

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.04.13

铜/铝异种金属管接头的高频感应钎焊工艺及性能提升

罗寿根^{1,2}, 黄魏青², 刘金湘^{1,2}, 车兴涛³, 黄世盛^{1,2}, 余丁坤^{2,3}, 乔雪^{1,2}

1. 浙江省华光新型绿色钎焊材料重点企业研究院, 浙江 杭州 311100

2. 杭州华光焊接新材料股份有限公司, 浙江 杭州 311100

3. 杭州孚晶焊接科技有限公司, 浙江 杭州 311100

摘要: 针对铜和铝异种金属管接头开发了高频感应钎焊工艺, 重点关注不同加热位置及工艺参数对焊缝外观及熔深的影响。通过对比两种常用钎料(BAl67CuSi和BZn78Al22)的焊接效果, 发现BZn78Al22钎料由于更低的熔点和更优的润湿性, 更适合铜/铝异种金属的感应钎焊。分析了不同加热位置对钎料润湿性和焊缝成形的影响, 确定了最佳加热位置: 首段加热时, 线圈底部与铝管顶部之间高度差为4~5 mm; 二段加热时, 线圈端面低于管座端面1 mm。此外, 通过调整感应加热功率和时间, 实现了分段加热控制, 有效避免了母材熔蚀并提高了焊缝熔深。最终, 采用优选的钎料和工艺参数获得的铜/铝异种金属感应钎焊接头, 其焊缝熔深超过95%, 致密性良好, 且承压能力达到13.81 MPa, 满足设计要求。该研究为铜铝异种金属管接头的高质量连接提供了理论依据和技术支持。

关键词: 铜/铝异种金属; 感应钎焊; 钎料; 加热位置; 工艺参数; 熔深

中图分类号: TG454 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)04-0100-07

High-frequency Induction Brazing Process and Performance Improvement of Copper/Aluminum Dissimilar Metal Pipe Joints

LUO Shougen^{1,2}, HUANG Weiqing², LIU Jinxiang^{1,2}, CHE Xingtao³, HUANG Shisheng^{1,2},
YU Dingkun^{2,3}, QIAO Xue^{1,2}

1. Zhejiang Huaguang New Green Brazing Material Key Enterprise Research Institute, Hangzhou 3111002, China

2. Hangzhou Huaguang Welding New Material Co., Ltd., Hangzhou 311100, China

3. Hangzhou Fuery Welding Technology Co., Ltd., Hangzhou 311100, China

Abstract: A high-frequency induction brazing process for copper and aluminum dissimilar metal pipe joints was developed, focusing on the effects of different heating positions and process parameters on the appearance and penetration depth of the weld seam. Firstly, by comparing the welding effects of two commonly used brazing alloys (BAl67CuSi and BZn78Al22), it was found that the BZn78Al22 brazing alloy, due to its lower melting point and better wettability, is more suitable for induction brazing of copper/aluminum dissimilar metals. Secondly, the influence of different heating positions on the wettability of the brazing alloy and the formation of the weld seam was analyzed, and the optimal heating position was determined: during the first stage of heating, the height difference between the bottom of the coil and the top of the aluminum pipe is 4~5 mm; during the second stage of heating, the end face of the coil is 1 mm lower than the end face of the pipe seat. In addition, by adjusting the induction heating power and time, segmented heating control was achieved, effectively avoiding parent material melting and improving weld penetration depth. Finally, the copper/aluminum dissimilar metal induction brazed joint obtained using the selected brazing alloy and process parameters has a weld penetration depth exceeding 95%, good compactness, and a pressure-bearing capacity of 13.81 MPa, meeting the design requirements. This study provides a theoretical basis and technical support for high-quality connections of copper and aluminum dissimilar metal pipe joints.

Keywords: Copper/Aluminum dissimilar metals; induction brazing; Zinc-Aluminum brazing filler; heating position; process

收稿日期: 2024-12-11

基金项目: 浙江省“尖兵领雁+X”研发攻关计划(2024C01086)

作者简介: 罗寿根(1981—), 男, 高级工程师, 主要从事焊接材料的研究工作。E-mail: luoshougen@cn-huaguang.com。

parameters; melting depth

引用格式:罗寿根,黄魏青,刘金湘,等.铜/铝异种金属管接头的高频感应钎焊工艺及性能提升[J].电焊机,2025,55(4):100-106.

Citation:LUO Shougen, HUANG Weiqing, LIU Jinxiang, et al. High-frequency Induction Brazing Process and Performance Improvement of Copper/Aluminum Dissimilar Metal Pipe Joints[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(4): 100-106.

0 引言

制冷设备为人们生活带来了舒适与便利,广泛用于生物医药、新能源、环保等多个领域^[1]。随着制冷行业产量的持续增长,铜的消耗与日俱增,然而铜资源的短缺导致铜价攀升,促使制冷行业迫切寻求一种性能相近且成本更低的替代材料^[2]。铝的密度较小、延展性能好、腐蚀性能良好以及与铜相近的导电和导热性能,且价格仅为铜的1/4,成为理想的替代选择。目前在空调和热泵管路设计中,两端铜、中间铝的方案已成为主流。因此,如何实现铜和铝的高质量连接成为行业亟待解决的关键问题^[3]。

国内外针对铜和铝异种金属连接技术进行了大量研究^[4-7]。如采用密封液和灌密封胶连接的洛克环,虽然成本高且接头质量不佳,但仍被部分使用。传统的焊接方法如熔焊、电阻焊、扩散焊和钎焊中,铜与铝直接熔焊时容易生成硬脆的金属间化合物,显著降低接头连接强度;电阻焊能够得到高强度的铜-铝接头,但需要使用夹具形成压力,对管件刚性有要求,不适用于大管径的薄壁铜-铝接头;李长安^[8]等人提出的铜/铝薄壁惯性摩擦焊接工艺虽能确保可靠连接,但需过渡接头,增加了额外成本。相比之下,钎焊因其毛细润湿填缝特性在制冷行业管路连接中具有显著优势,且其相对较低的连接温度和较强的结构适应性被认为是最适合铜/铝异种金属管接头连接的工艺方法^[9-11]。目前铜/铝异种金属管接头多以火焰钎焊方式为主,随着市场对无火化、高效率焊接需求的提升,开展铜和铝异种金属管接头感应钎焊工艺研究显得尤为迫切。

1 主要研究内容

本文针对铜和铝异种金属管接头完成高频感应钎焊工艺开发。鉴于铜、铝在物理性能上的显著

差异,首先验证不同焊接工艺参数(如加热位置、加热时间、加热方式等)对接头外观及焊缝熔深的影响,以及不同填充材料对接头外观及组织性能的影响,得出最佳的填充材料及钎焊工艺参数。再对最终应用的钎焊接头进行金相分析及承压性能测试。

2 试验方案

2.1 试验用母材

试验用母材为T2紫铜与3系铝锰合金,均符合GB/T 5231—2012标准,化学成分见表1。紫铜管规格为 $\varnothing 12.7$ mm,壁厚1 mm;铝管规格为 $\varnothing 16.9$ mm,壁厚2 mm,二者采用套接方式,单边间隙0.1 mm,套接深度为12 mm,如图1所示。

表1 焊接母材的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of base metal (wt. %)

成分	Al	Fe	Mg	Cu	Si	Mn	Zn	Ti
铝管	余量	0.7	0.30	0.1	0.5	0.9~1.5	0.2	0.02
铜管	—	0.005	—	>99.9	—	—	—	—

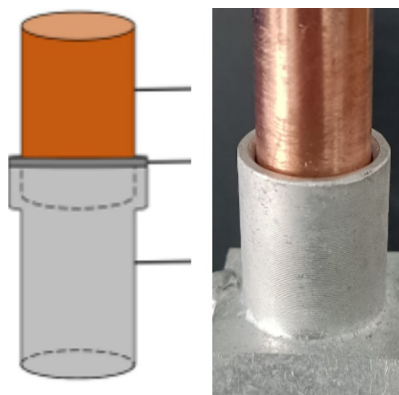


图1 铜和铝异种金属管接头示意

Fig. 1 Diagram of copper and aluminum dissimilar metal tube joints

紫铜的物理性能与铝差异很大^[12],如表2所示。熔点和热导率差异大,意味着在感应钎焊过程中铝很容易被加热熔化;线膨胀系数差异大,意味着两种金属钎焊过程中膨胀和收缩量差异大,容易导致焊接接头处产生内部应力引发裂纹。除此之外,二

者较大的热导率使得熔池的结晶速度相对较快,高温冶金反应产生的气体来不及逸出,因此铜和铝异种金属的焊缝中极易出现气孔。

表2 铜和铝的物理性能比较

Table 2 Comparison of physical properties between copper and aluminum

材料	熔点 /°C	密度 /g·cm ⁻³	热导率 /W·(m·K) ⁻¹	线膨胀系数 (20~100 °C) /10 ⁻⁶ ·K ⁻¹	弹性 模量 /GPa	比热容 /J·(g·K) ⁻¹
Cu	1 083	8.92	359.2	16.6	128	376.8
Al	660	2.7	206.9	23.8	62	934.8

2.2 试验用钎料

铜/铝异种金属钎焊的钎料合金体系主要有 Al-Cu-Si 和 Zn-Al 两种。Al-Cu-Si 钎料熔点接近 Al 母材,钎焊过程中易出现母材烧蚀风险,同时容易在铜母材一侧的接头中形成 Al-CuAl₂脆性共晶相,存在接头开裂风险,较难获得高质量的铜/铝接头;Zn-Al 钎料具有钎焊温度低的优点,目前已成为铜铝异种金属钎焊的首选钎料^[13]。试验选用 BA167CuSi 钎料和 BZn78Al22 钎料化学成分如表 3 所示。其中 BA167CuSi 钎料的固相线温度为 525 °C,液相线温度为 535 °C;BZn78Al22 钎料的固相线温度为 282 °C,液相线温度为 492 °C。

表3 两种不同钎料化学成分(质量分数,%)

Table 3 Chemical composition of brazing materials (wt. %)

元素	Zn	Al	Cu	Si	Fe
BA167CuSi	—	余量	28.1	6.2	—
BZn78Al22	余量	21.56	0.20	0.06	0.07

2.3 试验方法

通过调整钎料成分、加热位置、加热时间、加热模式(一段式、多段式)、填充材料缠绕方式(单圈、多圈)等多个焊接工艺参数,进行系统性的焊接验证,着重分析钎着率及致密性、母材熔蚀情况等关键指标,并对钎焊接头的外观及其内部组织成分扩散特征进行对比分析。

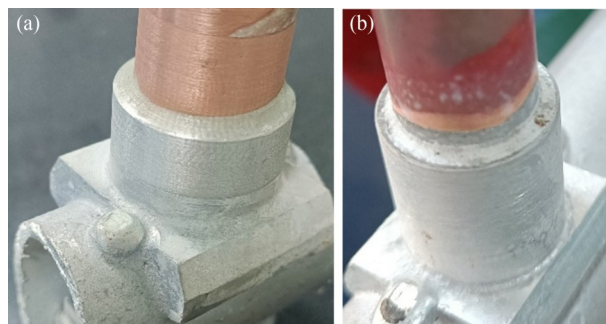
2.4 试验用设备及工艺参数

使用高频感应钎焊设备,最大功率 50 kW,频率 200 kHz;配合开合式感应线圈,尺寸 $\varnothing 30$ mm,且搭载机械臂实现变位运动;TES-1310K 型接触式热电偶;德国莱卡金相显微镜 DM-6M;赛默飞 SEM 扫描电镜 Apreo 2 s Hiva;牛津 EDS 能谱 AZtecLive UltimMAX 65。

3 试验结果及分析

3.1 钎料成分对铜/铝异种金属管接头组织及性能的影响

选用表 3 的两种钎料进行钎焊测试时,均能得到外观满足要求的焊缝成形,如图 2 所示。采用 BA167CuSi 钎料所得焊缝相比 BZn78Al22 钎料更加白亮,显示出了较好的流动性。但对二者金相组织进行深入观察时发现,采用 BA167CuSi 钎焊后的焊缝中存在裂纹,如图 3 所示,裂纹沿着焊缝与铜母材的熔合线扩展。利用 EDS 对开裂区域进行成分分析,显示该区域主要组成元素是 Cu 和 Al,经质量分数计算可知,主要组成物为硬脆的 CuAl₂ 金属间化合物。在 BZn78Al22 钎料的焊缝中未发现裂纹,焊缝与铜的熔合线区域也没有发现大片的 CuAl₂ 金属间化合物,主要以 Cu-Al-Zn 的三元合金状态呈现。



(a)BA167CuSi 钎料焊后 (b)BZn78Al22 钎料焊后

图2 两种钎料焊后外观照片对比

Fig. 2 Brazing appearance photo of two different filler metal

3.2 加热位置对钎料润湿性的影响

为深入探究第一段加热时不同加热位置对铜和铝异种金属管接头加热特性的影响,采用 BZn78Al22 钎料,选取线圈底部与铝管顶部之间高度差分别为 0~1 mm、2~3 mm、4~5 mm、8~9 mm。组装时相对位置照片、焊后外观照片及剥离后的试验结果如图 5~图 8 所示。

如图 5 所示,当线圈底部与铝管顶部高度差处于 0~1 mm 范围时,加热位置过低,铝件热量过高,管口熔蚀达到 0.3 mm,标准要求低于 0.2 mm,焊缝熔深不足;如图 6 所示,在此位置加热时易引起钎料流失,造成焊缝凹陷但焊缝熔深不足,无法满足钎焊填充率要求;如图 7 所示,在此位置加热时,焊缝成

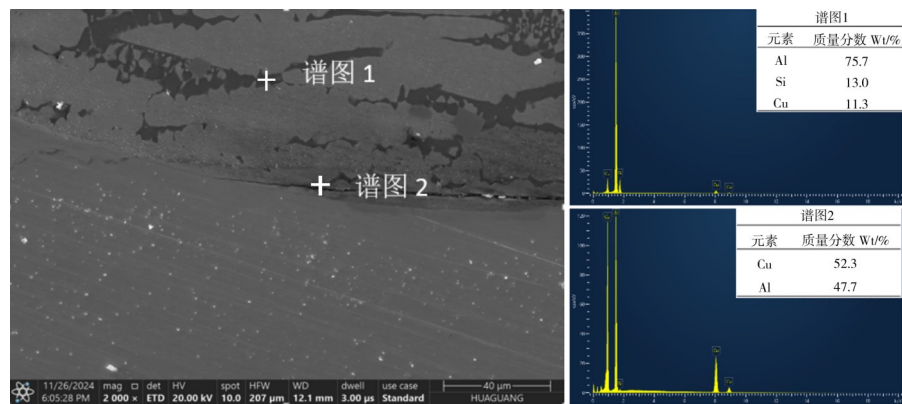


图3 BAl67CuSi 钎料焊缝裂纹照片及能谱扫描结果
Fig. 3 Crack photo and EDS results of BAl67CuSi filler metal after brazing

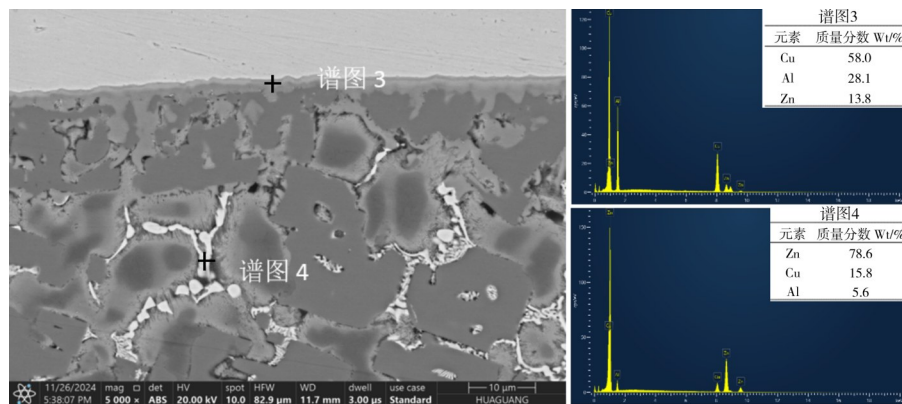


图4 BZn78Al22 钎料焊缝EDS能谱检测结果
Fig. 4 EDS results of BZn78Al22 filler metal after brazing

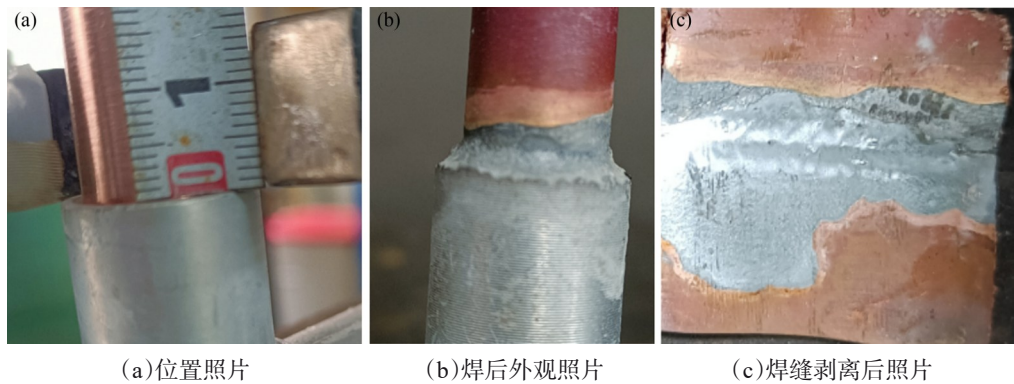


图5 线圈底部与铝管顶部之间高度差为0~1 mm时的焊接结果

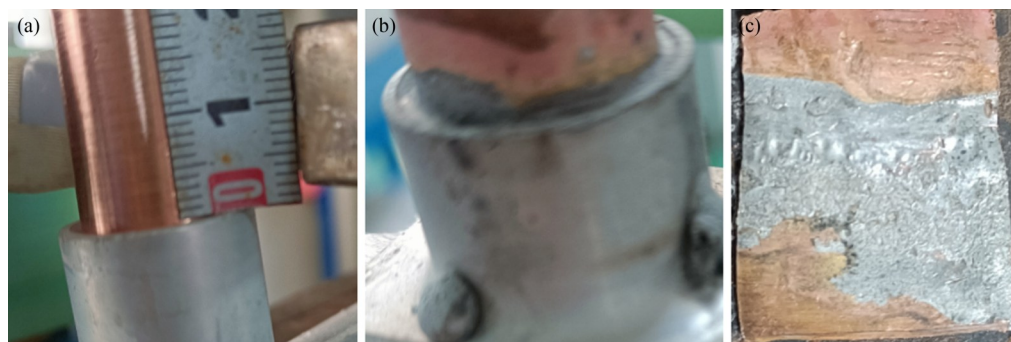
Fig. 5 Brazing result when the height difference between the coil and the aluminum tube is 0~1 mm

形较好,未引起钎料流失及母材表面熔蚀不良,焊缝剥离后填充率达到80%,内部缺陷(缺料、气孔)累计长度小于2.4 mm。如图8所示,加热位置过高,铝管热量不足,温度不够,导致钎料润湿填缝能力弱,不能向内部渗入而堆积于管口,焊缝熔深过浅。

3.3 焊接工艺参数对钎料填缝的影响

为直观确定首段加热功率及时间,采用图9所

示方法在加热过程中用热电偶实时测量铝管座的温度变化,线圈首段加热的位置如图10所示,当铝管座升温到240~260 ℃时,钎料与紫铜可形成初步润湿,可减少因母材温度不足引起的钎料起球掉落。二段加热时线圈与铝管座的相对位置如图11所示,该位置可让管座底部受热均匀,有利于钎料填缝流布渗入接头间隙内。



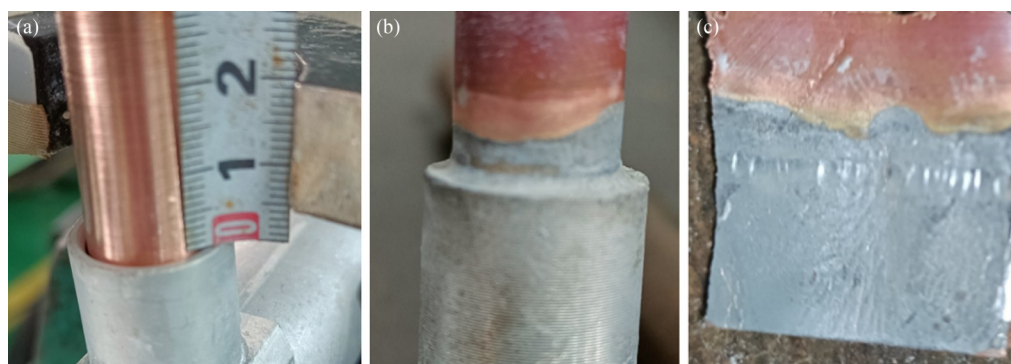
(a)位置照片

(b)焊后外观照片

(c)焊缝剥离后照片

图6 线圈底部与铝管顶部之间高度差为2~3 mm时的焊接结果

Fig. 6 Brazing result when the height difference between the coil and the aluminum tube is 2~3 mm



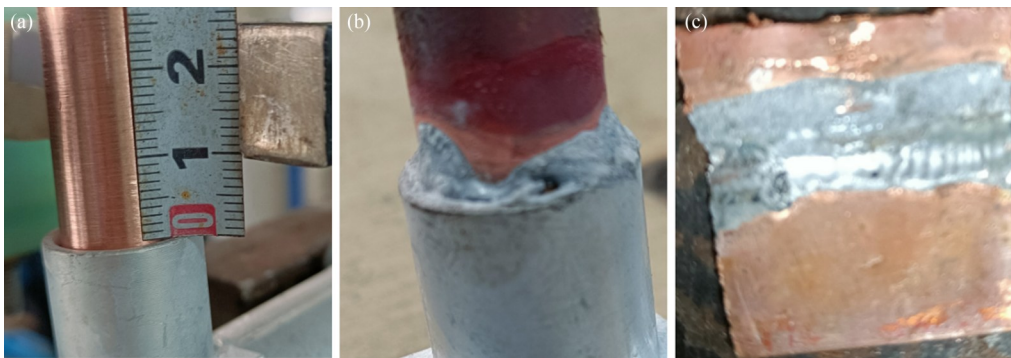
(a)位置照片

(b)焊后外观照片

(c)焊缝剥离后照片

图7 线圈底部与铝管顶部之间高度差为4~5 mm时的焊接结果

Fig. 7 Brazing result when the height difference between the coil and the aluminum tube is 4~5 mm



(a)位置照片

(b)焊后外观照片

(c)焊缝剥离后照片

图8 线圈底部与铝管顶部之间高度差为8~9 mm时的焊接结果

Fig. 8 Brazing result when the height difference between the coil and the aluminum tube is 8~9 mm

试验方案及工艺参数如表4所示。综合分析表4中方案二和方案三的焊接结果可知,当后段加热达到一定热量时,合理降低及减缓热量输入可增大焊缝熔深并减少母材熔蚀。由于铝合金熔点低,想要达到套接尺寸80%以上的熔深需要将感应加热功率分成三段,在最后一段时热量只需维持钎料缓慢凝固,让钎料中气体充分逸出,即可获得满足熔

深要求的致密钎缝,且管件表面无熔蚀缺陷。

3.4 焊缝熔深及金相组织检测

基于上述研究结果,优选BZn78Al22钎料,并采用上述优选工艺参数完成钎焊接头后进行熔深及金相组织检测。从图12所示的接头整体金相图中可以看出钎料填充至接头根部,熔深达到95%以上,母材侧也未见熔蚀现象。接头金相照片如图13

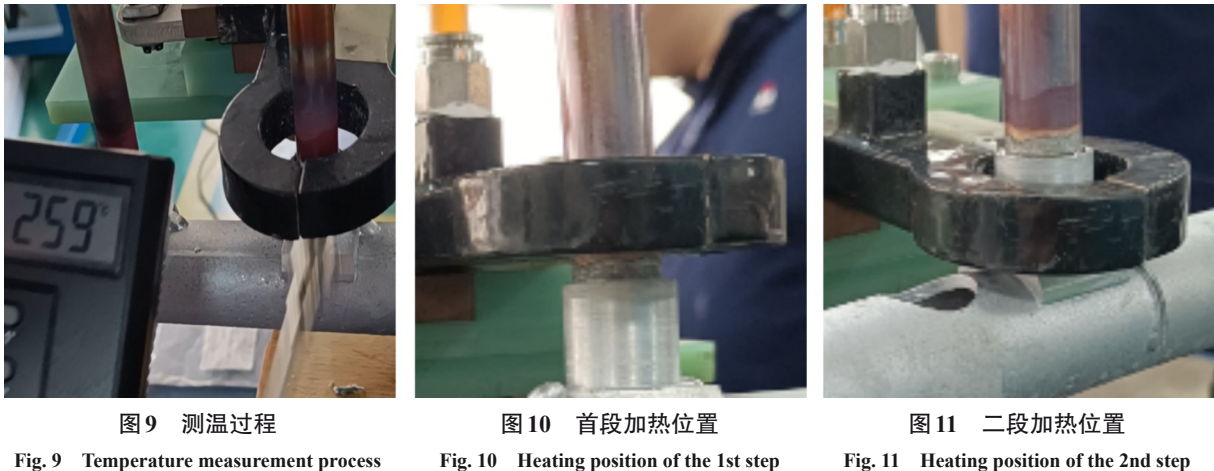


表 4 感应钎焊工艺参数及结果

Table 4 Induction brazing parameters and testing results					
焊接方案	功率/kW	时间/s	首段加热位置	二段加热位置	试验结果
方案一	① 25	23	线圈底面与焊环齐平	—	钎料流失 铝管熔蚀
	② 24	19	线圈底面高于管座端面	线圈端面高于管座端面 1 mm	铝管口边缘有熔蚀风险, 熔深不足
方案三	③ 33	19	4~5 mm	端面 1 mm	
	① 25	22	线圈底面高于管座端面	线圈端面低于管座端面 1 mm	成形良好, 管口无熔蚀, 熔深
	② 24	12	4~5 mm	端面 1 mm	100% 钎缝致密

所示,焊缝内部不存在空穴、气孔、裂纹等缺陷。焊缝与各母材熔合区的金相照片如图 14 所示, BZn78Al22 钎料与铝合金发生反应,生成了一定量的 Al-Zn 之间的金属间化合物,与紫铜发生反应生成了一些 Al-Cu-Zn 之间的金属间化合物(见图 14b),它们均实现了紧密的原子间结合。

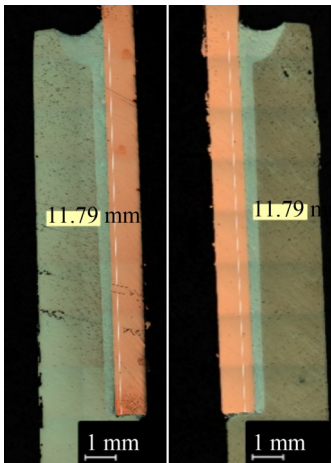


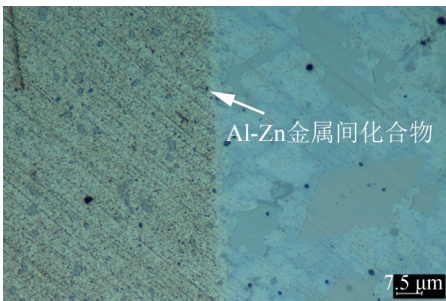
图 12 接头整体金相

Fig. 12 Integral metallographic of the joint

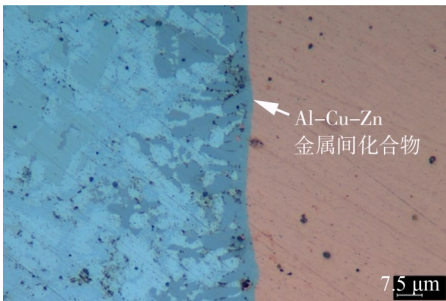


图 13 接头金相照片

Fig. 13 Metallographic diagram of the joint



(a) 焊缝与铝合金熔合区



(b) 焊缝与紫铜熔合区

图 14 接头金相照片

Fig. 14 Metallographic diagram of the joint

3.4 接头爆破试验结果

为验证优化后铜/铝异种金属感应钎焊接头的

承压性能,进行了接头爆破试验。具体为:使用水对钎焊接头样品内部加压至 13.5 MPa,继续缓慢增加试验压力,直至成品出现泄漏、开裂或穿通等破坏现象。破坏点出现在铜铝钎焊接头 20 mm 处铝管侧;爆破压力峰值为 13.81 MPa、13.87 MPa,均超过 13.5 MPa 的标准压力。证明所获的铜和铝异种金属感应钎焊接头能够满足压力测试的要求。



图 15 爆破试验破坏点

Fig. 15 Destruction point of blasting test

4 结论与展望

基于铜和铝各自物理性能的特征研究了不同钎焊材料、不同加热位置及工艺参数变化对铜和铝异种金属管接头感应钎焊焊接性的影响规律,主要得出以下结论:

(1) BZn78Al22 钎料比 BA167CuSi 更加适合铜和铝异种金属感应钎焊接头。

(2) 基于铜和铝异种金属管接头的特性,钎焊过程中的加热位置需要调整,首段加热时,线圈底部与铝管顶部之间高度差为 4~5 mm;二段加热时,线圈端面低于管座端面 1 mm,所得到的焊缝成形质量最好。

(3) 基于铜和铝异种金属管接头的特性,感应钎焊时的加热功率也不能是恒定的,想要达到套接尺寸 80% 以上的熔深需要将感应加热功率分成三段,在最后一段时热量只需维持钎料缓慢凝固,让钎料中气体充分逸出,即可获得满足熔深要求的致密钎缝,且管件表面无熔蚀缺陷。

(4) 经过钎料及工艺参数优选后得到的铜和铝异种金属管接头不仅能获得均匀稳定的熔深,而且焊缝致密性良好,能够满足压力测试的要求。

随着新能源汽车、5G 通讯、航空等领域对轻量化与高可靠性连接需求的增长,铜铝感应钎焊技术的突破将推动其在散热器、电池组件、电力电子等场景的规模化应用。针对铜铝异种金属连接材料兼容性瓶颈,未来还需开发复合新型钎料来改善润湿性、抑制脆性相生成,并提升抗腐蚀性能。

参考文献:

- [1] 孟奇,孙风莲,刘洋. 薄壁铝/铝,铜/铝高频感应焊接界面组织研究[J]. 中国体视学与图像分析, 2012, 17(4): 389-396.
MENG Q, SUN F L, LIU Y. Study on the Microstructure of High-Frequency Induction Welded Interface of Thin-Walled Aluminum/Aluminum, Copper/Aluminum [J]. Chinese Journal of Stereology and Image Analysis, 2012, 17(4): 389-396.
- [2] 曾谢波. 制冷设备 Cu-Al 管接头焊接设备的设计[D]. 辽宁:沈阳工业大学, 2007: 11-20.
ZENG X B. Design of Welding Equipment for Cu-Al Pipe Joints in Refrigeration Equipment [D]. Liaoning: Shenyang University of Technology, 2007: 11-20.
- [3] 赵越,黄聿川,左铁军. 实现铝代铜是制冷行业发展的必然趋势[J]. 家电科技, 2007, 11(5): 9-16.
ZHAO Y, HUANG Y C, ZUO T J. The Inevitable Trend of Aluminum Replacing Copper in the Refrigeration Industry [J]. Home Appliance Science and Technology, 2007, 11(5): 9-16.
- [4] LAI R S, LIN K L, SALAM B. Suppressing Growth of the Cu₅Zn₈ Intermetallic Layer in Sn-Zn-Ag-Al-Ga/Cu Solder Joints [J]. Journal of Electronic Materials, 2009, 38(1): 88-92.
- [5] WEI C, LIU L C, WAN J B. Formation of Interfacial Structure of Sn-3.7Ag-0.9Zn Eutectic Solder with Different Al Additions [J]. Mater. Electron, 2009, 20(1): 861-866.
- [6] 陶守林,王泽其. 工程有色金属材料电子束焊接性研究[J]. 焊接技术, 1998, 6(14): 9-11.
TAO S L, WANG Z Q. Study on Electron Beam Weldability of Engineering Non-Ferrous Metal Materials [J]. Welding Technology, 1998, 6(14): 9-11.
- [7] 元永新,杨瑞鹏. 铝铜焊接进展[J]. 焊接技术, 2000, 29(5): 4-5.
YUAN Y X, YANG R P. Progress in Aluminum Copper Welding [J]. Welding Technology, 2000, 29(5): 4-5.
- [8] 李长安,董彬,秦国梁,等. 铜/铝薄壁管惯性摩擦焊接