

6061-T6/AZ31B 异种金属激光焊接接头组织及性能

朱宗涛, 薛珺予, 陈 辉

(西南交通大学, 四川 成都 610031)

摘 要: 采用高功率、高速激光焊的方法, 实现了 3 mm 厚 6061-T6/AZ31B 异种金属对接接头的焊接。利用体视显微镜、扫描电镜及能谱仪对接头的宏观形貌、显微组织及成分、断口特征进行分析, 并测试了接头的显微硬度和抗拉强度。结果表明, 焊缝内部近镁侧焊缝区及镁侧熔合区存在大量 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 相, 其余区域为 $\alpha(\text{Al})$ 和 Al_2Mg_3 两相混合组织。金属间化合物的存在导致焊缝内部显微硬度明显高于两侧母材, 接头的抗拉强度可达 34 MPa, 拉伸断裂位置在近镁侧焊缝区, 为典型的脆性断裂。

关键词: 激光焊; 铝合金; 镁合金; 金属间化合物

中图分类号: TG456.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)07-1977-06

铝合金及镁合金具有强度高、密度小、塑性好等优点, 作为轻量化结构材料被广泛应用于航空、汽车、机械制造等工业中^[1,2]。由于铝合金和镁合金应用的广泛性和交叉性^[3], 将镁和铝连接成复合结构不可避免。虽然镁、铝的物理性能较为相近, 但以熔化焊的方式连接起来, 通常会产生大量严重恶化接头性能的金属间化合物组织, 因而镁、铝合金的异种金属连接面临的主要问题是有效抑制金属间化合物生成。

许多学者对镁、铝合金异种金属连接进行了研究, 取得了一些可观的成果。尚晶等^[4]以 HS201 铜焊丝作为填充金属对 AZ31 镁合金和 6061 铝合金进行冷金属过渡搭接, 获得了成形良好的搭接接头, 最大抗剪切强度为 27.9 MPa, 断裂发生在组织以 Mg_2Cu 、 MgCu_2 为主的镁铜侧熔合区。杜红燕等^[5]等采用 ER5183、ER5356 焊丝对 AZ31B 镁合金和 7005 铝合金进行填丝钨极氩弧焊, 获得了表面成形良好的焊缝, 并发现镁侧熔合区的硬度值极高, 由较大的脆硬倾向。Zhang 等^[6]对镁铝异种金属进行真空扩散焊, 并采用 Ni 作为中间层, 有效抑制了金属间化合物生成。J. Mohammadi 等^[7]对 2.3 mm 的 6061 铝合金和 3.1 mm 的镁合金进行搅拌摩擦焊, 采用高的转速比获得了较高强度的接头。

与传统焊接方法相比, 激光焊 LBW (Laser Beam Welding) 具有能量密度高、热输入量少、焊接速度快、接头强度高、焊道和热影响区窄等优点^[8], 这些因素都有利于改善焊接接头中金属间化合物的分布情况,

故而激光焊成为了实现镁、铝异种金属连接的热门方向之一。Gao 等^[9]对 2 mm 的 6061-T6 铝合金和 AZ31B 镁合金搭接接头进行激光焊接, 并采用 Ti 作为中间层, 成功抑制了 Mg-Al 金属间化合物层厚度, 金属间化合物层主要由 AlTi_3 和 $\text{Al}_{18}\text{Ti}_2\text{Mg}_3$ 组成。李慧等^[3]同样对 2 mm 的 6061-T6 铝合金和 AZ31B 镁合金搭接接头进行激光焊接, 并通过优化工艺参数得到了无裂纹的焊缝, 但仍存在焊缝脆化现象, 断裂易发生在含有 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 和 Mg_2Al_3 等金属间化合物的镁侧近缝区。目前对镁、异种金属的激光焊接的研究主要采用搭接接头的形式, 然而对镁、铝合金异种金属对接接头的高功率激光焊接的报道却很少。本研究采用高功率、高速光纤激光焊法对 AZ31B 镁合金与 6061-T6 铝合金对接接头进行焊接, 并对其接头的微观组织形貌及力学性能进行研究, 为镁铝合金异种接头激光焊接提供了可行性参考和实践经验。

1 实 验

试验所选材料为 6061-T6 铝合金和 AZ31B 镁合金, 材料尺寸为 150 mm×60 mm×3 mm。所选材料的化学成分如表 1 所示。焊前采用砂纸打磨去除材料表面的氧化膜, 并用乙醇擦拭吹干。

试验所用的激光器为 IPG YLS-4000 光纤激光器, 保护气为 99.999% 的高纯氩气, 吹气位置位于激光束后方, 并与激光束成 45° 夹角。焊接时将待焊试板固

收稿日期: 2016-07-18

基金项目: 国家自然科学基金 (51405398); 中央高校基本科研业务费专项资金 (2682015CX007)

作者简介: 朱宗涛, 男, 1983 年生, 博士, 讲师, 西南交通大学材料科学与工程学院, 四川 成都 610031, 电话: 028-87634353, E-mail: zongtaozhu@163.com

表 1 6061-T6 铝合金和 AZ31B 镁合金化学成分
Table 1 Chemical composition of 6061-T6 aluminum alloy and AZ31B magnesium alloy ($\omega/\%$)

Material	Mg	Fe	Si	Zn	Mn	Cu	Al
6061-T6	0.8-1.2	0.7	0.4-0.8	0.25	0.8-1.2	0.15-0.4	Bal.
AZ31B	Bal.	0.03	0.08	0.6-1.4	0.2-1.0	0.01	2.5-3.5

定于带成型槽的紫铜垫板上，为了控制镁铝之间熔化后的液相反应，减少金属间化合物的形成，将激光斑点由焊缝中心偏向铝板侧 0.5 mm，为了控制金属间化合物的生长，尽量在高激光功率、高速下进行焊接。因此，在激光器最大输出功率 4 kW 时，采用 3 种焊接速度进行焊接试验，焊接工艺参数见表 2。

采用线切割方法垂直于焊缝切取金相试样，用砂纸逐级打磨后，再抛光至镜面腐蚀，焊接接头靠近镁侧所用腐蚀剂为：乙酸 10 mL+苦味酸 4.2 g+乙醇 100 mL+蒸馏水 10 mL，铝侧所用腐蚀剂为：NaOH 20 g+蒸馏水 100 mL。采用 JENOPTIK 体式显微镜观察焊接接头宏观形貌；采用 QUANTA FEG 250 扫描电镜 (SEM) 及能谱仪 (EDS) 对接头的显微组织及元素分布、断口形貌及微区成分进行分析；采用 HXD-1000TM 显微硬度计进行硬度测试，载荷 300 g，加载时间 15 s；用 WDW3100 电子万能拉伸试验机进行拉伸试验，加载速率为 1 mm/min。

2 结果与分析

2.1 接头宏观形貌

3 组试样焊接时激光功率同为 4 kW，当焊接速度 70 mm/s，接头正面成型和背面熔透良好，且表面未出现开裂现象。当焊接速度为 65 mm/s 时，可能由于焊缝内部生产的脆硬相较多，在热应力作用下焊后焊缝发生开裂。当焊接速度增大到 75 mm/s 时，由于热输入相对减小，接头背面出现未焊透现象。图 1 为焊接速度 70 mm/s 时接头的截面形貌。

从图 1 可以看出接头内部熔合良好，焊缝内部出现了明显不同于母材的组织，且靠近 AZ31B 和靠近 6061-T6 两侧的组织差异较大，这是由于激光焊能量密度高、焊速快，在较大的冷却速度下，液相反应和扩散不充分，导致焊缝内部组织不均匀，且在焊缝内部发现一细小的裂纹，见图中椭圆标识区域，推测为焊缝内部组织分布不均匀，且不同组织之间的膨胀系数差异较大，加上热应力的作用，从而引起裂纹的萌生及扩展。

2.2 接头显微组织

6061-T6/AZ31B 异种金属激光焊接接头以焊缝中心为参照，可以分为铝侧熔合区、铝侧焊缝区、焊缝中心区、镁侧焊缝区、镁侧熔合区。图 2 为接头铝侧焊缝区、焊缝中心区、镁侧焊缝区 SEM 显微组织。用 EDS 成分分析结合 Mg-Al 二元合金相图^[10]对各区域的组织进行推测，各区域的 EDS 点分析见表 3。铝侧焊缝区组织由浅灰色基体上分布深灰色的枝状晶组成，如图 2a 所示，经推测二者皆由 $\alpha(\text{Al})$ 和 Al_3Mg_2 组成，但浅灰色组织与深灰色组织相比，其内含有更

表 2 焊接工艺参数

Table 2 Welding process parameters

No.	Laser power/kW	Welding speed/mm s ⁻¹	Focal position/mm	Gas flow/L min ⁻¹	Forming condition
1	4	75	+6	35	Incomplete penetration
2	4	70	+6	35	Good
3	4	65	+6	35	Cracked

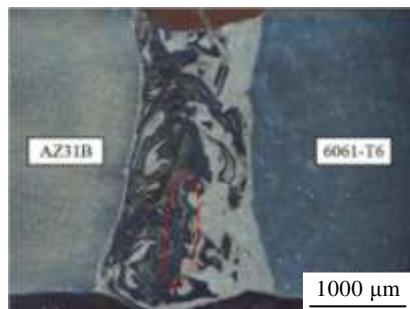


图 1 6061-T6/AZ31B 激光焊接接头截面形貌

Fig.1 Cross section morphology of 6061-T6/AZ31B laser welded joint

高比例的 Al_3Mg_2 ；焊缝中心区组织多以岛屿状的深灰色组织及离散分布黑色质点组成，如图 2b 所示，该区域组织由 $\alpha(\text{Al})$ 固溶体为主和一定量的 Al_3Mg_2 组成；镁侧焊缝区左右两侧出现了 2 种不同的组织，如图 2c 所示，左侧浅灰色组织以高含量的 $\alpha(\text{Al})$ 和一定量的 Al_3Mg_2 组成，右侧深灰色组织以 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 相为主并含有少量镁的固溶体相 $\delta(\text{Mg})$ ；此外，在焊缝中心区域发现有裂纹痕迹，如图 2d 所示，裂纹形成原因同图 1 中的裂纹一致。综上所述，焊缝区主要是 $\alpha(\text{Al})$ 和 Al_3Mg_2 两相混合组织，在镁侧焊缝区出现高含量的金属间化合物 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ ，这样的金属间化合物聚集分布于某一区域，会造成该区域脆硬倾向大，成为接头薄弱区域。

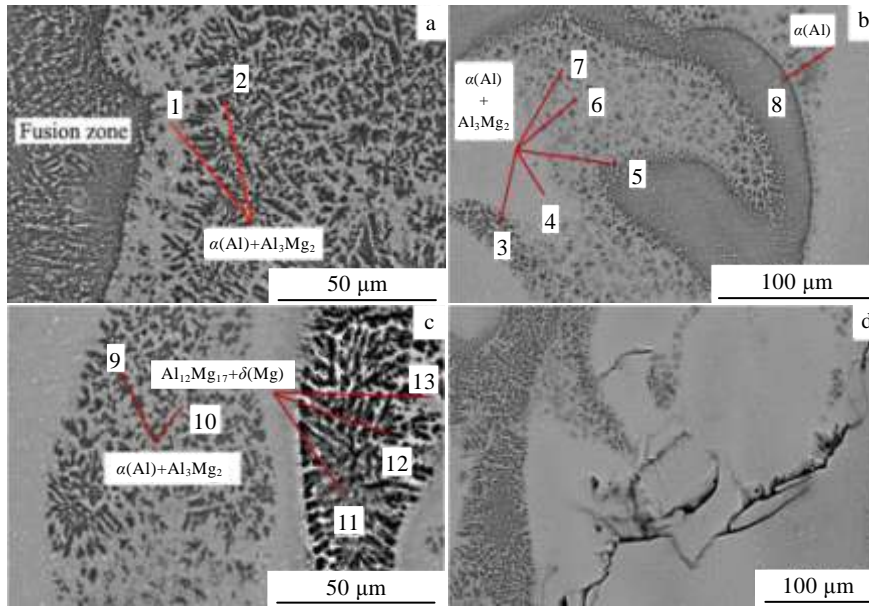


图 2 6061-T6/AZ31B 激光焊接接头显微组织

Fig.2 Microstructures of laser welded 6061-T6/AZ31B joint: (a) weld zone on Al side, (b) weld center, (c) weld zone on Mg side, and (d) cracks in weld zone

表 3 图 2 中不同区域各点成分 EDS 分析

Table 3 Composition of points in Fig.2 by EDS analysis

Points	Mg		Al	
	ω/%	at%	ω/%	at%
1	29.94	32.49	69.05	67.51
2	12.75	14.11	86.14	85.89
3	23.73	25.88	75.43	74.12
4	36.70	39.47	62.46	60.53
5	27.04	29.40	72.05	70.60
6	32.53	35.20	66.46	64.80
7	24.05	26.21	75.14	73.79
8	6.17	6.87	92.82	93.13
9	16.17	17.81	82.80	82.19
10	25.38	27.68	73.59	72.32
11	87.16	89.05	11.89	10.95
12	81.42	83.71	17.59	16.29
13	70.55	74.33	27.04	25.67

图 3 为 6061-T6/AZ31B 异种金属激光焊接接头镁侧熔合区的组织形貌及 EDS 元素线扫描分布曲线。镁侧熔合区以 Mg、Al 元素为主，按照熔合区颜色及组织形态不同可以分为 I、II、III 3 个区域（见图 3a）。I 区为向焊缝内部生长的柱状晶，该区域 Mg 元素含量急剧上升，Al 元素含量急剧下降，如图 3b 所示。对区域内的 A 点进行 EDS 分析，A 点 Mg 和 Al 的质量

分数分别为 66.18% 和 32.45%，结合 Mg-Al 二元合金相图^[10]，可推断该区域为 Al₁₂Mg₁₇ 与 δ(Mg) 两相混合

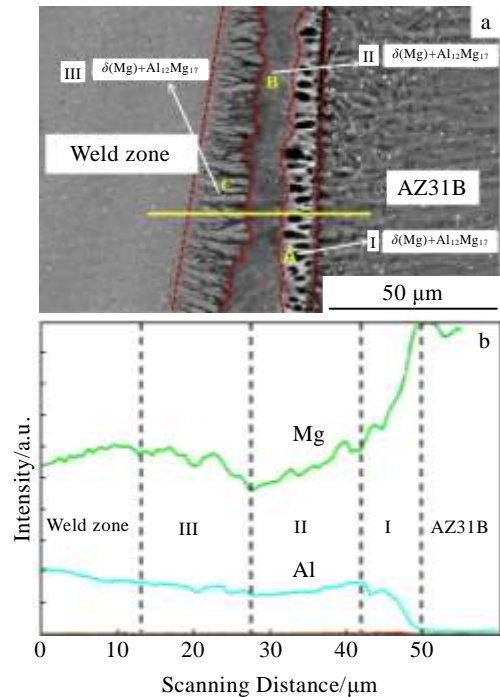


图 3 6061-T6/AZ31B 激光焊接接头镁侧熔合区显微组织
Fig.3 Fusion-zone microstructure of 6061-T6/AZ31B laser welded joint on Mg side: (a) SEM image of fusion zone on Mg side and (b) EDS elements line scanning profile

组织，并且越靠近 AZ31B 母材侧， $\delta(\text{Mg})$ 固溶体含量越高。II 区浅灰色组织 Mg 和 Al 元素含量相对稳定，Mg 含量大致为 Al 含量的 1.5~2.0 倍。对该区域的 B 点进行 EDS 分析，该点 Mg 和 Al 的质量分数分别为 59.71% 和 38.87%，推测为 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 相为主和少量的 $\delta(\text{Mg})$ 相混合组织，该区域母材未完全熔化，与液态焊接金属混合后，液态金属依附未熔相迅速结晶凝固，因此没有明显柱状晶生长特征。III 区组织为向焊缝内部生长的柱状树枝晶，对该区域内 C 点进行 EDS 分析，Mg 和 Al 质量分数分别为 60.50% 和 38.56%，推测同样为大量 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 与少量的 $\delta(\text{Mg})$ 两相混合组织。II 区和 III 区均有大量的 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 相生成，会造成该区域脆硬倾向大，是接头较为薄弱的区域。

图 4 为铝侧熔合区组织形貌及 EDS 元素线扫描分布曲线，该区域组织为连续致密向焊缝内部生长的柱状晶，如图 4a 所示；且该区域内镁和铝的成分变化平缓，Al 含量大约为 Mg 含量的 6~10 倍，如图 4b 所示。对该区域内的 D、E、F 点进行 EDS 分析，D 点 Mg 和 Al 质量分数分别为 13.66% 和 84.24%，E 点 Mg 和

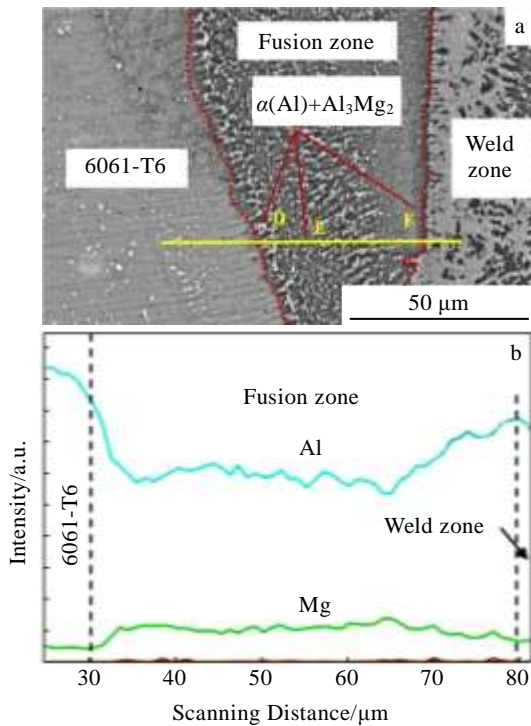


图 4 6061-T6/AZ31B 激光焊接接头铝侧熔合区显微组织及 EDS 分析

Fig.4 Fusion-zone microstructure and EDS analyze of 6061-T6/AZ31B laser welded joint on Al side: (a) SEM image of Fusion zone on Al side and (b) EDS elements line scanning profile

Al 质量分数分别为 11.01% 和 88.51%，F 点 Mg 和 Al 质量分数分别为 7.25% 和 92.03%，结合 Mg-Al 二元合金相图^[9]，推测 D、E、F 点组织为大量 $\alpha(\text{Al})$ 固溶体和少量 Al_3Mg_2 相。

2.3 接头力学性能及断裂行为

图 5 为 6061-T6/AZ31B 异种金属激光焊接接头显微硬度分布，测试位置在图中虚线标示。6061-T6 母材和 AZ31B 母材的硬度 HV 约为 600 MPa，焊缝内部的硬度值存在较大波动，且明显高于两侧母材。焊缝顶部与底部硬度曲线变化趋势一致，近镁侧区域硬度值 HV 平均为 2000 MPa 左右，明显高于近铝侧区域硬度值。焊缝中部在整个接头硬度较高区域，硬度值 HV 平均为 2200 MPa。结合上述的显微组织分析结果可知，焊缝内部存在脆硬的金属间化合物 Al_3Mg_2 和 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 相，是导致焊缝硬度值远高于母材的原因。硬度值的波动是由于不同区域和位置的金属间化合物含量有所不同所造成的。

对 6061-T6/AZ31B 异种金属激光焊接接头进行拉伸试验，接头抗拉强度为 34 MPa，达到了 AZ31B 镁合金母材抗拉强度的 13.2%。图 6a 为拉断后截取断裂位置两侧试样，镶样打磨抛光后在体视显微镜下的照片。可见，断裂位置发生在镁侧焊缝区，并且断裂位置附近存在许多细小的裂纹，如图 6b 所示，这样的断裂位置产生的主要原因是镁侧焊缝区存在高含量的金属间化合物 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 和一定量的 Al_3Mg_2 。图 6c 为扫描电镜下拉伸试样的断口形貌，断口存在明显的解理台阶和河流花样，为典型脆性断裂特征。对断口进行 EDS 成分分析发现，断口内成分多为 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 和 Al_3Mg_2 2 种金属间化合物相。综上所述，大量的金属

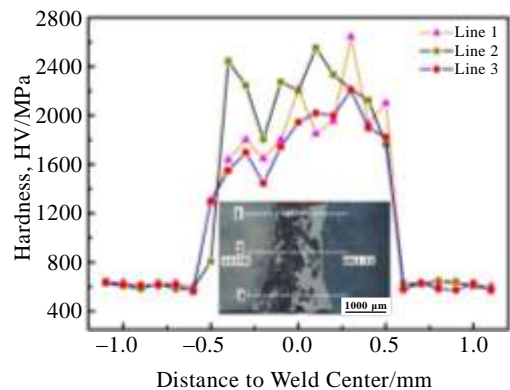


图 5 6061-T6/AZ31B 异种金属激光焊接接头显微硬度分布

Fig.5 Microhardness distribution of 6061-T6/AZ31B laser welded joint

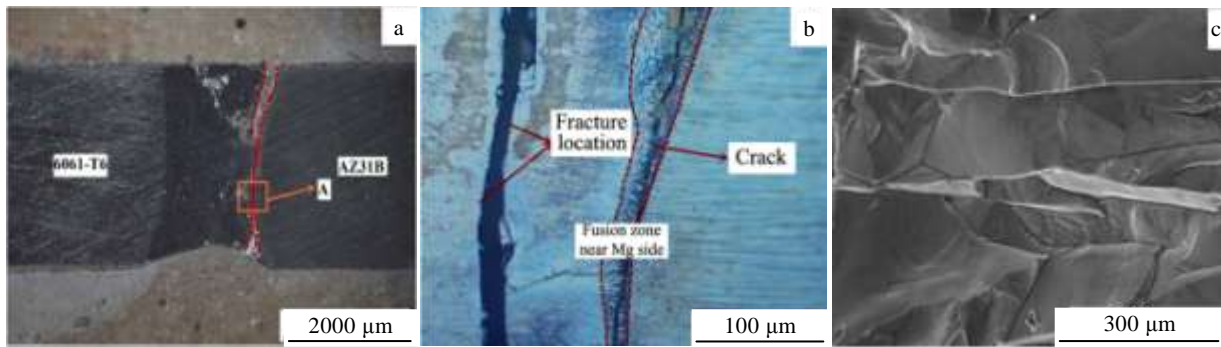


图6 6061-T6/AZ31B 激光焊接接头断裂位置及断口形貌

Fig.6 Fracture position and morphologies of 6061-T6/AZ31B laser welded joint: (a) cross section morphology of tensile specimen after fracture, (b) magnification of the area A in Fig.6a, and (c) SEM fracture morphology

间化合物 $Al_{12}Mg_{17}$ 和 Al_3Mg_2 的存在是造成接头断裂的主要原因。焊缝内部出现的裂纹及断裂位置的发生均是由于金属间化合物的存在及分布不均匀产生应力集中所致, 裂纹存在的位置和断裂位置之间是否存在具体的关联性还有待进一步的研究。

3 结 论

1) 采用激光焊的方法, 通过调整激光功率和焊速, 在 4 kW 的激光功率和 70 mm/s 的焊速条件下, 实现了 3 mm 厚的 6061-T6/AZ31B 异种金属对接接头的熔化焊连接。

2) 6061-T6/AZ31 激光焊接接头镁侧焊缝区和镁侧熔合区均含有大量的 $Al_{12}Mg_{17}$ 相和少量 $\delta(Mg)$ 两相混合组织, 导致该区域脆硬倾向增大, 易发生脆性断裂; 接头的其它区域主要为 $\alpha(Al)$ 和 Al_3Mg_2 两相混合组织组成。

3) 金属间化合物 $Al_{12}Mg_{17}$ 和 Al_3Mg_2 的存在, 导致焊缝内部显微硬度明显高于两侧母材, 且由于金属间化合物含量和位置的变化, 造成硬度变化较大。

4) 6061-T6/AZ31 激光焊对接接头的抗拉强度可达到 34 MPa。拉伸断裂位置发生在镁侧焊缝区, 断裂特征为典型的脆性断裂。镁侧焊缝区及镁侧熔合区大量 $Al_{12}Mg_{17}$ 的存在是造成断裂的主要原因。

参考文献 References

- [1] Liu Zheng(刘 正), Zhang Kui(张 奎), Zeng Xiaoqin(曾小勤). *Theoretical Basis and Application of Magnesium Based Light Alloys(镁基轻质合金理论基础及其应用)*[M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 2
- [2] Liu Jingan(刘静安), Xie Yongsheng(谢永生). *Application and Development of Aluminum Alloys(铝合金材料的应用与技术开发)*[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2004: 14
- [3] Li Hui(李 慧), Qian Ming(钱 鸣), Li Da(李 达). *Laser Journal(激光杂志)*[J], 2007, 28(5): 61
- [4] Shang Jing(尚 晶), Wang Kehong(王克鸿), Tian Hongjun(田宏军) et al. *Transactions of The China Welding Institution(焊接学报)*[J], 2011, 32(12): 41
- [5] Du Hongyan(杜红燕), Li Yajiang(李亚江), Liu Guoliang(刘国良). *Journal of Mechanical Engineering(机械工程学报)*[J], 2015, 51(10): 96
- [6] Zhang Jian, Luo Guoqiang, Wang Yiyu et al. *Materials Letters* [J], 2012, 83: 189
- [7] Mohammadi J, Behnamian Y, Mostafaei A et al. *Materials Characterization*[J], 2015, 101: 189
- [8] Chen Yanbin(陈彦宾). *Modern Laser Welding Technology(现代激光焊接技术)*[M]. Beijing: Science Press, 2005: 2
- [9] Gao Ming, Mei Shuwen, Li Xiangyou et al. *Sriptca Materialia* [J], 2012, 67: 193
- [10] Baker H, Okamoto H, Henry S D et al. *ASM Handbook, Alloy Phase Diagrams*[M]. Ohio: ASM International, 1992: 3

Microstructures and Properties of 6061-T6/AZ31B Butt Joints by Laser Welding

Zhu Zongtao, Xue Junyu, Chen Hui

(Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The butt joints of 6061-T6/AZ31B with a thickness of 3 mm were obtained using laser welding with high laser power and welding speed. The macro-morphology, microstructure and fracture feature of the joints were analyzed by stereo microscope and scanning electron microscope (SEM). The composition of microstructure and fracture surface was analyzed by Energy Dispersive Spectrometer (EDS). The microhardness and tensile strength of the joint were tested. The results show that the content of intermetallic compound is different in different weld regions. There are a large amount of intermetallic compounds $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ in the weld zone and the fusion zone near AZ31B side. Other areas are mostly the mixed structure of $\alpha(\text{Al})$ and Al_2Mg_3 . The presence of intermetallic compounds leads to the higher hardness of the weld compared to that of the base metal. The hardness fluctuates in value because of the different intermetallic compounds and their various contents. The tensile strength of 6061-T6/AZ31B dissimilar butt joints by laser welding is up to 34 MPa. It is found that the fracture always occurs in the weld zone near AZ31B side, and the fracture mode is typical brittle fracture.

Key words: laser welding; aluminum alloy; magnesium alloy; intermetallic compound

Corresponding author: Zhu Zongtao, Ph. D., Lecturer, School of Materials Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China, Tel: 0086-28-87634353, E-mail: zongtaozhu@163.com