

引用格式:田继鹏,丁云龙,邵文杰,等.铜/铝异种金属扩散焊接头耐腐蚀性能研究[J].有色设备,2025,39(4):69-74,99.

TIAN Jipeng, DING Yunlong, SHAO Wenjie, et al. Study on corrosion resistance of copper/aluminum dissimilar metal diffusion welding joints[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2025, 39(4): 69-74, 99.

铜/铝异种金属扩散焊接头耐腐蚀性能研究

田继鹏^{1,2}, 丁云龙^{1,2}, 邵文杰^{1,2}, 崔诗易^{1,2}, 庄志国³, 韩冰^{1,2}

(1. 辽宁科技大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 鞍山 114051;

2. 辽宁省复杂工件表面特种加工重点实验室, 辽宁 鞍山 114051;

3. 崇义章源钨业股份有限公司, 江西 赣州 341000)

[摘要] 本研究采用真空扩散焊接工艺焊接 T2Cu 和 1060Al, 使用扫描电子显微镜 (SEM) 和能量色散光谱仪 (EDS) 分析扩散层的微观结构和物相组成, 在 3.5wt% NaCl 溶液中进行腐蚀浸泡试验和电化学腐蚀性能研究, 分析比较了每个扩散层和基材的耐腐蚀性。结果表明, 在 T2Cu/1060Al 真空扩散接头的界面处形成了由 AlCu 层、Al₂Cu 层、Al₄Cu₉ 层组成的扩散层。扩散层不同区域的耐腐蚀性存在差异, 铜侧扩散层区域腐蚀程度相对较轻, 铝侧扩散层区域从点蚀孔发展成点蚀坑, 随着时间的延长形成了不规则的深沟壑, 最终发展成为剥落腐蚀。基材及各个扩散层按耐腐蚀性强弱排序为: T2Cu > Al₄Cu₉ > AlCu > Al₂Cu > 1060Al。

[关键词] 铜/铝扩散焊; 扩散层; 耐腐蚀性; 显微组织; 异种金属; 焊接; 腐蚀电位

[中图分类号] TG453.9 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2025)04-0069-06

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.04.008

0 引言

铜与铝作为重要的工业金属材料,在现代工业体系中占据着不可替代的地位。铝及铝合金凭借其高比强度、良好的可塑性与耐蚀性以及丰富的矿产资源储备,被广泛应用于航天军工、交通运输及建筑工程等领域^[1-4]。其因低密度(2.7 g/cm³)与仅次于金、银、铜的优异导电性,为电器制造、电线电缆等行业提供了关键材料支撑^[5-7]。而铜材则以其卓越的导电导热性能、优良的加工特性,成为电子产品、电动汽车及制冷散热系统的核心材料^[8-10]。我国铜资源储量仅占全球3%,远低于铝资源储备,为满足国内市场需求,长期以来高度依赖进口铜资源^[11-12]。在此背景下,以铝代铜的策略不仅契合资源优化配置理念,而且通过制备铜/铝复合接头,实现了铜的力学性能、耐蚀性与导电性优势与铝的轻量化、低成本特性的有机结合,为高端装备制造与新

兴产业发展提供了重要材料解决方案^[13-15]。然而,传统的钎焊、熔焊等连接技术在铜/铝异种金属焊接中面临应力集中、热裂纹等固有缺陷,导致接头强度不足且综合性能难以满足高端应用需求。扩散焊作为一种先进的固相连接技术,通过原子间的相互扩散实现冶金结合,能够有效规避气孔、开裂等焊接缺陷,具有接头强度高、焊缝组织致密、适配材料范围广及环境友好等显著优势,为铜/铝异种金属连接提供了极具潜力的技术路径^[16-17]。

金属材料在实际服役过程中不可避免地受到环境介质的侵蚀,导致结构失效与性能退化^[18]。对于铜/铝异种金属接头而言,其组织结构与物化性质的差异进一步增加了腐蚀行为的复杂性^[19]。尤其是焊接过程中形成的金属间化合物(如 Al₄Cu₉、AlCu 及 Al₂Cu 等),其形态与分布不仅直接影响接头力学性能,更在特定介质环境中引发电偶腐蚀等电化学反应,导致接头过早失效,严重制约了其工程应

[收稿日期] 2025-03-31

[基金项目] 辽宁省教育厅高校基本科研项目(LJ212410146074)。

[第一作者] 田继鹏(2002—),男,辽宁大连人,硕士研究生,主要研究方向为异种金属连接技术。

[通信作者] 丁云龙(1988—),男,吉林农安人,副教授,博士,硕士研究生导师,主要研究方向为异种金属焊接技术。

用^[20-22]。

为推动铜/铝扩散焊接头在工业领域的广泛应用,在提升接头力学性能的同时,深入探究其腐蚀行为具有重要的科学意义与工程价值。本研究基于文献调研与前期试验基础,选取焊接温度 530 °C、保温时间 60 min 的铜/铝扩散焊试样,进行浸泡腐蚀和电化学腐蚀试验,采用扫描电子显微镜、能谱分析和电化学工作站等工具,系统研究基体材料与各扩散层的腐蚀行为及腐蚀机理,旨在为铜/铝异种金属接

头的实际服役性能评估提供理论依据,进而推动其在高端装备制造中的工程化应用。

1 试验部分

1.1 试验材料

试验采用的焊接材料为 T2Cu 和 1060Al,二者尺寸均为 90 mm × 20 mm × 3 mm。T2Cu 和 1060Al 的化学成分见表 1 和表 2。

表 1 T2Cu 的化学成分

Table 1 Chemical compositions of T2Cu

wt%

Composition	Cu	Zn	S	O	As	Pb	Fe
Content	Bal.	0.005	0.005	0.060	0.002	0.005	0.005

表 2 1060Al 的化学成分

Table 2 Chemical compositions of 1060Al

wt%

Composition	Al	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Ni
Content	Bal.	0.050	0.100	0.012	0.200	0.250	0.001 6

1.2 试验方法

焊接前,采用不同粒度的 SiC 砂纸打磨试样表面以去除表面氧化层,并使用超声波清洗机去除试样表面杂质与油渍。预处理完毕后,将基材放入模具,并置于真空加热炉。为防止热冲击影响焊接接头质量,焊接完成后,试样在炉内以 12 °C/min 的降温速率缓慢冷却至室温,焊接时真空压力等于 1×10^{-2} Pa。

焊接完成后,采用线切割对 Cu/Al 焊接接头的界面进行取样。耐腐蚀性测试在 3.5wt% NaCl 溶液中进行。试样浸泡完成后取出,用无水乙醇进行超声波清洗,然后使用 3D 超景深光学显微镜对基体及反应层界面进行观测。采用 CS 系列电化学工作站,测试数据包括开路电位与极化曲线,并用拟合软件计算出试样的自腐蚀电位与腐蚀电流密度。

2 试验结果与分析

2.1 铜/铝界面的显微组织结构

如图 1 所示,在 530 °C 保温 60 min 的工艺条件下制备的 Cu/Al 扩散焊接头界面呈现出良好的结合特性,界面区域未见孔洞、熔蚀和未完全熔合等缺陷,接头结合处形成了 3 层金属间化合物。通过

EDS 能谱分析技术对界面 a、b、c 三点的元素组成进行分析,结果见表 3。a 点的元素组成为 42% Al 和 58% Cu,结合铜铝二元相图,该层对应 AlCu 金属间化合物相;b 点的元素组成显示 Al 含量降至约 29%,Cu 含量升至 71%,表明第二层主要由 Al₂Cu 相构成;c 点由近 20% 的 Al 和 80% 的 Cu 组成,第三层对应为 Al₄Cu₉ 相。综合分析表明,扩散层从 Al 基体侧向 Cu 基体侧依次形成 AlCu 层、Al₂Cu 层和 Al₄Cu₉ 层的层状结构。

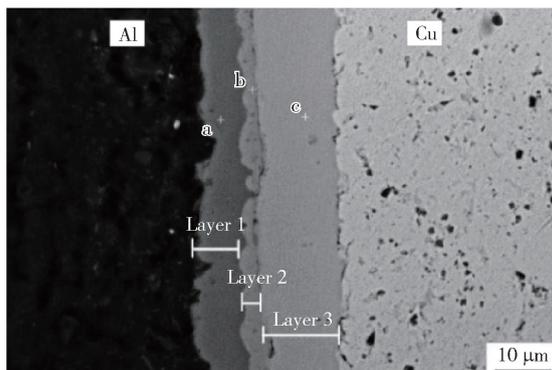


图 1 530 °C 焊接温度下 Cu/Al 扩散层 SEM 图

Fig. 1 SEM image of the Cu/Al diffusion layer at the welding temperature of 530 °C

表3 不同位置 EDS 点分析结果

Table 3 EDS analysis results at different positions

Position	Mole fraction/%	
	Al	Cu
a	42	58
b	29	71
c	20	80

2.2 腐蚀浸泡试验

图2展示了铜/铝扩散焊接头在3.5wt% NaCl溶液中不同浸泡时间的微观腐蚀形貌,观察区域包括铜母材、界面扩散层及铝母材。

浸泡2 h时,铜母材大多表面为金属态,仅局部

有轻微氧化痕迹,反应层靠近铜侧现褐色点蚀斑,靠近铝侧呈暗灰色且点蚀严重;铝母材表面轻微腐蚀,有大量黑色氧化物及弥散孔洞。6 h后铝母材黑色氧化物变为点蚀斑。随着时间增长,铜母材表面出现大面积点蚀斑与点蚀孔,整体呈红褐色,焊缝区铜侧点蚀斑面积增大。24 h时出现大面积点蚀孔,部分聚集成点蚀坑。48 h时近铜侧界面局部形成腐蚀沟壑。铝母材因 Cl^- 易吸附加速点蚀形成点蚀孔,腐蚀时间延长,点蚀孔向深处发展成点蚀坑,浸泡48 h后相邻点蚀坑相连形成更大点蚀坑,焊缝区铝侧点蚀孔向深处发展,24 h时点蚀坑汇聚重合形成腐蚀沟壑,出现小范围剥落腐蚀及点蚀坑周围细纹,48 h时近铝侧界面由点蚀发展为大面积剥落腐蚀,形成不规则凹坑。

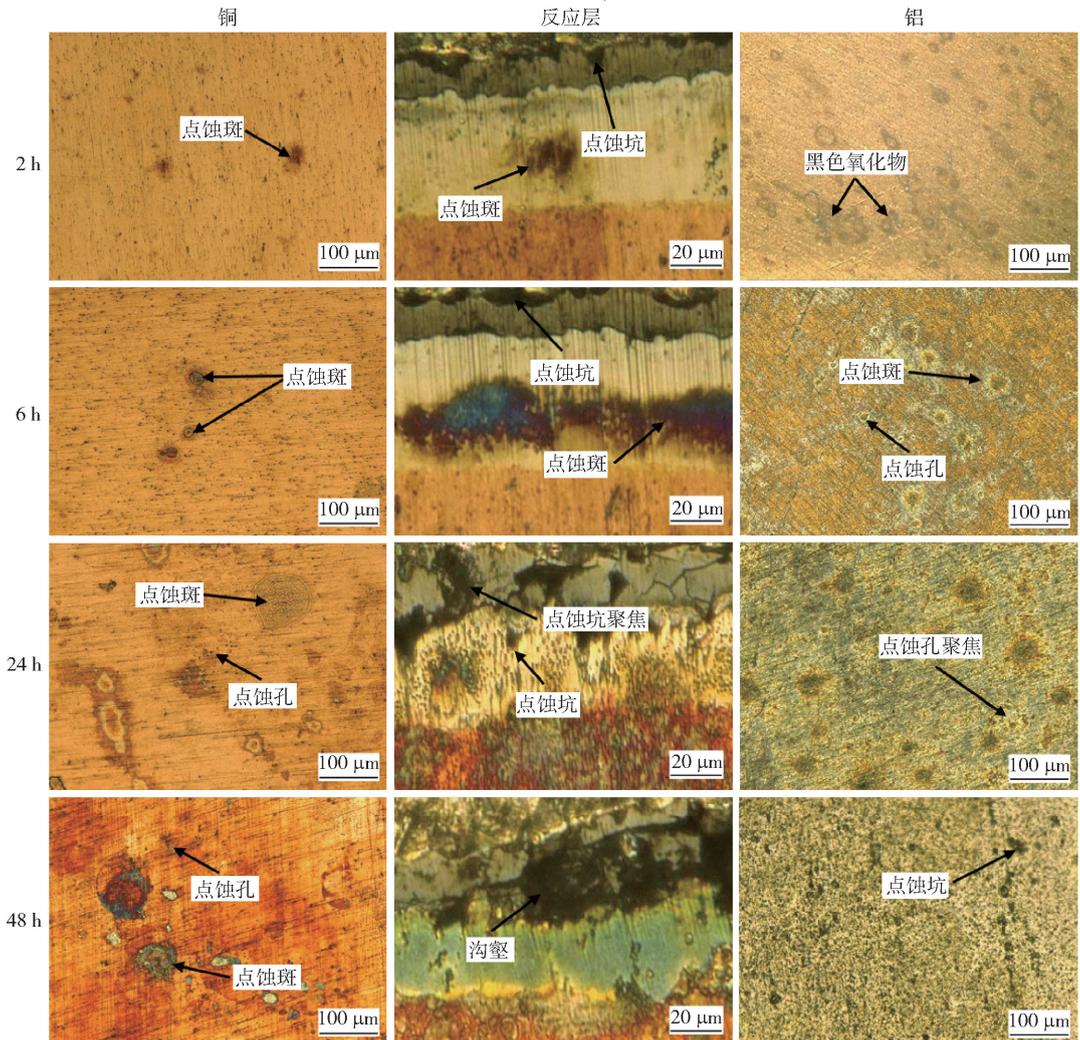


图2 铜/铝接头各区域在3.5wt% NaCl溶液中浸泡不同时间后的微观腐蚀形貌

Fig. 2 Microscopic corrosion morphology of Cu/Al joints in various regions after immersion for different times in 3.5wt% NaCl solution

根据铜/铝扩散焊接头在 3.5wt% NaCl 溶液中的浸泡腐蚀试验分析结果发现,铜、铝母材以及扩散层不同区域的耐腐蚀性能存在明显的差异。根据浸泡腐蚀结果表明,铜母材表现出较好的耐腐蚀性,在经过 48 h 的浸泡腐蚀后,表面仅有一些腐蚀斑与点蚀孔。反应层靠近铜侧区域表现出与铜母材类似的腐蚀情况,腐蚀程度相对于近铝侧反应层较轻。靠近铝侧区域反应层,随着浸泡的时间推移,腐蚀程度不断加重,最终形成了不规则的较深沟壑。铝母材耐腐蚀性能最差,由初始的点蚀孔不断汇聚发展,腐蚀逐渐加剧,临近的点蚀孔相互连接形成大面积的点蚀坑。

2.3 电化学腐蚀性能研究

图 3 所示为 T2Cu、1060Al 母材及 Al_4Cu_9 、AlCu、 Al_2Cu 各反应层在 3.5wt% NaCl 溶液的电极开路电位。腐蚀电位作为材料在自然腐蚀状态下的热力学指标,其数值高低直接反映材料的腐蚀倾向,电位越低,材料越易失去电子发生氧化反应,腐蚀倾向越高^[23]。由图 3 可知,在经历 1 h 的开路电位测试,母材及各反应层的电位已经基本稳定。其中,1060Al 的开路电位最低,表明铝母材具有较高的腐蚀倾向;T2Cu 的腐蚀电位最高,各反应层的开路电位有所差异,但相对于 T2Cu 的开路电位均有所下降,由于扩散层区域 Cu、Al 元素分布不均,分布大量的金属间化合物的原因所导致的^[24-25]。最终母材及各个扩散层按耐腐蚀性大小排序为:T2Cu > Al_4Cu_9 > AlCu > Al_2Cu > 1060Al。

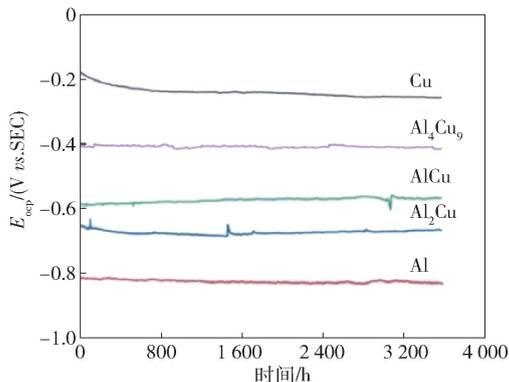


图 3 母材及各反应层在 3.5wt% NaCl 溶液的开路电位

Fig.3 Open-circuit potentials of the substrate and each reactive layer in 3.5wt% NaCl solution

为了更加详细了解铜、铝母材以及各反应层的耐腐蚀性能和腐蚀行为发展,对接头不同区域进行

极化曲线测试。图 4 为母材及各反应层在 3.5wt% NaCl 溶液的动电位极化曲线。根据图 4 的极化曲线进行 Tafel 拟合可确定铜、铝母材及不同反应层的电化学参数,包括腐蚀电位、腐蚀电流密度和极化电阻。母材及各反应层动电位极化曲线特征值结果如表 4 所示,由表可知,铝母材具有最低的腐蚀电位和最大的腐蚀电流密度,耐腐蚀性能最差;其次是 Al_2Cu 层,AlCu 层相对于 Al_2Cu 耐腐蚀性能有所改善;铜母材及 Al_4Cu_9 耐腐蚀性能相对较好。上述测试结果表明,在含有氯离子的腐蚀性环境中铝基体表现出最弱的耐腐蚀性能,其次是 Al_2Cu 、AlCu 金属间化合物层,而 Al_4Cu_9 金属间化合物层与铜基体的耐腐蚀性相对较好,且要明显优于铝基体。

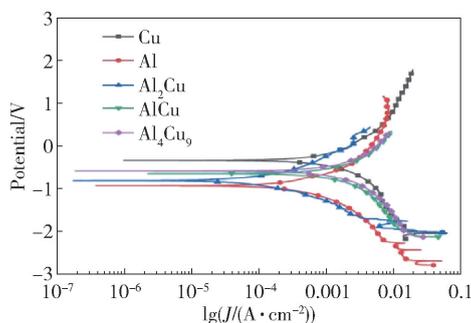


图 4 母材及各反应层在 3.5wt% NaCl 溶液的动电位极化曲线

Fig.4 Kinetic potential polarization curves of the substrate and each reaction layer in 3.5wt% NaCl solution

表 4 母材及各反应层动电位极化曲线特征值

Table 4 Characteristic values of kinetic potential polarization curves for the substrate and each reaction layer

Samples	E_{corr}/V	$I_{corr}/(A \cdot cm^{-2})$	$R_p/(\Omega \cdot cm^{-2})$
Cu	-0.35	1.462×10^{-4}	177.84
Al	-0.95	7.341×10^{-4}	35.42
Al_2Cu	-0.83	4.653×10^{-4}	55.88
AlCu	-0.66	3.136×10^{-4}	82.91
Al_4Cu_9	-0.60	2.265×10^{-4}	114.79

2.4 腐蚀演变过程

根据分析结果,对铜/铝扩散焊接头在 3.5wt% NaCl 溶液中的短期浸泡腐蚀过程进行阐述说明,图 5 为接头腐蚀反应过程示意模型图。在腐蚀开始阶

段,由于铜铝接头表面会覆盖一层致密的氧化膜,保护基体不受腐蚀性介质的侵蚀,腐蚀速率较慢。随着腐蚀时间的逐渐增加,溶液中的活性阴离子 Cl^- 在钝化的金属表面以及材料的原始缺陷处吸附,这种吸附不是均匀的,呈现局部点状分布。吸附的 Cl^- 改变了吸附位置钝化膜的成分和性质,形成了孔蚀核。从图5可知铝母材表面孔蚀核生长成宏观腐蚀孔,点蚀孔形成后,蚀孔内外构成活化钝化局部腐蚀电池,加速腐蚀。随着腐蚀进行,邻近点蚀孔相连成点蚀坑,时间增长使点蚀坑扩展为更大更深的腐蚀坑,腐蚀产物增多。 T2Cu 热力学稳定性高,在 NaCl 溶液中因氧化膜而呈钝态,耐腐蚀性好,其孔

蚀诱导期比铝母材长。铝母材形成点蚀孔阶段,铜母材只有局部表面有氯离子吸附斑,之后表面局部出现点蚀孔。铜/铝扩散焊接头反应层因金属间化合物不同,不同区域腐蚀程度有差异,靠近铝侧反应层区域腐蚀严重。腐蚀初期出现小的点蚀孔,随后点蚀孔向纵横发展成点蚀坑并相连,出现大面积腐蚀,大量疏松多孔腐蚀产物脱落,反应层裸露继续反应,点蚀坑面积扩大,最终形成剥落腐蚀。靠近铜侧反应层区域腐蚀性能与铜母材类似,初期有腐蚀斑,后局部出现点蚀孔。电化学腐蚀主要原因是金属间化合物化学成分和微观结构不均匀,构成了电化学腐蚀的阴极和阳极。

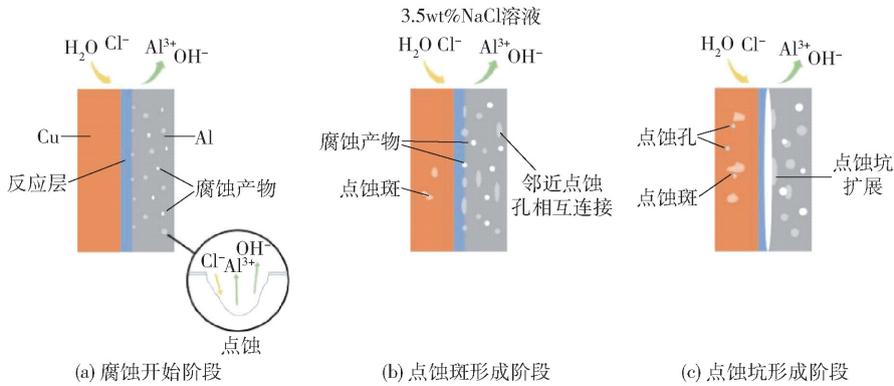


图5 接头腐蚀反应过程示意模型

Fig. 5 Schematic model of the corrosion reaction process of the joint

3 结论

1) 真空扩散焊可实现 $\text{T2Cu}/1060\text{Al}$ 的接合。接头的微观结构优良,在界面处形成均匀的扩散层。从 Al 侧到 Cu 侧的扩散层为: AlCu 层、 Al_2Cu 层、 Al_4Cu_9 层。

2) 铜母材表现出较好的耐腐蚀性,铝母材耐腐蚀性能最差,反应层不同区域的耐腐蚀性存在差异,反应层靠近铜侧区域腐蚀程度相对较轻,靠近铝侧区域扩散层从点蚀开始发展,随着浸泡时间的推移,点蚀坑不断扩大相连,腐蚀程度不断加重,大量腐蚀产物脱落,最终形成了不规则的较深沟壑,发展成为剥落腐蚀。

3) 与 T2Cu 和扩散层相比, 1060Al 母材在腐蚀性 NaCl 环境中的耐腐蚀性最差。在含有氯离子的腐蚀性环境中铝母材表现出最弱的耐腐蚀性能,其次是 Al_2Cu 、 AlCu 金属间化合物层,而 Al_4Cu_9 金属间化合物层与铜基体的耐腐蚀性相对较好,且要明显优于铝基体。

[参考文献]

- [1] C. Rajendran, R. B. Ruben, P. Ashokavarthanan., et al. Identifying the effect of PWHT on strength of laser beam welding joints of AA2024 aluminum alloy[J]. ASME Open J Engineering, 2022, 1:011003.
- [2] W. Sebastian, M. Raphaela, M. Marion. Numerical study on local short-term heat treatments for joining by forming of high-strength 7xxx aluminum[J]. Production Engineering, 2023, 17(6): 829 - 845.
- [3] Zheng G W, Li H, Lei C, et al. Natural aging behaviors and mechanisms of 7050 and 5A90 Al alloys: a comparative study[J]. Materials Science & Engineering A, 2018, 718:157 - 164.
- [4] 邢国华, 王晓盼, 李翔宇, 等. 铝合金材料在建筑结构中的应用研究进展[J]. 结构工程师, 2021, 37(5): 214 - 221.
- [5] J. J. Huang, X. Zhou, J. L. Guo, et al. Effect of Ni addition on the microstructure and mechanical properties of 6101 aluminum alloy with high electrical conductivity[J].

- Journal of Materials Engineering and Performance, 2022, 31(11): 8923 – 8931.
- [6] 丁宇森, 张璞, 黎洪, 等. 锂硒电池的研究现状与展望[J]. 化学进展, 2021, 33(4): 610 – 632.
- [7] 蒋志达, 王少华, 刘文才, 等. 铜铝层状复合材料研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(12): 3925 – 3940.
- [8] R. Vignesh Babu, S. Kanagaraj. Effect of different processing techniques on hardness, electrical and thermal conductivity of copper/carbon nanotube composites for industrial applications [J]. Diamond & Related Materials, 2021, 120: 108634.
- [9] 樊丁, 李永鹏, 武利建, 等. 超声振动对铝/铜等离子弧熔钎焊接头组织及力学性能的影响 [J]. 材料导报, 2021, 35(16): 16115 – 16119.
- [10] 孔德群. 汽车电池模组 Al/Cu 异种金属激光焊接技术新进展 [J]. 金属加工(冷加工), 2020 (S1): 153 – 160.
- [11] 王艳, 王发, 孙静. 2021 年铜市场分析与展望[J]. 中国有色金属, 2021(3): 46 – 48.
- [12] Lacaze J, Tierce S, Lafont M C, et al. Study of the microstructure resulting from brazed aluminium materials used in heat exchangers [J]. Materials Science & Engineering A, 2005, 413(6): 317 – 321.
- [13] J. X. Tang, L. Shi, C. S. Wu, et al. Microstructure and mechanical properties of dissimilar double-side friction stir welds between medium-thick 6061-T6 aluminum and pure copper plates [J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2022, 35(12): 2027 – 2046.
- [14] Wang Y. H., Xiao L. R., Zhao X. J., et al. Microstructure and mechanical properties of columnar-grained copper produced by the Ohno continuous casting technique [J]. Materials Science & Engineering A, 2015, 639: 122 – 130.
- [15] 田仕, 毛永灵, 彭超. 超声波作用下 Al/Zn-14Al/Cu 钎焊接头的显微组织及力学性能[J]. 热加工工艺, 2019, 48(13): 30 – 33.
- [16] S. S. SEYYED AFGHAHI, M. JAFARIAN, M. PAID-AR, et al. Diffusion bonding of Al7075 and MgAZ31 alloys: process parameters, microstructural analysis and mechanical properties [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(7): 1843 – 1851.
- [17] F. X. Yin, C. C. Liu, Y. G. Zhang, et al. Effect of Ni interlayer on characteristics of diffusion bonded Mg/Al joints [J]. Materials Science and Technology, 2018, 34(9): 1104 – 1111.
- [18] 崔彤, 崔振刚, 刘艳明, 等. 一种新型镍基薄带钎焊料的焊接接头的组织与性能[J]. 有色矿冶, 2006(1): 35 – 38.
- [19] 李雪爱, 王文彪. 浅谈金属腐蚀危害与防护[J]. 化工管理, 2013(12): 158.
- [20] 李东, 赵杨洋, 张延松. 焊接能量对铝/铜超声波焊接接头显微组织的影响[J]. 焊接学报, 2014, 35(2): 47 – 50, 115.
- [21] Wang B, Liu P, Liu X K, et al. Microstructures and mechanical properties of Cu/Al compound materials during thermal cycle [J]. Rare Metals, 2022, 41(11): 3911 – 3918.
- [22] Li Q, Zhang Y, Cheng Y, et al. Effect of temperature on the corrosion behavior and corrosion resistance of copper-aluminum laminated composite plate [J]. Materials, 2022, 15(4): 1621.
- [23] 徐磊欣. 铝铜异种合金搅拌摩擦焊接及腐蚀行为研究 [D]. 北京: 北京石油化工学院, 2022.
- [24] Song H Q, Feng C S, Guan Z, et al. Effect of Al/Cr ratio on structure, magnetism, and corrosion resistance of Fe-CoNiCr_{1-x}Al_x high entropy alloys, Journal of Alloys and Compounds, 2025, 1010: 177415.
- [25] 吴迎归. 地聚合物涂层材料的制备及其防腐性能研究 [D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2023.

(下转第 99 页)