

# 银钎剂残留对邦迪管腐蚀行为的影响

董宏伟, 张冠星, 董媛媛, 钟素娟, 薛行雁

(郑州机械研究所有限公司, 新型钎焊材料与技术国家重点实验室, 郑州 450001)

**摘要:** 【目的】旨在研究银钎剂残留对邦迪管腐蚀行为的影响。【方法】采用XRD、体视显微镜、扫描电子显微镜等手段系统地研究分析了308S银钎剂残留对邦迪管焊前和焊后腐蚀行为的影响。【结果】研究表明,以 $\text{KBF}_4$ 、 $\text{B}_2\text{O}_3$ 主要成分的308S钎剂溶液呈酸性,表面的镀Zn层与溶液中的 $\text{H}^+$ 、 $\text{HF}^-$ 、 $\text{F}^-$ 等发生反应,生成可溶性复合酸盐,速率随着时间的延长而降低。在盐雾腐蚀箱中,由于存在更多的 $\text{H}^+$ 、 $\text{F}^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 等活性离子,邦迪管中的Zn、Fe元素与钎料中Ag、Cu等元素存在电势差,表面镀Zn层可与其他金属形成原电池,将表面的Zn单质溶解后,伴生蓬松棉花状 $\text{ZnO}$ 、 $\text{ZnF}_2$ 等物质,活性离子沿裂缝进入内部并加剧内部腐蚀。镀Zn层被腐蚀完毕后,内部Fe与O结合形成 $\text{FeO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 等氧化物,同时又与 $\text{NaCl}$ 发生反应,形成 $\text{FeCl}_3$ 等物质,加速腐蚀,整体腐蚀接头呈现铁红色。【结论】钎焊作业后,残留钎剂腐蚀性较强,对于制冷、压力容器管路等的密封性及寿命有不良影响。因此,为提高焊接接头的服役寿命,应在焊接中尽量减少钎剂用量,并在焊后进行细致清洗打磨,并采取防锈防腐蚀处理。

**关键词:** 邦迪管; 银钎剂; 钎剂残留; 腐蚀行为

中图分类号: TG441.7 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hj.20240610004

## Influence of silver flux residue on corrosion behavior of Bundy tube

DONG Hongwei, ZHANG Guanxing, DONG Yuanyuan, ZHONG Sujuan, XUE Xingyan

(State Key Laboratory of New Brazing Materials and Technology, Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering Co., LTD., Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** [Objective] The purpose was to study influence of silver flux residue on corrosion behavior of Bundy tube. [Methods] By means of XRD, stereo-microscope and scanning electron microscope, influence of 308S silver flux residue on corrosion behavior of Bundy tube before and after welding was systematically studied and analyzed. [Results] The results showed that solution of 308S flux with main components of  $\text{KBF}_4$  and  $\text{B}_2\text{O}_3$  was acidic, Zn plating layer on the surface reacted with  $\text{H}^+$ ,  $\text{HF}^-$  and  $\text{F}^-$  in the solution to form soluble complex salts, and the rate decreased with the extension of time. In the salt spray corrosion box, due to more  $\text{H}^+$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Cl}^-$  and other active ions, there was an electric potential difference between Zn and Fe elements in Bundy tube and Ag and Cu elements in brazing filler metal, and plating Zn layer on the surface could form a galvanic cell with other metals. Zn substance on the surface was dissolved, it was accompanied by puffy cotton-like  $\text{ZnO}$ ,  $\text{ZnF}_2$  and other substances. Then, active ions entered the interior along the cracks and aggravated internal corrosion. After Zn plating layer was corroded, the internal Fe and O combined to form  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  and other oxides, while it reacted with  $\text{NaCl}$  to form  $\text{FeCl}_3$  and other substances to accelerate corrosion, and the overall corrosion joint showed iron red. [Conclusion] After brazing operation, flux residue was highly corrosive, which had an adverse effect on sealing and life of refrigeration and pressure vessel pipelines. Therefore, in order to improve service life of brazed joints, amount of flux should be reduced as much as possible in brazing, it was carefully cleaned and polished after brazing and anti-rust and anti-corrosion treatment should be taken.

**Key words:** Bundy tube, silver flux, flux residue, corrosion behavior

## 0 前言

铜管具有优良的导热性能,因而在制冷行业有着广泛的应用<sup>[1]</sup>。为降低产品成本适应市场家电市场的激烈竞争,邦迪管具有比铜管更低的成本,被应用于制冷系统中代替铜管<sup>[2]</sup>。因此,制冷管路存在大量的邦迪管与铜管异种材料钎焊连接,其钎焊质量的好坏是保证管路寿命长短的关键。制冷电器在使用过程中发生制冷管路故障,多数是因为接头发生断裂、泄漏等情况造成的<sup>[3-5]</sup>。这是由于制冷管路一般采用大气环境下感应钎焊或火焰的方式进行,必须采用高活性的钎剂,去除焊管路和钎料表面氧化膜,促进钎料的润湿和流铺,高活性钎剂残留则为管路腐蚀埋下了隐患<sup>[6-7]</sup>。

目前,邦迪管路钎焊普遍采用银钎料搭配银钎剂来实施<sup>[8]</sup>。传统钎焊中钎料、钎剂离散添加,钎剂过量使用,损耗大;新型的药芯钎料将钎剂内置钎料内部,在钎焊过程中实现了钎料钎剂协同添加,大幅度减少了钎剂使用<sup>[9-10]</sup>。但焊接后在焊件表面仍会有少量残留,残留钎剂既包括过量的钎剂,也包括焊后的残留物。在制冷设备使用过程中,残留的钎剂对邦迪管及接头的腐蚀性与密封性有较大影响。因此,深入研究药芯银钎剂残留对邦迪管腐蚀行为的影响,剖析钎剂中各成分对焊接接头的腐蚀作用过程,为是否需要焊后表面清洗提供事实依据。

该文对制冷设备系统邦迪管钎焊后残留银钎剂的腐蚀行为进行系统研究,明确其对钎焊接头腐蚀过程的影响,为焊后清洗和低腐蚀钎剂开发提供指导和建议。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料

试验钎剂为改良 308S 钎剂,将 BAg30CuZnSn 轧制成薄带,搭配 308S 钎剂卷制成直径 2.5 mm,长 450 mm 的药芯银钎料,如图 1 所示,钎剂含量为 15%。邦迪管和铜管的直径为 5 mm,壁厚为 0.8 mm,铜管一端扩孔至内径为 10 mm。邦迪管与铜管插接,采用火焰焊接方式搭配 BAg30CuZnSn 药芯银焊条进行钎焊。

### 1.2 试验方法

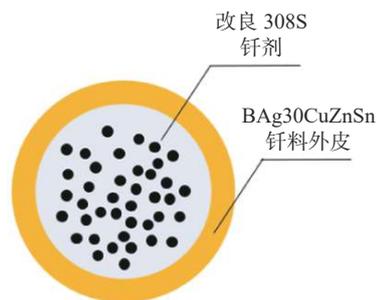
将改良 308S 银钎剂研磨成粉末,采用荷兰 Nalytical (X'Pert PRO MPD) X 射线衍射仪进行物相分析,测试角度  $10^\circ \sim 90^\circ$ ,测试速率  $5^\circ/\text{min}$ 。

将 308S 银钎剂加入蒸馏水制备成含量 40% 钎剂

溶液,将邦迪管裁成 30 mm 等长的小段,经分析天平称重后置于 25 mL 钎剂瓶中,每个钎剂瓶中放置 3 个,密封后放置于  $40^\circ\text{C}$  烘箱中保存,间隔 144 h, 240 h 和 576 h 后取出并清洗烘干,保留表面腐蚀产物,用分析天平称重,其精度为 0.1 mg。

采用火焰焊接方式,将邦迪管/铜管接头处加热至  $750^\circ\text{C}$  后,进行钎焊作业。焊接完成待接头冷却后不进行清洗,将焊接接头悬挂于盐雾腐蚀箱中。采用去离子水配制 5% NaCl 溶液作为腐蚀液,压力桶温度为  $40^\circ\text{C}$ ,试验室温度为  $40^\circ\text{C}$ ,压缩空气压力为 98 kPa ( $1.00\text{ kgf}/\text{cm}^2$ ),连续不间断腐蚀 24 h, 48 h, 72 h 和 100 h,取出后烘干;采用蔡司 (SteREO Discovery VS) 研究级体视显微镜对焊缝位置进行拍照检测。

将腐蚀后的邦迪管及接头采用冷镶方式镶样,依次选择金相砂纸进行逐级粗磨、细磨,待最后一道砂纸磨后表面划痕一致后用清水冲洗干净。选择尼龙抛光布及  $1.5\ \mu\text{m}$  的金刚石抛光膏抛光,抛光过程中不断加入清水防止因摩擦热使表面抛光过度。抛光后,采用清水、酒精依次冲洗除去脏物,吹风机吹干表面水分。使用 3% 的  $\text{FeCl}_3$  水溶液进行腐蚀,待表



(a) 示意图



(b) 实物图

图 1 BAg30CuZnSn 药芯银钎料纵截面形貌

Fig. 1 Cross-section morphology of BAg30CuZnSn flux-cored silver brazing filler metal. (a) schematic diagram; (b) real picture

面变暗后迅速用清水、酒精冲去表面残留腐蚀液,然后用吹风机吹干。采用蔡司(ZEISS Scope A1)金相显微镜及 Carl ZEISS 图像分析软件对试样表面的微观组织进行观察分析,采用自带能谱分析仪(EDS)的 Phenom XL 台式扫描电子显微镜(20KV, BESD, Point)进行截面的微观组织、试样腐蚀层的深度、元素分布和化合物相组成分析。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 X 射线衍射分析

改良后的 308S 银钎剂 X 射线衍射结果如图 2 所示。经对 X 衍射峰进行寻峰比对,如图 3 所示,发现此款银钎剂是以  $\text{KBF}_4$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$  为主,并辅以  $\text{K}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ,  $\text{KHF}_2$ ,  $\text{B}(\text{OH})_3$  等物质。



图 2 邦迪管/铜管焊后截面形貌

Fig. 2 Cross-section morphology of Bundy tube/copper tube after brazing

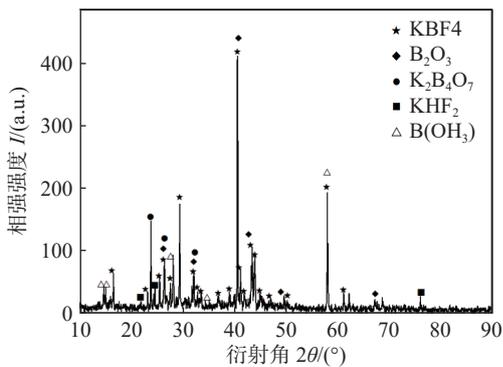


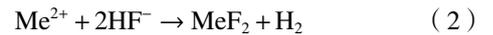
图 3 308S 钎剂的 X 射线衍射物相分析

Fig. 3 X-ray diffraction phase analysis of 308S flux

### 2.2 表面形貌

邦迪管在未被钎剂溶液腐蚀前,表面的镀锌呈光滑平整的银白色,如图 4(a) 所示。当邦迪管在  $40\text{ }^\circ\text{C}$  的 308S 钎剂溶液中浸泡后,则出现明显的现象。浸

泡 144 h 后,邦迪管表面已呈现大面积黑斑,只留下少部分镀锌层,如图 4(b) 所示。当浸泡超过 240 h,整个邦迪管呈现乌黑状,没有金属光泽,如图 4(c) 所示。当浸泡超过 576 h 后,邦迪管表面附着一层白色易碎物质,并出现了少量的锈点,如图 4(d) 所示。这是由于钎剂溶液中含有水、 $\text{H}^+$ ,  $\text{HF}^-$ ,  $\text{F}^-$  和硼酸等,溶液呈酸性,邦迪管浸入钎剂中,表面的锌层与钎剂中的  $\text{H}^+$ ,  $\text{HF}^-$ ,  $\text{F}^-$  等发生反应,反应方程式如式(1)和式(2)所示



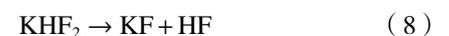
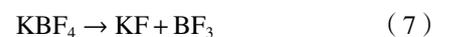
生成的  $\text{H}_2$  沿裂纹溢出,促使最外层锌层率先疏松脱落,发生溶解,生成  $\text{Zn}^{2+}$  进入钎剂中。内层的锌重新暴露出来,再次与钎剂发生反应,递次进行。在高温作用下,反应速度加快,锌层由厚变薄。当锌层脱落后,钎剂将开始腐蚀内部铁基体,导致邦迪管表面出现锈蚀。



图 4 邦迪管在 308S 钎剂中腐蚀不同时间后的表面形貌

Fig. 4 Surface morphology of Bundy tube corroded in 308S flux at different times. (a) 0 h; (b) 144 h; (c) 240 h; (d) 576 h

邦迪管在与铜管进行火焰钎焊时,铜管及邦迪管受热表面温度迅速升高,并持续与空气中氧气反应生成氧化膜。此时,308S 钎剂熔化,一方面,  $\text{KBF}_4$ ,  $\text{K}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ,  $\text{KHF}_2$  等成分熔化,生成活性基团与金属氧化物发生反应,生成复合酸盐,去除表面氧化膜,暴露内部干净的金属,反应方程式如式(3)~式(9)所示<sup>[11-14]</sup>





熔化的钎料由于金属密度较大而下沉,复合硼酸盐由于密度小,浮在焊缝表面。另一方面,钎剂熔化后粘度大,也可在焊缝位置形成液态保护壳,起到隔绝氧气的作用,防止钎缝金属再次被氧化。焊接作业结束后,焊缝附近表面存在有较多残留物。这来源于反应后的复合酸盐和部分未发生反应的钎剂。

将焊后的邦迪管/铜管接头置于 5% NaCl 溶液状态下盐雾腐蚀箱中,将温度调整至 40 °C 观察焊缝的腐蚀情况。如图 5 所示,在盐雾腐蚀箱中不同时间后,腐蚀从局部钎剂残留较多的地方开始,并逐渐扩展至整个钎焊接头。当时间超过 72 h 后,出现明显的外皮脱落现象; 100 h 后,接头表面呈现较多的腐蚀残渣,并能看到明显的褐红色铁锈。

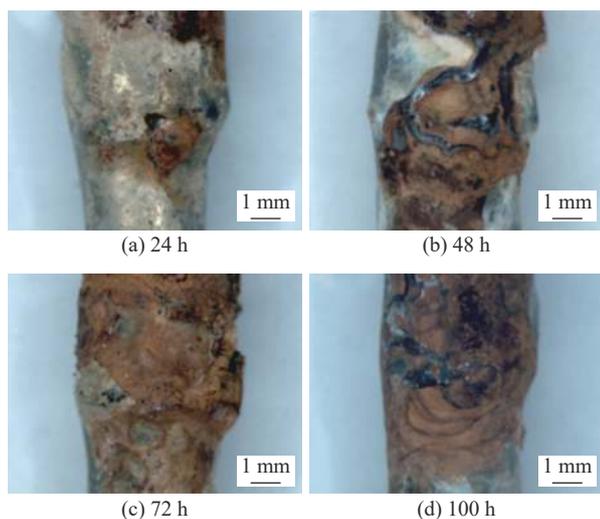


图 5 邦迪管/铜管接头经不同时间盐雾腐蚀后表面形貌  
Fig. 5 Surface morphology of Bundy tube/copper pipe brazed joints after salt spray corrosion at different times. (a) 24 h; (b) 48 h; (c) 72 h; (d) 100 h

### 2.3 腐蚀质量变化分析

邦迪管在钎剂溶液中浸泡,表面的镀锌层随腐蚀时间延长而脱落,质量会发生相应变化。通过对受腐蚀邦迪管的质量进行记录,能够反映腐蚀程度及腐蚀速度。单位长度的邦迪管在钎剂中腐蚀后,质量整体呈下降趋势。在 308S 钎剂溶液中浸泡 144 h, 240 h 和 576 h 后,质量分别减少了 0.015 g, 0.021 g 和 0.030 g。对应的邦迪管累计平均腐蚀速度分别为  $1.04 \times 10^{-4}$  g/h,  $8.75 \times 10^{-5}$  g/h 和  $5.21 \times 10^{-5}$  g/h, 其腐蚀速度变化如图 6 所示。邦迪管在钎剂溶液中浸泡腐

蚀,随时间较延长,钎剂溶液腐蚀的速率呈降低趋势。这是由于钎剂溶液呈酸性,邦迪管外层的氧化膜被腐蚀溶解后,内层新的锌层更容易被钎剂腐蚀,腐蚀速度快。但随着时间延长,一方面,钎剂溶液中的  $\text{H}^+$  与镀锌层反应,生成盐后,  $\text{H}^+$  和表面活泼的镀锌层减少;另一方面,钎剂溶液中水分减少,游离的  $\text{H}^+$  也逐渐减少,粘稠的钎剂粘附在镀锌管表面,如图 4(d) 所示,导致腐蚀速度逐渐降低。

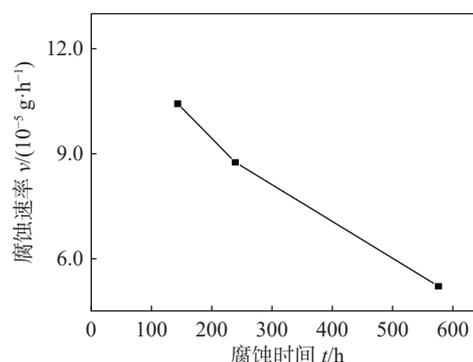


图 6 邦迪管在钎剂溶液中腐蚀失重  
Fig. 6 Mass loss of Bundy tube corroded in flux solution

邦迪管/铜管接头在 40 °C 的盐雾腐蚀箱中,腐蚀速度则明显加快。在 24 h, 48 h, 72 h 和 100 h 后,质量分别减少了 0.010 g, 0.016 g, 0.019 g 和 0.023 g。对应的邦迪管累计平均腐蚀速度分别为  $4.17 \times 10^{-4}$  g/h,  $3.33 \times 10^{-4}$  g/h,  $2.64 \times 10^{-4}$  g/h 和  $2.30 \times 10^{-4}$  g/h, 其腐蚀速度变化如图 7 所示。结合图 5 盐雾腐蚀照片可知,蚀邦迪管/铜管接头在盐雾腐蚀箱中明显更快,这是由于焊后接头表面残留的钎剂、表面的复合酸盐及高温高湿盐雾的协同作用下,提供了更多的  $\text{H}^+$ ,  $\text{F}^+$ ,

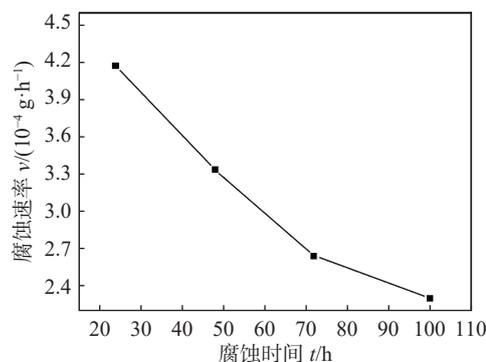


图 7 邦迪管/铜管接头在盐雾腐蚀中失重  
Fig. 7 Mass loss of Bundy tube/copper tube welded joints in salt spray corrosion

Cl<sup>-</sup>等活性离子,且由于基材邦迪管中的 Zn, Fe 元素及钎料金属中的 Ag, Cu 元素的标准电势分别为-0.76 V(Zn), -0.45 V(Fe), +0.80 V(Ag), +0.34V(Cu), 存在电势差,表面镀 Zn 可与 Ag, Cu 等金属形成原电池,共同加速了接头的腐蚀速度<sup>[15-16]</sup>,如式(10)所示。



因此,邦迪管外层锌层更容易被钎剂腐蚀,腐蚀速度快。同时需说明的是,由于加速反应,可能出现一段时间内质量下降幅度的减少,这是由于部分表面脱落和疏松的氧化层增加的质量出现动态平衡,但随着时间的延长,铁锈、铜锈等氧化层脱落,接头就会快速失质。

#### 2.4 扫描电镜及能谱分析

通过对在钎剂溶液中浸泡不同时间的邦迪管进行扫描电镜及能谱元素分析,如图 8 所示,显示邦迪管初始态表面光滑平整,主要以 ZnO 为主,并呈现裂纹沟壑,这也为钎剂溶液的进入提供了通道。当浸泡 144 h 后,表面呈现大面积颗粒状 ZnO 晶粒,这是由于腐蚀过程中将表面的 Zn 单质溶解后,伴随的已氧化的 ZnO 颗粒相暴露出来的缘故。随着进一步腐蚀,内部的镀 Zn 层被腐蚀,出现较多的蓬松棉花状 ZnO, ZnF<sub>2</sub> 等物质,这是由于 Zn 与 H<sup>+</sup> 反应生成 H<sub>2</sub>, 催

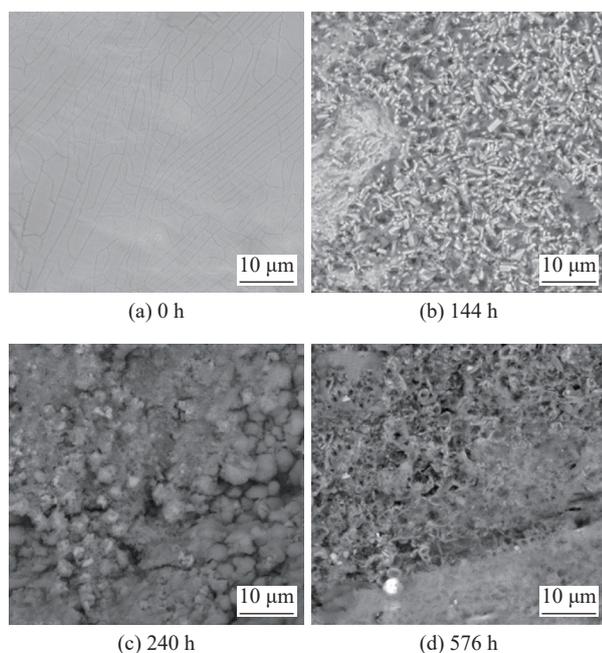


图 8 邦迪管在 308S 钎剂溶液中腐蚀不同时间后的 SEM 图

Fig. 8 SEM image of Bundy tube corroded in 308S flux solution at different times. (a) 0 h; (b) 144 h; (c) 240 h; (d) 576 h

生出泡状复合盐,并暴露了部分 Fe 基体;当时间进一步延长,形成泡状物质破碎,复合盐溶解至溶液中,并暴露出更多的 Fe 基体。

不同浸泡时间试样的面扫描成分也显示,随着邦迪管在钎剂溶液中时间的延长,Fe, K, F 等元素不断增加,证实腐蚀程度的不断增加,见表 1。

表 1 邦迪管在 308S 钎剂溶液中腐蚀不同时间后的面扫描结果(质量分数,%)

Tab. 1 Surface scan result of Bundy tube corroded in 308S flux solution at different times (wt.%)

试样	Zn	O	Fe	C	F	K
图 8(a)	60.13	34.96	—	4.82	—	—
图 8(b)	64.59	20.51	5.64	1.74	4.85	2.67
图 8(c)	49.02	19.30	17.55	0.91	10.65	2.57
图 8(d)	7.48	5.41	40.48	0.62	36.00	9.99

通过对在钎剂溶液中浸泡不同时间的邦迪管横截面进行线扫描,结果如图 9 所示。初始态约 7 μm 的镀 Zn 层主要以 Zn, ZnO 为主;在浸泡 144 h 后, O 含量沿径向快速增加,Fe 基体外层也明显增厚,且裂缝变宽,也证实了表面的蓬松腐蚀层。这是由于钎剂溶液进入,腐蚀内部金属腐蚀消耗,且释放气体,气体沿裂缝溢出的缘故。当浸泡时间超过 240 h,内部镀 Zn 层已腐蚀多半;当浸泡时间超过 576 h,镀 Zn 层已基本不存在,内部 Fe 基体也已被腐蚀变得粗糙。

对在 40 °C 盐雾腐蚀箱中放置不同时间的邦迪管/铜接头横截面进行线扫描,结果如图 10 所示。结果显示,24 h 后镀 Zn 层就有明显脱落,形成较厚疏松的腐蚀层;随着时间延长,腐蚀层快速脱落。当超过 72 h 后,只剩下极少部分不连续的疏松腐蚀层;当超过 100 h 时,镀 Zn 层脱落的同时,基材 Fe 也有明显的腐蚀痕迹。若继续延长时间,整个管路有被腐蚀穿透的风险。经对镀 Zn 层的物质分析发现,这是由于在残留钎剂层区域,Fe, Zn 元素含量较高,耐蚀性较差的 Fe 元素部分已扩散到残留钎剂层区域,形成 FeO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等氧化物,同时其中部分又与 NaCl 发生反应,形成可溶性 FeCl<sub>3</sub> 等物质,整体腐蚀接头呈现铁红色<sup>[17]</sup>。这充分说明在盐雾腐蚀的状态下,残留的钎剂将快速腐蚀焊接接头处的邦迪管。

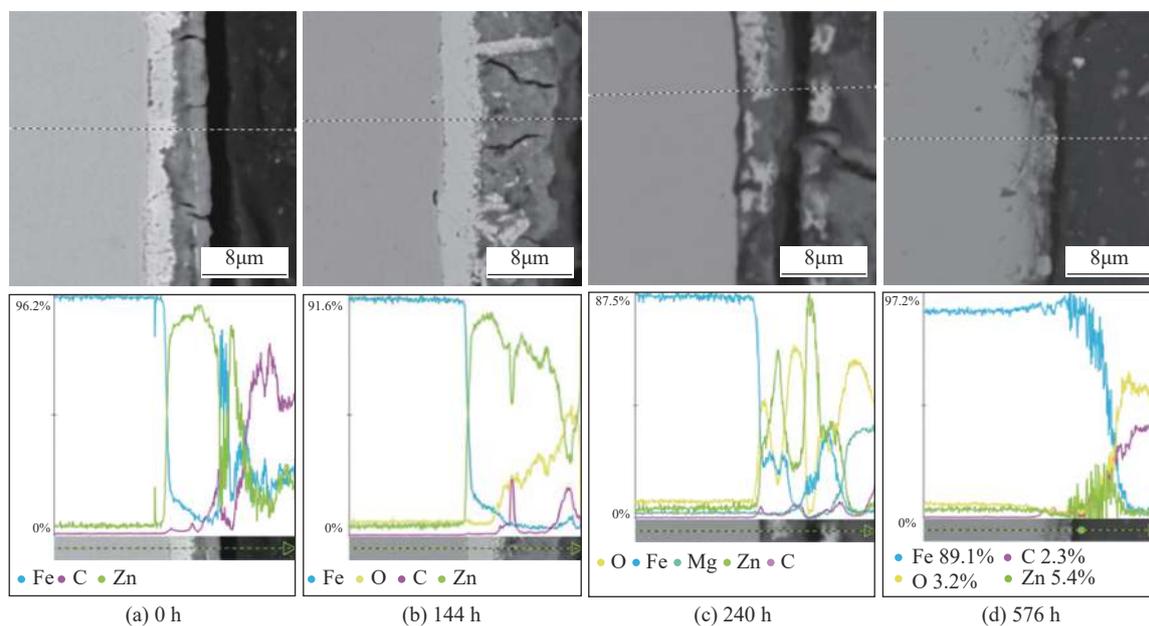


图9 邦迪管在308S钎剂溶液中腐蚀不同时间后的横截面扫描电镜图及元素分布

Fig. 9 Cross-sectional SEM image and element distribution of Bundy tube corroded in 308S flux solution at different times. (a) 0 h; (b) 144 h; (c) 240 h; (d) 576 h

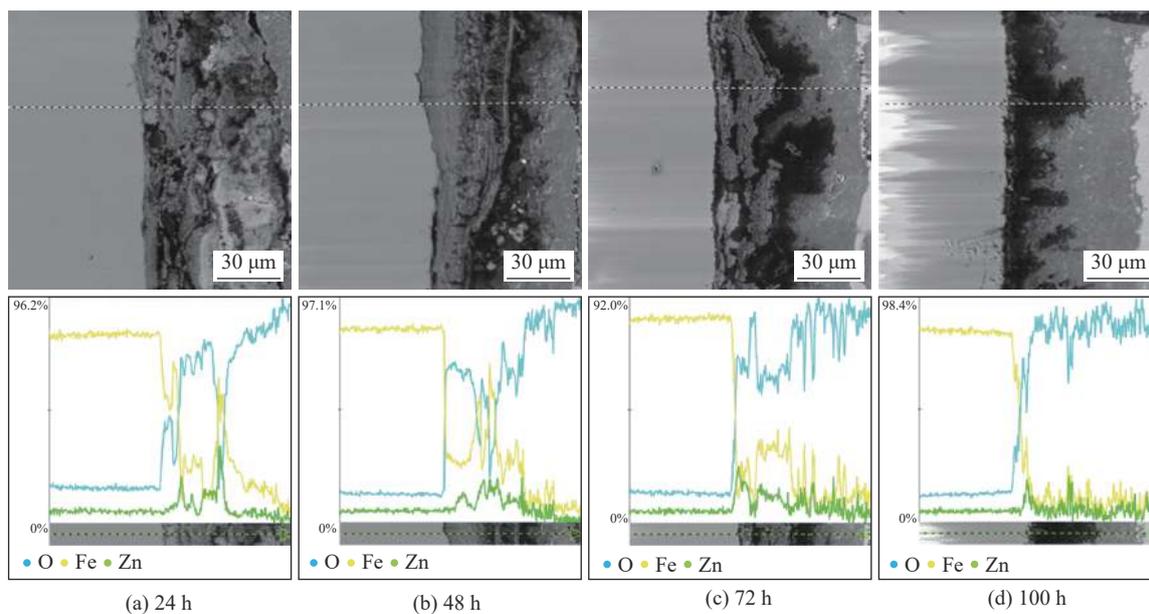


图10 邦迪管/铜管接头经不同时间盐雾腐蚀后横截面扫描电镜图及元素分布

Fig. 10 Cross-sectional SEM image and element distribution of Bundy tube/copper tube brazed joints after salt spray corrosion at different times. (a) 24 h; (b) 48 h; (c) 72 h; (d) 100 h

### 3 结论

(1) 308S钎剂溶液呈酸性,邦迪管表面的锌层与钎剂中的 $H^+$ ,  $HF^-$ ,  $F^-$ 等发生反应,生成可溶性复合酸盐,在 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 盐雾腐蚀箱中腐蚀速度更快。

(2) 邦迪管在盐雾腐蚀箱中腐蚀速度较钎剂溶液更快,是由于焊后接头表面残留的钎剂、表面的复合酸盐及高温高湿盐雾的协同作用下,提供了更多的 $H^+$ ,  $F^+$ ,  $Cl^-$ 等活性离子,且由于Zn, Fe与Ag, Cu, Zn等元素存在电位差,可以形成原电池,共同加速了接头

的腐蚀速度。

(3)邦迪管腐蚀过程是表面的 Zn 单质溶解后,钎剂溶液沿邦迪管表面裂缝浸入,加剧内部的镀 Zn 层腐蚀,并伴生蓬松棉花状 ZnO, ZnF<sub>2</sub> 等物质,泡状复合盐溶解至溶液后,暴露出内部 Fe 基体继续被腐蚀。

(4)Fe 基体外层与 O 结合形成 FeO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的氧化物,同时又与 NaCl 发生反应,形成可溶性 FeCl<sub>3</sub> 等物质,整体腐蚀接头呈现铁红色。随着腐蚀层溶解脱落,内部腐蚀速度加快。

(5)钎焊作业后残留钎剂腐蚀性较强,对于制冷、压力容器管路等的密封性及寿命有不良影响。因此,为提高焊接接头的服役寿命,应在焊接中尽量减少钎剂用量,并在焊后进行细致清洗打磨,并采取防锈防腐处理。

#### 参考文献

- [1] 王岸林,谭周芳. 空调器制冷用铜管研究 [J]. 家电科技, 2007(2): 39-41.  
WANG Anlin, TAN Zhoufang. Study of copper tubes used for refrigeration of air-conditioners[J]. Journal of Appliance Science & Technology, 2007(2): 39-41.
- [2] 王应民,洪梅,韩爱林. 邦迪管完全可替代铜管在制冷系统管路中的应用 [J]. 家用电器科技, 2000(11): 44-46.  
WANG Yingmin, HONG Mei, HAN Ailin. The application of Bundy pipe can completely replace copper pipe in refrigeration system pipeline[J]. Science and Technology of Household Electric Appliance, 2000(11): 44-46.
- [3] 王海滨,乔培新,唐福庆,等. 邦迪管钎焊接头的应力腐蚀断裂研究 [J]. 焊接, 1998(11): 35-38.  
WANG Haibin, QIAO Peixin, TANG Fuqing, et al. Stress-corrosion cracking in brazed joint of Bundy pipe[J]. Welding & Joining, 1998(11): 35-38.
- [4] 栾阳,焦咏翔,孙奇,等. 空调制冷铜管腐蚀失效分析 [J]. 制冷与空调, 2020, 20(10): 22-26.  
LUAN Yang, JIAO Yongxiang, SUN Qi, et al. Corrosion failure analysis of copper tubes in refrigerating system of air conditioning[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2020, 20(10): 22-26.
- [5] 马宗理,张金利,李德富,等. 空调制冷铜管使用中的若干问题 [J]. 制冷与空调, 2003, 3(4): 66-70.  
MA Zongli, ZHANG Jinli, LI Defu, et al. Some problems of copper tube using in air conditioning and refrigeration system[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2003, 3(4): 66-70.
- [6] 郭沫清. 邦迪管的手工钎焊 [J]. 焊接技术, 1998(6): 43.  
GUO Moqing. Manual brazing of Bundy pipe[J]. Welding Technology, 1998(6): 43.
- [7] ZHAO Yue, LONG Weimin, HUANG Sen, et al. Film removal mechanism of FB3-F silver brazing flux [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50(11): 3857-3861.
- [8] 祁冰,王世明. 基于邦迪管低银钎料的研究 [J]. 家电科技, 2017(8): 66-67.  
QI Bing, WANG Shiming. Research of low-silver brazing filler metal on Bundy tube[J]. Journal of Appliance Science & Technology, 2017(8): 66-67.
- [9] LONG Weimin, LI Shengnan, DU Dong, et al. Morphological evolution and development trend of brazing materials[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(12): 3781-3790.
- [10] 张雷,吴铭方,浦娟,等. Ag30CuZnSn 药芯钎料润湿性及钎缝性能研究 [J]. 热加工工艺, 2022, 51(1): 39-41.  
ZHANG Lei, WU Mingfang, PU Juan, et al. Study on wettability and brazing properties of Ag30CuZnSn flux cored brazing filler metal[J]. Hot Working Technology, 2022, 51(1): 39-41.
- [11] 张启运,庄鸿寿. 钎焊手册 [M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2017: 135-143.  
ZHANG Qiyun, ZHUANG Hongshou. Handbooks of brazing and soldering [M]. 3rd edition. Beijing: China Machine Press, 2017: 135-143.
- [12] ZHAO Yue, LONG Weimin, HUANG Sen, et al. Removal mechanism of oxide film on 304 stainless steel surface by silver brazing flux containing fluoride[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51(12): 4502-4507.
- [13] 伍成根,张露菁. 银钎剂的改性处理 [J]. 焊接, 2002(10): 29-31.  
WU Chenggen, ZHANG Lujing. The research of modifications for silver brazing fluxes[J]. Welding & Joining, 2002(10): 29-31.
- [14] 张露菁,朱庆华,顾润南. 银钎剂剖析与制备的研究 [J]. 中国纺织大学学报, 1999, 25(1): 98-99,107.  
ZHANG Lujing, ZHU Qinghua, GU Runnan. Research of silver brazing fluxes in analysis and processing[J]. Journal of China Textile University, 1999, 25(1): 98-99,107.
- [15] 张太平,邵文松. 元素的电离能、电子亲合能、电负性、电极电势四者的联系与区别 [J]. 高等函授学报(自然科学版), 2001, 14(6): 15-18.  
ZHANG Taiping, SHAO Wensong. The relation and difference of ionization energy, electron affinity energy, electronegativity and electrode potential of elements[J]. Journal of Higher Correspondence Education (Natural Sciences), 2001, 14(6): 15-18.

[16] 李淑妮, 崔斌, 唐宗薰. 元素电势图及其应用 [J]. 宝鸡文理学院学报 (自然科学版), 2001, 21(1): 39 - 44.  
LI Shuni, CUI Bin, TANG Zongxun. Element potential diagram and its applications [J]. Journal of Baoji University of Arts and Sciences (Natural Science Edition), 2001, 21(1): 39 - 44.

[17] 张冠星, 钟素娟, 董媛媛, 等. 焊后钎剂残渣腐蚀行为分析 [J]. 焊接, 2022(11): 47 - 53.  
ZHANG Guanxing, ZHONG Sujuan, DONG Yuanyuan,

et al. Analysis of flux residue corrosion behavior after brazing [J]. Welding & Joining, 2022(11): 47 - 53.

---

**第一作者:** 董宏伟, 硕士, 工程师; 主要从事新型钎焊材料与钎焊工艺方面的研究; 已发表论文 10 余篇, 授权专利 20 余项; [zjsdhw@163.com](mailto:zjsdhw@163.com)。

(编辑: 王龙权)

---

**本文引用格式:**

董宏伟, 张冠星, 董媛媛, 等. 银钎剂残留对邦迪管腐蚀行为的影响 [J]. 焊接, 2025(x): 1 - 8.

DONG Hongwei, ZHANG Guanxing, DONG Yuanyuan, et al. Influence of silver flux residue on corrosion behavior of Bundy tube [J]. Welding & Joining, 2025(x): 1 - 8.