

基于 Ni 中间层的铝合金与高强钢激光诱导 TIG 复合焊接

马雨晴, 王红阳*, 刘黎明

大连理工大学材料科学与工程学院辽宁省先进连接技术重点实验室, 辽宁 大连 116024

摘要 提出了加入 Ni 中间层的 6061 铝合金与 DP980 高强钢搭接接头激光诱导电弧复合连接技术, 采用该技术实现了 6061 铝合金与 DP980 高强钢的良好连接。分析了 Ni 中间层对搭接接头力学性能、微观组织的影响, 并分析了 Ni 中间层在焊接过程中的作用。使用光学显微镜、扫描电镜、电子探针、X 射线衍射仪等对典型焊接接头的显微组织、元素分布进行分析。结果表明: 在铝合金与高强钢之间加入 Ni 中间层, 能有效阻止 Fe 元素向铝合金基体中扩散, 并改变了 6061/DP980 界面金属间化合物的种类及分布, 金属间化合物的厚度明显减小, 金属间化合物主要由 FeAl_3 和 Fe_2Al_5 组成, Ni 元素也发生扩散, 并主要以 Al-Ni 化合物及 Fe(Ni) 固溶体的形式存在于焊缝中。添加 Ni 中间层焊接接头的剪切拉伸载荷可达到 173 N/mm, 比未添加 Ni 中间层的接头提高了约 35%。

关键词 激光技术; 激光诱导电弧; 复合焊接; 铝合金; 高强钢; Ni 中间层

中图分类号 TG457

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0802002

Aluminum Alloy and High-Strength Steel Joint via Laser-Induced Tungsten Inert Gas Hybrid Welding Based on Ni Interlayer

Ma Yuqing, Wang Hongyang*, Liu Liming

Key Laboratory of Liaoning Advanced Welding and Joining Technology, School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China

Abstract This study proposes laser-induced arc hybrid welding technology for 6061 aluminum (Al) alloy/DP980 high-strength steel lap jointing with a nickel (Ni) interlayer, which achieves a good connection between 6061 Al alloy and DP980 high-strength steel. The effect of Ni interlayer on the mechanical properties and microstructure of the lap joints and the effect of the Ni interlayer in the welding process are analyzed. An optical microscope, a scanning electron microscope, an electron probe, and an X-ray diffractometer are used to analyze the microstructure and elemental distributions of typical lap joints. Experimental results show that adding a Ni interlayer between Al alloy and high-strength steel can effectively prevent the diffusion of Fe element into aluminum alloy matrix and change the types and distributions of intermetallic compounds (IMCs) at the 6061/DP980 interface. With the Ni interlayer, the IMC-layer thickness reduces obviously, and the IMC layer primarily contains FeAl_3 and Fe_2Al_5 . Simultaneously, the Ni element is mainly diffused in the form of an Al-Ni compound and an Fe (Ni) solid solution in the weld. The shear tensile load of the joint with the Ni interlayer can reach a maximum of 173 N/mm, indicating an increase of $\sim 35\%$ compared to that of the joint without the Ni interlayer.

Key words laser technique; laser-induced arc; hybrid welding; aluminum alloy; high-strength steel; Ni interlayer

OCIS codes 140.3390; 140.3538; 350.3390

1 引 言

随着全球气候变暖、环境恶化以及能源短缺等

问题日益严峻, 节能减排成为全球汽车制造业可持续发展的关键, 新能源汽车产业兴起的目标是降低汽车对能源的消耗。据统计, 电动汽车的车重降低

收稿日期: 2019-01-15; 修回日期: 2019-03-13; 录用日期: 2019-04-08

基金项目: 国家自然科学基金(U1764251)

* E-mail: wang-hy@dlut.edu.cn

10%，对应的续航里程可提高 5.5%^[1]。在尽可能减轻车重的同时，应确保汽车的安全性能，故势必需要采用高强钢与轻质金属组成的复合结构。高强钢与铝合金两种具有轻量化特征的材料组成的复合连接结构，可以充分发挥高强钢良好的力学性能及铝合金的轻量化作用，对于促进车辆的节能减排具有十分重要的意义^[2-3]。

铝和钢的热物理性能、化学性能相差较大，焊接时极易生成 Fe-Al 金属间化合物 (IMC)，导致接头变脆。此外，钢与铝热膨胀系数的显著差异会使接头产生较大的内应力，影响接头的性能^[4]，因此铝合金/钢异种金属间的焊接非常困难。国内外已有诸多学者针对铝合金/钢焊接技术进行了大量研究，提出了扩散焊^[5]、爆炸焊^[6]、搅拌摩擦焊^[7]、电阻点焊^[8]、激光焊^[9]等焊接方法，并针对铝合金和高强钢的焊接进行了深入研究。北京工业大学的马彪等^[10]在铝合金/钢异种金属的激光深熔焊过程中加入 Zn、Ni、Sn 粉末，发现填充粉末的加入能减小 IMC 的厚度，改善接头的力学性能；哈尔滨工业大学的宋建岭等^[11]通过在不锈钢表面预涂钎剂层，采用钨极氩弧焊 (TIG) 实现了铝合金与不锈钢的优质连接，获得的对接接头具有熔焊与钎焊的双重性质，接头的平均抗拉强度为 90.6 MPa；湖南大学的周愆武等^[12]通过对比双相钢/铝合金的激光胶接焊和激光焊接的接头发现，胶层的加入增加了焊缝的熔深和熔宽，并提高了铝合金/钢焊接接头的力学性能；苏州大学的陈夏明等^[13]对铝合金/钢板材进行激光搭接焊试验，对比分析了镍箔对焊缝组织及性能的影响，结果表明：Ni 元素抑制了 Fe-Al 冶金反应的进行，IMC 厚度减小，接头强度为 61 MPa，是未添加镍箔试样的 1.4 倍。兰州理工大学的樊丁等^[14]采用 TIG 电弧辅助激光技术对铝合金/钢进行对接熔钎焊，结果表明，与单纯激光相比，电弧辅助激光热源改变了焊接过程的温度场分布，促进了液态铝向钢侧铺展，接头的最大抗拉强度可达 163 MPa。

上述研究均发现铝合金/钢熔化焊易在接头内形成硬脆的 IMC^[15]，添加中间层或采用新型热源后能够改善界面结构，并有利于接头力学性能的提高。针对目前铝合金/钢焊接存在的问题，本文提出了一种基于 Ni 中间层的铝合金/钢搭接接头激光诱导电弧复合连接技术。与传统的单热源相比，激光诱导电弧复合热源综合了激光和电弧各自的优点，具有激光焊接的高速度及电弧焊接良好的桥接性，焊接效率、焊接过程的稳定性和可靠性、焊接质量等得到

了进一步提高^[16-17]。Ni 元素不仅可以与 Al 反应生成 Al-Ni 系化合物，还可以与 Fe 无限互溶，因此通过在铝合金与高强钢之间添加一层镍箔来改善液态钢与液态铝之间的冶金反应，就可以减少 Fe-Al 脆性相的生成，改善铝合金与高强钢的焊接性。

2 试验材料和方法

2.1 试验材料

采用 2 mm 厚的 6061 铝合金和 1 mm 厚的 DP980 高强钢作为待焊接材料，0.1 mm 厚的纯镍箔作为中间层进行焊接试验。铝合金和高强钢的主要化学成分如表 1~2 所示。

表 1 6061 铝合金的主要化学成分

Table 1 Main chemical compositions of 6061 Al alloy

Element	Mass fraction / %
Mg	0.89
Si	0.53
Fe	2.00
Al	Bal.

表 2 DP980 高强钢的主要化学成分

Table 2 Main chemical compositions of DP980 high-strength steel

Element	Mass fraction / %
Mn	2.07
C	0.19
Si	0.13
Fe	Bal.

2.2 试验方法

采用由最大输出功率为 1000 W 的脉冲激光热源和 TIG 组成的激光诱导电弧复合焊接系统进行焊接试验。焊接示意图如图 1 所示，采用 DP980 高强钢在上、6061 铝合金在下的搭接接头形式，在搭接区域添加宽约 5 mm 的镍箔。试验过程中采用交流电弧进行焊接，使用高纯氩气作为焊接保护气体。采用激光在前、电弧在后，即用激光引导电弧的形式进行复合焊接，具体焊接参数如表 3 所示。

表 3 激光诱导电弧复合焊接工艺参数

Table 3 Parameters of laser-induced arc hybrid welding process

Parameter	Without Ni	With Ni
Laser power / W	600-800	600-800
Welding current / A	120	140
Defocusing / mm	3	3
Laser-arc distance / mm	2	2
Welding speed / (mm·min ⁻¹)	700-900	700-900

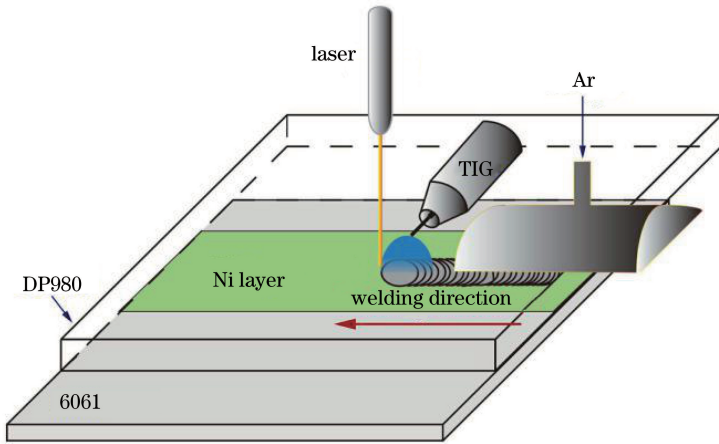


图 1 6061 铝合金/DP980 高强钢激光诱导电弧复合焊接示意图

Fig. 1 Schematic of 6061 aluminum alloy/DP980 high-strength steel laser-induced arc hybrid welding process

焊接前先用钢刷对铝合金和 6061 高强钢表面进行打磨,以去除其表面的氧化膜,再用无水乙醇擦拭,去除表面的污渍。焊接完成后,沿垂直于焊缝方向切取 100 mm×10 mm 的拉伸试样(GB/T 26957—2011)进行拉伸性能测试。从同一焊缝中切取试样,制成金相试样,使用 Keller 腐蚀剂对其进行腐蚀,然后利用金相显微镜和扫描电镜(SEM)对金相试样接头各区域的组织进行观察,通过电子探针设备(EPMA)及 X 射线衍射仪(XRD)分析焊缝微区的成分及元素分布。

3 结果与分析

3.1 中间层对接头力学性能的影响

采用激光诱导电弧复合焊接的方法焊接铝合金与 6061 高强钢时,电弧主要用来熔化 6061 高强钢,激光主要作用于熔池底部,并影响热源在铝合金上的熔化深度^[18]。因此,本试验在适当的电弧电流下,通过改变激光功率进行了 5 组焊接试验,并对 Ni 中间层加入前后焊接接头的状态进行了对比分析。图 2 为添加 Ni 中间层后激光诱导电弧复合焊接典型试件的焊缝形貌,焊接过程中出现了轻微飞溅,焊缝正面呈规则的鱼鳞纹形状,焊缝背面稍有凸起。

对焊接试件进行抗拉剪强度测试,结果表明:未添加 Ni 中间层时,部分试件的焊接缺陷较多,焊接结果不理想,剪切拉伸载荷仅为 128 N/mm;添加 Ni 中间层后,接头的剪切拉伸载荷随激光功率的增大呈先增大后减小的趋势,如图 3 所示,剪切拉伸载荷可达到 173 N/mm,较未添加 Ni 中间层的试件提高了 35%。当激光功率较小时,焊缝的熔深较小,6061 高强钢与铝合金的结合性能和力学性能较差;随着

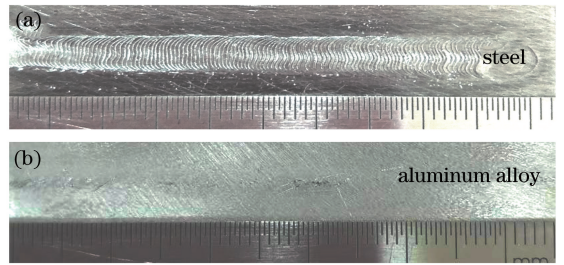


图 2 添加 Ni 中间层后得到的焊缝的宏观形貌。
(a) 铝合金;(b) 6061 高强钢

Fig. 2 Macroscopic morphologies of welds with Ni interlayer. (a) Aluminum alloy; (b) high-strength steel

激光功率增大,焊缝的有效连接宽度和 IMC 厚度均增加。有效连接宽度的增加有利于增强焊缝的剪切载荷,而 IMC 厚度增加则会使接头变脆,剪切载荷降低。因此,当激光功率增大到一定程度时,将产生较厚的 IMC,导致接头强度降低。

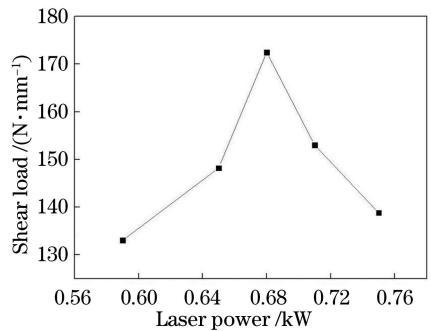


图 3 激光功率对添加 Ni 中间层焊接接头剪切载荷的影响
Fig. 3 Effect of laser power on shear load of lap joint with Ni interlayer

3.2 Ni 中间层对焊缝组织的影响

铝合金与 6061 高强钢异种金属连接界面是整个接头的最核心部分,在该区域内发生了 Fe、Al、Ni 三种

金属的互溶与反应,会形成多种固溶体与 IMC 的混合物^[19]。图 4(a)为未添加 Ni 中间层激光诱导电弧焊接接头横截面的形貌。受复合焊接热源中脉冲激光的影响,熔化的钢呈图钉形嵌入铝合金熔池中,在界面处 Fe 元素向铝合金母材中迅速扩散,生成较厚的 IMC 层。焊接接头热影响区(HAZ)的范围较大,并伴有明显的裂纹和气孔产生。图 4(b)为图 4(a)中 A 区域的局部放大图,可以看出生成的 IMC

层厚度并不均匀,且超过了 50 μm,主要由靠近钢侧的片状化合物以及靠近铝合金侧向外生长的针状化合物组成。通过 EPMA 对图 4(b)中 3 个位置的成分进行定量分析,结果如表 4 所示。根据测得的原子比并结合 Al-Fe 二元相图推测,图中区域 1 为 FeAl₂ 相,区域 2 中的针状化合物主要为 FeAl₃,而类似区域 3 中片状、颜色不均匀的物质则是 Al 在 Fe 中的固溶体^[20]。

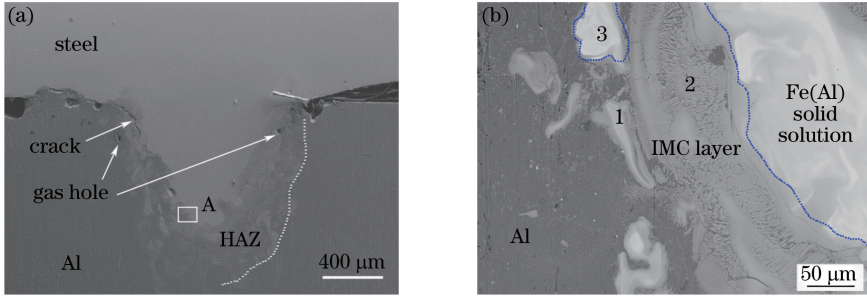


图 4 未添加 Ni 中间层焊接接头的横截面形貌及局部放大图。
Fig. 4 Cross-section morphology and local magnification of lap joint without Ni interlayer.

(a) Cross-section morphology; (b) magnified image of A area in Fig. 4(a)

表 4 图 4~5 中各标注位置的主要成分

Table 4 Main components of each marked position in Figs. 4-5

Position	Atomic fraction /%				Possible phase
	Al	Fe	Ni	Mg	
1	63.95	35.52	0	0.470	FeAl ₂
2	75.15	24.76	0	0.060	FeAl ₃
3	15.42	84.49	0	0.230	Fe(Al)
4	82.69	14.12	2.46	0.720	FeAl ₃ , Al _{1,1} Ni _{0,9}
5	69.98	27.83	1.82	0.360	Fe ₂ Al ₅
6	63.49	34.40	1.76	0.351	Fe ₂ Al ₅
7	4.18	86.11	9.64	0.069	Fe

图 5(a)所示为添加 Ni 中间层后激光诱导电弧复合焊接接头的横截面形貌。在激光作用下,铝合金熔池呈典型的图钉形形貌,其成型特征与未加入 Ni 中间层时基本相似,但未发现明显的焊接裂纹及

气孔缺陷。同时,在图钉两侧能够看到清晰的未熔化的 Ni 金属层。加入 Ni 中间层后,复合焊接接头铝合金/钢界面变得清晰,IMC 层明显变薄,无明显裂纹和气孔产生,说明添加 Ni 中间层能有效抑制

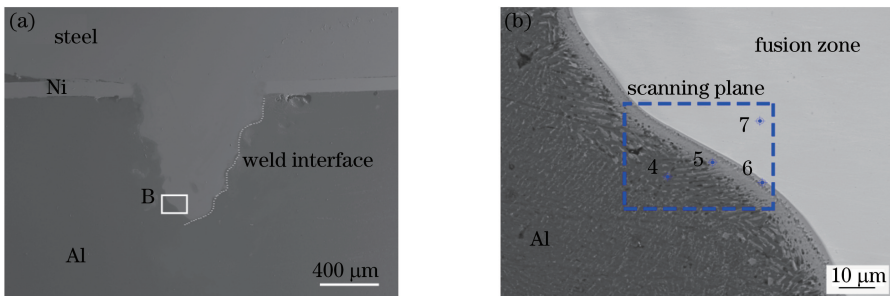


图 5 添加 Ni 中间层焊接接头的横截面形貌及局部放大图。
Fig. 5 Cross-section morphology and local magnification of lap joint with Ni interlayer.

(a) Cross-section morphology; (b) magnified image of B area in Fig. 5(a)

Fe 向铝合金中扩散。

将图 5(a) 中的 B 区域进行放大, 如图 5(b) 所示, 可明显看到 IMC 层变薄且分布均匀。由图 6 所示的 EPMA 面扫结果可以看出, 添加 Ni 中间层后, 铝合金/钢界面中的 IMC 层大致可以分为 4 个部分。结合图 7 所示的 XRD 分析结果分别对这 4 部分化合物成分进行分析, 结果如下:

1) 区域 4 中靠近 Al 基体向外侧择优生长的细长针状化合物主要由富 Al 相组成, 测得 Ni 元素的含量相对较少; 结合 EPMA 面扫图像可知, Ni 元素在该区域中主要以化合物的形式存在, 结合原子比分析可知此处的化合物为 FeAl_3 和 $\text{Al}_{1.1}\text{Ni}_{0.9}$ 。

2) 与区域 5 相比, 区域 6 中的 IMC 层相对较薄; 区域 5、6 中 Al 原子的质量分数为 51%~74%, Fe 原子的质量分数为 26%~37%, Ni 元素的质量分数约为 1.8%。经分析, 这两处的化合物均为 Fe_2Al_5 , 由于形成 Fe_2Al_5 所需的 Gibbs 自由能小于形成 FeAl_3 所需的 Gibbs 自由能, 故 Fe_2Al_5 比 FeAl_3 更早形成, 因此随着温度降低, Fe 在熔融 Al 中

的溶解度逐渐降低^[21-22], 从区域 6 到区域 5, Fe 元素含量呈递减的趋势, 这说明 Ni 中间层的加入在一定程度上抑制了 Fe、Al 之间的相互扩散, 避免生成图 4(b) 中所示的呈片状的脆性相以及较厚的 IMC 层。

3) 区域 7 的成分主要为 Fe 元素, 结合 Ni 元素的 EPMA 面扫结果可知 Ni 主要以固溶体的形式弥散分布于钢的边缘, 且从钢侧到铝侧, Ni 元素含量依次递减, 说明 Ni 元素并没有在整个熔池中弥散分布, 虽然 Ni 也发生扩散, 并以 Al-Ni 化合物和 Fe(Ni) 固溶体两种形式存在于焊缝中, 但其整体上仍呈现层状分布特征。这主要是因为激光诱导电弧复合焊接过程中铝合金的熔池主要是由脉冲激光作用产生的, 脉冲激光的脉宽为 0.2 ms, 焊接速度为 900 mm/min, 铝合金中的熔池会在脉冲激光作用下快速熔化及凝固, 因此 Ni 在铝合金熔池中的扩散时间相对较短, 能够有效地减少 Fe 元素与 Al 元素之间的反应时间和接触面积, 进而有效地改善了焊接接头铝合金/钢界面处的反应过程和组织结构, 提高了铝合金与高强钢激光诱导电弧焊接接头的整体性能。

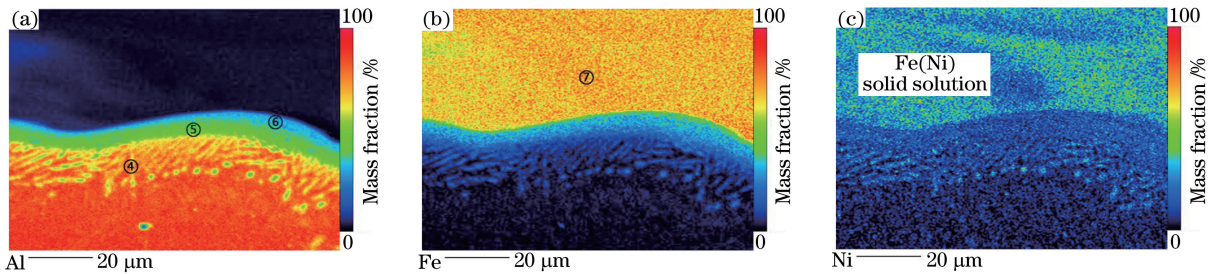


图 6 添加 Ni 中间层焊缝的 EPMA 面扫图像。(a) Al 元素分布; (b) Fe 元素分布; (c) Ni 元素分布

Fig. 6 EPMA surface scan images of weld with Ni interlayer. (a) Al-element distribution; (b) Fe-element distribution; (c) Ni-element distribution

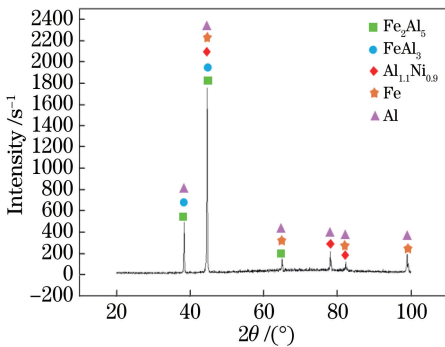


图 7 添加 Ni 中间层焊接接头界面的 XRD 分析结果
Fig. 7 XRD analysis results of lap-joint interface with Ni interlayer

3.3 焊接接头的断口形貌

图 8 为典型试件接头断口的 SEM 形貌。对于未添加 Ni 中间层的接头, 拉伸时裂纹起源于焊缝边

缘, 沿着铝合金/钢界面中的片层状 IMC 开裂, 致使接头整体剥离, 从图 8(a) 中可以看出断口属于典型的脆性断裂。对断面进行点成分的定量分析后发现, 断口处的主要成分为 FeAl_3 和 Fe_2Al_5 金属间化合物。对于添加 Ni 中间层后的接头, 拉伸时接头沿着铝合金 HAZ 和中间层过渡区开裂, 断口形貌由解理面和解理台阶组成, 有明显的河流花样^[23]。对断口进行成分分析, 发现断口边缘为 Ni 的富集区, 中心处的 Ni 含量极少, 主要为 Fe_2Al_5 金属间化合物和少量 Al-Ni 相。

4 结 论

采用激光诱导电弧复合热源实现了 6061 铝合金和 DP980 高强钢的良好连接, 分析了 Ni 中间层对搭接接头力学性能及微观组织的影响。随着激光

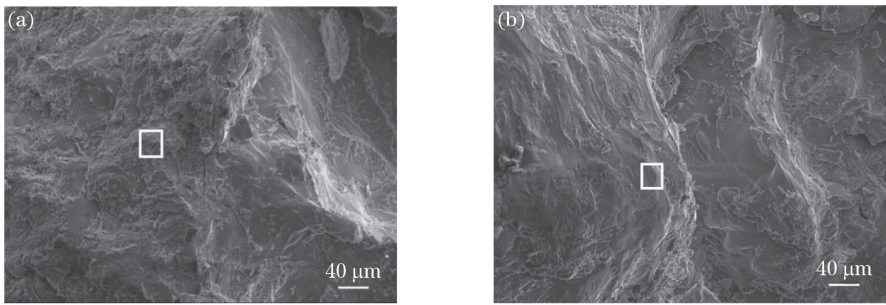


图 8 有无 Ni 中间层焊接接头的典型断口形貌。(a)无 Ni 中间层;(b)有 Ni 中间层

Fig. 8 Typical fracture morphologies of lap joints with and without Ni interlayer. (a) Without Ni interlayer; (b) with Ni interlayer

功率增加,接头的力学性能呈先变好后变差的趋势,当激光功率为 680 W 时力学性能最好,接头形貌呈典型的图钉形。加入 Ni 中间层后,Ni 元素主要分布于铝合金/钢界面处,以 $Al_{1.1}Ni_{0.9}$ 化合物和 Fe(Ni)固溶体的形式存在于焊缝中,界面处 Fe 元素与 Al 元素的相互扩散及反应受到抑制,金属间化合物层的厚度在 $10\ \mu\text{m}$ 以内,接头的剪切拉伸载荷较未添加 Ni 中间层的接头明显提高。

参 考 文 献

[1] Qin X, Jiang S, Liu J. Discussion on the connection technology of light materials for electric vehicles[J]. *Modern Components*, 2017(11): 55-58.
覃鑫,江崧,刘建.电动汽车轻质材料连接工艺的探讨[J].*汽车工艺师*, 2017(11): 55-58.

[2] Xie C J, Yang S L, Liu H B, *et al.* Microstructures and mechanical properties of 7050 ultrahigh-strength aluminum alloy joints by laser welding[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(3): 031403.
谢超杰,杨尚磊,刘浩博,等.7050 高强铝合金激光焊接接头的组织性能[J].*激光与光电子学进展*, 2018, 55(3): 031403.

[3] Feng Y Y, Zeng K, He X C, *et al.* Laser spot weld bonding and joint strength analysis of dual-phase steels[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(3): 031404.
冯煜阳,曾凯,何晓聪,等.双相钢激光胶接点焊及接头强度分析[J].*激光与光电子学进展*, 2018, 55(3): 031404.

[4] Li J, Huang J K, Jin Q S. Research status of welding-brazing of aluminum/steel dissimilar metals [J]. *Electric Welding Machine*, 2018, 48(1): 109-114.
李杰,黄健康,靳全胜.铝/钢异种金属熔钎焊方法研究现状[J].*电焊机*, 2018, 48(1): 109-114.

[5] Chen S J, Zhao P F. Transient liquid-phase diffusion bonding process of steel/aluminum dissimilar metal

and microstructures of joint[J]. *Welding & Joining*, 2013(5): 32-35, 69.
陈思杰,赵丕峰.钢/铝异种金属 TLP 扩散焊工艺与组织[J].*焊接*, 2013(5): 32-35, 69.

[6] Sun X J, Tao J, Guo X Z. Bonding properties of interface in Fe/Al clad tube prepared by explosive welding [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21(10): 2175-2180.

[7] Uzun H, Dalle Donne C, Argagnotto A, *et al.* Friction stir welding of dissimilar Al 6013-T4 to X5CrNi18-10 stainless steel[J]. *Materials & Design*, 2005, 26(1): 41-46.

[8] Mortazavi S N, Marashi P, Pouranvari M, *et al.* Investigation on joint strength of dissimilar resistance spot welds of aluminum alloy and low carbon steel [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 264/265: 384-389.

[9] Torkamany M J, Tahamtan S, Sabbaghzadeh J. Dissimilar welding of carbon steel to 5754 aluminum alloy by Nd: YAG pulsed laser [J]. *Materials & Design*, 2010, 31(1): 458-465.

[10] Ma B, Cui L, Qian W, *et al.* Effects of filler powders on microstructures and properties of the interface in the welded joints for steel/Al dissimilar materials using laser keyhole welding [J]. *Applied Laser*, 2015, 35(4): 441-444.
马彪,崔丽,钱伟,等.填充粉末对钢/铝异种合金激光深熔焊接头界面组织的影响[J].*应用激光*, 2015, 35(4): 441-444.

[11] Song J L, Lin S B, Yang C L, *et al.* Characteristics of precoating TIG welding-brazing joint of aluminum alloy to stainless steel [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2009, 19(7): 1209-1215.
宋建岭,林三宝,杨春利,等.铝合金/不锈钢预涂层钨极氩弧熔钎焊接头的特性[J].*中国有色金属学报*, 2009, 19(7): 1209-1215.

[12] Zhou D W, Li N N, Xu S H, *et al.* Analysis of the adhesive layer of laser weld bonding joints in dual phase steel/ aluminum alloy [J]. *Journal of*

- Mechanical Engineering, 2016, 52(14): 25-30.
- 周恬武, 李宁宁, 徐少华, 等. 双相钢/铝合金激光胶接焊胶层作用分析[J]. 机械工程学报, 2016, 52(14): 25-30.
- [13] Chen X M, Wang X N, Yan Q, *et al.* Effect of nickle foil on microstructure properties of DP980/A6061 dissimilar laser welded joints [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(11): 1102002.
- 陈夏明, 王晓南, 颜倩, 等. 镍箔对DP980/A6061异种激光焊接接头组织性能的影响[J]. 中国激光, 2018, 45(11): 1102002.
- [14] Fan D, Wang B, Li C L, *et al.* Method of fusion-brazed butt joint between aluminum alloy and galvanized steel by arc-assisted laser [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(1): 15-18.
- 樊丁, 王斌, 李春玲, 等. 铝/钢异种金属电弧辅助激光对接熔钎焊方法[J]. 焊接学报, 2015, 36(1): 15-18.
- [15] Cui L, Lu D Q, Wang G H, *et al.* Research progress of steel/aluminum dissimilar alloys joining using laser keyhole welding-brazing and keyhole welding processes [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(3): 66-73.
- 崔丽, 卢东琪, 王国红, 等. 钢/铝异种合金激光深熔钎焊与深熔焊工艺研究进展[J]. 航空制造技术, 2018, 61(3): 66-73.
- [16] Xiao R S, Wu S K. Progress on laser-arc hybrid welding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(11): 1680-1685.
- 肖荣诗, 吴世凯. 激光-电弧复合焊接的研究进展[J]. 中国激光, 2008, 35(11): 1680-1685.
- [17] Hu L H, Liu X L, Hou D B, *et al.* Microstructures and properties of laser hybrid welded T91 steel joints after high temperature aging[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(9): 0902003.
- 胡连海, 刘晓林, 侯德彬, 等. 激光电弧复合焊 T91 钢接头的高温时效组织与性能[J]. 中国激光, 2018, 45(9): 0902003.
- [18] Mei S W, Cheng Q L, Jiang Y, *et al.* Interfacial properties and tensile strength of laser arc hybrid welded dissimilar Al/steel joint [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(2): 351-359.
- 梅述文, 成群林, 姜勇, 等. 铝/钢异种合金激光-电弧复合焊接接头的界面性能及抗拉强度[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(2): 351-359.
- [19] Yang X D, Shi Y, Liu J. Effect of Cu foil on laser butt welding quality of aluminum/steel dissimilar metals joint [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(14): 143-149.
- 杨旭东, 石岩, 刘佳. 铜箔中间层对铝/钢异种金属激光对接焊接头质量的影响[J]. 机械工程学报, 2014, 50(14): 143-149.
- [20] Wang H Y, Feng B Q, Song G, *et al.* Laser-arc hybrid welding of high-strength steel and aluminum alloy joints with brass filler [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2018, 33(7): 735-742.
- [21] Liu J, Jiang S C, Shi Y, *et al.* Effects of zinc on the laser welding of an aluminum alloy and galvanized steel [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 224: 49-59.
- [22] Ma J J, Harooni M, Carlson B, *et al.* Dissimilar joining of galvanized high-strength steel to aluminum alloy in a zero-gap lap joint configuration by two-pass laser welding [J]. Materials & Design, 2014, 58: 390-401.
- [23] Li C L, Fan D, Wang B. Characteristics of TIG arc-assisted laser welding-brazing joint of aluminum to galvanized steel with preset filler powder [J]. Rare Metals, 2015, 34(9): 650-656.