

高活性度石灰生产线。为减少投资和快速见效，该公司通过方案比选后确定将氧化铝焙烧车间原有1条 $\Phi 4.5 \times 100\text{m}$ 闲置回转窑改造成600t/d活性石灰生产线。

### 3 改造方案

本项目是在原有的回转窑焙烧工艺的基础上改造成600t/d活性石灰生产线，充分利用原有的工艺生产设备和生产条件，通过新建上料系统和成品输送储存系统，改造窑尾收尘系统，对原设备进行维修等方案完成项目的改造建设。（如图1）

#### 3.1 回转窑改造

回转窑长度不变（四档支撑），改造回转窑窑尾端，采用锥段收口以提高回转窑容积率；原窑尾迷宫密封改造为鱼鳞片弹性密封装置，增设窑尾端密封环。原窑头端密封结构维持不变，窑头端内部采用浇注料浇筑出锥段收口。对主辅减速机、电机等进行拆解清洗、检修和试验。

#### 3.2 窑尾上料及预热器改造

（1）预热器采用阶梯式8室预热器—预热器安装在窑尾框架上，原有的烟道以及旋风除尘器拆除，原有窑尾罩子及上升、下降烟道拆除。

（2）上料机房设置在原有饲料车间位置，原有饲料车间拆除，饲料槽拆除，作为上料位置。上料间房顶放置上料除尘器及风机。

（3）石灰石上料采用大倾角皮带机，皮带机设彩钢防雨罩，皮带机安装平台带露天爬梯并设置一处中间支腿。地矿槽下设2台振动给料机。上料机房顶部设岗位除尘。

（4）预热器液压站放置在窑尾框架上。预热器下原窑尾厂房立柱及梁



图1 生产线改造前

加固以承受预热器载荷。

（5）原有窑尾罩子及烟道拆除，设置新的窑尾转运溜槽（鱼鳞片密封、含耐材砌筑）—转运溜槽下设漏料管及扇形阀。

#### 3.3 窑头及燃烧系统修复达到使用状态

#### 3.4 单筒冷却机改造

（1）冷却机截短为 $\Phi 4.0 \times 36\text{m}$ —从出料口方向截去9米，二档支撑基础后移。冷却机淋水冷却管路更新。

（2）冷却机原传动系统不变，对主、辅减速机、电机等进行检修和试验。冷却机内部耐材拆除并更新。

#### 3.5 成品系统

（1）原耐火砖库拆除。在耐火砖库位置建设1座 $\Phi 9\text{m}$ 钢制圆仓作为中转仓，仓下设置库侧和库底散装机进行汽车转运。成品仓附设岗位除尘进行装车点除尘。

（2）新建成品输送系统，设置1台水平链板机和1台B800大倾角链斗机，将成品石灰直接送入成品仓。

（3）成品仓系统设计两个独立布袋除尘器对成品仓系统及链板机输送系统进行除尘。成品系统各落料点/转运点/装车点设置独立的岗位单机除尘，除尘灰返入输送系统及成品仓。

#### 3.6 窑尾除尘系统改造

（1）新建1台多管冷却器，下设库

底散装机，进行除尘灰的装车转运。

（2）窑尾引风机进行改造—更换叶轮、电机、联轴器，修配机壳以满足风量、风压要求，风机基础不变。风机配置高压变频器进行调速。

（3）两台电除尘内部极板拆除，利用原基础和电除尘壳体做布袋除尘的壳体，重新制作袋式除尘进出风箱及其内部结构，链式输送机及原电除尘操作值班室保留，框架下部除尘灰链式输送机修复，除尘灰采用链式输送机+斗提机送入大除尘灰仓。除尘灰仓设库底卸料。除尘灰仓设岗位除尘。窑尾除尘器采用特种耐高温布袋。

和电除尘壳体做布袋除尘的壳体，重新制作袋式除尘进出风箱及其内部结构，链式输送机及原电除尘操作值班室保留，框架下部除尘灰链式输送机修复，除尘灰采用链式输送机+斗提机送入大除尘灰仓。除尘灰仓设库底卸料。除尘灰仓设岗位除尘。窑尾除尘器采用特种耐高温布袋。

#### 3.7 电气自动化系统改造

控制系统：利用原有中控室设备设施，增改上料系统、成品系统、窑尾控制系统的配电及PLC控制模块，上料系统设置独立PLC子站，预热器料仓设置雷达料位计检测仓内料位，料位信号送中控室显示并做高/低料位报警。

## 4 改造工艺流程

活性石灰的生产过程分别在预热器、回转窑和单筒冷却器三台独立的设备中完成，主要工艺流程如图2所示。

## 5 改造后的生产情况

经过前期充分的准备和紧张的施工，从局部拆除、改造、土建、维修、安装、调试到点火，仅用时3个月就全部完工。并顺利超产达标。目前产量稳定在650t/d，而且还有提产空间。

### 5.1 石灰石粒度：20-40 mm之间，粒

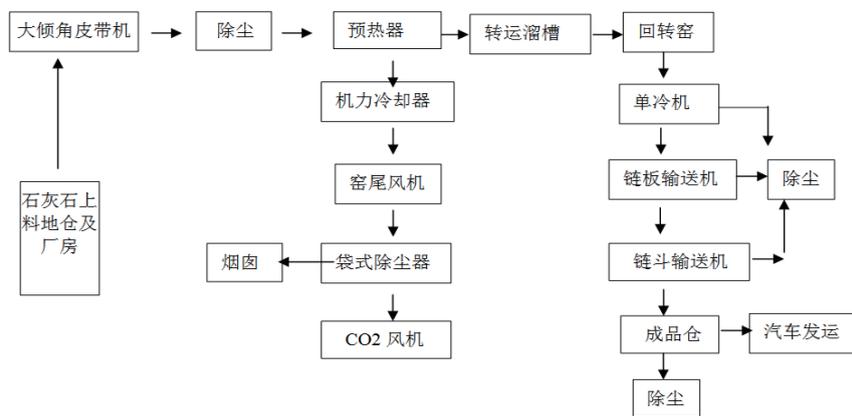


图2 改造工艺流程图



图3 生产线改造后

度合格率 ≥ 90 %

CaO	SiO <sub>2</sub>	S	粒度指标
≥52%	≤1.5%	≤1	20~40mm

### 5.2 活性石灰产品质量

CaO	SiO <sub>2</sub>	活性度	生过烧率
≥90%	≤1.5%	≥360	≤5%

## 6 改造后的经济效益

目前市场上外购活性石灰370元/吨(含税),项目达产后,实际生产成本260元/吨,按年产20万吨白灰计算,每

年利润超2000万元。(如图3)

## 7 总结

由于本项目属于原有闲置设备项目改造,故改造投资费用较低,利润总额偏大,改造投资回收期较短。闲置设备的充分利用,不仅能有效降低氧化铝的生产成本,还可以使过剩的劳动力得到妥善安排,为公司赢得合理的利润。另外,回转窑生产的石灰由于大幅提高了活性度,对后期氧化铝

的熔出率提高3%以上,间接经济效益更为显著。

总之,利用原有的回转窑改造成活性石灰生产线,实施过程相对简单,过剩和闲置资源得以利用,节能、环保、投资少、见效快、经济效益可观,符合国家的产业政策,是一个行之有效的改造项目。7

### 作者信息

周腾飞, 新兴能源装备股份有限公司, 分公司副总经理, 工程师, 河北省邯郸市开发区和谐大街99号, 056107, 15613071112, zhoutengfei666@126.com

(上接07页)

行业实现由高速度向高质量发展的任务依然艰巨。

### 综合分析

预计2018年机械工业将延续上年平稳的增长态势,主要经济指标增速保持或略低于上年水平。具体而言,预计全年机械工业增加值、主营业务收入和利润总额增速均在7%左右,对外贸易出口将保持适度增长,增速将低

于上年。

2018年是改革开放40周年,是决胜全面建成小康社会、实施“十三五”规划承上启下的关键一年。全行业要学习贯彻党的十九大和中央经济工作会议精神,以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导,遵循新发展理念,围绕落实“中国制造2025”和机械工业调结构促转型增效益的部署要求,坚持质量第一、效益优先,以

改善供给侧结构为主线,以推进质量变革、效率变革、动力变革为抓手,以实施“十三五”行业发展总体任务、实现高质量发展为目标,坚持创新驱动、质量提升,坚持两化融合、智能转型,坚持开放升级、协调发展,着力稳增长、调结构、转方式、补短板、提品质、增效益,推进行业转型升级,为实现由大变强奠定基础。7

# 微通道换热器铜铝管腐蚀失效分析及对策

陈昌中, 吴扬军, 张 斌, 谭德强

珠海格力电器股份有限公司, 珠海, 519070

**摘 要:** 微通道换热器是制冷系统的重要组成部分, 微通道换热器的铜铝管发生腐蚀泄漏会导致制冷系统不起作用。

本文针对微通道换热器的铜铝管腐蚀失效样件, 通过宏观、微观形貌分析、原材料化学成分测试、金相分析、红外光谱分析、XRD测试、扫描电镜及能谱分析等技术手段, 结合相关文献对铝管发生点腐蚀的原因及机理进行深入分析, 并提出相应的预防措施。结果表明: 当制冷系统中的R22溶解于少量的水分中会产生微量的Cl<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>对整个铝管表面的氧化膜都可能破坏, 腐蚀是发生在氧化膜破坏处。铜—铝构成的电极对比氧化膜—铝构成的电极对电位差更大, 对电化学腐蚀的推动力更大, 腐蚀更倾向于发生在铜—铝接触处, 点蚀由内向外不断进行, 腐蚀产物逐渐堆积在铝管内壁, 最终腐蚀穿透铝管, 制冷剂R22泄露。

**关键词:** 微通道换热器; 铝管; 点蚀; 氯离子; 制冷剂

## Research of Miciochannel Heatex Changer Copper and Aluminum Tubes Corrosion Failure Analysis and Countermeasures

CHEN Changzhong , WU Yangjun , ZHANG Bin , TAN Deqiang

Gree Electric Appliances, INC. of Zhuhai, Zhuhai ,519070

**Abstract:** Miciochannel heatex changer is an important part of refrigeration system, copper and aluminum tubes corrosion leak of miciochannel heatex changer cause refrigeration system doesn't work. This article based on miciochannel heatex changer copper and aluminum tubes corrosion failure samples, We Through the macroscopic and microcosmic morphology analysis, raw material chemical composition test, metallographic analysis, spectral analysis of maple leaf ,XRD test, scanning electron microscopy and energy spectrum analysis and other technical means, and combined with literature , it is in-depth analyzed that the reason and mechanism of spot corrosion of aluminum tube, and corresponding preventive measures are put forward. The results show that when the refrigeration system of R22 dissolved in a small amount of water will produce trace amounts chloride ions , chloride ions to the aluminum oxide film on the surface of the tube may damage. Copper-alunmium electrode is much larger than of the oxide- alunmium electrode to the potential of a larger, more impetus of electrochemical corrosion , corrosion tend to occur in copper and aluminum contact point, pitting by ongoing outside introversion , corrosion products gradually accumulated in the aluminum tube inside , eventually penetrates the aluminium tube corrosion , refrigerant R22 leakage.

**Keywords:** Micio-channel heatex changer; Aluminum pipe; Pitting ; Chloride ion; Refrigerant

## 1 引言

微通道换热器是制冷管路系统的重要组成部分，不仅可以明显强化传热，还可以提高管道的耐压能力。目前，微通道换热器的铜铝管采用铜铝异种金属材料连接，可以节约铜资源，降低生产成本，提高市场竞争力。铜铝管的连接方式分为焊接方法和非焊接方法，其中常用的焊接方法有熔化焊、钎焊、电阻焊等，非焊接方法有洛克环、丝扣及胶粘轧压等。近几年电阻压力焊接铜铝管已取得突破性进展，微通道换热器的铜铝管焊接已大量采用电阻压力焊。

在制冷管路系统运行过程中，微通道的铜铝管处在制冷剂（一般为含氯的有机溶剂，如R22、R134a等）、压缩机油等介质的环境中。当系统洁净度不好（混入空气或水）时，水分就进入系统，铜铝管不可避免会与其服役环境中的这些介质发生作用，进而发生电化学腐蚀现象。铜铝管接头的常见腐蚀类型有点蚀、应力腐蚀、腐蚀疲劳等<sup>[1]</sup>，其中以点蚀的危害性最大，能导致铜铝管腐蚀穿孔，引起系统漏氟。因此，对微通道铜铝管的腐蚀失效过程进行分析，对于预防和控制系统漏氟，保障系统的安全运行具有重要意义。

本文针对应用于制冷系统的微通道铜铝管腐蚀失效样件进行分析。

## 2 失效试样分析

### 2.1 宏观形貌

截取一小段腐蚀泄漏处的铜铝管试样观察，可以看到铜铝管内有黑色的附着物，同时散发恶臭味。用刀片刮掉铜铝管外壁的热缩套管时发现冒

白烟，有刺激性气味。从试样的横截面可以看出铝管颜色变得较暗（端面颜色较亮的部分是截取的新端面），初步判断为铝管被腐蚀透，导致氟系

统泄漏。同时，铜管发生沿径向内侧的严重变形，铝管经挤压后厚度变薄出现外壁开裂，可以确定铜管的这种变形与铝管开裂有关。（如图1、图2）



图1 铜铝管宏观腐蚀形貌



图2 铜铝管腐蚀横截面

### 2.2 截面形貌分析

沿径向切割焊接结合处发现，铝管逐渐变薄直至破裂。用水清洗可见铜铝相间冒气泡，表明二者之间的缝隙含有强酸。镶嵌后抛光发现，铝管从熔接部位逐渐剥离，发生由内而外的腐蚀反应。打磨抛光后在图5（a）100X显微镜下显示熔接处最薄处为0.602mm，铝管内部组织疏松，含大量

气孔。从开裂的铝管中分析发现，靠近内部腐蚀比靠近外部腐蚀严重，在100X图5（a）和400X图5（b）下观察到一个明显的由内而外的腐蚀坑，并且在400X图5（b）下观察到一系列连在一起的由内到外的腐蚀带。腐蚀坑是最开始的腐蚀，逐渐腐蚀加剧后一起全面腐蚀，从金相中可以看出是由内而外的点蚀形貌。（如图3—图5）



图3 铜铝管接头剖面图



图4 铜铝管接头镶嵌试样

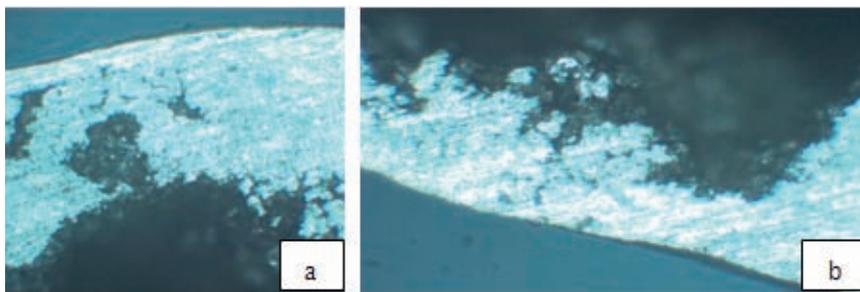


图5 铝管腐蚀处的横向剖面金相图

### 2.3 成分测试

微通道的铜铝管所用铜管、铝管材质分别为TP2M铜管、1060铝管，铜铝接头采用电阻压力焊连接。通过直读光谱仪对铜铝管的铝管进行成分测试，其测试结果如表1所示，从表1中材料的元素成分和含量可以看出，铜铝管中所使用的铝管的化学成分符合要求。

### 2.4 红外光谱分析

取铜铝管焊接结合处位置铝管内壁的黑色腐蚀物质和外侧热缩套管进行红外测试，结果如下：红色为热缩套管，紫色为管内黑色腐蚀产物。从图6中可以腐蚀产物与热缩管的重合度不高，表明物质成分的特征官能团完全不重合，因此说明两者没有关系，并且微通道铜铝管内部的压力较外界高，外界物质不具备进入管路内部的条件。在 $1000 \sim 1700 \text{ cm}^{-1}$ 之间的峰显示为烷烃，腐蚀产物还在 $680 \text{ cm}^{-1}$ 处有一个强峰，此处为碳-氯峰。说明腐蚀产物中有含氯的有机物，循环管路内部制冷剂R22在 $-40^\circ\text{C}$ 就会挥发，因此检测到的有机物不是R22，而是R22与管路中其他物质作用产生的有机物在此处堆积。

### 2.5 XRD测试

取铜铝连接管焊接结合处位置铝管内壁的黑色腐蚀物质进行XRD测试，结果如下，图7中可以看出右端峰对应着铝及三氧化二铝，说明黑色腐蚀物质含有铝及三氧化二铝，说明这是铝的腐蚀产物。左端几处较明显的峰并不能完全对应，但是此处的峰为有机物的峰，说明是含有比较复杂的有机物。

### 2.6 扫描电镜及能谱分析

在铝管内壁腐蚀明显的部位取

表1 1060铝管的元素成分及含量

元素	1060铝管								
	化学成分%(重量), GB/T 3190								
标准含量 (%)	≤0.25	≤0.35	≤0.05	≤0.03	≤0.03	≤0.05	≤0.05	≤0.03	≥99.60
成分含量 (%)	0.203	0.212	0.017	0.014	0.021	0.028	0.025	0.013	99.724

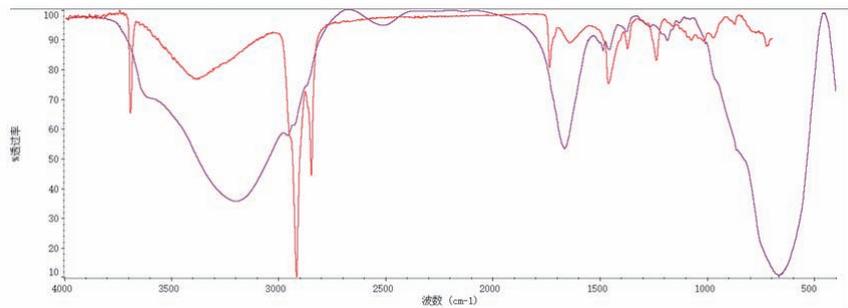


图6 腐蚀产物、热缩套管的红外光谱图

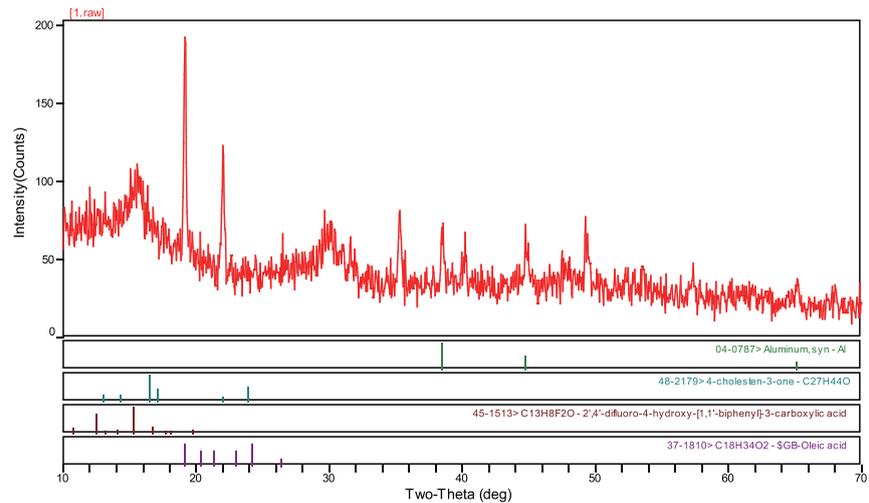


图7 腐蚀产物的XRD谱图

样，将样品放置在扫描电子显微镜 (JSM-6700F, JEOL) 下观察。从图8(a)可以看出，存在一个明显的点腐蚀坑，铝管腐蚀坑周围的铝管表面已经被腐蚀的凹凸不平，并出现很多小的点蚀坑。这表明在铝管腐蚀穿孔失效之前，铝管壁内部已经发生了大量的腐蚀。从放大后的图8(b)可以看出，在铝管的腐蚀部位存在陷落现象，陷落处有较多大小不一的块状物体，且呈不均匀层状分布，腐蚀块与块之间存在腐蚀缝隙，呈现出比较疏松

的状态。

铝管的腐蚀属于典型的点腐蚀现象，取典型的腐蚀坑区域经能谱 (EDS) 分析，从表2可以看出铝管内部腐蚀坑处含有S、Cl、O等非金属元素，其中 $\text{Cl}^-$ 易使铝管内壁的氧化膜破坏而引起点腐蚀。 $\text{Cl}^-$ 可能来自来自管路中的R22与其他物质的接触，使管路中引入了含 $\text{Cl}^-$ 的溶液，破坏了铝管内壁的氧化膜，引起铝基材的腐蚀。铝管中含有Si等微量元素，它可以和铁、铝形成固溶体，在腐蚀过程中形成

电极,促进腐蚀的进行。

### 3 铝管发生点腐蚀的原因及机理分析

铝的化学性质很活泼,其平衡电极电位(SCE)约为-1.67V,虽然热力学上不稳定,但却有良好的钝化性能。因为铝和氧的亲合力很大,在大气中铝表面很快生成一层薄而致密、具有自愈能力的 $Al_2O_3$ 氧化膜<sup>[2]</sup>,且随着时间的延长或大气湿度的增加,氧化膜的厚度愈厚,因此Al在大气中具有很好的耐蚀性。当铝合金暴露在含有侵蚀性阴离子(如 $Cl^-$ 、 $F^-$ )的溶液中,铝合金表面的钝化膜破裂<sup>[3]</sup>,在铝合金表面的局部地区,出现向深处发展的腐蚀小孔,其余地区不腐蚀或腐蚀很轻微,这种腐蚀形态称为小孔腐蚀,简称孔蚀或称点蚀<sup>[4]</sup>。点蚀是铝合金常见的局部腐蚀,就产生点蚀的成因而言,需满足三个条件<sup>[5]</sup>:

(1) 铝合金的电位必须达到临界点蚀电位;(2)  $Cl^-$ 的存在,  $Cl^-$ 能够通过氧化膜上的微孔或缺陷进入铝合金表面;(3) 络合离子的形成有助于铝阳极溶解过程的进行。当铝合金表面存在钝化膜缺陷、机械划痕、化学成分不均衡等活性位置时,  $Cl^-$ 容易在这些部位吸附,促进点蚀核的形成。当点蚀核长大至一定临界尺寸(一般孔径大于 $30\mu m$ )时,金属表面出现宏观蚀孔。点蚀孔一旦形成,孔位的金属处于局部活化状态(电位较低),为阳极;点蚀孔外部的大片表面仍处于钝化状态(电位较高),为阴极,从而构成由小阳极一大阴极组成的活化-钝化电池,使蚀孔加速发展。腐蚀过程中发生的化学反应如下:

(1) 蚀孔底部Al溶解、水解

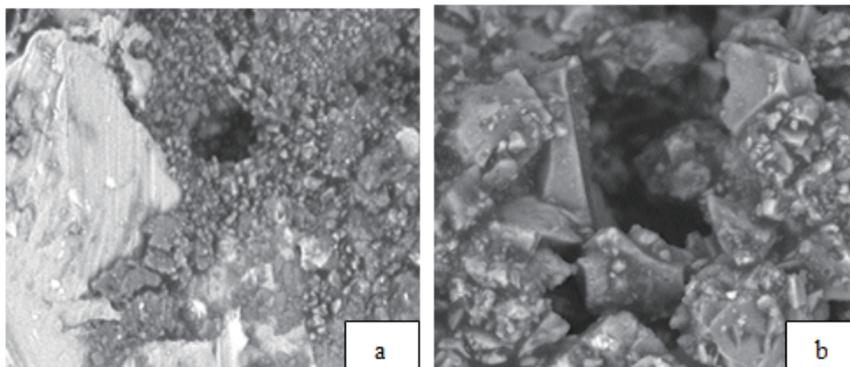


图8 铝管腐蚀处的SEM形貌

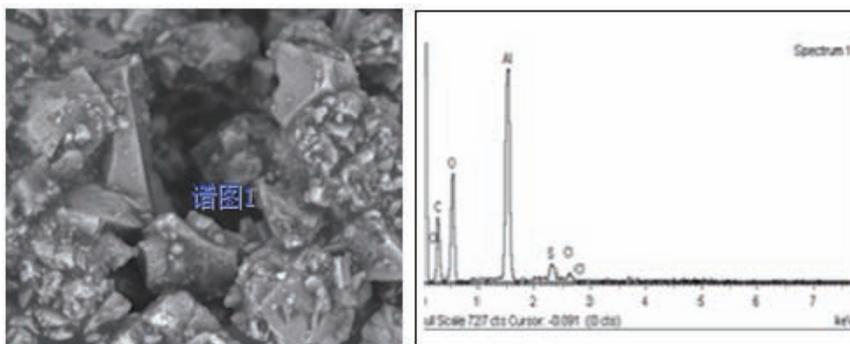
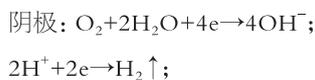
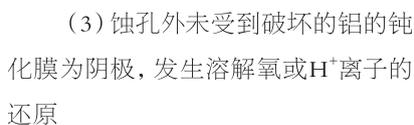
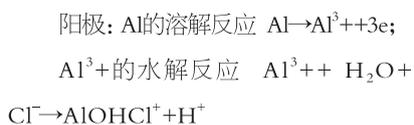


图9 铝管腐蚀处的EDS能谱图

表2 铝管点腐蚀处的EDS测试结果

元素	CK	OK	AlK	SK	ClK	总量
重量百分比	29.31	41.37	26.52	1.94	0.86	100.00
原子百分比	44.65	47.93	6.27	0.89	0.26	



点蚀孔发生的最初阶段,在蚀孔内发生金属Al的溶解,生成 $Al^{3+}$ ,而在相邻的孔口外表面,发生溶解氧或 $H^+$ 离子的还原。孔口处pH值的增高和孔内金属离子 $Al^{3+}$ 的外迁,产生二次反

应,即 $4Al + 6H_2O + 3O_2 \rightarrow 4Al(OH)_3 \downarrow$ ;  
 $Al(OH)_3$ 在点蚀孔外部堆积,使点蚀孔内部形成一个闭塞区。孔内缺氧,孔外富氧,从而形成了氧浓差电池,进一步加速孔内金属离子的去离子化过程。小孔内部因阳极反应产生了大量金属正离子,结果为保持电中性,蚀孔外的阴离子 $Cl^-$ 会向孔内迁移,造成蚀孔内的 $Cl^-$ 浓度增高(高出孔位一个数量级以上),并与孔位 $Al^{3+}$ 等发生水解反应,形成高浓度的氯化物。由 $Al^{3+}$ 的水解反应方程式可知,反应产生了 $H^+$ ,蚀孔内的pH值降低,加上 $Cl^-$ 的活化作用,加速了阳极Al的溶解。 $Cl^-$ 浓度的增加会使金属的稳定性变得更差,这是由 $Cl^-$ 的配位作用造成的。 $Cl^-$ 向孔内

聚集后会与孔内的H<sup>+</sup>结合形成盐酸,盐酸具有强腐蚀性,小孔内壁在这种强酸环境下会变得不稳定,成为阳极,小孔外部金属表面仍然有钝化膜的保护则成为阴极,形成小阳极一大阴极电池体系,导致腐蚀小孔加速发展。综上所述,小阳极一大阴极电池、孔内外浓差电池、闭塞电池自催化酸化作用<sup>[6]</sup>等构成了点蚀发展的推动力。

#### 4 分析结论及对策

综上,从金相组织观察可以看出铝管腐蚀是由内而外的点状腐蚀。从XRD测试可以看出腐蚀产物主要有Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>及不能确定成分的有机物。从红外光谱分析可以看出腐蚀产物中含有有机物,可能是有R22参与有机反应得到的产物。从扫描电镜中看到腐蚀坑,可以确定是点蚀。从能谱分析可以看出腐蚀产物中氯离子,但氯离子对金属表面氧化膜的穿透作用极强,氯离子浓度增加使铝合金点蚀电位降低,点蚀倾向加剧。

因此我们可以确定腐蚀过程:微通道换热器注入R22时,当系统洁净度不好(混入空气或水)时,水分就进入系统。系统里的R22溶解于少量的水分中产生微量的氯离子,部件处于温度较高的环境中,对整个铝管表面的氧化膜都可能破坏,铜—铝构成的电极对比氧化膜—铝构成的电极对电位差更大,对电化学腐蚀的推动力更大,因此,腐蚀更倾向于发生在铜—铝接触处,暴露在电解液下,就会发生上面介绍的电极反应。点蚀由内向外不断进行,腐蚀产物逐渐堆积在铝管内壁,最终腐蚀穿透铝管,制冷剂R22泄露。铝管沿着点蚀通道向铝管壁其他方向进行腐蚀,造成全面腐蚀,铝管粉化,机械性能下降。

铝管腐蚀后的产物疏松,机械性能差,因此铜铝管之间的腐蚀产物会对铜管有一定的挤压,导致铜管受力收缩,使得内径减小。如图2所示,腐蚀产物堆积在铜管内侧堆积,对铜管的挤压使其内径收缩,铜管就会受到一个向内的挤压。日积月累,腐蚀产物不断增加堆积在铜铝之间,并且接头处存在压强差,就会挤压铜管逐渐变形,铜管收缩,逐渐为腐蚀产物的堆积提供了空间。

微通道换热器管路内部存在水分和氯离子导致铝管被腐蚀穿,腐蚀是发生在氧化膜破坏处,此处氧化膜和铝形成电极对,暴露在电解质溶液(制冷剂和杂质等形成的系统)中,发生了原电池反应:  
 $4Al+6H_2O+3O_2 \rightarrow 2Al_2O_3+6H_2O$ 。

从上述反应,我们可以看出,整个腐蚀过程的反应条件必须要有氧气和水的参与,并且在产物中还有水,这就说明腐蚀的不断进行整个过程中,并不消耗水,只消耗氧气。相应的预防措施如下:

(1) 保持系统干燥及密闭性,去除水分及氧气。铜铝管焊接时,要防止水分进入系统中。对微通道检堵、检大漏、氨检等岗位所用的气体增加出口常压露点检测要求,要求低、中、高压压缩空气和氮气、氦气的出口常压露点在一定的温度以下,同时要求氨检设备增加独立的干燥过滤器,并带有自动排水装置。微通道平行流需做好防尘防水,并在系统中充氮气保护。

(2) 合理选择耐蚀材料。对于铝合金材料,降低那些能够生产沉淀相的金属元素(如Si、Fe、Cu等),以减少局部阴极,或加入Mn、Mg等合金元素,能与Fe、Si等形成电位较负的活泼相,均能起到抗点蚀能力的效果。

(3) 替换制冷剂。用无氟制冷剂替换现有的含氟制冷剂,防止氯化物、氟化物等酸性物质的产生,破坏铝合金表面的氧化膜,产生点蚀孔。

(4) 改善热处理工艺。避免铝合金在500℃淬火,以防止析出过多的阴极性沉淀相<sup>[7]</sup>。7

#### 参考文献

- [1] HUANG ZH, CONWAY P P, THOMSON R C. Microstructural Consideration for Ultrafine Lead Free Solder Joints[J]. Microelectronics Reliability, 2007,47(12): 1997-2006.
- [2] 王振波,尹鸽平,史鹏飞. 铝电池用合金阳极的研究进展[J]. 电池, 2003(1):41-43.
- [3] 曹楚南. 腐蚀电化学原理[M]. 北京:化学工业出版社, 2008.
- [4] 刘道新, 材料的腐蚀与防护[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2010.
- [5] 朱祖芳. 有色金属的耐腐蚀性及其应用[M]. 北京:化学工业出版社, 1998:126-135.
- [6] 单毅敏,罗兵辉,柏振海. 5083铝合金在3.5%NaCl溶液中的电化学腐蚀行为研究[J]. 铝加工, 2007, 1(173): 11-14.
- [7] Buchheit R G, Morgan J P, Stoner G E. Electrochemical behavior of the TI (Al<sub>2</sub>CuLi) intermetallic compound and its role in localized corrosion of Al-2% Li-3%Cu alloys[J]. Corrosion, 1994,50:120.

#### 作者信息

陈昌中(1987~),男,任职于珠海格力电器股份有限公司,工艺员,中级工程师,主要从事水箱新产品开发、搪瓷工艺及材料腐蚀研究工作,通讯地址:广东省珠海市香洲区前山金鸡西路789号格力电器有限公司,邮编:519070,电话:0756-8589574,传真:0756-8614998,电子邮箱: chenchangzh2011@126.com