[文章编号] 1003－4684(2026)01-0084-06

线能量参数匹配对 DP780/5052 激光焊搭接接头组织性能的影响

魏李庚，卜智翔，王立世，施浩澜

（湖北工业大学材料与化学工程学院，湖北 武汉 430068）

[摘 要] 为研究激光焊线能量一定时激光功率和焊接速度同比例变化对 DP780 高强钢/5052 铝合金薄板搭接焊接头组织性能的影响，分别制备了含 Ni 和不含 Ni 过渡层的搭接接头试样，并采用扫描电子显微镜（SEM）、能谱分析（EDS）及拉伸试验等方法对其进行表征与分析。结果表明：在线能量恒定为 1.44 kJ/cm 的条件下，随着激光功率和焊接速度的同比例增大，搭接焊接头的焊缝剪切力呈现出先升高后降低的趋势。其中，含 Ni 过渡层时线能量的最佳匹配参数为激光功率 1200 W，焊接速度 500 mm/min，其焊缝剪切力为 1.763 kN/cm。相较于不含 Ni 过渡层的试样焊缝剪切力（1.556 kN/cm），其焊缝剪切力提升 13.3%。此外，钢/铝熔合界面存在不连续现象，且随着激光功率的增大，钢与铝相互熔入的深度同步增加，Fe 元素和 Al 元素的互扩散效应越来越明显，由此产生的金属间化合物（IMCs）数量增多，靠近钢侧表面的连续 IMCs 层厚度随之增厚，铝侧也会相应产生大量针状 IMCs。

[关键词] 钢/铝焊接；激光搭接焊；Ni 过渡层；组织性能

[中图分类号] TG456.7 [文献标识码] A

铝合金与钢的薄板搭接结构，将铝合金的轻质特性和钢结构的高强度相结合，可以赋予产品更优的性能，特别是在汽车轻量化领域有着巨大的应用潜力[1-3]。然而钢和铝合金的化学成分及热物理性能的差异导致其焊接性差，主要是由于热膨胀系数差异导致较大的焊接应力，且 Fe 和 Al 易形成金属间化合物（intermetallic compounds，IMCs）[4-6]。激光焊有利于减少焊接热输入，降低焊接应力，是目前异种材料常见的连接方法之一。相关研究针对钢/铝异种金属的激光焊工艺参数优化开展了大量实验[7-8]，探讨了不同工艺参数对焊接接头力学性能的影响。为了抑制 IMCs 的不利影响，研究人员通过加入不同过渡层金属的方式来减少 IMCs 的形成[9-12]，其中 Ni 过渡层改善的效果比较明显。这表明控制激光线能量与加入过渡层可在一定程度上改善钢铝焊接接头的力学性能，但现有研究未进一步探讨在固定焊接线能量条件下不同激光功率与焊接速度匹配方式对钢铝焊接接头组织性能的影响。本研究通过固定线能量下功率-焊接速度同比例匹配实验，结合 Ni 过渡层的界面调控作用，揭示工艺参数-微观组织-力学性能的关联机制，为钢铝异种金属激光焊工艺优化提供理论依据。

1 试验材料与方法

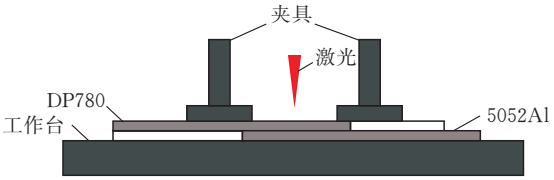
选用 DP780 高强钢和 5052 铝合金薄板作为母材，Ni 箔作为过渡层，DP780 的尺寸为 100 mm×100 mm×2 mm，5052 铝合金的尺寸为 100 mm×100 mm×2 mm，镍箔的尺寸为 10 mm×100 mm×0.02 mm。焊前需要对母材表面进行机械清理，采用 1200 目 SiC 砂纸沿同一方向打磨，随后用无水乙醇超声清洗 15 min（功率 300 W），晾干后 30 min 内完成焊接。激光焊机采用武汉华工激光 EW2000D 型，激光波长为 1.06 μm，最大输出功率为 2 kW。焊接时采用纯度为 99.999%的高纯氩气作为保护气体。

焊接接头为搭接形式，采取钢上铝下的方法，即 DP780 薄板放置在 5052 薄板的上方，镍箔夹在钢板和铝板之间（图 1）。前期正交试验筛选出 1.44 kJ/cm 为基础线能量，此参数下接头无明显未熔合缺陷。实验方案以该激光焊线能量为基础，设计了 5 组不同激光功率和焊接速度匹配的实验参数，并根据是否添加 Ni 过渡层对焊件进行了编号（表 1）。

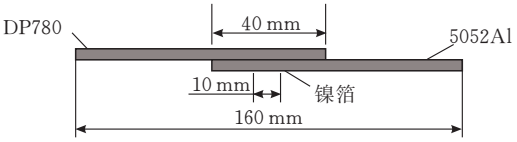
[收稿日期] 2024－09－09

[第一作者] 魏李庚（1998－），男，湖北武汉人，湖北工业大学硕士研究生，研究方向为激光焊接、钢/铝异种金属连接。

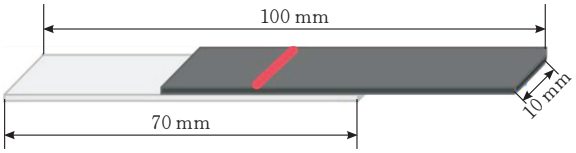
[通信作者] 卜智翔（1975－），男，湖南益阳人，湖北工业大学讲师，研究方向为焊接过程质量控制，金属材料表面改性和电弧增材制造。



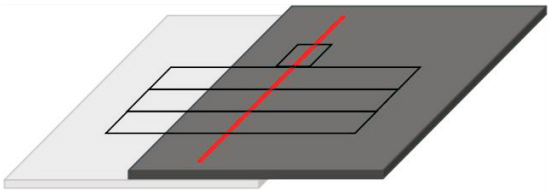
(a)焊接工装



(b)焊接试样尺寸



(c)拉伸试样



(d)拉伸试样与金相试样取样位置

图 1　DP780/5052 激光搭接焊实验

表 1　实验方案分组编号及参数设置

实验组	焊件编号	是否有 Ni 过渡层	激光功率 P/W	焊接速度 v/(mm·min^{-1})
1	P11	否	1100	458
	P12	是		
2	P21	否	1200	500
	P22	是		
3	P31	否	1300	542
	P32	是		
4	P41	否	1400	583
	P42	是		
5	P51	否	1500	625
	P52	是		

固定工艺参数：离焦量，－2 mm；激光摆动幅度，2 mm；激光摆动频率，70 Hz。

从制备好的每个焊件焊缝中间位置截取 3 个拉伸试样和 1 个金相试样。取样方向：沿焊缝长度方向截取，拉伸试样轴线垂直于焊缝，金相试样观测面垂直于焊缝，取样位置如图 1d 所示。通过拉伸试验测试 3 个拉伸试样的最大剪切力，并除以试样的焊缝长度，得到单位焊缝长度的剪切力，取平均值。拉伸试验机的型号为 CTM9200。采用 TESCAN MIRA LMS 型场发射电子显微镜(SEM)，使用 Cu 滤波片观察接头的微观组织形貌，并利用能谱分析(EDS)对焊缝截面不同区域的元素分布进行分析。

2　试验结果与分析

2.1　力学性能分析

通过对 DP780/5052 薄板激光搭接焊试样进行拉伸试验，测得焊件平均单位长度焊缝所承受的最大剪切力 R_s(焊缝剪切力，kN/cm)。从图 2 可见，无论是否添加 Ni 过渡层，在激光焊线能量均为 1.44 kJ/cm的条件下，随着激光功率和焊接速度的同比例增大，焊接接头的焊缝剪切力呈现先增大后减小的趋势；有 Ni 过渡层试样焊缝剪切力在 1200 W，500 mm/min 时最大；而无 Ni 过渡层试样焊缝剪切力则会在 1300 W，542 mm/min 时最大。这表明在激光焊线能量一定时，存在一个最佳的激光功率和焊接速度匹配参数，使得焊接接头的焊缝剪切力 R_s 有一个最佳值。Ni 过渡层的加入，会影响最佳力学性能对应的线能量参数的最佳匹配。有 Ni 过渡层的试样，焊缝剪切力最大为 1.763 kN/cm，最小为1.427 kN/cm，性能相差 23.5%；无 Ni 过渡层的试样焊缝剪切力最大为1.639 kN/cm，最小为 1.342 kN/cm，性能相差 22.1%。结果表明，选择合适的线能量匹配参数，能显著改善搭接接头的力学性能。在相同焊接速度和激光功率下，有 Ni 过渡层的试样焊缝剪切力均优于无 Ni 的试样，加入 Ni 过渡层明显提高了试样的焊缝剪切力。

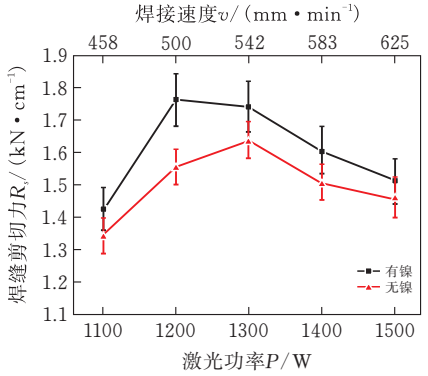
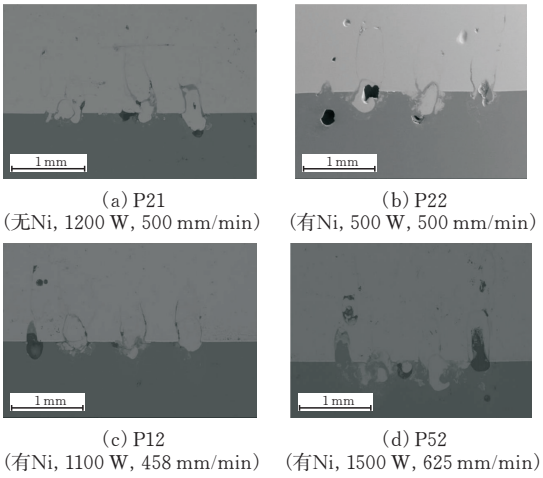


图 2　激光焊不同功率-速度匹配参数下试样的焊缝剪切力

2.2　焊缝截面形貌

线能量相同时，采用不同的激光焊工艺参数匹配，搭接接头的截面形貌有很明显的区别(图 3)。图中浅白色区域为钢侧，深色区域为铝侧，试样的钢/铝界面熔合均为非连续的，呈现出钢/铝相互咬合的形状特征。图 3a－b 分别为相同激光工艺条件下，无 Ni 和有 Ni 过渡层的焊缝截面形貌。图中均有浅白色岛状区域脱离钢侧，脱离区域的间隙被深色组织填充。钢/铝界面及其附近存在孔洞，该孔洞主要源于搭接间隙内吸附的水汽、油污分解气体及保护气体卷入，焊接过程中气体未充分逸出所致；

P22 试样在钢/铝界面存在明显未熔化的 Ni 金属层，P21 试样钢/铝界面附近存在较多的微裂纹，这使得其焊缝剪切力低于含 Ni 的 P22 试样。



(a) P21 (无Ni, 1200 W, 500 mm/min)　(b) P22 (有Ni, 500 W, 500 mm/min)

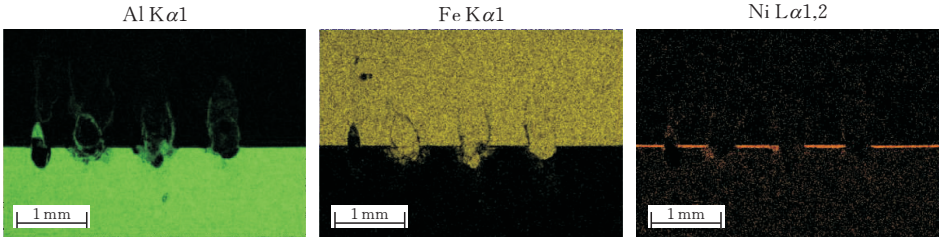
(c) P12 (有Ni, 1100 W, 458 mm/min)　(d) P52 (有Ni, 1500 W, 625 mm/min)

图 3　DP780/5052 焊接接头截面形貌

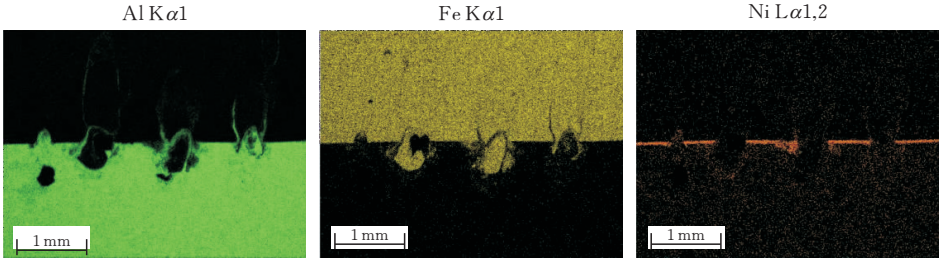
图 3b－d 是在相同线能量且有 Ni 过渡层的条件下，激光功率与焊接速度同比例增大时的焊缝截面形貌。随着激光功率增大，钢向铝侧熔入的深度随之加深，钢/铝相互咬合的程度更明显，互相扩散产生 IMCs 的概率越大，对焊缝剪切力的劣化作用越显著；较小的激光功率，虽然会减少 IMCs 的产生，钢铝互相咬合的程度减弱，也会导致其焊缝剪切力降低。因此，钢/铝搭接接头的焊缝剪切力取决于钢铝互相咬合的程度和 IMCs 产生量的共同作用。

2.3　钢/铝界面元素分布

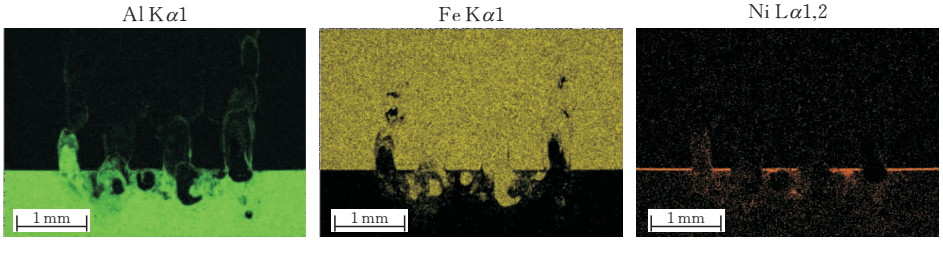
2.3.1　钢/铝界面面扫描　选取 P12、P22、P52 及无 Ni 过渡层的 P21 共 4 个典型试样进行元素面扫描测试，其元素面分布特征如图 4 所示。图 4 中上、下两个区域分别对应钢侧和铝侧，绿色、黄色和橙色区域分别对应 Al、Fe 和 Ni 三种元素。其中 P21 试样无 Ni 过渡层，其余试样均有 Ni 过渡层，各试样的元素分布呈现显著差异。图 4a 的试样 P12 焊接时的激光功率较小，铝熔化量较少，Fe 与 Al 互扩散最少。由于铝的密度小于钢，铝扩散时形成上浮流动的絮状组织；铝侧因部分铝熔入钢侧形成凹坑，并被熔池中的钢液填充。Ni 在中间结合面处断续分布，因 Ni 与 Al 的反应亲和能(－42 kJ/mol)低于 Ni 与 Fe 的反应亲和能(－18 kJ/mol)，故熔化的 Ni 优先向铝侧扩散并发生反应。图 4b 和图 4c 对应的试样，随着激光功率增加，铝熔化量也增加，Fe 与 Al 互扩散增多，均存在 Al 扩散形成的絮状组织，Ni 熔入量增多且向铝侧扩散更显著。图 4d 的试样 P21 无 Ni 过渡层，与相同工艺参数条件下有 Ni 过渡层的试样 P22 相比，因缺少 Ni 过渡层界面调控，且由于钢/铝直接接触，焊接时散热更显著，导致铝侧熔化量较少，钢铝咬合程度降低。



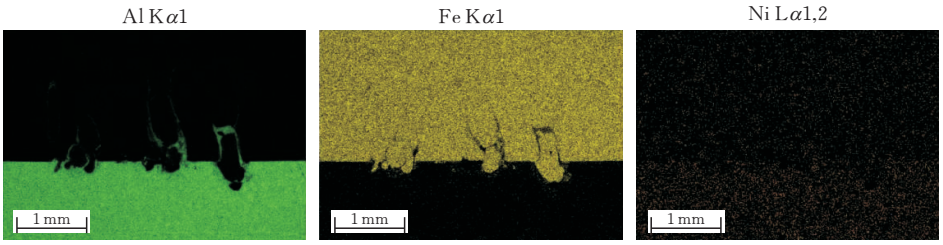
(a)P12(P＝1100 W，ν＝458 mm/min，有 Ni)



(b)P22(P＝1200 W，ν＝500 mm/min，有 Ni)



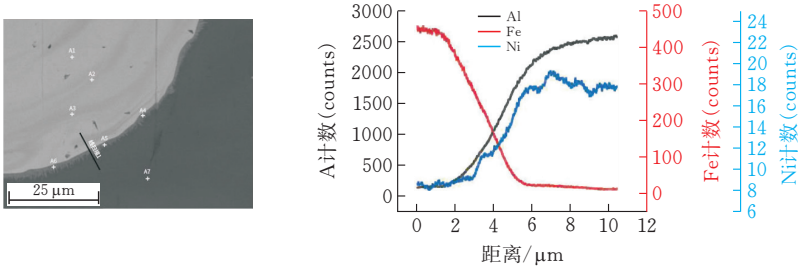
(c)P52(P＝1500 W，ν＝625 mm/min，有 Ni)



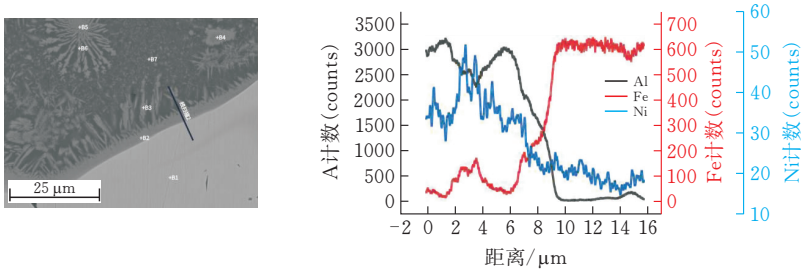
(d)P21(P=1200 W,ν=500 mm/min,无 Ni)

图 4　含 Ni 过渡层的 DP780/5052 界面面扫描结果

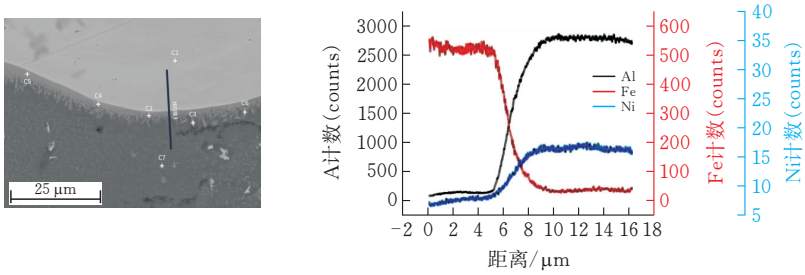
2.3.2　钢/铝界面线扫描　选取 P22、P52 和 P21 3 个试样进行线扫描与点扫描，线扫描位置及结果如图 5 所示。图 5 中深灰色、淡灰色和白色部分分别为 Al 侧、IMCs 和钢侧。表 2 为 3 个试样的点扫描结果，A1、B1、C1 测试点位于钢侧，A2－A6、B2－B6、C2－C6 测试点位于 IMCs，A7、B7、C7 测试点位于铝侧。



(a)P22 (P=1200 W, v=500 mm/min, 有 Ni)



(b)P52(P=1500 W, v=625 mm/min, 有 Ni)



(c)P21(P=1200 W, v=500 mm/min, 无 Ni)

图 5　DP780/5052 界面的线扫描结果

表 2　DP780/5052 界面的 EDS 点扫描所得元素原子分数　%

	Al	Fe	Ni	Al/Fe		Al	Fe	Ni	Al/Fe		Al	Fe	Ni	Al/Fe
A1	1.50	98.10	0.39	0.02	B1	7.16	91.26	1.58	0.08	C1	3.21	96.73	0.06	0.03
A2	20.30	78.37	1.33	0.26	B2	75.07	24.52	0.40	3.06	C2	82.50	17.49	0.01	4.72
A3	76.92	22.09	0.99	3.48	B3	82.67	16.22	1.12	5.10	C3	92.59	7.33	0.07	12.62
A4	86.40	12.29	1.31	7.03	B4	80.50	18.97	0.53	4.24	C4	66.92	33.08	0.00	2.02
A5	50.18	44.82	5.00	1.12	B5	82.29	15.88	1.83	5.18	C5	89.72	10.28	0.00	8.73
A6	29.89	64.92	5.19	0.46	B6	80.47	18.68	0.85	4.31	C6	94.24	5.67	0.10	16.63
A7	96.28	3.08	0.63	31.23	B7	89.79	9.64	0.57	9.31	C7	95.10	4.82	0.08	19.75

P22 试样的界面过渡区为 2 ～5.5 μm，区间内 Al 和 Fe 元素成分变化明显，钢/铝界面的钢侧表面形成连续的 IMCs 层，其厚度约 3.5 μm。随着激光功率的增大，除了钢侧表面连续的 IMCs 层外，P52 试样在 Al 侧还分布有大量的针状 IMCs，其长度约为 2～8 μm，界面过渡区为 2～9.5 μm，厚度约 7.5 μm。Ni 元素在铝侧的含量均高于钢侧，即 Ni 元素主要扩散进入了铝侧。显然，随着激光功率和焊接速度同比例增大，在钢/铝界面处钢侧表面的 IMCs 层厚度也增大，且 Al 和 Fe 元素的相互扩散更充分，Al 侧生成了大量的针状 IMCs。无 Ni 试样 P21，在钢侧表面的连续 IMC 层厚约 4.5 μm，铝基体中分布有细小的点状 IMCs，长度在 1 μm 左右，铝/钢界面处还存在一些细小的裂纹。在相同激光工艺条件下，无 Ni 过渡层的 IMC 层的厚度大于有 Ni 过渡层，因为缺少 Ni 元素调控界面，界面脆性较大，易产生微裂纹。

表 2 中的点扫描结果中，P52、P22 和 P21 试样 Al/Fe 的原子分数范围分别是[0.08, 9.31]，[0.02, 31.23]和[0.03, 19.75]，这表明在激光功率与焊接速度同步提高时，Fe 和 Al 元素的互扩散增强，促使形成更多的 IMCs。Ni 过渡层的存在有效抑制了 Al 和 Fe 之间的扩散。界面处 IMCs 的成分分布与形态特征（如针状及层状结构），主要受元素扩散程度控制，在不同工艺条件下均以 Fe-Al 系化合物（如 $FeAl_3$）为主。

2.4 钢铝界面相成分

对 P21 和 P22 试样的钢/铝界面，采用 XRD 试验方法进行物相分析，探讨在相同激光工艺条件下 Ni 过渡层对物相产生的影响，其结果见图 6。无 Ni 过渡层接头，XRD 分析显示接头中除铝、钢基体衍射峰外，存在明显的 $FeAl_3$ 等脆性 Fe-Al 系 IMCs 特征峰，Al 与 Fe 的互扩散导致基体峰强度下降及宽化，形成连续的脆性反应层，成为裂纹萌生的薄弱环节。有 Ni 过渡层接头，存在 $NiAl_3$ 衍射峰及其次级衍射，界面反应路径从无 Ni 时的 Al-Fe 反应部分转变为 Al-Ni 反应，生成以 $NiAl_3$ 为主的韧性化合物层。Ni 并未完全抑制 Al-Fe 反应，仍存在 $FeAl_3$ 等衍射峰，且 Al(200)峰在 44.5°附近呈现不对称肩峰（暗示 $FeAl_3$ 存在）并进一步宽化，可能与 Ni 固溶引起的晶格畸变有关。结合热力学来分析物相变化，Ni-Al 与 Fe-Al 反应活化能对比：$NiAl_3$ 生成活化能约 25 kJ/mol，$FeAl_3$ 约 42 kJ/mol，Ni 过渡层通过优先与 Al 反应形成 $NiAl_3$，有效抑制了脆性 Fe-Al 层的形成与生长，改善了界面组织。

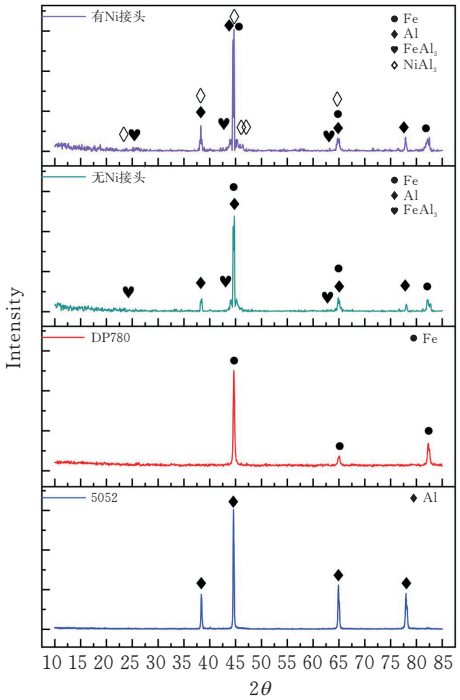


图 6 有/无 Ni 过渡层接头 X 射线衍射图谱

3 结论

本文针对 DP780/5052 薄板激光搭接焊，添加 Ni 过渡层，研究了在相同线能量下同比例改变激光功率和焊接速度，以及对接头界面元素分布、IMCs 形成与力学性能的影响，得到了以下结论：

1）随着激光功率和焊接速度的同比例增大，试样的焊缝剪切力呈现先升高后降低的趋势，即激光功率和焊接速度的适当匹配，可获得最佳的焊缝抗剪切性能。含 Ni 过渡层时，最佳匹配参数为激光功率 1200 W，焊接速度 500 mm/min，此时含 Ni 过渡层接头的焊缝剪切力，相较相同参数下无 Ni 过渡层接头提高 13.3%。无 Ni 过渡层接头，最佳匹配参数为激光功率 1300 W，焊接速度 542 mm/min。无 Ni 过渡层时，铝/钢间的传热面积更大，因此形成可靠接头需要的激光功率更高。

2）钢/铝界面的熔合不连续，在熔合处会形成铝和钢相互熔入的形态，随着激光功率增大，钢/铝相互熔入的深度会同步增大，Fe 和 Al 的互相扩散越明显，形成的 IMCs 越多，Ni 元素熔入程度增大，且主要向铝侧扩散。

3）钢/铝界面靠近钢侧的表面会形成连续的 IMCs 层，随着激光功率与焊接速度同比例增大，IMCs 层厚度同步增加，且 Fe 和 Al 的互相扩散更为显著，导致铝侧生成大量针状的 IMCs。

[参 考 文 献]

[1] 李光霁，刘新玲. 汽车轻量化技术的研究现状综述[J]. 材料科学与工艺，2020，28(05)：47-61.

[2] 王曼，于治水，张培磊，等. 铝钢激光焊接研究现状[J]. 热加工工艺，2017，46(23)：10-14.

[3] 李永兵，马运五，楼铭，等. 轻量化多材料汽车车身连接技术进展[J]. 机械工程学报，2016，52(24)：1-23.

[4] AKHSHIK M，PANTHAPULAKKAL S，TJONG J，et al. The effect of lightweighting on greenhouse gas emissions and life cycle energy for automotive composite parts[J]. Clean technologies and environmental policy，2019，21(03)：625-636.

[5] ZHANG Y，WANG W，LI Z，et al. Study of the brittleness mechanism of aluminum/steel laser welded joints with copper and vanadium interlayers[J]. Optics & Laser Technology，2023，163：109319.

[6] SADEGHIAN A ，IQBAL N. A review on dissimilar laser welding of steel-copper，steel-aluminum，aluminum-copper，and steel-nickel for electric vehicle battery manufacturing[J]. Optics and Laser Technology，2022，146：107595.

[7] SHAH，LH，ISHAK M. Review of Research Progress on Aluminum-Steel Dissimilar Welding[J]. Materials and Manufacturing Processes. 2014，29(08)：928-933.

[8] 李昂，曾一达，李智勇，等. 双相钢与铝合金异种金属激光焊接技术研究进展[J]. 材料导报，2024，38(22)：214-222.

[9] 李鹤. 铝/钢金属箔小功率 YAG 激光焊接工艺及机理研究[D]. 南昌：南昌大学，2016.

[10] 马雨晴，王红阳，刘黎明. 基于 Ni 中间层的铝合金与高强钢激光诱导 TIG 复合焊接[J]. 中国激光，2019，46(08)：82-88.

[11] CAO Xuelong，WANG Gang，XING Chang，et al. Effect of process parameters on microstructure and properties of laser welded joints of aluminum/steel with Ni/Cu interlayer [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China，2021，31 (08)：2277-2286.

[12] 王刚，曹雪龙，檀财旺，等. Ni/Si 中间层对铝/钢激光焊接头组织与性能的影响[J]. 焊接学报，2020，41(04)：84-89.

Effect of Heat Input Parameter Matching on Microstructure and Properties of DP780/5052 Laser Welding Lap Joints

WEI Ligeng，BU Zhixiang，WANG Lishi，SHI Haolan

(*School of Materials and Chemical Engineering，Hubei Univ. of Tech.，Wuhan* 430068，*China*)

Abstract：To investigate the effect of proportionally varying laser power and welding speed on the microstructure and mechanical properties of DP780/5052 thin plate lap welded joints at a constant heat input of 1.44 kJ/cm，samples with and without Ni transition layers were prepared. The samples were analyzed using scanning electron microscopy (SEM)，energy-dispersive spectroscopy (EDS)，and tensile tests. The results indicate that the tensile properties of the lap welded joints exhibit a trend of first increasing and then decreasing with proportionally increasing laser power and welding speed. The optimal matching parameters for the heat input with the Ni transition layers were a laser power of 1200 W and a welding speed of 500 mm/min，which improved the tensile properties by 13.3% compared to the case without Ni. The steel/Al melting interface exhibits discontinuity phenomena，and with the increase of laser power，the depth of steel melting into the Al side also increases. Simultaneously，the mutual diffusion of Fe and Al was more pronounced，leading to increased intermetallic compounds，the thickness of the continuous intermetallic compound layer near the steel side increased，and the needle-like intermetallic compounds on the Al side increased in size and dimensions.

Keywords：steel/aluminum welding；laser lap welding；Ni transition layer；micro-structure and properties

[责任编校：张　众]