

# 汽车油冷器典型失效分析

徐强, 金喆民, 顾国荣, 刘欣, 王文东

(一汽-大众汽车有限公司, 长春 130011)

**摘要:** **目的** 分析汽车机油冷却器的典型缺陷, 寻找其产生的根本原因, 制定相应的措施, 从而避免此类问题的再次发生。**方法** 通过对失效车辆的分布进行统计分析, 锁定失效车辆的范围。使用扫描电子显微镜对失效部位的微观结构进行观察, 通过能谱仪对腐蚀部位周围的腐蚀产物进行分析, 发现其主要成分为  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 并且发现了  $\text{Cl}^-$ 。结合前人的腐蚀理论, 并对比分析, 确定腐蚀主要是由于  $\text{Cl}^-$  的穿透作用导致的孔蚀。通过对防冻液进行统计分析, 并对当时防冻液样品中  $\text{Cl}^-$  的含量进行检测, 确定腐蚀元素的来源为防冻液。通过分析防冻液的混合工艺, 现场检查油库的应急操作, 并且进行模拟实验, 可以确定由于油库人员的操作不当导致消毒液中的  $\text{Cl}^-$  被大量引入储水罐的混合用水中, 最终使加注的防冻液带有强烈的腐蚀性。**结果** 防冻液的混合用水中  $\text{Cl}^-$  的含量远高于正常水平。**结论** 防冻液的混合用水中  $\text{Cl}^-$  含量过高, 导致铝合金表面钝化膜被穿透, 最终形成了典型的铝合金孔蚀失效。

**关键词:** 机油冷却器; 铝合金腐蚀; 孔蚀; 氯离子; 防冻液; 混合用水

**中图分类号:** TG172; U464.13 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)05-0244-05

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.05.039

## Typical Defects Analysis of Automotive Oil Cooler

XU Qiang, JIN Zhe-min, GU Guo-rong, LIU Xin, WANG Wen-dong

(FAW-Volkswagen Automotive Company Ltd, Changchun 130011, China)

**ABSTRACT:** The work aims to analyze typical defects of automotive automotive oil cooler, find root cause and make corresponding measures to prevent such problems from occurring repeatedly. Scope of faulty vehicles was defined by performing statistical analysis to distribution of the faulty vehicles. Microstructure of faulty position was observed with SEM, corrosion products around were analyzed with EDX and found to be mainly aluminum oxide, and chloride ions were also found. Allowing for previous corrosion theories and contrastive analysis, the corrosion was found to be mainly caused by penetration effect of chloride ions. According to statistical analysis of antifreeze and content measurement of chlorides ions in the antifreeze samples, the corrosion elements came from the coolant fluid. Based on analysis of mixing process, field inspection of depot emergency operation and simulation experiment, it could be determined that chloride ions in disinfectant were introduced into the mixing water in water storage tank in quantity due to improper operation by depot staff. As a result, the antifreeze was highly corrosive. The  $\text{Cl}^-$  content in mixing water samples to be mixed with the antifreeze was considerably higher than normal level. Too high  $\text{Cl}^-$  content in mixing water leads to penetration of passive film on the aluminum alloy, and causes a typical pitting failure of aluminum alloy finally.

收稿日期: 2016-12-10; 修订日期: 2017-02-10

Received: 2016-12-10; Revised: 2017-02-10

作者简介: 徐强 (1984—), 男, 工程师, 主要研究方向为车用油液品。

**Biography:** XU Qiang(1984—), Male, Engineer, Research focus: operational fluid.

通讯作者: 金喆民 (1977—), 男, 工程师, 主要研究方向为表面防护技术。

**Corresponding author:** JIN Zhe-min(1977—), Male, Engineer, Research focus: surface protection technology.

**KEY WORDS:** oil cooler; aluminum alloy corrosion; pitting; chloride ion; antifreeze; mixing water

机油冷却器是机油和防冻液共通的一个零部件。在发动机运转时, 机油黏度随着温度的上升而降低, 即润滑性降低, 并且蒸发损失逐渐增加。在高性能、大功率的强化发动机上, 由于热负荷大, 为了使机油维持一个较为合适的工作温度(90~120℃)<sup>[1]</sup>, 必须装设机油冷却器。机油冷却器布置在润滑油路中, 其工作原理与散热器相同。根据与机油进行热交换的介质不同, 将机油冷却器分为风冷式和水冷式两种。在普通轿车上, 一般采用水冷式降温, 即机油冷却器置于冷却系统中, 当机油温度高时, 靠冷却液降温, 当发动机启动时, 则可以从冷却液中吸收热量使润滑油迅速提高温度。这样做还能够使润滑系统的其他零部件, 特别是油封类的橡胶制品的寿命得到延长。常见的机油冷却器都是由铝合金钎焊工艺制成, 由于需要维持较大的热交换面积, 因此内部一般会做成较小的类似蜂窝状结构, 称其为板翅状结构<sup>[2]</sup>, 这就可能出现由于异物、防冻液结晶等造成的局部堵塞的常见失效现象。本文介绍一例由于防冻液自身的腐蚀性导致的机油冷却器失效的现象及具体的分析过程。

## 1 失效问题描述

某汽车主机厂发现部分车辆有防冻液报警的现象, 经过现场确认, 发现防冻液的量有异常缺少现象, 并且补充防冻液后, 很快还会重复出现防冻液报警的现象。经过专业人员现场检查发现, 报警是由于机油冷却器部位发生了防冻液泄露导致的, 并且发生泄漏的原因都是由于在图 1 中标识位置或附近发生了孔腐蚀。由于涉及车辆的机油冷却器失效现象都非常一致, 因此初步推测很可能是同一种原因导致。经过对失效车辆的车型、行驶里程、行驶地域、生产总装车间分布、初装防冻液加注时间、机油冷却器供应商以及供应商的生产时间进行统计分析, 发现失效车辆来自同一个总装车间, 生产下线时间和初装防冻液加注时间较为集中, 且涉及的机油冷却器来自于不同供应商。这说明失效与机油冷却器品牌无关, 仅与此段时间内的生产过程或加注液体有关, 具体来说, 此车间在向冷却器中加注液体这段时间内发生的变化, 很可能是导致机油冷却器发生失效的原因。

## 2 失效样件分析

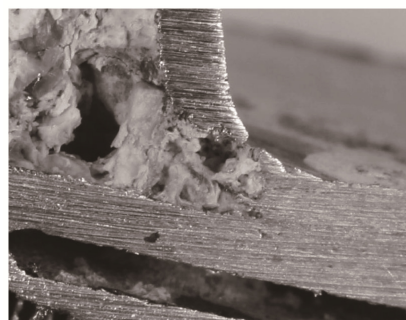
### 2.1 样件失效现象分析

通过分析发现, 几乎所有返回的失效机油冷却器在冷却液出口附近的弯折处, 都有目视清晰可见的腐

蚀孔。对比样件在腐蚀孔部位的剖面图和其内外部腐蚀情况发现, 在冷却液出口腔内有大量粉红色或黄色的堆积物, 而且腐蚀是从机油冷却器内部向外发生的。我们使用光学显微镜和扫描电子显微镜对失效样件的腐蚀部位进行了观察(图 1、2), 结果显示在



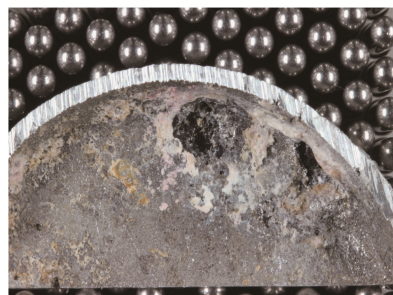
a 孔蚀处宏观照片



b 孔蚀处的纵切面



c 孔蚀处放大图



d 孔蚀处从内向外的观察图

图 1 腐蚀部位照片

Fig.1 Micro pictures of corrosion position: a) Macro photograph, b) Longitudinal section, c) Enlarged view, d) View from inside to outside

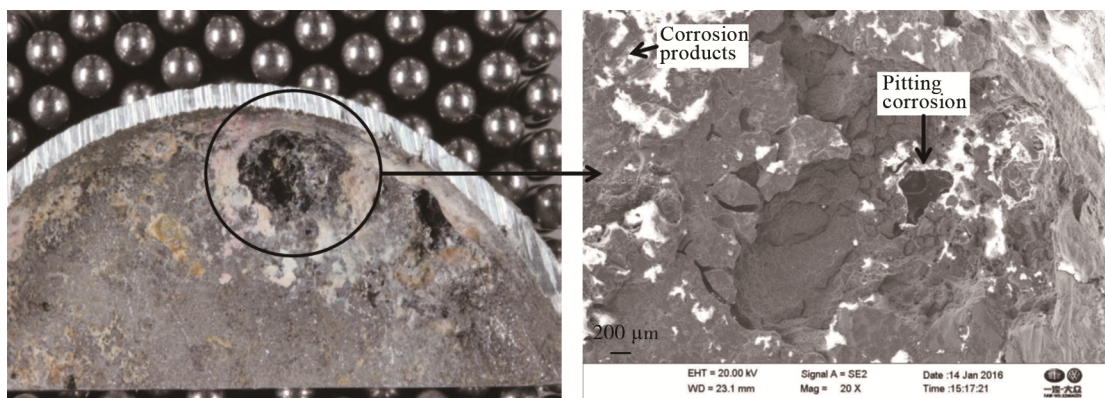


图2 泄露部位的 SEM 图  
Fig.2 SEM pictures of leakage point

腐蚀孔附近有大量的部位发生了腐蚀，腐蚀深度不一，并且有大量的腐蚀堆积物，为非常典型的孔蚀。

对腐蚀孔周围的腐蚀堆积物进行能谱分析，结果如图3所示，发现其主要成分是 Al、O 和 Si 元素，还含有少量的 Fe 和 Ca 元素。其中，Fe 元素可能是铝合金中的杂质，Ca 元素主要来自于水，Si 元素主要来自于防冻液添加剂，因此腐蚀产物的主要成分可能是铝的氧化物  $\text{Al}_2\text{O}_3$ <sup>[3-4]</sup> 或其水合物。此外，最重要的是在腐蚀产物和堆积物中发现了一定量的 Cl 元素，而活泼的  $\text{Cl}^-$  一般情况下是导致孔腐蚀的主要原因。

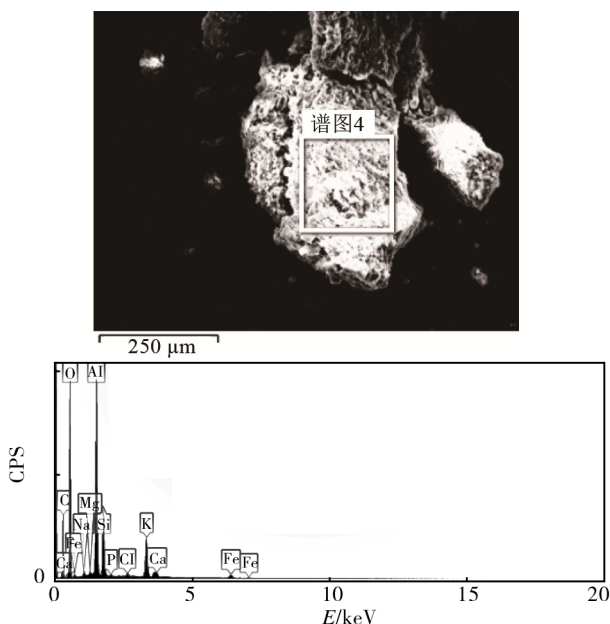


图3 腐蚀产物的能谱分析  
Fig.3 EDS results of corrosion dust

## 2.2 $\text{Cl}^-$ 腐蚀机理

铝合金表面有一层氧化膜，正常情况下能够较为有效地阻止腐蚀的发生。但铝合金表面的氧化膜不可能是均匀和完整的，必定有一些沟壑、褶皱等影响表

面均匀的结构缺陷<sup>[5-7]</sup>，这是氧化膜被破坏的内因<sup>[4]</sup>。介质中含有的  $\text{Cl}^-$  能够强烈吸附在金属表面，在氧化膜薄弱的地方，金属表现出较强的空余成键能力，吸附了较多的  $\text{Cl}^-$ ，这时氧化膜中的  $\text{O}^{2-}$  逐步被  $\text{Cl}^-$  取代，金属氧化物变成可溶性金属氯化物或与之形成复盐<sup>[8-9]</sup>，使氧化膜局部溶解。当氧化膜破裂显露出金属基体时，金属暴露的部分将发生阳极溶解，孔蚀便开始发生。而在氧化膜覆盖的金属表面，阴极反应消耗了阳极溶解产生的电子<sup>[10-11]</sup>。因此，一般情况下铝合金腐蚀的反应式如式(1)、(2)、(3)所示，机理示意图见图4。

阳极反应：



阴极反应可能有以下两种：

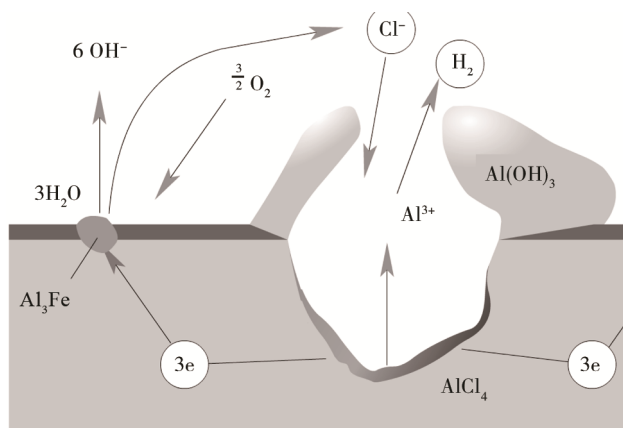
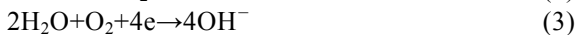


图4 铝合金  $\text{Cl}^-$  孔腐蚀机理图  
Fig.4 Corrosion pitting formation

随着腐蚀的发生，为了保持电荷的平衡，溶解的阳离子一部分从孔内向外流出，而  $\text{Cl}^-$  则由于电泳作用向孔内移动，这将使得孔内的腐蚀速度进一步增加。同时油冷器中的温度较高，将进一步加快腐蚀的速率<sup>[12-13]</sup>。此外，防冻液在孔蚀位置的流动速率相



对较慢，也有利于孔蚀的发生<sup>[14-15]</sup>。

结合图 2 中的 SEM 图像和  $\text{Cl}^-$  孔蚀的机理可以推测，机油冷却器的腐蚀很可能是非常典型的  $\text{Cl}^-$  导致的孔蚀。为了验证这个假设，对防冻液样品和混合用水样品中的  $\text{Cl}^-$  含量进行了检测。

2.3  $\text{Cl}^-$  含量检测

对返回的 5 个防冻液样品进行检测，其中 3 个来自已经售出的抱怨车，2 个来自同一时间生产但未售出的商品车。经过检测，结果见表 1。

表 1 防冻液样品  $\text{Cl}^-$  含量  
Tab.1  $\text{Cl}^-$  content in coolant samples

Car status	Coolant	$\text{Cl}^-/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	pH
complaint	Sample 1	830	6.91
	Sample 2	500	6.90
	Sample 3	339	6.60
unsold	Sample 4	179	7.87
	Sample 5	20	8.42

按照经验，防冻液中的  $\text{Cl}^-$  质量浓度不应该超过 20 mg/L，而从表 1 可以看出，防冻液样品中  $\text{Cl}^-$  质量浓度远远大于经验值，这说明这些  $\text{Cl}^-$  肯定是非正常状态混入的杂质或污染物。而同一天供货的来自同一槽车的防冻液原液在其他总装车间加注并没有引起相同车型的任何问题，这说明  $\text{Cl}^-$  并不是通过供货的防冻液原液带入的，而是由于该问题总装车间与其他总装车间，在防冻液入库至加注到车辆的整个过程不同之处导致的，因此对防冻液的混合和加注工艺进行分析。

2.4 混合加注工艺分析

防冻液的混合加注工艺简单，就是供应商使用槽车提供防冻液原液，在入厂检测合格后，在油库入库。入库后与经过特殊处理的混合用水按一定比例进行工艺混合，然后通过管路输送至车间的加注机进行加注。混合工艺示意图见图 5。每个总装车间都有一个对应的油库，而入厂的防冻液原液都是一样的，并且防冻液原液在储存、混合以及混合后的储存、输送基本都是密闭的，不存在从外界引入杂质或污染物的可能，因此， $\text{Cl}^-$  很可能是来自混合用水部分。

正常情况下，自来水需要依次经过粗滤、细滤，然后再进入水处理设备（反渗透膜原理）去除多余的离子，使之变成去离子水，然后与防冻液原液进行混合。由于此时已经变成了去离子水，因此基本是不会带入  $\text{Cl}^-$  的。此外，这个过程都是设备自动进行的，不需要人工干涉，而且水处理设备与混合水罐之间的连接都是密闭的，正常情况下混合水罐也不存在人为

引入杂质的可能性。

我们经过调查，发现在此阶段，该问题总装车间油库内的水处理设备因故障正在维修中，由于没有明确的备用方案，油库操作人员未经允许擅自使用塑料管从清洁池引自来水注入混合水罐中，这很可能是引入  $\text{Cl}^-$  杂质的主要渠道。

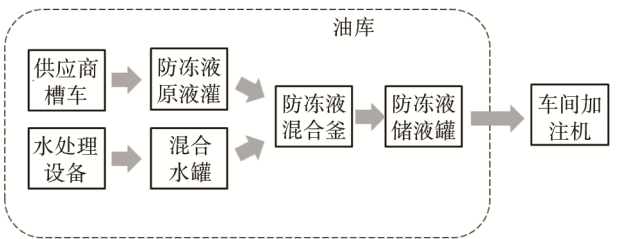


图 5 加注工艺示意图  
Fig.5 Filling process

2.5  $\text{Cl}^-$  来源分析

自来水中含有漂白粉（主要成分为  $\text{NaClO}$ ），分解后可以产生  $\text{Cl}^-$ ，这很可能是引入大量  $\text{Cl}^-$  的一个途径。由于已经无法获得当时的自来水样品，因此无法准确获得当时自来水中的  $\text{Cl}^-$  含量。但我们调查的政府自来水水质监控数据显示，一直来自自来水的  $\text{Cl}^-$  含量并没有异常的波动，并且都能维持在能够接受的范围，后续对自来水中  $\text{Cl}^-$  的检测也证明了这一点。因此  $\text{Cl}^-$  不太可能是从自来水中引入的，而是有其他的渠道。

在对此油库的现场检查中发现，之前引自来水注入储水罐的水管就放在清洁池的水龙头下面，在清洗时水会非常容易飞溅到水管中，此外在清洁池旁边发现了常见的某品牌的消毒液。经过询问现场工作人员得知，由于一些原因，需要经常在清洁池中使用消毒液清洗物品。而消毒液中一般都含有大量的  $\text{Cl}^-$ ，这很可能是引入  $\text{Cl}^-$  的另一个途径。之后我们按照工作人员每天使用消毒液的频次和使用方式进行了模拟实验，然后从水管中取出液体，检测其中的  $\text{Cl}^-$  质量浓度，进行了模拟计算，结果是如果这些液体与自来水混合全部进入储水罐后，储水罐混合用水中  $\text{Cl}^-$  质量浓度大约是 1000 mg/L，这个浓度与失效车防冻液中  $\text{Cl}^-$  质量浓度比较吻合。而且，当油库中水处理设备维修完毕后，制水过程又恢复了自动化过程， $\text{Cl}^-$  杂质的引入途径被切断，后续的车辆也未出现类似的问题。以上说明，此次失效车防冻液中的  $\text{Cl}^-$  杂质来源于被消毒液污染的水管。

2.6 失效位置分析

由于所有返回的失效机油冷却器都是在固定位置发生的孔蚀，因此对失效位置进行了简单的分析。机油冷却器中都是蜂窝状的小孔，冷却液从板翅小孔中流出

到机油冷却器冷却液出口附近时, 由于孔径突然变大, 流速显著降低, 并且在出口附近结构的迂回处流速将会变得非常低, 在这些位置会积聚一些防冻液带来的碎屑(例如金属碎屑、防冻液晶体颗粒等),  $\text{Cl}^-$  浓度也会局部相对变大。而且这些位置由于结构造型的变化, 机油冷却器壁变薄, 表面由于拉伸变形而产生不均匀等结构缺陷, 在这些位置将最先产生孔蚀。

### 3 结论

此案例中机油冷却器发生孔蚀的原因, 主要是由于混合用水带入大量的  $\text{Cl}^-$ , 导致防冻液带有了较强的腐蚀性, 在高温以及流动速率相对较低的位置形成孔蚀。通过对这个案例的分析, 我们可以知道, 在工业自动化生产的今天, 引起问题的可能不是占重要比重的正常生产过程, 而恰恰是发生异常时的应对措施。因此, 对于发生异常时的应急预案, 需要从技术、工艺等角度进行可行性、稳定性等评估, 确认无误后再投入使用。对于实施这些应急预案的人员, 也需要重点关注其在异常情况下是否能有效的应对。另外, 完全覆盖所有生产过程的过程审核也尤为重要。

#### 参考文献:

- [1] 刘志东, 史占军, 刘俊杰. 某汽油机机油冷却器芯片开裂失效分析[J]. 科技风, 2015(12): 75.  
LIU Zhi-dong, SHI Zhan-jun, LIU Jun-jie. A Failure Analysis of Oil Cooler with Chip Cracking[J]. Technology Wind, 2015(12): 75.
- [2] 杨连生. 内燃机设计[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1981.  
YANG Lian-sheng. Engine Design[M]. Beijing: China Agriculture Machine Press, 1981.
- [3] 马腾, 王振尧, 韩微. 铝和铝合金的大气腐蚀[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2004, 16(3): 155—161.  
MA Teng, WANG Zhen-yao, HAN Wei. A Review of Atmospheric Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2004, 16(3): 155—161.
- [4] 肖纪美. 腐蚀总论——材料的腐蚀及其控制方法[M]. 北京: 化学工业出版社, 1994: 32—43.  
XIAO Ji-mei. General Corrosion—Material Corrosion and Its Control Method[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1994: 32—43.
- [5] 崔昌军, 彭乔. 铝及铝合金的阳极氧化研究综述[J]. 全面腐蚀控制, 2002, 16(6): 12—17.  
CUI Chang-jun, PENG Qiao. The Summarization of the Research for the Anodic Oxidation Technique of Aluminum and Its Alloys[J]. Total Corrosion Control, 2002, 16(6): 12—17.
- [6] 周育红, 韩喜江, 周德瑞, 等. 铝及铝合金阳极氧化膜的封闭技术[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(11): 1325—1327.  
ZHOU Yu-hong, HAN Xi-jiang, ZHOU De-rui, et al. Techniques Used for Sealing of Anodized Aluminum and Aluminum Alloys[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003, 35(11): 1325—1327.
- [7] 马胜利, 井晓天. 铝及铝合金阳极氧化膜结构及其应用[J]. 兵器材料科学与工程, 1998(4): 54—57.  
MA Sheng-li, JING Xiao-tian. Structure of Anodic Oxide Films of Al and Its Alloys and Its Application[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 1998(4): 54—57.
- [8] 小泽昭弥. 现代电化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 1995: 132—133.  
KOZAWA A. Modern Electrochemistry[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1995: 132—133.
- [9] 管明荣.  $\text{Cl}^-$  离子对孔蚀的作用机理[J]. 青岛理工大学学报, 1997(3): 95—98.  
GUAN Ming-rong. The Action Mechanism of Anion  $\text{Cl}^-$  on Pitting Corrosion[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 1997(3): 95—98.
- [10] 战广深, 牟战旗. Al-Zn-In-Si 合金在 NaCl 溶液中的小孔腐蚀行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1996(9): 33—36.  
ZHAN Guang-shen, MOU Zhan-qi. Pitting Corrosion Behavior of Al-Zn-In-Si Alloy in NaCl Solution[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 1996(9): 33—36.
- [11] 战广深, 殷正安. NaCl 溶液中氯离子浓度对铝合金电偶腐蚀的影响[J]. 材料保护, 1994(2): 20—23.  
ZHAN Guang-shen, YIN Zheng-an. The Effect of Chloride Ion Concentration in NaCl Solution on Aluminum Alloy Galvanic Corrosion[J]. Materials Protection, 1994(2): 20—23.
- [12] 李克, 孙宝德, 王俊. 铸铝合金在潮湿大气中的腐蚀及其微观机制[J]. 上海交通大学学报, 1999(7): 791—792.  
LI Ke, SUN Bao-de, WANG Jun. Corrosion and Its Micro-mechanism of Aluminum Casting Alloy in Moist Atmosphere[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 1999(7): 791—792.
- [13] 马欣. 金属在含氯离子水介质中的腐蚀行为[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2005, 22(5): 5—9.  
MA Xin. Corrosion Behavior of Metals in Water Containing Chlorine Ions[J]. Corrosion & Protection in Petrochemical Industry, 2005, 22(5): 5—9.
- [14] 赵麦群. 金属的腐蚀与防护[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.  
ZHAO Mai-qun. Metal Corrosion and Protection[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.
- [15] 王艳波. 高浓度氯离子介质中铝、铜合金的腐蚀与防护研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005: 20—21.  
WANG Yan-bo. Study on Corrosion and Protection of Al and Cu Alloy in Environment with High-concentration of Chlorine Ion[D]. Chongqing: Chongqing University, 2005: 20—21.