

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.08.13

组合导管感应钎焊代替火焰钎焊工艺可行性研究

李芊卉, 姜毅, 黄闻喜

中航西安飞机工业集团股份有限公司, 陕西 西安 710089

摘要: 针对航空氧气系统T2紫铜导管与HPb59-1黄铜平管嘴火焰钎焊工艺存在的明火安全风险、环境污染及效率低下问题,本研究采用高频感应钎焊技术进行替代可行性分析。通过对比Ag45CuZn钎料在火焰钎焊(8组试样)与感应钎焊(10组试样)下的质量差异,系统开展无损检测、力学性能及显微组织表征。结果表明:感应钎焊接头外观质量显著优于火焰钎焊,钎角成形饱满(R3.0~4.5 mm),焊后无需打磨,所有试样均通过31 MPa耐压试验;X射线检测发现1组火焰钎焊接头存在2个 $\varnothing 0.5$ mm气孔(间距0.6 mm),感应钎焊试样无内部缺陷,仅低热输入组(25 A/40 s)出现0.94 mm未焊透;两类工艺接头抗剪强度均高于母材(断裂发生于铜管本体),但火焰钎焊显微组织存在密集型微气孔(最大尺寸 $\varnothing 0.25$ mm);EDS分析表明钎料/HPb59-1界面冶金反应比钎料/T2更为剧烈,30 A电流下黄铜晶粒长大明显,Zn元素已扩散至紫铜母材。研究证实感应钎焊可有效消除气孔缺陷并提升工艺安全性,但需严格控制热输入参数(推荐电流 ≤ 28 A)以避免黄铜熔蚀风险。

关键词: 铜合金; 火焰钎焊; 感应钎焊; 气孔缺陷; 钎料

中图分类号: TG454 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)08-0116-06

Feasibility Study of Induction Brazing Instead of Flame Brazing for Combined Conduits

LI Qianhui, JIANG Yi, HUANG Wenxi

AVIC XI'AN Aircraft Industry Group Co., Ltd., Xi'an 710089, China

Abstract: To address the safety hazards (open flame), environmental pollution, and low efficiency associated with flame brazing of T2 copper conduits and HPb59-1 brass flat nozzles in aircraft oxygen systems, this study investigates the feasibility of replacing conventional flame brazing with high-frequency induction brazing. A comparative analysis of joint quality was conducted using Ag45CuZn filler metal on flame-brazed (8 samples) and induction-brazed (10 samples) specimens through non-destructive testing (X-ray), mechanical property assessment (shear strength), and microstructural characterization (metallography, EDS). Key findings reveal: Induction-brazed joints exhibit superior surface quality with fully formed fillets (R3.0-4.5 mm), eliminating post-weld polishing. All specimens passed 31 MPa pressure tests. X-ray inspection detected two $\varnothing 0.5$ mm pores (spaced 0.6 mm apart) in one flame-brazed joint, while induction-brazed samples showed no internal defects except for 0.94 mm incomplete penetration in the low-heat-input group (25 A/40 s). Both processes produced joints with shear strength exceeding the base metal (fracture occurred in the copper tube), but flame-brazed microstructures contained clustered micropores (maximum $\varnothing 0.25$ mm). EDS analysis confirmed more intense metallurgical reactions at the filler/HPb59-1 interface than at the filler/T2 interface. Significant grain growth was observed in brass under 30A current, with Zn diffusion into the copper substrate. The study demonstrates that induction brazing effectively eliminates porosity and enhances process safety. Strict control of heat input parameters (recommended current ≤ 28 A) is critical to mitigate brass dissolution risks.

Keywords: copper alloy; flame brazing; induction brazing; porosity defect; brazing filler metal

收稿日期: 2024-10-14 修回日期: 2024-11-21

作者简介: 李芊卉(1994—),女,学士,工程师,主要从事铝合金焊接、热处理及激光选区熔化成形研究。E-mail: 479084211@qq.com。

引用格式:李芊卉,姜毅,黄闻喜. 组合导管感应钎焊代替火焰钎焊工艺可行性研究[J]. 电焊机,2025,55(8):116-121.

Citation:LI Qianhui, JIANG Yi, HUANG Wenxi. Feasibility Study of Induction Brazing Instead of Flame Brazing for Combined Conduits[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(8): 116-121.

0 引言

近年来,钎焊工艺作为飞机制造业关键技术之一,在润湿作用及毛细作用下使母材与钎料相互扩散连接,该工艺具有良好的可达性,以其接头变形小、密封性能好、焊后无需过多打磨的特点在航空领域有着广泛的研究及应用^[1]。针对航空氧气系统T2紫铜与HPb59-1黄铜平管嘴异种材料组合导管,传统火焰钎焊采用Ag45CuZn钎料虽能实现可靠连接,但其明火操作引发诸多问题:(1)安全风险:氧气系统环境禁火要求与火焰钎焊工艺冲突,存在燃爆隐患;(2)环境污染严重,易产生气孔;(3)效率不高,自动化程度不足制约量产^[2]。

相较于传统火焰钎焊工艺,感应钎焊的工件自生热,减少了热传导过程中的热量损失,可以实现精准的局部加热,减少对其他部位的热影响,同时具有绿色环保的优点。高频感应钎焊加热装置是利用磁损和涡电流损两种加热原理将熔化的钎料在固态母材上润湿、铺展、填缝,与母材形成冶金结合,电流的交变频率在10 kHz以上,加热速度更快,对母材性能影响更小。由于感应加热的技术特点,适合管路、法兰、轴等回转体部件的加热焊接^[3-8]。

当前研究多聚焦不锈钢的感应钎焊,对铜合金及其异种材料的感应钎焊研究较少。因此本研究针对T2紫铜与HPb59-1黄铜异种铜合金材料的感应钎焊工艺进行了研究。旨在建立异种铜合金感应钎焊热输入判据,揭示Zn元素扩散-熔蚀竞争机制及其对界面强度的影响,为航空导管绿色高效制造提供理论依据。

1 试验方法

感应加热是在线圈中通入交流电产生交变磁场,在工件中产生感应电流,感应电流通过楞次定律实现工件局部或整体加热的加热工艺,感应加热原理如图1所示^[9]。实际工程应用中受到温度、对

流等外部环境条件及设备波动值变化因素影响,其工艺参数范围还需结合实际应用进一步探索。

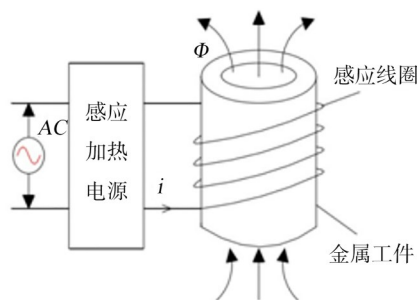


图1 电磁感应加热原理

Fig. 1 Schematic diagram of electromagnetic induction heating

感应钎焊温度取决于钎料的熔点,依据钎焊工艺原理钎焊温度一般比钎料的液相线温度高出30℃~50℃,钎焊温度过高,会引起钎料过热、外溢、烧穿等缺陷;钎焊温度过低,则钎料不能充分熔化产生未焊透的缺陷^[10]。但实际应用中测温元件会因为工件及钎料表面产生的氧化层及钎剂的影响导致温度显示不准确,因此通过温度设定来实现焊接过程的控制存在极大难度。本次试验在Mac®3000-OE-20/380高频感应钎焊设备上开展,设备有恒温/恒流两种控制模式,现拟通过电流控制开展相关试验。

被加热工件和感应线圈之间的间隙越大,漏磁就非常严重,通过的磁通量就越少,一般感应线圈内径与被加热工件的外径比值在1.1~2.0之间最优^[11],连接附件最大直径处为12.6 mm,连接附件结构及尺寸见图2,因此采用直径为20 mm的3匝螺旋式线圈见图3。

选取与典型氧气组合导管同牌号、同规格的试样进行试验,标准为GB/T 1527材料为T2-M-G5*1的紫铜导管与标准为GB 4423材料为HPb59-1-Y2-Ø20的黄铜平管嘴插焊。选用Ag基Ag45CuZn预制钎料环(规格:Ø1.0×5×1),圆环内径和管子外径相适应,钎剂使用FB102混合钎剂,其体积比为工业纯水(XPM 0789-1):工业酒精(XPM 0700):FB102(XPM 3609-1)=7:1:13。

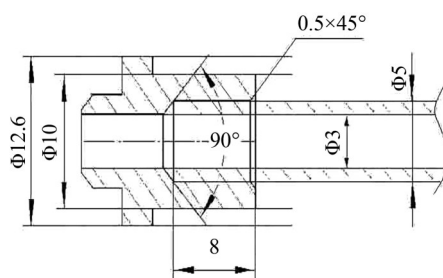


图2 试样结构及尺寸

Fig. 2 Sample structure and dimensions

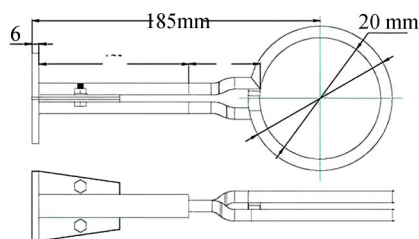


图3 线圈结构及尺寸

Fig. 3 Coil structure and size

由于相关标准上均未对铜合金感应钎焊的工艺参数明确列出,参考相关文献资料,设备频率为15~25 kHz,对应铜合金的透入电流加热厚度 ΔL 为2.75~10.19 mm。

$$T = 0.006 \times (D_2 - \Delta L)^2 + 15.36 \sqrt{\Delta L} \quad (1)$$

$$I = \sqrt{631.54 \times G/T} \quad (2)$$

式中 T 表示保温时间(单位:s); ΔL 表示电流透入深度(单位:mm); D_2 表示零部件钎焊面最大尺寸范围(单位:mm); $D_2 - \Delta L$ 表示透热区(单位:mm); I 表示钎焊电流(单位:A); G 表示工件质量(单位:g)^[5]。

经计算得出 T2+HPb59-1 的试样高频感应钎焊工艺参数大致范围如表1所示。对钎料用量评定采用配重相同的钎料环数量逐个递增的方法进行,通过对焊后的铜管接头饱满度及填缝深度对比得出最佳的钎料用量范围。

表1 高频感应钎焊推荐工艺参数

Table 1 Recommended process parameters for high-frequency induction brazing

钎焊电流/A	保温时间/s	试样装配间隙/mm
25~30	30~45	0.05~0.1

分别研究钎料环用量、电流、装配间隙的变化对焊接接头质量的影响,保温时间参考表1通过观察目视钎料熔化状态,钎料完全熔化形成完整钎角后保温3 s 停止加热。保温时间的长短影响钎料在

间隙中的漫流程度,保温时间不足会引起未焊透缺陷;保温时间过长,钎料外溢、过热甚至烧穿。接头的装配间隙是影响钎焊质量和接头强度的主要因素,间隙太小,阻碍钎料流动;间隙太大,破坏钎料的毛细作用,钎料不能填满间隙。由于装配间隙增大需要手工打磨导管对后期操作过程繁琐,因此只增加了两组装配间隙变量试验。

表2 高频感应钎焊主要焊接工艺参数试验

Table 2 Experimental study on main welding process parameters of high-frequency induction brazing

序号	钎料环用量/个	钎焊电流/A	保温时间/s	装配间隙/mm
1	2	25	40	0.05
2	2	26	36	0.05
3	2	28	28	0.05
4	2	30	20	0.05
5	2	28	28	0.1
6	3	25	42	0.05
7	3	26	38	0.05
8	3	28	30	0.05
9	3	30	22	0.05
10	3	28	30	0.1

以8组火焰钎焊工艺评定数据为基础,采用对比研究法对感应钎焊工艺进行评定,主要对比工作为:(1)钎焊接头外观质量对比及评价;(2)钎焊接头内部缺陷通过对X射线检测及显微组织表征、对比及评价(至少翻转90°观察);(3)钎焊接头抗剪切强度检测、对比及评价。

2 结果与讨论

完成感应钎焊试验件如图4所示,感应钎焊共10组参数试样编号为1#~10#,质量检测结果如下:

(1)目视检查钎焊搭接接头处均能形成完整的钎角且未堵管。感应钎焊接头外观质量明显优于火焰钎焊,基本无需打磨且焊接变形更小。经测量使用2个钎料环试样钎角为R3~R3.5 mm,使用3个钎料环试样钎角为R4~R4.5 mm,R角均成形饱满。18组(10组感应钎焊及8组火焰钎焊)试样在压力为21 MPa的氮气下保持2 min未泄露,耐压试验压力为31 MPa的0.5%~1%重铬酸钾溶液中保持2 min未发生变形,均满足产品气密试验要求。

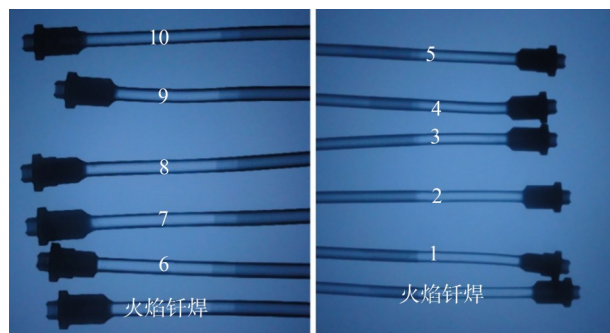
(2)经X射线检测发现1组火焰钎焊试样存在



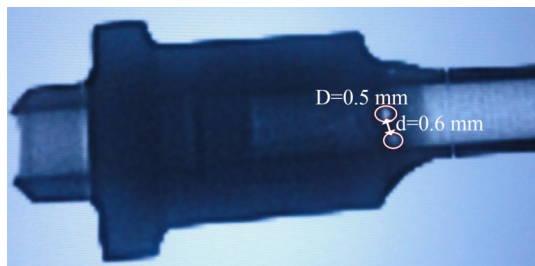
图4 感应钎焊试验件

Fig. 4 Brazing condition of test piece

两个直径为0.5 mm的气孔,气孔间距为0.6 mm,缺陷之间的距离大于规定的单个缺陷间距因此不能作为密集型内部缺陷处理。X射线底片及火焰钎焊接头局部放大图如图5所示。



(a) X射线图



(b) 火焰钎焊局部放大图

图5 感应钎焊和火焰钎焊试样X射线图

Fig. 5 Partial magnification of X-ray and flame brazing specimens

(3) 选取2-7#、3-8#、5-10#感应钎焊试样及3对火焰钎焊试样按GB/T 11363—2008《钎焊接头强度试验办法》进行了抗剪切强度测试。断裂部位均在母材处发生,如图6所示,证明无论是感应钎焊还是火焰钎焊,钎焊接头的实际抗剪切强度明显高于焊后铜管母材的抗拉强度。

(4) 对1#、4#、6#、9#感应钎焊试样及X射线合格的火焰钎焊试样管接头沿轴线翻转90°进行纵向切片取样,并用砂纸研磨抛光,对接头进行低倍检



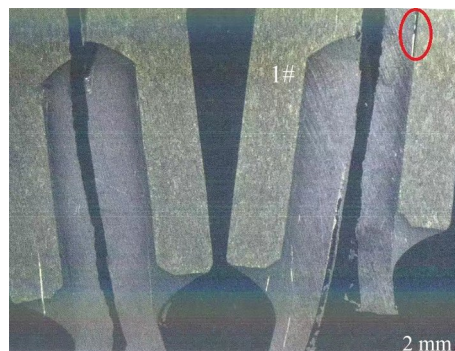
图6 断裂部位

Fig. 6 Fracture site

查,如图7所示。可以看出,火焰钎焊内部钎焊接头钎角处均存在多处气孔,其中1#试样钎接头底部存在填隙不良的情况,1#试样为热输入最小的试样,可通过增加保温时间增加热输入。4#、6#、9#试样在显微镜下放大50倍观察均无裂纹、气孔或疏松、夹杂物溶蚀或烧穿以及钎焊接头未钎透等缺陷,如图8所示。



(a) 火焰钎焊



(b) 感应钎焊

图7 低倍检查

Fig. 7 Low magnification inspection

用腐蚀液(配比:5 g FeCl_3 +5 mL HCL +100 mL H_2O)进行腐蚀后用显微镜观察火焰钎焊及1#感应钎焊试样HPb59-1的组织呈细针状,1#试样未钎透深度为0.94 mm,火焰钎焊存在密集型气孔,最大尺寸为 $\varnothing 0.25$ mm,缺陷测量如图8所示。9#感应钎焊

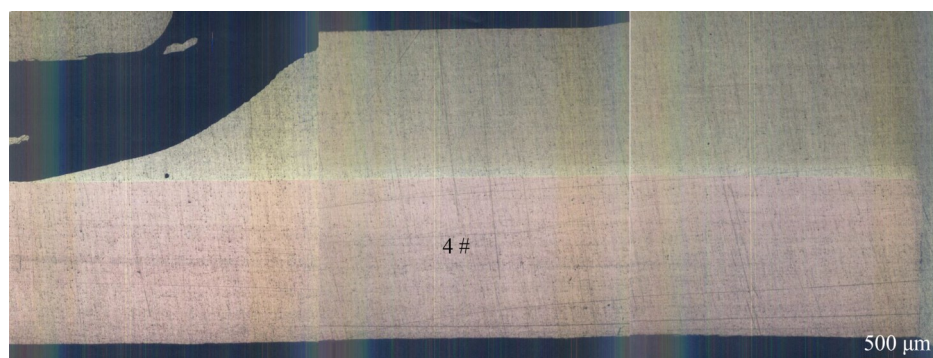
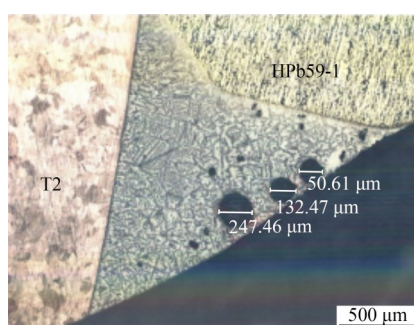
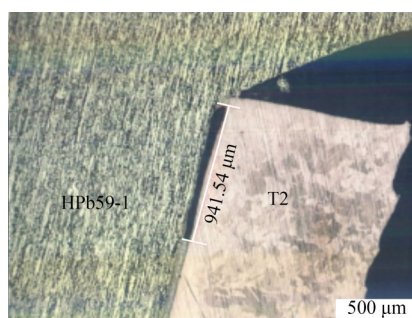


图8 50倍显微镜下观察

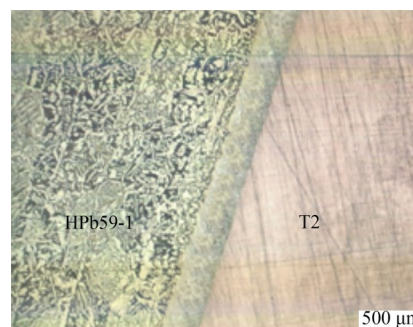
Fig. 8 Observation under a 50x microscope



(a)火焰钎焊



(b)1#试样



(c)9#试样

图9 试样显微组织

Fig. 9 Sample microstructure

试样钎焊电流由 25 A 升至 30 A, HPb59-1 组织的晶粒长大约四分之一, 如图 9 所示。

选取 6# 试样进行 EDS 分析见图 10, 在异质材料钎焊时钎料与母材冶金反应剧烈程度不同, 生成过渡层厚度不同, 熔融钎料会优先溶蚀一种母材。黄

铜侧钎接头组织的过渡层厚度较紫铜侧的过渡层厚度更大, 这说明钎料与黄铜的冶金反应程度相对较为剧烈, 因此在实际感应钎焊操作过程中, 若温度过高或保温时间过长, 熔融钎料极易溶蚀黄铜母材。钎焊接头内部浅色区域为富 Ag 组织, 由 Ag

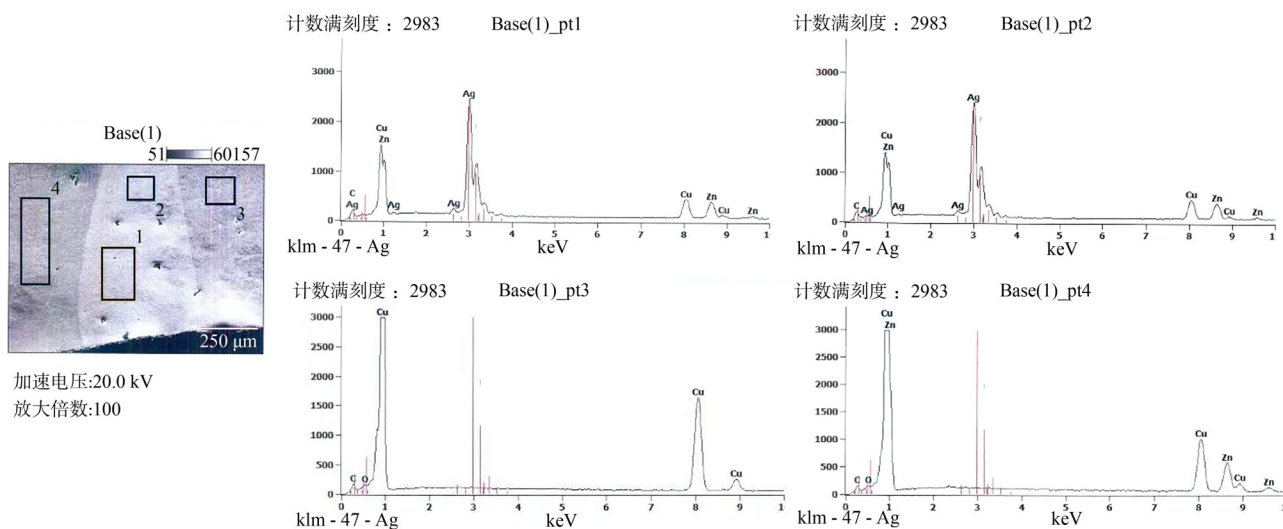


图10 EDS分析

Fig. 10 EDS analysis

固溶体和Ag、Cu、Zn三元共晶组成,Zn元素由于活性较强,弥散分布于整个钎焊接头组织,甚至钎料内的Zn已经部分扩散至紫铜母材内部。

3 结论

(1)感应钎焊由于加热时间短接头的外观质量明显优于火焰钎焊,焊后无需打磨。火焰钎焊X射线检查部分接头内部存在气孔缺陷,而感应钎焊X射线检查接头处均未发现内部缺陷。

(2)感应钎焊微观组织表征仅1#试样钎焊热输入低出现填隙不良的情况,火焰钎焊钎料为人工送丝填充,由于钎角处钎料最后送入即停止加热钎料凝固因此气体来不及逸出,导致火焰钎焊试样钎角处均存在内部气孔。

(3)无论是感应钎焊还是火焰钎焊,钎焊接头的实际抗剪切强度均高于焊后铜管母材的抗拉强度。

(4)Ag45CuZn钎料与HPb59-1的冶金反应程度相对T2较为剧烈,热量过大会优先腐蚀黄铜母材。Zn元素由于活性较强,弥散分布于整个钎焊接头组织,已有部分扩散至紫铜母材内部。

参考文献:

- [1] 李琢.飞机安装式导管高频感应钎焊技术研究及应用[D].黑龙江:哈尔滨工业大学,2014.
LI Z. Research and Application of Aircraft mounted Catheter High-Frequency Induction Brazing Technology[D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [2] 赵丽玲.紫铜管的火焰钎焊工艺[J].有色矿冶,2012,28(01):33-34.
ZHAO L L. Flame Brazing Process of Pure Copper Pipe [J]. Non-Ferrous Mining and Metallurgy, 2012, 28 (01):33-34.
- [3] 刘勇,裴寅,梁赛,等.高速列车铜合金管路密封连接绿色感应钎焊技术研究[J].电焊机,2024,54(09):63-68.
LIU Y, PEI Y Y, LIANG S, et al. Research on Induction Brazing Technology of Integrated Composite Brazing Metal for Copper Alloy Pipeline of High-speed Train [J]. Electric Welding Machine, 2024, 54 (09): 63-68.
- [4] 李想,朱明,黄健康,等.铜与不锈钢高频感应钎焊工艺及组织分析[J].热加工工艺,2016,45(17):213-215+218.
LI X, ZHU M, HUANG J K, et al. High Frequency Induction Brazing Process and Microstructure Analysis of Copper and Stainless Steel [J]. Hot Working Technology, 2016, 45(17):213-215+218.
- [5] 孙宁.感应加热钎焊技术的应用[J].金属加工(热加工),2010(24):47-49.
SUN N. Application of induction heating brazing technology [J]. MW Metal Forming, 2010(24):47-49.
- [6] 李连杰,戴乐.高频感应焊接的特点及其在异种金属焊接中的应用[J].电焊机,2011,41(06):60-63.
LI L J, DAI L. Characteristic and application in dissimilar metals welding of high-frequency induction welding [J]. Electric Welding Machine, 2011, 41(06):60-63.
- [7] 何鹏,贾进国,余泽兴,等.高频感应钎焊的研究分析[J].机电工程技术,2003(01):23-25.
HE P, JIA J G, YU Z X, et al. Research of High Frequency Induction Brazing [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2003(01):23-25.
- [8] 赵凯磊.紫铜与黄铜插套接头感应加热工艺参数对钎焊接头组织与性能的影响[D].山东:中国石油大学(华东),2019.
ZHAO K L. The Effect of Induction Heating Process Parameters of Copper and Brass Inserts on Microstructure and Properties of Brazed Joints [D]. Shandong: China University of Petroleum (East China), 2019.
- [9] 沈芳.高频感应钎焊优化技术研究[J].现代工业经济和信息化,2020(09):18-19.
SHEN F. Research on Optimization Technology of High Frequency Induction Brazing [J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2020(09):18-19.
- [10] 王敏.导管高频感应钎焊在飞机制造中的应用[J].航空制造技术,2002(11):35-38.
WANG M. Application of High Frequency Induction Brazing of Conduits in Aircraft Manufacture [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2002(11):35-38.
- [11] 黄和平.金属零部件高频感应钎焊技术标准的研究[J].焊接技术,2013,42(02):30-34.
HUANG H P. Research on Technical Standards for High-Frequency Induction Brazing of Metal Components [J]. Welding Technology, 2013, 42(02):30-34.