@sjtu.edu.cn

导师简介: 黄坚(1967—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事激光焊接与熔覆技术、焊接过程分析与数值模拟等方面的研究。E-mail: jhuang@sjtu.edu.cn(通信联系人)

到较多应用的镁合金。NZ30K 镁合金为新型的稀土镁合金,具有优良的室温和高温力学性能及耐腐蚀性能^[1~4],潜在应用前景广阔。由于镁合金熔点低易烧损,热膨胀系数大易形成气孔,且易氧化和夹渣^[5],焊接难度较大。激光焊接作为一种先进焊接技术,具有能量密度高、焊接速度和精度高、热影响区窄的优点^[6~10],应用在镁合金焊接中可较大程度地避免由于其本身性质引发的焊接缺陷,可以获得大的深宽比和较小的热影响区,焊缝晶粒细小,易得到成形良好的接头,因此成为焊接镁合金的重要方法之一。AZ31 镁合金与 NZ30K 镁合金分别采用激光焊接均可得到成形良好的接头^[11~14],目前对于 AZ 系列镁合金激光焊接的缺陷也有详尽的研究^[15,16]。但随着稀土镁合金应用范围的扩展,难免

表 1 AZ31 镁合金和 NZ30K 稀土镁合金化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of AZ31 and NZ30K (mass fraction, %)

	Al	Zn	Mn	Zr	Nd	Mg
AZ31	3.0	1.0	0.2	—	—	Bal.
NZ30K	—	0.2~0.4	—	0.3~0.5	2.5~3.5	Bal.

试样尺寸 150 mm×90 mm×4.5 mm。实验使用 TRUMPF 公司快速轴流 CO₂ 激光器 TLF15000T,最大输出功率 15 kW,最大光斑直径 0.8 mm。正面侧吹保护气体采用纯 He 气,侧吹气体方向与焊接方向相反,侧吹气体喷嘴与试板夹角为 50°。试板背面采用纯铜背衬并通纯 Ar 气体保护。激光焊接功率 4~5 kW,焊接速度 4 m/min,侧吹保护气体流速为 28 L/min,背面保护气体流速为 15 L/min,离焦量为 0。

焊接之前采用机械方法将试样表面氧化膜清理干净,并用丙酮擦拭。实验采用平板激光对接焊方式,对接焊完成后,采用 D 2550VL X 射线衍射仪(XRD)进行焊缝物相分析。以 1 g 草酸,1 mL 乙酸,1 mL 硝酸与 150 mL 去离子水配制的腐蚀液腐蚀金相试样 15 s,并采用 MEF4M 金相显微镜和 JSM-6460 型扫描电镜(SEM)观察试件接头的显微组织及元素分布。采用 HVS-10 型 SCTMC 数显维氏硬度计测量焊接接头区硬度。采用 ZWICK Z020 拉伸试验机测试了接头的拉伸性能。

3 实验结果分析

3.1 焊缝截面形貌

在激光功率 4~5 kW,焊接速度 4 m/min 时获得的成形良好的焊缝横截面宏观形貌如图 1 所示,

会遇到同一结构中使用不同镁合金的情况,需要对它们的连接进行研究。目前 AZ31 与 AZ61 异种镁合金可以使用惰性气体钨极保护(TIG)焊与搅拌摩擦焊成功焊接^[17~19],但对于 AZ31 与 NZ30K 镁合金的异种对接焊研究还未见报道。本文利用高功率 CO₂ 激光对这两种不同的变形镁合金进行了异种对接焊,对得到的焊接接头进行了组织、成分和性能分析。

2 实验方法及材料

实验用材料为 AZ31 镁合金和 NZ30K 稀土镁合金,材料化学成分含量如表 1 所示,使用的 AZ31 镁合金抗拉强度为 220 MPa,NZ30K 镁合金抗拉强度为 200 MPa。

图 2 为焊缝表面照片。

从图 1 的焊缝横截面照片上可以看出,接头完全熔透,由于对接接头存在着一定错边,且镁合金易烧损,焊缝根部成形出现了约 0.3 mm 的凹陷。焊缝宏观组织中可以看到较明显的分层现象。焊缝内部有一微小气孔。对焊缝进行了 X 射线检测,只发现少量微小气孔分布于焊缝中,未发现裂纹、宏观气孔等缺陷。从图 1 中可观察到右侧 NZ30K 母材的熔合线外侧有大约 0.4 mm 宽的热影响区,而左侧 AZ31 母材处几乎观察不到热影响区(HAZ)。从图 2 可以看出,焊缝表面成形比较均匀,焊缝背面个别位置存在如图 1 所示的轻微凹陷。

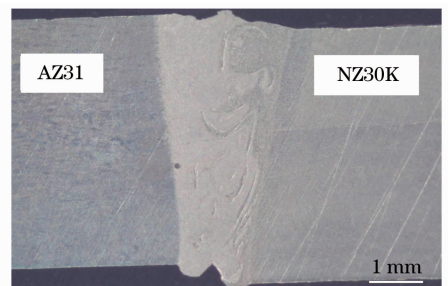


图 1 异种镁合金焊接接头横截面宏观形貌
(5 kW, 4 m/min)

Fig. 1 Macrograph of the joint of dissimilar magnesium alloys (5 kW, 4 m/min)

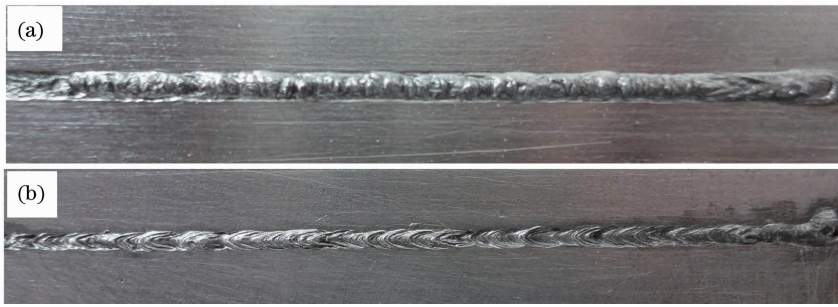


图 2 焊缝表面,左端为收焊处。(a)焊缝正面;(b)焊缝背面

Fig. 2 Weld surface, left side is the end of the weld. (a) Top side; (b) bottom side

3.2 微观组织分析

3.2.1 接头微观组织

图 3 为焊缝与母材的熔合线处和母材的微观组织形貌。图 3(a)为 NZ30K 侧熔合线处微观形貌,其左边热影响区的晶粒尺寸比母材晶粒尺寸[图 3(c)]有所增大,其右侧熔化区(FZ)内的焊缝组织明显精细。图 3(c)为 NZ30K 母材,组织为细小

的等轴晶。原始轧制状态的 AZ31 母材[图 3(d)]中存在着层状组织,组织为典型变形镁合金的拉长的粗大等轴晶组织。图 3(b)中所示的 AZ31 母材侧的熔合线外侧的组织基本上保持了原来母材的组织形态并与母材原层状组织相连,图 3(b)中未观察到明显的热影响区,熔合线附近晶粒尺寸与母材晶粒尺寸无明显差别。

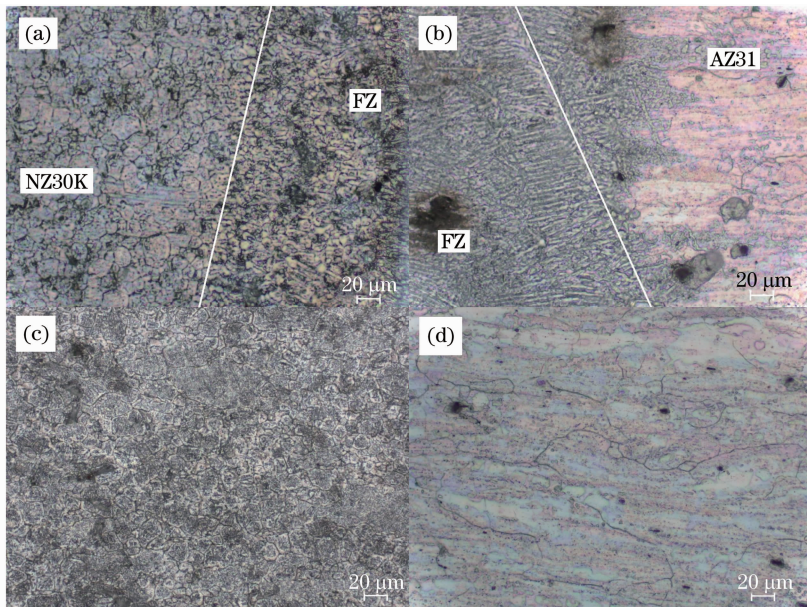


图 3 熔合线处及母材微观组织形貌。(a) NZ30K 熔合线;(b) AZ31 熔合线;(c) NZ30K 母材;(d) AZ31 母材
Fig. 3 Microstructure around the fusion line and base metals. (a) Fusion line at the side of NZ30K; (b) fusion line at the side of AZ31; (c) base metal NZ30K; (d) base metal AZ31

图 4 为焊缝区的微观结构形貌。图 4(a)中左边为 NZ30K 母材,右边为 AZ31 母材。图 4(b)为图 4(a)局部(标记方框内)放大照片,可见其为混合区的一处分层组织。因为激光作用的强烈搅拌和极快的冷却速度,两种母材熔合后,熔入部分的成分未能互相扩散均匀,所以形成两种组织区域并各自保持着母材的特点,宏观上表现出波浪状夹杂态。图 4(b)两处深色条状结构由原 NZ30K 母材进入焊缝,其他亮白的浅色组织主要来自 AZ31 母材。焊

缝晶粒以枝晶为主,平行于板材表面生长。由于激光热输入较小,冷却速度较快,因此焊缝组织比母材更细小。受化学成分的影响,来自母材 NZ30K 的深色组织处的晶粒不仅比原母材的小,也比来自母材 AZ31 的浅亮组织区晶粒更细小。

图 5 中的焊缝组织 X 射线衍射结果表明,焊缝组织中主要为 α -Mg 基体与 $Mg_{17}Al_{12}$ 和 $Mg_{12}Nd$ 析出相。 $Mg_{17}Al_{12}$ 和 $Mg_{12}Nd$ 在凝固过程中从 α -Mg 中析出,细化晶粒,对组织起到强化作用。表 2 中

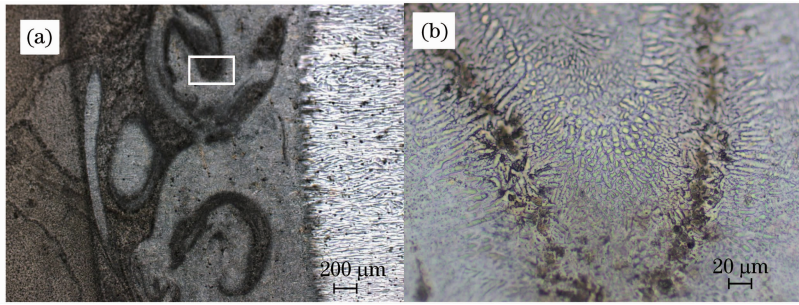


图 4 焊缝及其局部形貌

Fig. 4 Weld joint and local microstructure

为图 6(a)、(b)中标记方框 A、B 内的元素含量,及图 6(c)、(d)中标记点 C、D 处元素含量。焊缝在 SEM 观察下可见两种不同组织,图 6(a)、(b)中为焊缝局部一处混合区域,可观察到这两种不同组织。图 6(a)中标记方框内元素成分较接近 AZ31 母材,

说明此处组织主要来自 AZ31 母材,而图 6(b)中标记方框内的元素成分较接近 NZ30K 母材,因此此处组织主要来自 NZ30K 母材。图 6(c)为图 6(a)、(b)中左侧成分接近 AZ31 组织的局部放大图像,图 6(d)为图 6(a)、(b)中右侧成分接近 NZ30K 组织的局部放大图像。

表 2 图 6 中焊缝局部标记区域的元素分布
(质量分数,%)

Table 2 Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX) analysis of the marked positions in Fig. 6
(mass fraction, %)

	Mg	Al	Nd
A	96.21	03.79	—
B	95.48	—	04.52
C	89.50	10.50	—
D	87.39	—	12.61

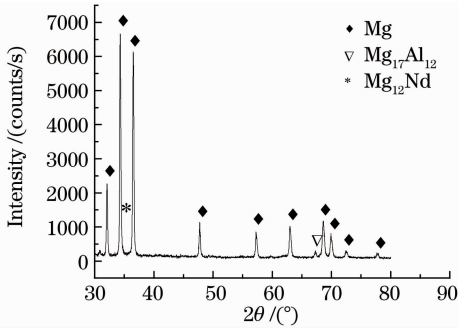


图 5 焊缝 X 射线衍射谱

Fig. 5 XRD spectrum of joint

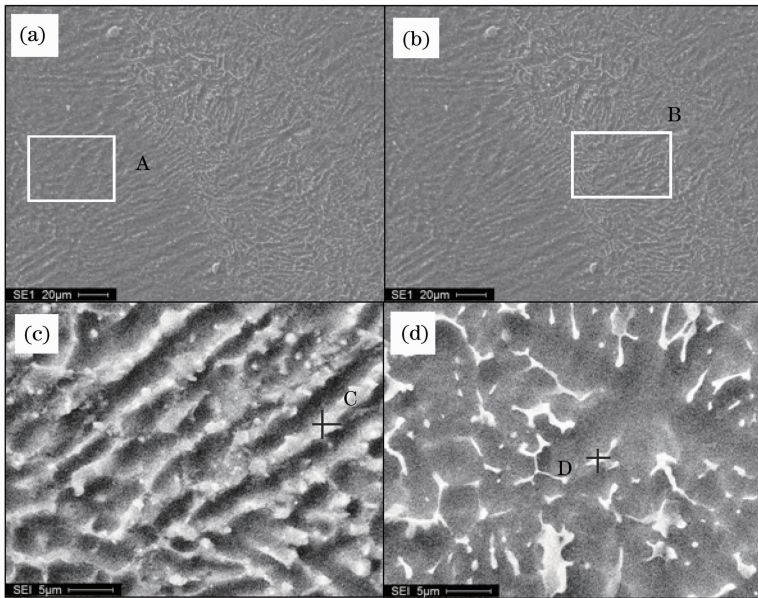


图 6 焊缝局部组织

Fig. 6 SEM images of microstructure of the joint

3.2.2 焊缝合金元素分布

缝左边为 AZ31 母材,右边为 NZ30K 母材。由线扫描可以看出,Mg 元素由于熔点低易蒸发且焊缝偏

图 7 为 30 倍下跨过焊缝截面的线扫描结果,焊

析存在,在焊缝中的含量略有减少且分布波动明显; Zn 作为两种母材共有的合金元素,在焊缝横向上浓度变化较小。Al 元素在焊缝中浓度与 AZ31 母材中浓度相近,在靠近 NZ30K 母材时逐步降低,在 NZ30K 母材熔合线处其浓度降为 0。Nd 元素分布与 Al 元素情况相反,由于 Nd 只存在于 NZ30K 母材中,所以从 AZ31 母材侧至 NZ30K 母材侧,Nd 的浓度由低至高变化。

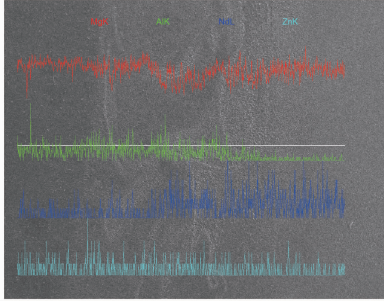


图 7 焊缝截面线扫描

Fig. 7 Line scan analysis of the section of joint

3.3 焊接接头力学性能

3.3.1 焊接接头硬度分布

图 8 为焊接速度为 4 m/min,激光功率为 5 kW 焊得的焊接接头横截面硬度分布。测试载荷为 2.912 N,加载时间 5 s。结果显示,接头横向硬度分布较平缓,焊缝区域硬度从 AZ31 侧向 NZ30K 侧逐渐增加,焊缝区大部分的硬度不低于母材硬度。焊缝平均硬度值为 56.94 HV。

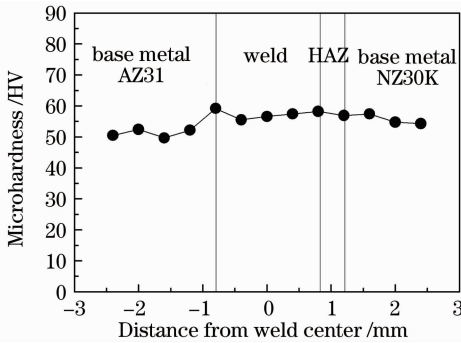


图 8 焊缝硬度分布图

Fig. 8 Microhardness of the weld joint

3.3.2 焊接接头拉伸强度

对成形良好的焊接接头进行拉伸性能测试。拉伸试样断裂在焊缝处,平均抗拉强度达 169 MPa,低于两种母材的抗拉强度,为 AZ31 母材的 77% 和 NZ30K 母材的 85%。观察断口未发现焊接缺陷。抗拉强度低于母材有可能是由于接头形成的两种分层组织降低了接头的拉伸性能,具体原因需要进一步分析研究。

4 结 论

NZ30K 稀土镁合金与 AZ31 镁合金在 CO₂ 激光功率 4~5 kW,焊接速度 4 m/min 的工艺参数下可以得到成形良好的异种焊接接头。由于镁合金易蒸发和烧损,焊缝表面及背面有少许凹陷。焊缝中可观察到两种组织,有明显的分层现象。NZ30K 母材侧的热影响区晶粒略微增大,靠近 AZ31 母材一侧未观察到明显的组织形貌发生变化的热影响区。焊缝中合金元素有明显的梯度分布,且合金元素主要富集在析出相中。合金元素 Nd 在焊接接头中的含量由 AZ31 端熔合线至 NZ30K 端熔合线逐渐升高,Al 元素在焊接接头中的含量在同方向上逐渐降低。焊缝组织主要由 α-Mg 基体及析出相 Mg₁₇Al₁₂ 及 Mg₁₂Nd 组成,析出相主要位于晶界处。NZ30K 和 AZ31 的异种材料激光焊缝区域的显微硬度不低于母材硬度,异种接头的抗拉强度为 169 MPa,低于两种母材的抗拉强度。

参 考 文 献

- 1 Chang Jianwei, Guo Xingwu, Fu Penghui *et al.*. Effect of heat treatment on corrosion and electrochemical behavior of Mg-3Nd-0.2Zn-0.4Zr (wt. %) alloy [J]. *Electrochimica Acta*, 2007, **52**(9): 3160~3167
- 2 Jiang Haiyan, Fu Penghui, Peng Liming *et al.*. The microstructure and mechanical properties of Mg-3Nd-0.2Zn-0.4Zr (wt. %) alloy [J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2008, (s1): 254~258
蒋海燕, 付彭怀, 彭立明等. Mg-3Nd-0.2Zn-0.4Zr 合金的显微组织与力学性能 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2008, (s1): 254~258
- 3 Fu Penghui, Peng Liming, Jiang Haiyan *et al.*. Effects of heat treatments on the microstructures and mechanical properties of Mg-3Nd-0.2Zn-0.4Zr (wt. %) alloy [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, **486**(1-2): 183~192
- 4 Chang Jianwei, Fu Penghui, Guo Xingwu *et al.*. The effects of heat treatment and zirconium on the corrosion behaviour of Mg-3Nd-0.2Zn-0.4Zr (wt. %) alloy [J]. *Corrosion Science*, 2007, **49**(6): 2612~2627
- 5 Sun Dexin. Study on Weldability of Magnesium Alloys (AZ91D and AZ31B) [D]. Changchun: Jilin University, 2008, 6~9
孙德新. 镁合金 (AZ91D、AZ31B) 焊接性的研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2008, 6~9
- 6 Fu Jun. Laser Welding for Copper-Steel Joint [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2009, 4~6
付俊. 铜钢异种材料激光焊接研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2009, 4~6
- 7 Zhai Yufeng, Huang Jian, Li Min *et al.*. Research on high speed high power CO₂ laser welding of 6061-T6 aluminum with filler wire [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0503001
翟玉峰, 黄坚, 李敏等. 6061-T6 铝合金高速高功率 CO₂ 激光填丝焊接性的研究 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(5): 0503001
- 8 Wu Xiaohu, Zhao Fei, Xie Wenjia *et al.*. Microstructure and properties of laser weld joints of reduced activation martensitic steel [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 577~580
吴小虎, 赵飞, 谢文佳等. 低活化马氏体钢激光焊接接头的组织与性能 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 577~580

- 9 Ma Guangyi, Wu Dongjiang, Wang Zhanhong *et al.*. Weld joint forming of thin hastelloy C-276 sheet of pulsed laser welding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0603014
马广义, 吴东江, 王占宏等. 脉冲激光焊接对超薄 Hastelloy C-276 焊缝成形的影响[J]. 中国激光, 2011, **38**(6): 0603014
- 10 Gong Weihuai, Chen Yuhua, Lü Zhen *et al.*. Microstructure and properties of 0.2mm thick sheet GH4169 by laser microwelding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0603008
龚伟怀, 陈玉华, 吕 榛等. 0.2mm 厚 GH4169 薄片激光微焊接接头的组织性能[J]. 中国激光, 2011, **38**(6): 0603008
- 11 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): 15~18
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): 15~18
- 12 R. S. Coelho, A. Kostka, H. Pinto *et al.*. Microstructure and mechanical properties of magnesium alloy AZ31B laser beam welds [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, **485**(1-2): 20~30
- 13 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
- 14 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
- 15 Shan Jiguo, Zhang Jing, Zheng Shiqing *et al.*. Experimental study on pores in laser welding of magnesium alloys[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2009, **38**(3): 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**(3): 234~239
- 16 Quan Yajie, Chen Zhenhua, Yu Zhaohui *et al.*. Defects analysis of AZ31 magnesium alloy joints by laser beam welding[J]. *Hot Working Technology*, 2007, **36**(3): 33~36
全亚杰, 陈振华, 俞照辉等. AZ31 镁合金激光焊接接头中的缺陷分析[J]. 热加工工艺, 2007, **36**(3): 33~36
- 17 Peng Jian, Zhou Chou, Tao Jianquan *et al.*. Gas tungsten arc welding of dissimilar magnesium alloys as AZ31 with AZ61[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2011, (2): 46~51
彭 建, 周 绸, 陶健全等. AZ31 与 AZ61 异种镁合金的 TIG 焊研究[J]. 材料工程, 2011, (2): 46~51
- 18 Quan Yajie, Chen Zhenhua, Gong Xiaosan *et al.*. CO₂ laser beam welding of dissimilar magnesium-based alloys [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, **496**(1-2): 45~51
- 19 Wang Xijing, Zhang Yonghong, Zhang Zhongke. Friction stir welding process of AZ31B and AZ61A magnesium alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2008, **18**(7): 1199~1204
王希靖, 张永红, 张忠科. 异种镁合金 AZ31B 与 AZ61A 的搅拌摩擦焊工艺[J]. 中国有色金属学报, 2008, **18**(7): 1199~1204

栏目编辑: 宋梅梅