

铝/钢激光-感应加热复合熔钎焊工艺与组织性能研究

吴凌清¹ 杨瑾^{1*} 应纯志¹ 叶欣¹ 王非凡² 张华³

(1. 上海工程技术大学材料科学与工程学院, 上海 201620; 2. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076;
3. 上海大型构件智能制造机器人技术协同创新中心, 上海 201620)

摘要: 随着运载火箭结构轻量化发展, 部分传统的钢结构逐渐被铝合金等轻质材料取代, 这就涉及到铝/钢异种金属连接技术。为了获得高质量的铝/钢异质接头, 利用自主研发的激光-感应加热复合焊接平台, 开展了铝合金/不锈钢激光熔钎焊工艺试验。借助扫描电镜 (SEM)、能谱分析仪 (EDS) 等分析手段, 对比研究了有无感应加热条件下, 铝/钢接头的宏观形貌、显微组织和力学性能。研究表明, 感应加热能提高激光熔钎焊过程 Zn-Al 钎料在不锈钢表面的润湿铺展性增加了钎焊宽度, 并促进了界面金属间化合物的生长; 此外, 感应加热提高了接头力学性能, 单位长度拉伸载荷由 189.8 N/mm 增加到 267.2 N/mm, 接头断裂形式由界面附近的脆性断裂变化为熔合线附近的韧性断裂。

关键词: 感应加热; 异种接头; 激光焊接; 微观组织

中图分类号: TG454; V19 **文献标识码:** A

Mechanical Properties and Microstructure of Dissimilar Laser-induction Heating Hybrid Braze-welding of Al Alloy to Steel

Wu Lingqing¹ Yang Jin^{1*} Ying Chunzhi¹ Ye Xin¹ Wang Feifan² Zhang Hua³

(1. School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620; 2. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076; 3. Shanghai Collaborative Innovation Center of Intelligent Manufacturing Robot Technology for Large Components, Shanghai 201620)

Abstract: With the development of lightweight launch vehicle structure, part of the traditional steel structure has been gradually replaced by aluminum alloy and other lightweight materials, which involves Al/Steel dissimilar joint technology. To obtain high-quality Al/Steel dissimilar joints, the self-developed laser-inductive heating composite welding platform was used to carry out the Al/steel laser braze-welding process experiment. With the help of a scanning electron microscope (SEM), energy spectrum analyzer (EDS), and other analytical means, the macroscopic morphology, microstructure, and mechanical properties of the aluminum/steel joints were comparatively studied with and without induction heating. The results show that induction heating can improve the wetting and spreading of Zn-Al brazing material on the surface of stainless steel which improved the brazing width and promote the growth of intermetallic compounds at the interface in the process of laser brazing welding; moreover, induction heating improves the mechanical properties of the joint, which are increased from 189.8 N/mm to 267.2 N/mm, and the form of fracture of the joint is changed from the brittle fracture near the interface to the ductile fracture near the fusion line.

Key words: induction heating; dissimilar joints; laser braze-welding; microstructure

1 引言

随着我国航天技术的发展, 在面对越来越复杂的航

空航天任务时, 航天材料逐渐向着轻量化、低成本发展, 这已经成为航空航天发展的主要研究课题^[1-2]。使用轻质材料代替传统钢材有助于复合结构轻量化进行, 铝

基金项目: 国家自然科学基金 (522***55、522***95)。

收稿日期: 2024-05-07

合金由于具有高强度、轻重量、耐腐蚀性好等优点，在替代传统钢材减轻结构重量方面具有良好的应用前景^[3]。因此，钢与铝合金的混合结构代表了未来结构轻量化发展的趋势。由于铝合金与钢材之间热物理性能差异较大和冶金相容性较差，铝合金和钢的焊接面临着巨大的挑战^[4]。铝/钢异质接头焊接工艺有搅拌摩擦焊接、扩散焊、冷压焊等，都能获得性能良好的接头。但是这些技术受到工件形状的限制，并且焊接过程中会产生大量的脆性金属间化合物（IMCs），在较大应力下容易产生裂纹，其存在会严重影响接头的力学性能^[5]。

高质量铝/钢接头的获得关键在于精确控制焊接功率，尽量减少金属间化合物（脆性相）的形成。激光熔钎焊是一种有效的铝/钢连接方法，具有铝侧为熔焊接头和钢侧为钎焊接头的双重特性，在控制能量热输入和抑制金属间化合物（IMCs）生长方面具有明显的优势，是一种有效的连接异质材料方法^[6]。Huang Rongrong等^[7]采用激光熔钎焊工艺焊接 AA6061 合金和 22MnB5 钢，研究了不同离焦量对接头组织性能的影响。试验结果表明在离焦量为+30 mm 的情况下，接头的最大断裂载荷达到 2 793 N。Yang Jin 等^[8]使用 Zn-Al22 作为填充金属，采用激光熔钎焊工艺焊接了 5052 铝合金和 22MnB5 钢。研究表明随着激光功率的增加，焊缝形态和界面微观结构发生了显著变化，同时接头拉伸性能先上升后降低。这是由于高功率下激光热输入过高，在界面处生成了大量的脆性金属间化合物，导致接头中裂纹的产生，影响了接头力学性能。为了进一步提高接头强度，有学者研究了钎料和中间层对接头性能的影响。Tan Caiwang 等^[9]采用不同的锌铝填充金属进行铝/钢激光钎焊试验。随着填充金属中 Al 含量增加，使得 Fe-Al 反应更充分，导致金属间化合物层变厚以及分散的 δ -FeZn₁₀ 相大量生成。研究表明 δ -FeZn₁₀ 相在层状 Fe₂Al₅Zn_{0.4} 基体中具有抑制裂纹的作用，因此使用 Zn-Al22 填料的接头抗拉强度最高。Jiang Jiawei 等^[10]采用多孔高熵合金（HEA）作为中间层，使用激光熔钎焊技术对铝合金和低碳钢进行焊接。结果表明

接添加高熵合金涂层后，在冶金反应过程中，铝和硅优先向 HEA 球移动并与有限数量的铁原子结合形成 τ_5 相，其与界面错配度相对较小，有助于形成良好的界面键合，纳米晶粒更容易释放应力，从而增加接头强度。

激光复合热源在焊接异种金属的连接方面具有巨大的优势，与单一激光热源相比，复合焊接热源具有保证焊接稳定性、热影响区窄、焊接工艺窗口范围广等优点^[11]。Qin Guoling 等^[12]以前置激光作为辅助热源，电弧作为主热源焊接铝合金与镀锌钢板。研究表明较高的激光功率可以提高镀锌钢板表面温度和锌的电离，促进了熔融金属在钢表面的润湿性。与气体金属电弧焊（GMAW）相比，大光斑激光辅助电弧焊改善了焊缝外观，提高了工艺的稳定性 and 时间效率。Tan Caiwang 等^[13]使用激光熔钎焊工艺焊接铝和黄铜时，采用热台对工件进行加热处理。研究表明加热平台的预热改善了焊缝成形，提高了钎料的润湿铺展面积，减小了接触角，大大减少了焊接缺陷。Gao Yidi 等^[14]利用激光感应加热复合焊接技术，成功实现了 CP-Ti/304 不锈钢（SS）和 CP-Ti/T2 双金属片连接。研究表明焊接头中未出现 Ti-Fe 和 Ti-Cu 脆性金属间化合物，这大大提高了接头力学性能，其最大抗拉强度为 600 MPa。

本文采用铝/钢激光-感应复合焊接热源，以熔钎焊工艺对铝/钢异质金属进行焊接。研究了高频感应加热对铝/钢异质合金焊缝成形、接头微观组织、接头强度的影响和接头的断裂模式。

2 试验材料及方法

试验选用尺寸 150 mm×100 mm×1.5 mm 的 304 不锈钢板和尺寸 150 mm×100 mm×2 mm 的 5052 铝合金板作为母材金属，选用直径 1.6 mm 的 Zn-Al22 合金药芯焊丝作为填充材料，母材和合金钎料的化学成分如表 1 所示。

表 1 铝合金、不锈钢母材和钎料的化学成分

材料	Fe	Cu	Mn	Si	Mg	Zn	Cr	Al	P	Ni	S
5052 铝	0.4	0.1	0.1	0.25	22.6	0.1	0.2	Bal	—	—	—
304 不锈钢	Bal	—	2	0.75	—	—	18.5	—	0.045	9	0.03
Zn-Al22	—	0.8	—	—	—	Bal	—	22	—	—	—

试验采用熔钎焊的焊接工艺焊接铝/钢异质金属,焊接热源为激光和高频感应复合热源,接头为铝上钢下搭接形式,搭接宽度为 20 mm。激光-感应复合焊接系统如图 1 所示,包括焊接机器人、激光器、高频感应加热机和焊接平台。由于铝板表面通常会存在高熔点的氧化膜,会使得焊接时接头出现缺陷概率增大,并且两种母材表面也需要清除油污、灰尘等杂质。故实验前需采用砂纸对铝合金和不锈钢表面进行打磨,采用酒精溶液清洗并烘干。焊接过程中激光束垂直照射在母材表面,铝、钢表面的光斑面积各占 1/2,工件与送丝嘴之间角度为 45°。为了防止焊接过程中焊缝被氧化,使用 99.99% 的 Ar 气作为保护气体,工件与保护气喷嘴的夹角设置为 35°。高频感应加热以感应电流为工艺参数,为了对比有无感应加热对焊接接头的影响,感应电流设置为 0 A 和 600 A。



图 1 激光-感应复合焊接系统

焊接完成后使用线切割机切割试样,然后用砂纸和抛光机对试样进行抛光处理,用酒精清洗后,采用光学金相显微镜观察接头横截面微观形貌。使用金相腐蚀液腐蚀抛光试样,然后使用扫描电镜 (SEM) 和能谱分析 (EDS) 对接头的显微组织进行观察和标定,并对焊缝成分进行初步鉴定。按照国家标准 GB/T 228.1—2021 制作拉伸试样,每个参数选取 3 个试样进行拉伸测试。使用 AG-25KN 万能试验机进行拉伸测试实验,拉伸速

率设定为 1 mm/min,拉伸方向垂直于焊缝。

3 结果与讨论

3.1 宏观形貌分析

图 2 为无感应加热 (即感应电流为 0 A) 和感应电流 600 A 条件下铝/钢激光熔钎焊接头焊缝成形及截面形貌,其他焊接工艺参数:激光功率为 1 800 W、焊接速度 6 mm/s、送丝速度 50 mm/s、保护气流量 15 L/min、离焦量+30 mm。图 2a 和图 2c 为焊缝正面形貌,分析可知,焊接过程比较稳定,焊缝表面没有气孔、飞溅等明显缺陷,成形较为均匀且美观,这表明在此焊接工艺参数下获得了优良的焊缝。图 2b 和图 2d 为接头截面形貌,截面上没有明显的气孔裂纹等缺陷,接头横截面具有双重特征,从整体上可分为部分铝合金母材与 Zn-Al12 填充金属熔化混合形成的熔焊接头特征、Zn-Al22 填充金属铺展在钢表面上形成的钎焊接头特征。从图 2 可知无感应加热时,焊缝具有较大的余高,焊缝宽度较小,焊接过程中增加感应加热辅助后,随着感应电流的增加,接头钎焊宽度逐渐增加,焊缝余高逐渐减小。这是因为感应电流的增加为钢表面提供了一个初始温度,使得母材表面温度梯度变化较小,液态钎料会向着钢侧铺展,因此能获得更大的钎焊宽度;同时焊接过程中激光热输入不变,所以钎料的熔化量不变,随着钎焊宽度的增加,焊缝余高随之下降。

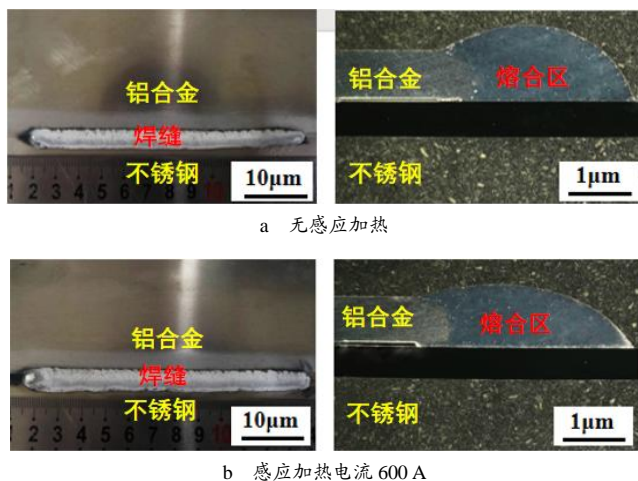


图 2 铝/钢接头焊缝成形及截面形貌

对有无感应加热条件下铝/钢激光熔钎焊接头的润湿铺展相关参数进行统计分析,结果见图 3。分析可知,无感应加热情况下接头钎焊宽度为 6.16 mm,接触角为 64°;感应加热条件下,接头钎焊宽度为 7.62 mm,

接触角为 44°，这表明感应加热能提高接头的润湿铺展性能。

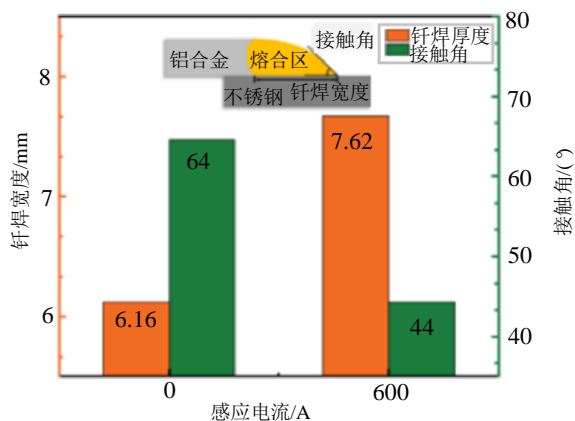


图3 有无感应加热情况下接头的接触角和钎焊宽度

3.2 微观组织分析

焊接时中由于加热过程不同，在界面处会产生形貌和物相各异的金属间化合物。焊接接头微观组织的特性与接头力学性能之间有着密不可分的关系，因此采用扫描电子显微镜观察了有无感应加热情况下的接头界面微观组织形貌及元素分布，并对其相成分及种类进行分析，图3为有无感应加热情况下的接触角和钎焊宽度的变化。接头熔合区形貌主要由块状凸起和河流状凹坑组成，结合表2的EDS能谱分析可知，这两种组织分别是 η -Zn(Al)固溶体和Zn-Al共晶组织。为了进一步分析铝/钢界面间金属化合物，对其局部进行放大，如图4b所示。远离界面处出现了半透明的骨骼状结构，通过表2能谱分析结果可知，骨骼状结构为Zn-Al共晶组织。在界面处有一层浅色层状结构，靠近钢侧较为平直，熔合区附近有起伏，这表明IMC层是由钢侧向铝侧生长。能谱分析结果可知浅色层状结构成分为 $w(\text{Fe})=25.93\%$ 、 $w(\text{Al})=35.69\%$ 、 $w(\text{Zn})=30.11\%$ 、 $w(\text{Cr})=6.09\%$ 和 $w(\text{Ni})=2.18\%$ ，推测该相为 $\text{Fe}_2\text{Al}_{5-x}\text{Zn}_x$ ^[15]。感应加热条件下对界面区域进行局部放大，如图4感应电流为600 A的高倍SEM，靠近钢一侧为平滑的层状结构，而在熔合区一侧出现了树枝状结构。对两种结构进行能谱分析(表2)可知，树枝状结构成分为 $w(\text{Fe})=9.06\%$ 、 $w(\text{Al})=32.67\%$ 、 $w(\text{Zn})=51.17\%$ 、 $w(\text{Cr})=0.91\%$ 、 $w(\text{Ni})=0.19\%$ ，确定相为 $\text{Fe}_4(\text{Al}, \text{Zn})_{13}$ ；层状结构成分为 $w(\text{Fe})=18.72\%$ 、 $w(\text{Al})=33.20\%$ 、

$w(\text{Zn})=41.13\%$ 、 $w(\text{Cr})=5.19\%$ 、 $w(\text{Ni})=1.76\%$ ，推测该相为 $\text{Fe}_2\text{Al}_{5-x}\text{Zn}_x$ 和 $\text{Fe}_4(\text{Al}, \text{Zn})_{13}$ 的混合相^[16]。

表2 选定位置能谱分析结果

位置	元素成分/%					可能相
	Fe	Al	Zn	Cr	Ni	
1	0.43	59.51	39.94	0.09	0.03	η -Zn(Al)
2	1.16	14.15	84.29	0.17	0.23	Zn-Al共晶组织
3	1.14	54.15	44.40	0.18	0.13	η -Zn(Al)
4	25.93	35.69	30.11	6.09	2.18	$\text{Fe}_2\text{Al}_{5-x}\text{Zn}_x$
5	9.06	32.67	57.17	0.91	0.19	$\text{Fe}_4(\text{Al}, \text{Zn})_{13} + \text{Fe}_2\text{Al}_{5-x}\text{Zn}_x$
6	18.72	33.20	41.13	5.19	1.76	$\text{Fe}_4(\text{Al}, \text{Zn})_{13} + \text{Fe}_2\text{Al}_{5-x}\text{Zn}_x$

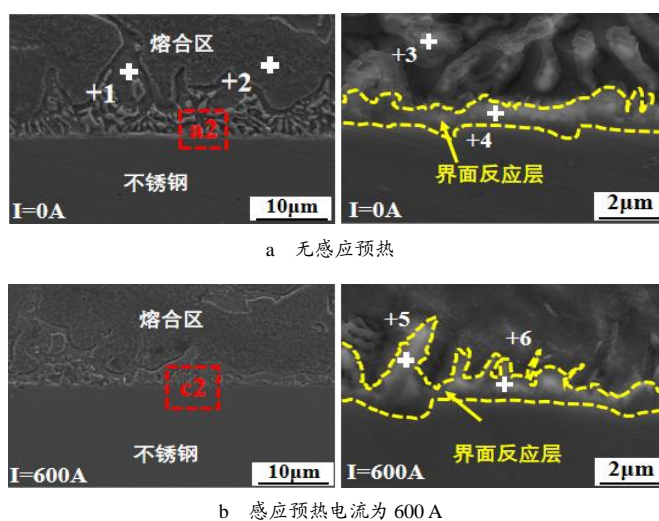


图4 接头不同区域显微组织

为了进一步确认界面层金属间化合物的元素分布和相成分，选择感应加热情况下接头局部区域(图4d)进行EDS能谱面扫描分析，结果如图5所示。由图可知，Al元素主要分布在焊缝熔化区的 η -Zn(Al)相和界面层当中，Al-Zn共晶相中的铝元素较两者而言明显降低；Fe元素大量分布在钢母材中间并逐渐向界面层内扩散；Cr元素和Fe元素的分布呈现一致性，这是由于Cr元素可以相互置换Fe元素；Zn元素分布在熔合区，主要集中于 η -Zn(Al)相中，界面层之间的Zn元素分布较少。从面扫的元素分布结果可知，Zn元素是从熔合区逐渐扩散到界面层中间并与Fe和Al元素发生冶金反应生成 $\text{Fe}_2\text{Al}_{5-x}\text{Zn}_x$ 和 $\text{Fe}_4(\text{Al}, \text{Zn})_{13}$ 。

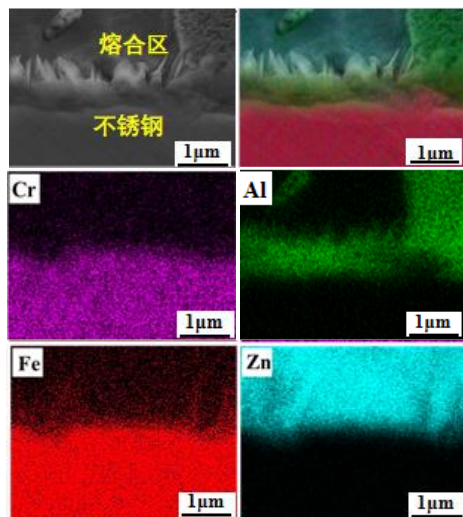


图5 接头界面元素分布

3.3 力学性能分析

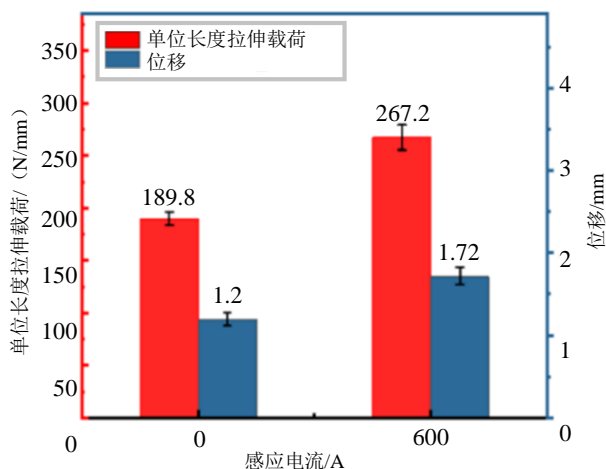


图6 有无感应加热铝/钢接头单位长度拉伸载荷和位移变化

为了研究感应加热对接头拉伸性能的影响,对铝/钢接头强度进行测试,采用试样峰值载荷与试样宽度之间的比值作为力学性能的评判标准,单位为N/mm,其计算式为:单位长度拉伸载荷(N/mm)=最大拉伸载荷(N)/拉伸试样宽度(mm),结果如图6所示。由图可知,在无感应加热情况下接头单位长度拉伸载荷为189.8 N/mm、拉伸位移为1.2 mm;激光-感应复合焊接接头的单位长度拉伸载荷为267.2 N/mm(为铝合金母材的70%)、拉伸位移为1.72 mm,这表明感应加热能明显提高接头的拉伸强度。结合图3和图4分析可知,有无感应加热条件下熔合区组织都为Zn-Al共晶组织,但是在感应加热条件下钎焊接界面生成了 $Fe_4(Al, Zn)_{13}$ 相,相关研究表明与 Fe_2Al_5 相比, Fe_4Al_{13}

的韧性更高,这有利于接头性能的提升^[16];同时感应加热提高了钎焊宽度,增加了填充金属与母材的接触面积,提高了接头强度,所以感应加热条件下铝/钢接头界面的强度更高,接头会在由强度较低的Zn-Al共晶组成的熔合区附近断裂。

铝/钢接头断口分析如图7所示,图7a和图7b是无感应加热情况下拉伸试样和断口形貌。从图中可以看出接头在铝/钢界面处断裂,断口表面呈现层状撕裂,这表明接头断裂形式为脆性断裂。图7c和图7d是感应加热情况下接头断裂形式拉伸试样和断口形貌。从图中可知接头在熔合区发生断裂,断口处呈现大小不一的韧窝,接头为典型的韧性断裂。这表明感应加热能提高接头力学性能,改善接头断裂模式。

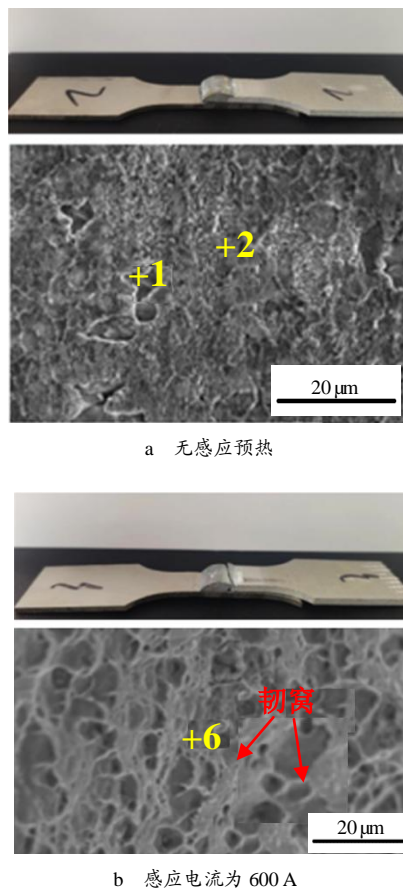


图7 铝/钢激光熔钎焊接头拉伸断口

4 结束语

本文采用铝/钢激光-感应复合焊接热源,以熔钎焊工艺对铝/钢异质金属进行焊接。对比分析了感应加热对焊缝成形、接头微观组织、接头强度的影响和接头断裂模式的影响。

a. 焊接工艺参数为激光功率为 1 800 W, 焊接速度 6 mm/s、送丝速度 50 mm/s、保护气流量 15 L/min、离焦量+30 mm, 有无感应加热都能获得表面无明显缺陷, 成形良好的焊缝。

b. 无感应加热情况下接头钎焊宽度为 6.16 mm、接触角为 64°。感应加热条件下接头钎焊宽度为 7.62 mm、接触角为 44°, 表明感应加热能提高接头的润湿铺展性能。

c. 无感应加热条件下界面相组织为 $\text{Fe}_2\text{Al}_{5-x}\text{Zn}_x$, 有感应加热时界面出现了新的结构。对其进行能谱分析确定相为 $\text{Fe}_4(\text{Al}, \text{Zn})_{13}$, 有利于接头性能的提升。

d. 无感应加热情况下接头单位长度拉伸载荷为 189.8 N/mm、拉伸位移为 1.2 mm, 接头断裂在铝/钢接头界面处, 断口呈现脆性断裂; 感应加热情况下接头单位长度拉伸载荷为 267.2 N/mm、拉伸位移为 1.72 mm, 接头断裂在接头熔合区, 断口呈现韧性断裂, 这表明感应加热能提高接头力学性能。

参考文献

- [1] 廖文和, 戴宁. 航空航天结构轻量化设计制造技术发展现状与挑战[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(3): 347-360.
- [2] 王博, 郝鹏, 田阔, 等. 航空航天结构轻量化设计与实验方法研究进展[J]. 宇航学报, 2023, 44(4): 596-606.
- [3] 陈晓辉, 钟志平, 陆辛. 车用铝合金连接技术的研究进展与应用[J]. 热加工工艺, 2016, 45(11): 5-8.
- [4] 陈大林. 铝钢异种金属焊接研究现状[J]. 兰州石化职业技术学院学报, 2021, 21(1): 5-21.
- [5] 高辰恺, 杨瑾, 李铸国, 等. 铝/钢异种金属先进连接方法研究进展[J]. 焊接, 2021(11): 7-20+62.
- [6] 马一帆, 徐培全, 林俊宇. YG20/45 钢激光熔钎焊缝界面显微组织与元素扩散研究[J]. 轻工机械, 2022, 40(2): 9-34.
- [7] Huang Rongrong, Tan Caiwang, Sun Yiming, et al. Influence of processing window on laser welding-brazing of Al to press-hardened 22MnB5 steel[J]. Optics and Laser Technology, 2021, 133: 106566.
- [8] Yang Jin, Xiao Ming, Wu Lingqing, et al. The influence of laser power on microstructure and properties of laser welding-brazing of Al alloys to Al-Si coated 22MnB5 steel[J]. Optics and Laser Technology, 2023, 162: 109318.
- [9] Tan Caiwang, Zang Chenwei, Xia Hongbo, et al. Influence of Al additions in Zn-based filler metals on laser welding-brazing of Al/steel[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 34: 63-251.
- [10] Jiang Jiawei, Oliveira J P, Yang Jin, et al. Effect of defocusing distance on interfacial reaction and mechanical properties of dissimilar laser Al/steel joints with a porous high entropy alloy coating[J]. Materials Characterization, 2024, 210: 113751.
- [11] 耿占一, 胡连海, 霍佳磊, 等. 激光复合焊技术研究及应用进展[J]. 金属加工(热加工), 2023(4): 1-9.
- [12] Qin Guoling, Lei Zhen, Su Yuhu, et al. Large spot laser assisted GMA brazing-fusion welding of aluminum alloy to galvanized steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014.
- [13] Tan Caiwang, Liu Fuyun, Sun Yimeng, et al. Laser brazing characteristics of Al to brass with Zn-based filler[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2018, 27(7): 3521-3531.
- [14] Gao Yidi, Zhang Yan, Xu Yan, et al. The butt of CP-Ti/304 stainless steel and CP-Ti/T2 bimetallic sheets using laser-induction heating welding technology[J]. Materials Letters, 2022, 307: 131054.
- [15] Yang Jin, Sun Jiahao, Guo Chenkai, et al. Effect of heat input on interfacial microstructure, tensile and bending properties of dissimilar Al/steel lap joints by laser welding-brazing[J]. Optics and Laser Technology, 2021, 142: 107218.
- [16] Xia Hongbo, Zhang Liankai, Tan Caiwang, et al. Effect of heat input on a laser powder deposited Al/steel butt joint[J]. Optics and Laser Technology, 2019, 111: 459-469.