

镍箔对 DP980/A6061 异种激光焊接接头组织性能的影响

陈夏明^{1**}, 王晓南^{1*}, 颜倩¹, 王高松², 胡增荣³, 张敏⁴, 陈长军⁴

¹苏州大学沙钢钢铁学院, 江苏 苏州 215021;

²东北大学材料电磁过程研究教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;

³苏州大学轨道交通学院, 江苏 苏州 215021;

⁴苏州大学机电与工程学院, 江苏 苏州 215021

摘要 对 DP980 板和 A6061 板进行了激光搭接焊试验, 对比分析了镍箔对焊接接头焊缝(WS)和熔合线(FL)的显微组织、显微硬度及拉剪性能的影响。结果表明, 对于未添加镍箔样品, 铝元素进入熔池内导致 WS 和 FL 处形成大量软质相 δ 铁素体和部分板条马氏体(LM), 钢/铝界面处析出脆性 FeAl_2 、 FeAl_3 金属间化合物, 金属间化合物层的峰值厚度约为 $50 \mu\text{m}$, 拉伸过程中焊接接头在界面处发生脆性断裂; 对于添加镍箔样品, 镍元素抑制了 Fe-Al 冶金反应的进行, 促使 δ 铁素体向奥氏体转变, 在室温下 WS 获得了全 LM 组织, WS 硬度升高, 界面处形成了 Ni-Al 金属间化合物, 界面处的硬度和脆性 Fe-Al 金属间化合物层的厚度减小。镍箔使焊接接头的强度提高至 61 MPa, 是未添加镍箔样品的 1.4 倍。

关键词 激光技术; 激光焊接; 镍箔; 显微组织; 金属间化合物; 力学性能

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1102002

Effect of Nickle Foil on Microstructure Properties of DP980/A6061 Dissimilar Laser Welded Joints

Chen Xiaming^{1**}, Wang Xiaonan^{1*}, Yan Qian¹, Wang Gaosong²,
Hu Zengrong³, Zhang Min⁴, Chen Changjun⁴

¹Shagang School of Iron and Steel, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China;

²Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China;

³School of Rail Transportation, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China;

⁴School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China

Abstract The experiment of the laser overlapped welding for the DP980 and A6061 sheets is conducted and the influences of the nickel foil on the microstructure, the microhardness and the tensile shear property of the weld seam (WS) and the fusion line (FL) of the laser welded joints are compared and analyzed. The results show that, as for the sample without the nickel foil, the entry of the Al element into the weld pool results in the formation of a large number of soft phase δ ferrites and some lath martensites (LM) within the WS and FL. The brittle intermetallic compounds of FeAl_2 and FeAl_3 separate out near the steel-Al interface, whose peak thickness is about $50 \mu\text{m}$, and thus there occur brittle fractures of welded joints at the interface during the tensile process. In contrast, as for the sample with the nickel foil, the nickel element effectively suppresses the Fe-Al metallurgical reaction, and thus the transformation of δ ferrites into austenite is promoted. At room temperature, the WS obtains the full LM microstructure. The WS hardness increases, there occurs the Ni-Al intermetallic compound near the interface, and

收稿日期: 2018-03-08; 修回日期: 2018-04-16; 录用日期: 2018-06-21

基金项目: 国家自然科学基金(51775102)、中国博士后基金第 11 批特别资助(2018T110542)、江苏省研究生科研与实践创新计划(KYCX18_2507)

* E-mail: wxn@suda.edu.cn; ** E-mail: 1962923837@qq.com

both the hardness at interface and the thickness of the Fe-Al intermetallic compound layer decrease. The nickel foil makes the laser welded joint strength increase up to 61 MPa, which is 1.4 times that of the sample without the nickel foil.

Key words laser technique; laser welding; nickel foil; microstructure; intermetallic compound; mechanical properties

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 140.3510

1 引 言

铝合金是汽车轻量化中应用最广泛的轻质金属^[1]。采用铝合金制造发动机、车轮及白车身,其质量较钢铁材料制造的产品可分别减轻 30%、30%和 40%^[2-3]。鉴于经济性和安全性的综合考虑,目前在燃油汽车上只有部分部件由铝合金制造,在实际的制造过程中需要解决钢铁材料和铝合金的焊接问题。

相比于传统的电阻点焊、电弧焊、气体保护焊等,高功率连续激光焊接技术以焊接速度快、焊缝(WS)成形好、热影响区及热变形小等优点得到了国内外汽车生产商的青睐。近年来,国内外研究人员也尝试将激光焊接技术应用于钢/铝异种金属连接,获得了大量有价值的研究结果。钢和铝的物理化学性能差异较大,且铁、铝元素极易发生冶金反应形成脆性 Fe-Al 金属间化合物,恶化焊接接头的力学性能^[4-6]。减少或抑制 Fe-Al 金属间化合物的产生是钢/铝异种激光焊接的关键科学问题之一。Peyre 等^[7-9]研究了 Zn 对钢/铝异种激光钎焊焊接接头组织和性能的影响机理,发现锌能提高液态铝在钢板表面的润湿铺展能力,且钎料中的锌可与铝发生冶金反应,对 Fe-Al 冶金反应有一定的抑制作用,Fe-Al 金属间化合物层的厚度可控制在 3~23 μm 内。Yang 等^[10]利用透射电子显微镜(TEM)分析了锌

元素对熔池冶金反应的影响机理,发现锌元素使得界面处有 Fe₂Al_{15-x}Zn_x、FeZn₁₀ 新相析出,焊接接头的强度提高了 69%。Zhou 等^[11-12]通过在钢/铝界面预置厚度为 0.10 mm 的过渡金属粉末(Mn、Zr 和 Sn),获得了无缺陷的钢/铝焊接接头,研究结果表明,预置锡粉条件下焊接接头的性能最为优异,界面处 Fe-Al 金属间化合物层的厚度可控制在 10~13 μm,焊接接头强度达到了 62 MPa。陈树海等^[13-14]研究了镍箔中间层对 201 不锈钢和 5052 铝合金搭接激光焊组织性能的影响,经 X 射线衍射(XRD)分析可知,界面处有新相 Al_{0.9}Ni_{1.1} 金属间化合物生成,Fe-Al 脆性金属间化合物的析出减少,但焊接接头的承载能力仅提高了 7%。

本文以汽车上应用更为广泛的低碳双相钢和 6XXX 系铝合金为研究对象,研究了镍箔对 DP980/A6061 异种激光焊接接头组织性能的影响,深入研究了镍元素对熔合区显微组织尤其是 Fe-Al 金属间化合物的影响机理,为提高钢/铝异种激光焊接接头的力学性能提供了必要的理论依据。

2 实验材料与方 法

实验材料为退火态的 DP980 钢和 A6061 铝合金,厚度均为 1.5 mm,化学成分分别见表 1 和表 2。激光焊接实验中所使用的镍箔厚度为 0.10 mm,镍的质量分数大于 99.99%。

表 1 DP980 的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of DP980 (mass fraction, %)

Composition	C	Si	Mn	Ti	Cr	Mo	Nb	Al	Fe
Value	0.09	0.06	1.90	0.03	0.50	0.20	0.03	0.30	Bal.

表 2 A6061 铝合金的化学成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical compositions of A6061 aluminum alloy (mass fraction, %)

Composition	Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al
Value	0.15-0.4	0.4-0.8	0.7	0.15	0.8-1.2	0.25	0.04-0.35	0.15	Bal.

激光焊接实验在美国 IPG 公司生产的型号为 YLR-6000 的高功率光纤激光器上完成,聚焦镜焦距为 300 mm,光斑直径为 0.3 mm,保护气的吹入方向与激光入射方向保持一致,保护气为氩气,气体流量

为 15 L/min。图 1(a)所示为激光焊接示意图,采用钢上铝下的搭接方式,镍箔置于二者之间,具体的焊接工艺见表 3。激光焊接实验所用样品的尺寸为 80 mm×60 mm,焊接接头的重叠长度约为 10 mm。

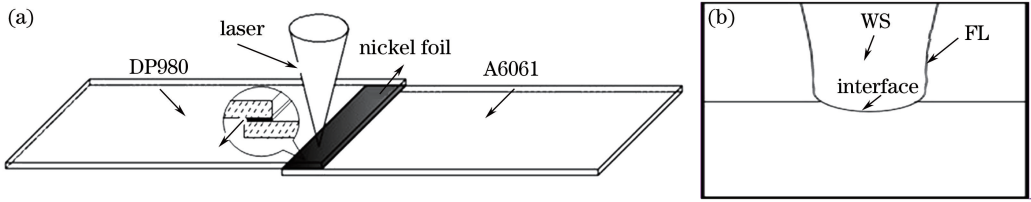


图 1 示意图。(a)激光焊接;(b)焊接接头

Fig. 1 Schematic. (a) Laser welding; (b) welded joint

表 3 激光焊接实验方案

Table 3 Experimental scheme of laser welding

Sample No.	Thickness of nickel foil /mm	Laser power /kW	Welding speed /($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	Defocusing /mm
1	0.00	2.0	4.2	0
2	0.10	2.2	4.2	0

利用体积分数为 4% 的硝酸酒精溶液对焊接接头金相样品进行腐蚀,随后利用日本日立公司生产的型号为 SU 5000 的热场场发射扫描电子显微镜 (SEM) 对焊接接头的显微组织进行观察,焊接接头的元素分布在英国牛津仪器公司生产的型号为 X-Max20 的能谱仪 (EDS) 上完成。焊接接头的示意图如图 1(b) 所示,主要将熔合区分为 WS、熔合线 (FL) 及界面三个区域。

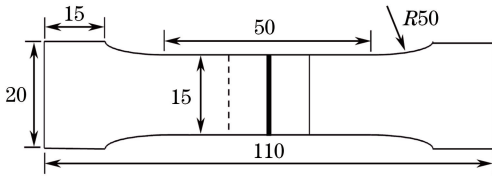


图 2 拉剪试样尺寸示意图

Fig. 2 Size dimension of tensile shear sample

根据国家标准 GB/T2654 2008,在上海泰明公司生产的 HV1000IS 型显微维氏硬度计上对焊接接头进行硬度测试,加载载荷为 2.94 N,保载时间为 10 s。焊接接头的纵向硬度测试点的采集点间距为 0.1 mm。将焊接试样加工成图 2 所示的拉剪试样,在长春机械研究院生产的 DNS-300 型万能材料试验机上按照国家标准 GB/T 228-2010 (金属材料室温拉伸实验标准) 完成室温拉剪实验。焊接接头拉剪强度的计算公式为

$$\delta_c = F / (ab), \quad (1)$$

式中 F 为剪切力; a 为 WS 搭接处焊接接头的整体厚度,单位为 mm; b 为 WS 总长度,单位为 mm。

3 结果及讨论

3.1 镍箔对焊接接头宏观形貌及元素分布的影响

图 3 所示为不同实验条件下焊接接头的宏观形

貌及元素分布情况。可以看出,两种实验条件下 WS 内均获得了无明显焊接缺陷的焊接接头。利用 EDS 对焊接接头内铝、镍元素的分布进行了线扫描分析,结果如图 4 所示。从 DP980 钢侧的横向元素分布角度来看,对于样品 1, A6061 铝合金在焊接过程中部分熔化进入熔池内,铝元素随熔池流动而上浮,并在随后熔池快速凝固的过程中保留在 WS (DP980 侧) 中,熔合区的铝含量明显高于热影响区和母材的。受熔池流动的影响,铝元素在熔合区局部区域出现了富集现象,如图 4(a) 所示;对于样品 2,镍的熔点为 1453 $^{\circ}\text{C}$,在激光焊接过程中镍熔化进入熔池内,熔合区中镍元素的含量明显高于热影响区和母材的,且镍元素在熔合区中的分布规律与铝元素的相似,在铝元素富集区域,镍元素也相应富集,如图 4(c) 所示。对比添加镍箔前后熔池内的纵向元素分布可知,添加镍箔后,界面处的镍元素含量明显增大,铝元素含量和富集区域明显减小。这些现象表明,镍箔的添加改变了熔池内铝元素的分布情况,减小了界面处的铝元素富集区域,故界面处脆性 Fe-Al 金属间化合物的析出减少。

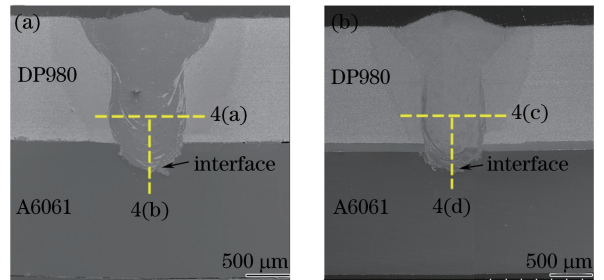


图 3 焊接接头的横截面形貌。(a)样品 1;(b)样品 2

Fig. 3 Cross-sectional morphologies of welded joints. (a) Sample 1; (b) sample 2

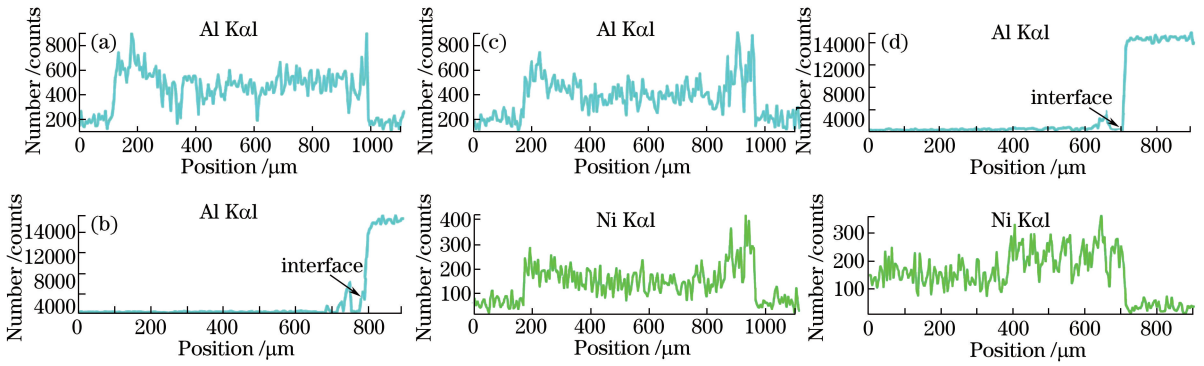


图4 DP980侧焊接接头元素分布。(a)样品1的横向元素分布;(b)样品1的纵向元素分布;
(c)样品2的横向元素分布;(d)样品2的纵向元素分布

Fig. 4 Element distributions of DP980 side welded joints. (a) Horizontal element distribution of sample 1; (b) longitudinal element distribution of sample 1; (c) horizontal element distribution of sample 2; (d) longitudinal element distribution of sample 2

3.2 镍箔对焊缝及熔合线显微组织的影响

图5所示为不同实验条件下WS和FL的显微组织。对于样品1,WS和FL的显微组织均是板条马氏体(LM)和 δ 铁素体;对于样品2,WS为LM,

FL的显微组织为LM和 δ 铁素体, δ 铁素体主要出现在焊接接头的中部和下部。由此可见,镍元素对WS和FL的显微组织产生了明显影响。

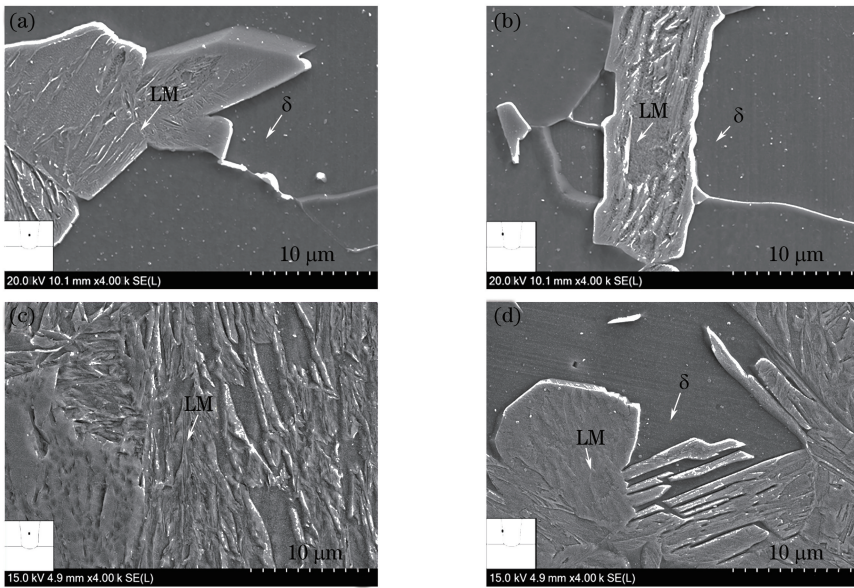


图5 显微组织。(a)样品1的WS;(b)样品1的FL;(c)样品2的WS;(d)样品2的FL

Fig. 5 Microstructures. (a) Ws of sample 1; (b) FL of sample 1; (c) WS of sample 2; (d) FL of sample 2

为进一步分析WS及FL处的相变机理,利用EDS对样品1和样品2的WS和FL显微组织中的铝、镍元素含量进行了定量分析,每个相取50个点取平均值以确定显微组织中的铝、镍元素含量,结果见表4。对于样品1,WS处 δ 铁素体中铝元素的质量分数约为2.20%,LM中铝元素的质量分数约为1.20%;FL处 δ 铁素体中铝元素的平均质量分数高达2.38%,LM中铝元素的平均质量分数约为1.08%。对于样品2,WS处LM中铝元素的平均质

量分数约为1.90%,镍元素的平均质量分数约为5.28%;FL处 δ 铁素体中铝元素的质量分数约为4.30%,镍元素的质量分数约为9.05%。由此可见,添加镍箔后,WS及FL显微组织中的镍元素含量明显升高。

对于样品1,焊接过程中A6061铝合金熔化进入熔池中,受熔池流动的影响,在铝元素上浮过程中,WS及FL处有局部富集现象发生。铝元素作为一种强铁素体形成元素^[15],其进入熔池后会显著提

高高温 δ 铁素体的稳定性, 缩小 γ 相区, 阻碍包晶反应的进行, 在激光快冷条件下部分高温 δ 铁素体保留至室温^[16]。对于样品 2, 熔池内镍元素的质量分数明显增大。镍元素是一种强奥氏体形成元素^[17-18], 常作为奥氏体不锈钢的合金化元素, 其可扩大 γ 相区, 促进高温 δ 铁素体转变为奥氏体。因此, 在镍元素的作用下, 高温 δ 铁素体的稳定性显著降

低, 在凝固过程中全部转变为奥氏体; 在随后的焊后快速冷却过程中, C 原子和 Fe 原子等无法发生扩散, 以切变型相变的方式转变为 LM^[19]。但受到熔池流动的影响, FL 处的铝元素含量明显高于 WS 的, 镍元素难以将 δ 铁素体完全转变为奥氏体, 故 FL 处仍有部分 δ 铁素体析出, 但析出量有所减少, 仅在 WS 中部和下部有少许析出。

表 4 WS 和 FL 内的元素含量(质量分数, %)

Table 4 Chemical compositions within WS and FL (mass fraction, %)

Sample No.	Position	Phase	Al	Ni	Mn	Fe
1	WS	δ	2.20	-	2.12	88.78
		LM	1.20	-	2.10	89.30
	FL	δ	2.38	-	2.10	88.60
		LM	1.08	-	2.10	88.90
2	WS	LM	1.90	5.28	2.02	83.35
	FL	δ	4.30	9.05	2.00	76.35
		LM	2.95	7.38	1.90	79.50

3.3 镍箔对界面处显微组织的影响

图 6 所示为不同实验条件下焊接接头界面处的显微组织。可以看出, 添加镍箔前后界面处无裂纹、气孔等缺陷产生。为进一步分析界面处的显微组织, 将两种实验条件下的钢/铝界面分为 A、B、C、D 四个区域, 并在每个区域选取 5 个点进行能谱分析, 元素的平均原子数分数见表 5。位于界面处铝合金侧的独立岛状组织中元素以铁为主, 因此该处是部分钢液流入铝合金侧形成的 LM 组织。对于样品 1, 铝合金附近 B 处铝元素的原子数分数明显高于 A 处的, B 处的针状组织中铁和铝元素的原子数分数接近 1:3, A 区域铁和铝元素

的原子数分数接近 1:2。根据 EDS 分析结果及 Fe-Al 二元相图, 推测 A 处主要生成的是 $FeAl_2$ 金属间化合物, B 处形成的针状组织主要是 $FeAl_3$ 。故未添加镍箔条件下界面处主要是 Fe-Al 金属间化合物, 金属间化合物层的峰值厚度约为 $50 \mu m$ 。对于样品 2, C 处以 $FeAl_2$ 金属间化合物为主, D 处形成的条状组织主要是 $FeAl_3$ 金属间化合物。但镍箔在焊接过程中熔化进入熔池内, 使得 C 处和 D 处的镍元素原子数分数明显增大。根据 EDS 分析结果及 Ni-Al 二元相图^[20], 推测 C 和 D 处生成的新相为 Ni_xAl_y 金属间化合物, 界面处金属间化合物层的峰值厚度减至 $30 \mu m$ 。

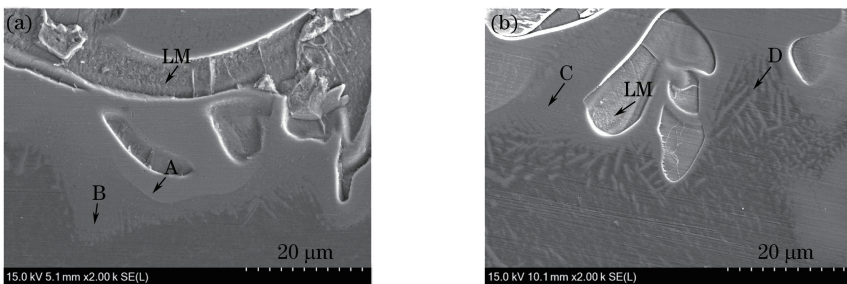


图 6 焊接接头界面的显微组织。(a) 样品 1; (b) 样品 2

Fig. 6 Microstructure at welded joint interface: (a) Sample 1; (b) sample 2

表 5 焊接接头界面不同区域的元素含量(原子数分数, %)

Table 5 Elemental contents at different areas near welded joint interface (atomic fraction, %)

Sample No.	Position	Al	Fe	Ni
1	A	46.08	21.96	-
	B	55.93	15.38	-
2	C	48.02	22.27	2.62
	D	59.43	16.74	2.58

3.4 镍箔对焊接接头硬度的影响

图 7 所示为不同实验条件下焊接接头的纵向硬度分布情况。可以看出, 样品 1 中 WS 的硬度分布不均匀, 硬度范围为 $255 \sim 300$ HV, 平均硬度约为 279 HV; 界面处的硬度略高于 WS 的, 硬度范围为 $341 \sim 376$ HV, 平均硬度约为 362 HV。样品 2 的 WS 硬度分布均匀且明显增大, 硬度范围为 $382 \sim$

403 HV, 平均硬度约为 394 HV; 但钢/铝界面处的硬度有所降低, 硬度范围为 257~270 HV, 平均硬度约为 265 HV。由此可见, 镍元素可显著提高 WS 区的硬度, 同时起到软化钢/铝界面的作用。

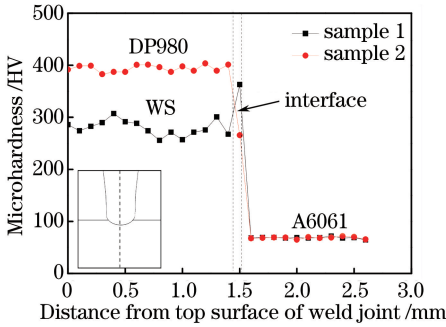


图 7 焊接接头的纵向硬度分布

Fig. 7 Longitudinal hardness distribution of welded joint

对于样品 1, 铝元素在熔池内的局部偏析使得 WS 中存在一定量的高温 δ 铁素体, 故其 WS 的纵向硬度明显低于样品 2 的, 且其硬度约是全 LM 的 WS 硬度的 76.1%, 与 Saha 等^[21]的研究结果相一致, 进一步证明了 WS 中析出的是 δ 铁素体。对于样品 2, 镍元素使得 WS 中析出的是全 LM 显微组织。钢中马氏体的硬度一般高于铁素体的^[22],

因此 WS 的硬度明显增大。同时, 由于镍箔的加入, 钢/铝界面处中存在一定量的 Ni-Al 金属间化合物, 相比于 Fe-Al 金属间化合物, Ni-Al 金属间化合物是软相, 其硬度约为 256 HV^[23], 故界面处的硬度有所减小。

3.5 镍箔对焊接接头强度的影响

图 8 所示为不同实验条件下焊接接头拉剪样品的宏观照片和工程应力-应变曲线。可以看出, 焊接接头拉剪样品的失效位置均出现在界面。添加镍箔后, 焊接接头的拉剪强度明显增大, 达到 61 MPa, 约是未加镍箔样品的 1.4 倍。由此可见, 镍箔的加入显著地提高了焊接接头的拉剪性能。

图 9 所示为不同实验条件下拉剪试样断口的 SEM 形貌及能谱分析结果。可以看出, 两种实验条件下拉剪试样断口均是河流花样状的脆性断口, 断裂方式相同。但对断口进行 EDS 分析后发现, 样品 1 的脆性断裂区中铝的质量分数高达 49.50%; 样品 2 的脆性断裂区中铝元素含量明显减小, 而镍元素的质量分数为 15.80%。这主要是因为镍箔熔化后进入 WS, 在界面处形成了 Ni-Al 金属间化合物。尽管 Ni-Al 金属间化合物存在室温脆性的特性^[24], 但其韧性优于脆性 Fe-Al 金属间化合物的, 故钢/铝界面处的结合力增大, 焊接接头的拉剪强度明显增大。

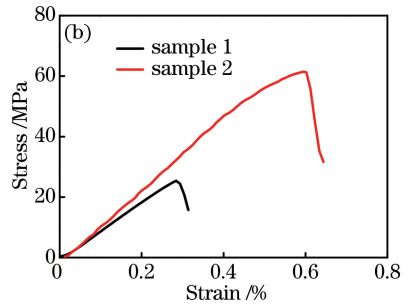
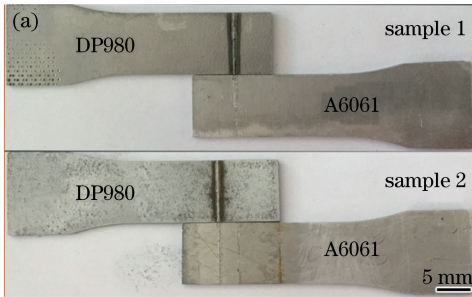


图 8 拉剪后样品宏观形貌及应力-应变曲线。(a)断裂后宏观形貌;(b)应力-应变曲线

Fig. 8 Macroscopic morphology and stress-strain curve of sample after tensile shear. (a) Macroscopic morphology after fracture; (b) stress-strain curve

4 结 论

利用高功率光纤激光器对 DP980 钢和 A6061 铝合金进行了激光搭接焊实验, 对比分析了镍箔对 DP980/A6061 异种激光搭接焊焊接接头 WS 和 FL 的显微组织、显微硬度及拉剪性能的影响, 主要结论如下。

1) DP980/A6061 焊接接头的 WS 及 FL 处的显微组织均为 LM 和骨架状的 δ 铁素体, 界面处显微组

织主要是脆性 FeAl₃ 和 FeAl₂ 金属间化合物, 金属间化合物层的峰值厚度约为 50 μm 。添加镍箔样品的 WS 处的显微组织为 LM, FL 处的 δ 铁素体明显减少; 界面处有新相 Ni_xAl_y 金属间化合物析出, 脆性 Fe-Al 金属间化合物层的峰值厚度减至 30 μm 。

2) 对于未添加镍箔的样品, 焊接接头 WS 处的硬度约为 279 HV, 钢/铝界面处的硬度约为 362 HV, 焊接接头在界面处发生脆性断裂, 其强度仅为 44 MPa; 对于添加了镍箔的样品, 焊接接头

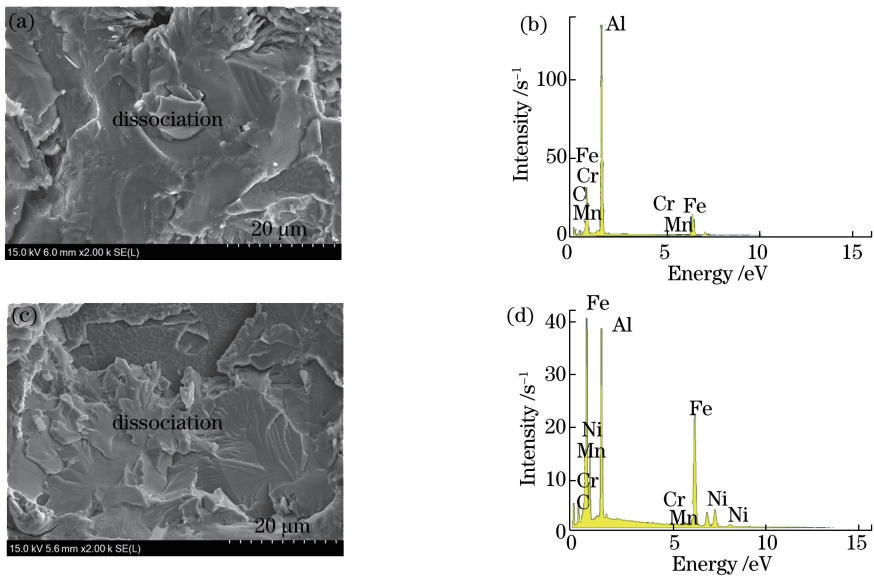


图 9 拉剪样品微观断口及能谱分析。(a)样品 1 的断口形貌;(b)样品 1 的能谱分析;
(c)样品 2 的断口形貌;(d)样品 2 的能谱分析

Fig. 9 Microscopic fracture and EDS analysis of tensile shear sample. (a) Fracture morphology of sample 1;
(b) EDS analysis of sample 1; (c) fracture morphology of sample 2; (d) EDS analysis of sample 2

WS 处的硬度增大 39.29%，但钢/铝界面处硬度减小了 26.80%。虽然焊接接头仍在界面处发生脆性断裂，但焊接接头的拉剪强度明显增大(61 MPa)，约是未添加镍箔样品的 1.4 倍。

3) 镍元素扩大了 γ 相区，促进了高温 δ 铁素体转变为奥氏体，WS 处形成了全 LM，FL 处 δ 铁素体的析出量明显减少；镍元素改变了熔池内的冶金反应，形成了 Ni-Al 金属间化合物，有效地抑制了 Fe-Al 冶金反应的进行，减小了界面处脆性 Fe-Al 金属间化合物层的厚度，提高了焊接接头的拉剪强度。

参 考 文 献

[1] Haferkamp H, Meier O, Harley K. Laser beam welding of new high strength steels for auto body construction[J]. Key Engineering Materials, 2007, 344: 723-730.
[2] Zhang D S. The development status and prospect of China's new energy industry[J]. Economics & Management Strategies Journal, 2012(1): 67-77.
张东胜. 我国新能源产业发展现状及展望[J]. 经济与管理战略研究, 2012(1): 67-77.
[3] Li X, Tang J G, Zhang X M, *et al.* Effect of temperature deformation on the natural aging and mechanical properties of automotive body 6061 aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(1): 1-6.
李翔, 唐建国, 张新明, 等. 温变形对汽车车身用

6061 铝合金自然时效及力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(1): 1-6.

[4] Yang J, Zhang H, Li Y L. A study on problems of laser welding of aluminum and steel dissimilar materials[J]. Applied Laser, 2013, 33(5): 555-562.
杨瑾, 张华, 李玉龙. 铝/钢异种材料激光焊接现状与展望[J]. 应用激光, 2013, 33(5): 555-562.
[5] Ozaki H, Kutsuna M, Nakagawa S, *et al.* Laser roll welding of dissimilar metal joint of zinc coated steel to aluminum alloy[J]. Journal of Laser Applications, 2010, 22(1): 1-6.
[6] Mecoc S, Ganguly S, Williams S, *et al.* Effect of laser processing parameters on the formation of intermetallic compounds in Fe-Al dissimilar welding[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(9): 3361-3370.
[7] Peyre P, Sierra G, Deschaux-Beaume F, *et al.* Generation of aluminium-steel joints with laser-induced reactive wetting[J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 444(1/2): 327-338.
[8] Mathieu A, Shabadi R, Deschamps A, *et al.* Dissimilar material joining using laser (aluminum to steel using zinc-based filler wire)[J]. Optics & Laser Technology, 2007, 39(3): 652-661.
[9] Dharmendra C, Rao K P, Wilden J, *et al.* Study on laser welding-brazing of zinc coated steel to aluminum alloy with a zinc based filler[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528(3): 1497-1503.
[10] Yang J, Yu Z S, Li Y L, *et al.* Influence of alloy

- elements on microstructure and mechanical properties of Al/steel dissimilar joint by laser welding/brazing[J]. *Welding in the World*, 2018, 62(2): 427-433.
- [11] Zhou D W, Xu S H, Zhang L J, *et al.* Microstructure, mechanical properties, and electronic simulations of steel/aluminum alloy joint during deep penetration laser welding[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 89(1/2/3/4): 377-387.
- [12] Zhou D W, Xu S H, Peng L, *et al.* Laser lap welding quality of steel/aluminum dissimilar metal joint and its electronic simulations[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 86(5/6/7/8): 2231-2242.
- [13] Chen S H, Huang J H, Yang D D, *et al.* Influence of Ni-foil interlayer on laser penetration welding of stainless steel to aluminium alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2012, 33(8): 9-12.
陈树海, 黄继华, 杨冬冬, 等. 镍箔中间层对不锈钢/铝合金激光深熔焊的影响[J]. *焊接学报*, 2012, 33(8): 9-12.
- [14] Chen S H, Huang J H, Ma K, *et al.* Influence of a Ni-foil interlayer on Fe/Al dissimilar joint by laser penetration welding [J]. *Materials Letters*, 2012, 79(23): 296-299.
- [15] Tseng C C, Shen Y, Thompson S W, *et al.* Fracture and the formation of sigma phase, $M_{23}C_6$, and austenite from delta-ferrite in an AlSi 304L stainless steel [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1994, 25(6): 1147-1158.
- [16] Wang X N, Chen X M, Sun Q, *et al.* Formation mechanism of δ -ferrite and metallurgy reaction in molten pool during press-hardened steel laser welding[J]. *Materials Letters*, 2017, 206: 143-145.
- [17] Zhang Z, Farrar R A. Influence of Mn and Ni on the microstructure and toughness of C-Mn-Ni weld metals[J]. *Welding Journal*, 1997, 76(5): 183s-196s.
- [18] Kang B Y, Kim H J, Hwang S K. Effect of Mn and Ni on the variation of the microstructure and mechanical properties of low-carbon weld metals[J]. *Transactions of the Iron & Steel Institute of Japan*, 2000, 40(12): 1237-1245.
- [19] Bohemen S M C, Sietsma J. Martensite formation in partially and fully austenitic plain carbon steels [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2009, 40(5): 1059-1068.
- [20] Campbell C E, Kattner U R. A thermodynamic assessment of the Ni-Al-B system[J]. *Journal of Phase Equilibria*, 1999, 20(5): 485-496.
- [21] Saha D C, Biro E, Gerlich A P, *et al.* Fiber laser welding of Al-Si-coated press-hardened steel[J]. *Welding Journal*, 2016, 95(5): 147-s-156-s.
- [22] Guo P F, Wang X N, Zhu G H, *et al.* Microstructures and properties of X100 pipeline steel joints by fiber laser welding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(12): 1202003.
郭鹏飞, 王晓南, 朱国辉, 等. X100 管线钢光纤激光焊接头的显微组织及性能 [J]. *中国激光*, 2017, 44(12): 1202003.
- [23] Guo J T, Yuan C, Hou J S. Effect of rare earth elements on NiAl-based alloys[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2008, 44(5): 513-520.
郭建亭, 袁超, 侯介山. 稀土元素在 NiAl 合金中的作用 [J]. *金属学报*, 2008, 44(5): 513-520.
- [24] Wang Z X. Vacuum diffusion bonding of SiC paniculate reinforced LD2 matrix composite[D]. Jinan: Shandong University, 2008.
王中晓. SiC 颗粒增强 LD2 复合材料的真空扩散焊 [D]. 济南: 山东大学, 2008.