

# 飞机蒙皮材料在醋酸钾型除冰液中腐蚀行为研究

胡豪<sup>1a</sup>, 林修洲<sup>1a,1b</sup>, 窦宝捷<sup>1a,1b</sup>, 梅拥军<sup>2</sup>, 羊锋<sup>1a</sup>, 罗淑文<sup>2</sup>, 赵薇<sup>1a</sup>

(1.四川轻化工大学 a.材料科学与工程学院 b.材料腐蚀与防护四川省重点实验室,  
四川 自贡 643000; 2.中国民航局第二研究所, 成都 610041)

**摘要:** **目的** 评价醋酸钾型除冰液能否用于飞机除冰以及对飞机蒙皮材料腐蚀性的影响。**方法** 采用 AutoLab 电化学工作站对飞机蒙皮材料在不同浓度缓蚀剂、无缓蚀剂醋酸钾型除冰液中的干湿交替腐蚀电化学行为进行分析, 通过扫描电镜观察其腐蚀前后表面形貌及涂层/基体金属界面形貌。**结果** 无缺陷飞机蒙皮涂层在除冰液中的阻抗模值高达  $2.78 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}^2$ , 而缺陷涂层的阻抗模值只有  $1.72 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}^2$ , 说明缺陷破坏了涂层的完整性, 降低了涂层的阻抗模值, 明显加速了飞机蒙皮材料的腐蚀。带缺陷飞机蒙皮试样经除冰液腐蚀不同周期后的低频区  $R_{ct}$  存在较大变化, 试样在高浓度无缓蚀剂除冰液中的  $R_{ct}$  始终低于在低浓度溶液中的  $R_{ct}$ ; 试验初期, 试样在高浓度除冰液中的  $R_{ct}$  较大, 说明此时缓蚀剂浓度较高, 缓蚀作用明显; 但随着腐蚀周期的延长,  $R_{ct}$  逐渐减小, 说明缓蚀剂逐渐失效, 高浓度除冰液的腐蚀性逐渐增强并高于低浓度除冰液。腐蚀实验后, 飞机蒙皮涂层表面和涂层/基体金属界面处存在一定的腐蚀产物; 人造缺陷破坏了涂层的完整性, 降低了涂层的结合力, 甚至产生局部剥离, 造成除冰液浸入, 在划痕处发生了较严重的膜下腐蚀。**结论** 醋酸钾型除冰液对飞机蒙皮材料存在一定的腐蚀性, 尤其是当涂层存在缺陷时, 腐蚀较为严重。

**关键词:** 飞机蒙皮; 除冰液; 铝合金; 腐蚀; 涂层; 电化学阻抗谱

**中图分类号:** TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)10-0239-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.10.027

## Corrosion Behavior of Aircraft Skin Material in Potassium Acetate Type Deicing Fluid

HU Hao<sup>1a</sup>, LIN Xiu-zhou<sup>1a,1b</sup>, DOU Bao-jie<sup>1a,1b</sup>, MEI Yong-jun<sup>2</sup>,  
YANG Feng<sup>1a</sup>, LUO Shu-wen<sup>2</sup>, ZHAO Wei<sup>1a</sup>

(1.a.School of Materials Science and Engineering, b.Materials Corrosion and Protection Key Laboratory of  
Sichuan Province, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China;  
2.The Second Research Institute of CAAC, Chengdu 610041, China)

收稿日期: 2019-09-05; 修订日期: 2020-02-24

Received: 2019-09-05; Revised: 2020-02-24

基金项目: 国家自然科学基金 (U1633118); 四川省青年科技创新研究团队项目 (2016TD0024); 四川轻化工大学研究生创新基金 (y2019028)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (U1633118), Sichuan Youth Science and Technology Innovation Research Team Project (2016TD0024), Graduate Innovation Fund of Sichuan University of Science & Engineering (y2019028)

作者简介: 胡豪 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为材料表面工程。

Biography: HU Hao (1996—), Male, Master, Research focus: material surface engineering.

通讯作者: 林修洲 (1974—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为材料失效与保护、材料表面工程。邮箱: linxiuzhou@163.com

Corresponding author: LIN Xiu-zhou (1974—), Male, Doctor, Professor, Research focus: material failure and protection, material surface engineering. E-mail: linxiuzhou@163.com

通讯作者: 窦宝捷 (1989—), 男, 博士, 主要研究方向为材料腐蚀与防护、材料表面工程。邮箱: baojiedou@163.com

Corresponding author: DOU Bao-jie (1989—), Male, Doctor, Research focus: material corrosion and protection, material surface engineering. E-mail: baojiedou@163.com

引文格式: 胡豪, 林修洲, 窦宝捷, 等. 飞机蒙皮材料在醋酸钾型除冰液中腐蚀行为研究[J]. 表面技术, 2020, 49(10): 239-246.

HU Hao, LIN Xiu-zhou, DOU Bao-jie, et al. Corrosion behavior of aircraft skin material in potassium acetate type deicing fluid[J]. Surface technology, 2020, 49(10): 239-246.

**ABSTRACT:** The work aims to evaluate whether the potassium acetate type deicing fluid can be used for aircraft deicing and its effect on the corrosiveness of aircraft skin materials. AutoLab electrochemical workstation was used to analyze the electrochemical behavior of aircraft skin materials in different concentrations of potassium acetate type deicing fluid with and without corrosion inhibitor. The surface morphology before and after corrosion and the surface morphology of coating/matrix metal interface were observed by scanning electron microscopy. The impedance modulus of complete aircraft skin coating in deicing fluid was as high as  $2.78 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}^2$ , while the impedance modulus of defective coating was only  $1.72 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}^2$ , which indicated that defects damaged the integrity of the coating, reduced the impedance mode value of the coating, and significantly accelerated the corrosion of aircraft skin materials. The time constant in the low frequency region of the aircraft skin with defects after different cycles of deicing fluid corrosion had a great change, and the  $R_{ct}$  of the samples in the high concentration deicing fluid without inhibitor was always lower than that in the low concentration solution. The  $R_{ct}$  of the samples in the high concentration deicing fluid at the initial stage of the test was larger, indicating that the inhibitor concentration was higher at this time, and the corrosion inhibition effect was obvious. However, with the extension of the corrosion cycle, the  $R_{ct}$  gradually decreased, indicating that the corrosion inhibitor gradually failed, and the corrosiveness of high concentration deicing fluid gradually increased and was higher than that of low concentration deicing solution. After the corrosion test, there were some corrosion products on the surface of the aircraft skin coating and the interface between the coating and the base metal. The artificial defects damaged the integrity of the coating, reduced the adhesion of the surrounding coating, and even produced local peeling, resulting in the immersion of deicing fluid, and serious corrosion under the coating around the scratch. Potassium acetate type deicing fluid has certain corrosiveness to aircraft skin materials, especially when the coating has serious corrosion defects.

**KEY WORDS:** aircraft skin; deicing fluid; aluminum alloy; corrosion; coating; electrochemical impedance

在冬季低温气象条件下,飞机表面极易凝结冰、霜和积雪等沉积物,严重危害飞机的飞行安全<sup>[1]</sup>。过去已发生过多起因飞机低温结冰而导致的灾难性事故<sup>[2-3]</sup>。目前,国际上应对飞机结冰/防冰最有效的方式是使用飞机除冰/防冰液。

飞机除冰液主要有四种类型:I型、II型、III型和IV型。I型飞机除冰液的标准<sup>[4-7]</sup>规定I型飞机除冰液的冰点降低剂可以为醇基型和非醇基型化合物。由于其成分原因,醇基型除冰液的COD值和BOD值极高,其废液严重影响机场周围的生态环境<sup>[8-10]</sup>。用于跑道除冰的碱金属有机酸盐型除冰液经济成本较低,防冰/除冰效果好,并且COD值和BOD值极低,不涉及环境污染问题。I型飞机除冰液的标准也没有限制碱金属有机酸盐作为飞机除冰液使用,但该除冰液能否用于飞机除冰,目前没人进行过系统研究。

目前,大多机型的机身蒙皮、机翼下蒙皮、长桁、弦梁和水平机翼下表面仍主要使用2024铝合金<sup>[11-12]</sup>。但是2024铝合金的耐蚀性较差<sup>[12]</sup>,须对其进行表面防护或涂覆涂层。文献调研发现<sup>[13-15]</sup>,目前飞机铝蒙皮材料表面的涂层体系主要包括环氧聚酰胺类或聚氨酯类底漆层和双组分脂肪族聚氨酯面漆层,且须符合MIL-P-23377<sup>[16]</sup>和MIL-PRF-85285标准<sup>[17]</sup>的要求。

蒙皮材料在飞机维护、维修时以及起飞和降落过程中,粉尘和砂石等微粒的冲击难免会对蒙皮表面涂层造成损伤或划痕<sup>[18]</sup>,这些损伤导致腐蚀介质渗入到涂层/铝合金基体界面,导致铝合金基体发生腐蚀。

目前已有学者对飞机铝合金及其涂层的腐蚀失效进行了研究<sup>[19-25]</sup>,但大多是研究其在海洋大气环境中的腐蚀行为,并未考虑或涉及到除冰液(或其他航化产品)对飞机蒙皮材料的腐蚀影响及腐蚀机理。飞机除冰液在使用时,常形成动态薄液膜、干湿交替等复杂状态,造成飞机蒙皮材料腐蚀。本文对飞机蒙皮材料在醋酸钾型除冰液中干湿交替腐蚀行为进行研究,探讨干湿交替周期、除冰液浓度、缓蚀剂等对蒙皮材料腐蚀的影响,为探讨碱金属有机酸盐型除冰液是否可作为飞机除冰液提供理论基础及数据支撑,为现行除冰液的生产及使用提供建议和指导。

## 1 实验

实验材料选择2024-T3铝合金,化学成分(质量分数)为:Si 0.5%,Fe 0.5%,Cu 3.8%~4.9%,Mn 0.3%~0.9%,Mg 1.2%~1.8%,Cr 0.1%,Zn 0.25%,Ti 0.15%,Al余量。加工成50 mm×40 mm×5 mm的矩形试样,经砂纸逐级打磨至1000#,再由丙酮除油,蒸馏水冲洗,冷风干燥,采用HB/Z118—1987<sup>[26]</sup>制备铬酸阳极氧化膜。根据相关文献<sup>[13-15]</sup>,制备环氧聚酰胺底漆+聚氨酯面漆涂层体系。先涂覆一层底漆,厚度为15~20 μm,再涂覆三层面漆,每层厚度为10~15 μm。用测厚仪测量涂层总体厚度并控制在(65±5) μm。缺陷试样为:在制备好的试样表面刻划长度为1000 μm、宽度为100 μm的划痕,划痕需穿透至

基体。

腐蚀溶液由中国民用航空总局第二研究所提供, 有两类, 一类是添加缓蚀剂的醋酸钾型除冰液产品 (以下简称除冰液, 用 N6 表示), 另一类是生产过程中尚未添加缓蚀剂的醋酸钾型除冰液 (以下简称无缓蚀剂除冰液, 用 Non 表示)。在实际应用中, 飞机除冰液以原液为基础并稀释为 50% (体积分数) 再使用, 并且使用过程中会被冰霜和积雪不断稀释, 所以本实验采用原液加去离子水配制成为积分数为 10%、50% 的腐蚀溶液。采用干湿交替腐蚀试验, 试验时, 浸泡处理 4 h, 干燥处理 4 h, 在浸泡处理时测试其电化学性能, 一个循环周期记为 1 T, 共处理 50 T。

采用 AutoLab 电化学工作站进行电化学阻抗谱和极化曲线测试。测试体系为三电极体系, 辅助电极为铂片电极, 参比电极为饱和甘汞电极。电化学阻抗谱测试的扰动电位为 10 mV (vs.OCP), 测量频率范围为  $10^{-2}$ ~ $10^5$  Hz, 测试数据用 ZSimpWin 软件进行分析。极化曲线测试的扫描速度为 0.001 V/s, 极化范围为 -0.6~2.0 V (vs.OCP), 测试数据用 Origin 软件进行分析。采用 VEGA 3 SBU 型扫描电子显微镜观察试

样腐蚀前后的表面形貌。

## 2 结果与讨论

### 2.1 电化学阻抗谱分析

#### 2.1.1 缺陷对试样腐蚀行为的影响

无缺陷涂层和有缺陷涂层试样在除冰液中腐蚀后的电化学阻抗谱如图 1 所示, 采用图 2a 所示的等效电路图对图 1 的电化学阻抗谱进行拟合。图 2 中, 当低频区未出现扩散特征时, 采用等效电路图 2a; 当低频区出现扩散特征时, 采用等效电路图 2b。其中,  $R_s$  为溶液电阻,  $R_c$  为涂层与腐蚀产物膜的总电阻,  $R_{ct}$  为电荷转移电阻,  $Q_1$  和  $Q_2$  为常相位角元件,  $W$  为 Warburg 阻抗。从图 1a 中可以看出, 无缺陷涂层试样的阻抗模值高达  $2.78 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}^2$ , 而缺陷涂层试样的阻抗模值只有  $1.72 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ; 图 1b 中无缺陷涂层试样只有一个时间常数, 而缺陷涂层试样有两个时间常数。说明缺陷破坏了涂层的完整性, 降低了涂层的阻抗模值, 使腐蚀介质直接接触铝合金基体而发生腐蚀。

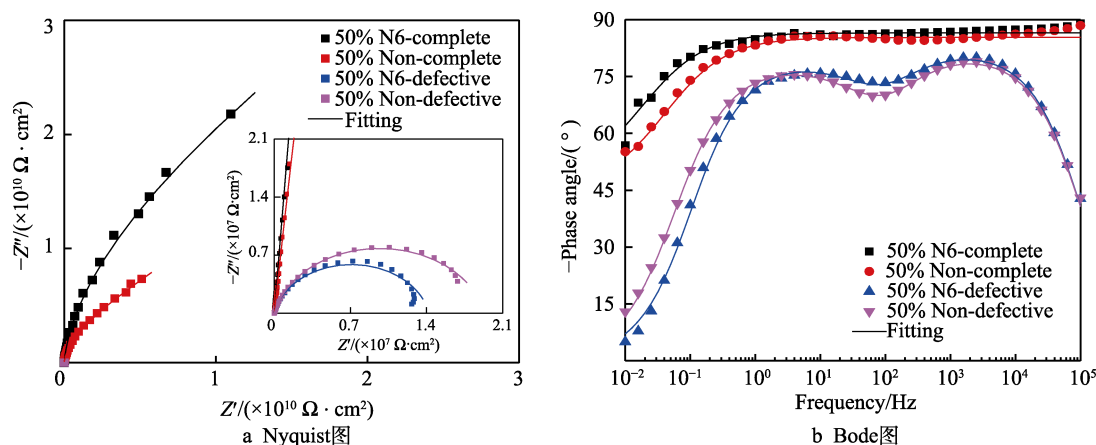


图 1 无缺陷涂层和有缺陷涂层试样在 50% 除冰液中的电化学阻抗谱

Fig.1 EIS of complete coating and defective coating samples in 50% deicing fluid: (a) Nyquist diagram; (b) Bode diagram

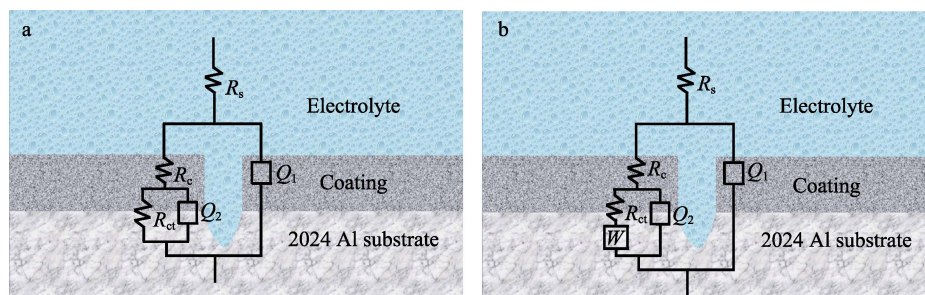


图 2 电化学阻抗谱等效电路图

Fig.2 Equivalent electrical circuit diagram of EIS

#### 2.1.2 试样在除冰液中干湿交替腐蚀行为分析

图 3 为试样在 10%、50% 除冰液中处理不同干湿交替周期后的 Nyquist 图和 Bode 图。由图 3 的 Nyquist 图可以看出, 试样在两种不同浓度的除冰液中具有相

同的变化趋势, 容抗弧半径总体呈先减小后增大再减小的变化, 在第 15 T 时达到最大。从图 3 腐蚀不同周期后的 Bode 图中可以看出存在两个时间常数, 分别在高频区和低频区。在高频区对应的时间常数变化

不大,区别主要来自于低频区的时间常数。与高频区对应的时间常数来自于涂层电容和膜电阻的贡献,与低频区对应的时间常数则来自于界面双电层电容和

基底金属腐蚀反应电荷转移电阻的贡献<sup>[27]</sup>。由此说明,随着干湿交替腐蚀周期的不断进行,发生变化的主要是电荷转移电阻,此处主要讨论电荷转移电阻的变化。

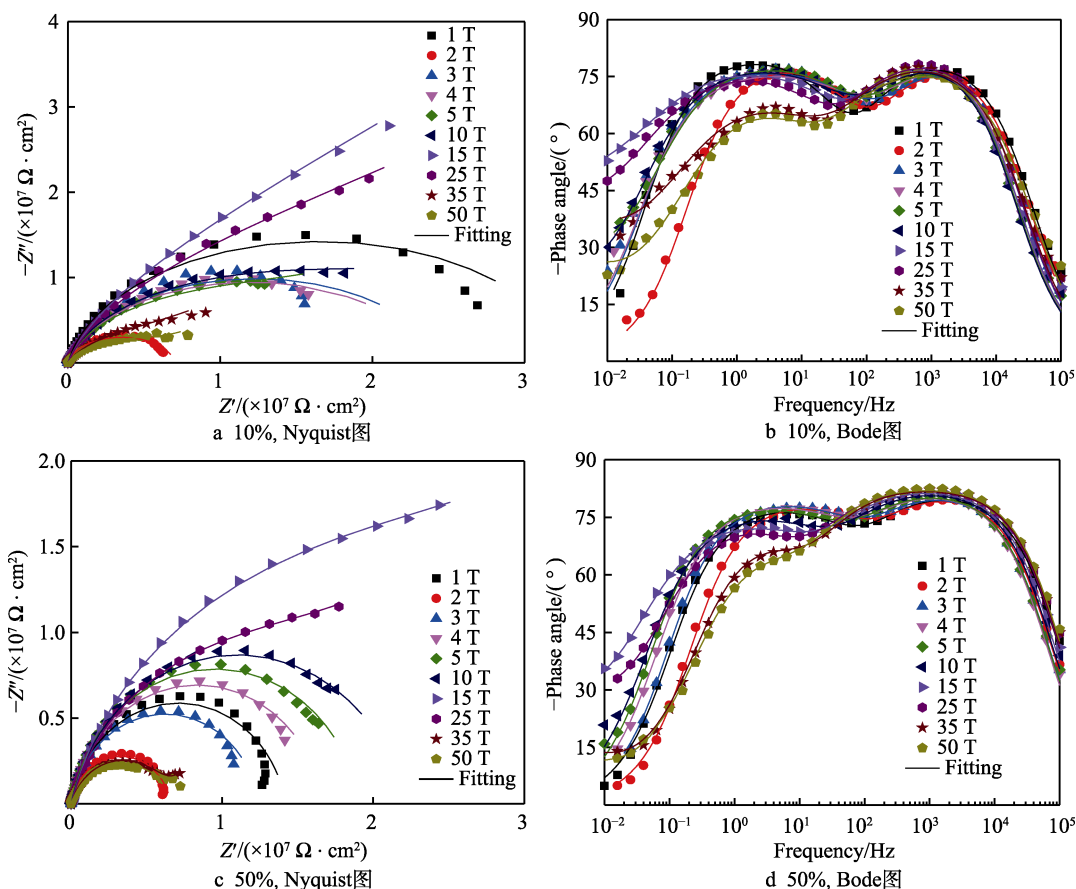


图3 试样在不同浓度除冰液中腐蚀不同周期的电化学阻抗谱

Fig.3 EIS of samples corroded in different concentrations of deicing fluid for different periods: (a) 10%, Nyquist diagram; (b) 10%, Bode diagram; (c) 50%, Nyquist diagram; (d) 50%, Bode diagram

采用图2所示的等效电路图对图3所示电化学阻抗谱进行拟合,其中1~25 T用图2a拟合,35 T、50 T用图2b拟合,对拟合得到的 $R_{ct}$ 在不同浸泡周期作图,得到不同浓度除冰液中腐蚀不同周期后的 $R_{ct}$ 变化图,如图4所示。

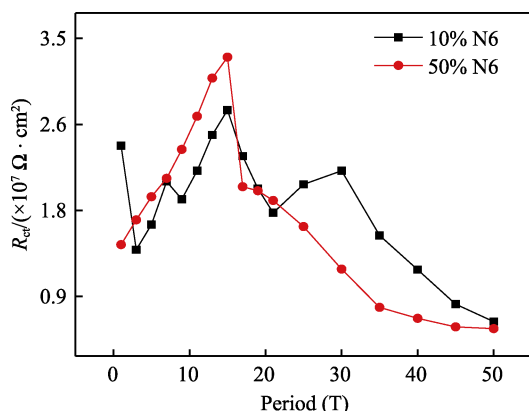


图4 试样在不同浓度除冰液中腐蚀不同周期后的 $R_{ct}$ 变化图  
Fig.4  $R_{ct}$  variation of samples corroded in different concentrations of deicing fluid for different periods

由图4可以看出,在10%和50%除冰液中电荷转移电阻的变化趋势基本一致,总体呈增大-减小的变化趋势,在10%除冰液中存在较大的波动,且经过50 T的腐蚀后,电荷转移电阻都小于初始状态。干湿交替腐蚀初期,试样在50%除冰液中的电荷转移电阻较大,腐蚀中期两者的电荷转移电阻差别不大,腐蚀后期试样在10%除冰液中的电荷转移电阻较大。由此可知,在干湿交替腐蚀初期,10%除冰液的腐蚀性大于50%除冰液;腐蚀后期,50%除冰液的腐蚀性较大。

### 2.1.3 试样在无缓蚀剂除冰液中干湿交替腐蚀行为分析

图5为试样在10%、50%无缓蚀剂除冰液中处理不同干湿交替周期后的Nyquist图和Bode图。由图5中的Nyquist图可以看出,两者的容抗弧半径同样呈先增大后减小的变化趋势,试样在50%无缓蚀剂除冰液中的容抗弧半径比在10%无缓蚀剂除冰液中的普遍更小。从图5腐蚀不同周期后的Bode图中可以看出,同样存在两个时间常数,分别在高频区和低频区,两者的差别同样来自于低频区的时间常数。



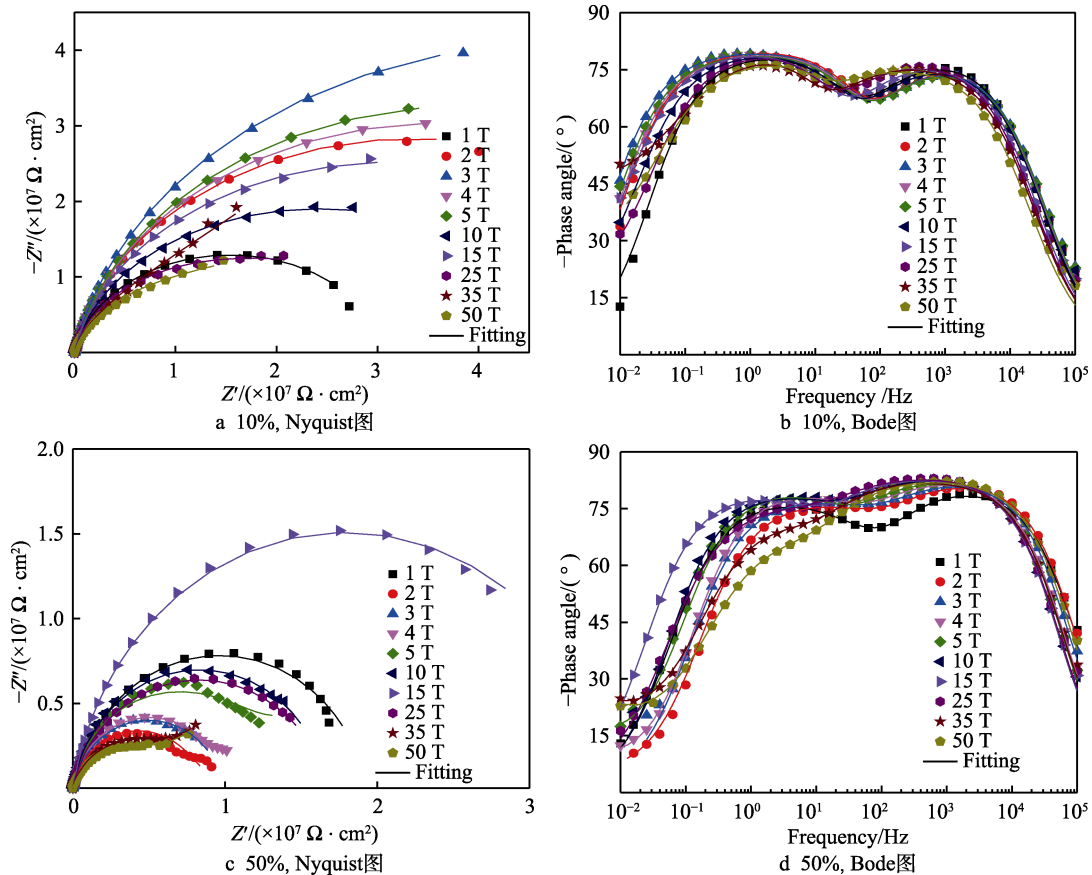


图 5 试样在不同浓度无缓蚀剂除冰液中腐蚀不同周期的电化学阻抗谱

Fig.5 EIS of samples corroded in different concentrations of non-inhibitor deicing fluid for different periods: (a) 10%, Nyquist diagram; (b) 10%, Bode diagram; (c) 50%, Nyquist diagram; (d) 50%, Bode diagram

同样采用图 2 所示的等效电路图对图 5 所示电化学阻抗谱进行拟合, 其中 1~25 T 用图 2a 拟合, 35 T、50 T 用图 2b 拟合, 对拟合得到的  $R_{ct}$  在不同浸泡周期下作图, 得到在不同浓度无缓蚀剂除冰液中腐蚀不同周期后的  $R_{ct}$  变化图, 如图 6 所示。

由图 6 可以看出, 试样在 10% 无缓蚀剂除冰液中的电荷转移电阻总体呈先增大后逐渐减小的变化趋势,

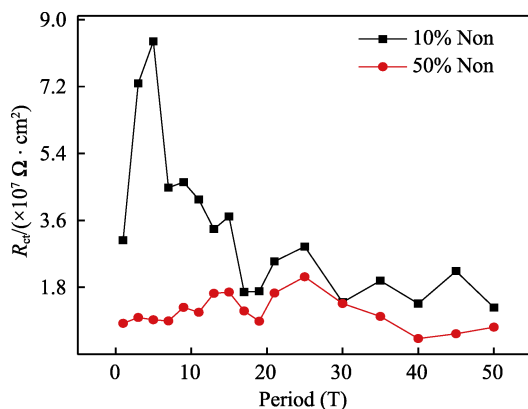
图 6 试样在不同浓度无缓蚀剂除冰液中腐蚀不同周期后的  $R_{ct}$  变化图

Fig.6  $R_{ct}$  variation of samples corroded in different concentrations of non-inhibitor deicing fluid for different periods

势, 在 50% 无缓蚀剂除冰液中的电荷转移电阻总体呈波动趋势且变化不大。对比两者可以发现, 干湿交替腐蚀初期, 试样在 10% 无缓蚀剂除冰液中的电荷转移电阻较大, 腐蚀中后期两者的电荷转移电阻呈波动趋势, 差别不大。总体来说, 试样在 50% 无缓蚀剂除冰液中的电荷转移电阻普遍小于在 10% 无缓蚀剂除冰液中的电荷转移电阻。由此说明, 随着干湿交替腐蚀周期的进行, 50% 无缓蚀剂除冰液的腐蚀性总体大于 10% 无缓蚀剂除冰液。

#### 2.1.4 缓蚀剂对试样在除冰液中干湿交替腐蚀行为的影响

由于 10% 除冰液的缓蚀剂浓度较低, 此处主要讨论 50% 除冰液。图 7 为试样在 50% 除冰液和无缓蚀剂除冰液中腐蚀不同周期后的  $R_{ct}$  变化图, 从图中可以看出, 在干湿交替腐蚀初期, 试样在无缓蚀剂除冰液中的电荷转移电阻明显小于在有缓蚀剂除冰液中的电荷转移电阻; 在腐蚀后期, 两者相差不大, 总体呈下降的趋势。由此说明, 缓蚀剂在干湿交替腐蚀初期能起到一定的缓蚀作用, 且缓蚀剂的作用时间有限, 在腐蚀后期, 有无缓蚀剂对试样腐蚀速度的影响差别不大。

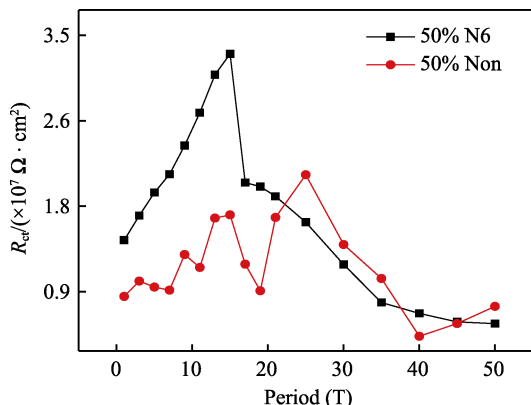


图7 试样在有无添加缓蚀剂除冰液中腐蚀不同周期后的 $R_{ct}$ 变化图

Fig.7  $R_{ct}$  variation of samples corroded in deicing fluid with or without corrosion inhibitor for different periods

## 2.2 极化曲线分析

图8为试样在50%两种不同除冰液中干湿交替腐蚀1 T和50 T的极化曲线结果,此处只讨论50%的情况,在10%的除冰液中具有相同的结果。从图8及表1中的拟合结果可知,经过50 T的干湿交替腐蚀后,试样在两种除冰液中的腐蚀电位均正移,腐蚀

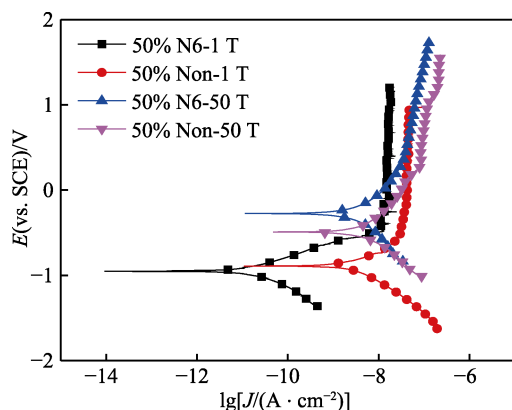


图8 试样在50%不同除冰液中腐蚀1 T和50 T的极化曲线  
Fig.8 1 T and 50 T polarization curves of samples corroded in different deicing fluids with 50% concentration

表1 试样在50%不同除冰液中的极化曲线拟合结果  
Tab.1 Polarization curves fitting results of samples in different deicing fluids with 50% concentration

Project	1 T		50 T	
	50%N6	50%Non	50%N6	50%Non
$E_{corr}/V$	-0.953	-0.891	-0.274	-0.491
$J_{corr}/(A \cdot cm^{-2})$	$1.184 \times 10^{-11}$	$1.343 \times 10^{-9}$	$1.576 \times 10^{-9}$	$2.949 \times 10^{-9}$

倾向减小。在1 T和50 T的腐蚀后,试样在无缓蚀剂除冰液中的腐蚀电流密度均大于有缓蚀剂除冰液中的腐蚀电流密度,且在1 T时两者相差更大,在50 T时两者差距很小,由此同样说明缓蚀剂在干湿交替腐蚀初期能起到一定的缓蚀作用,降低试样的腐蚀电流密度;腐蚀后期缓蚀剂的作用有限,有无缓蚀剂对除冰液的腐蚀性影响不大。

## 2.3 腐蚀形貌

图9为试样在不同除冰液中干湿交替腐蚀前后远离缺陷处涂层的扫描电镜图。从图9a中可以看出,腐蚀前试样表面比较平整光洁,腐蚀后试样表面生成了许多片状或絮状的腐蚀产物。对比图9b、图9c两图可以发现,无缓蚀剂除冰液腐蚀后的腐蚀更多、更密集,说明除冰液在无缓蚀剂时的腐蚀性更强。

从图10飞机蒙皮试样缺陷处的截面图和腐蚀前后的表面形貌图可以看出,涂层厚度在65  $\mu m$ 左右,涂层缺陷宽度在100  $\mu m$ 左右。腐蚀前缺陷周围较为平整光滑,腐蚀后缺陷周围的涂层有所破损,涂层有剥离的迹象。

将腐蚀前后划痕周围的涂层剥离后,观察到的扫描电镜如图11所示。从图11中可以看出,干湿交替腐蚀前,涂层/基体金属界面存在一些阳极氧化膜孔隙,界面较干净;腐蚀后,界面孔隙处有腐蚀产物堆积,其他部位也存在一些沉淀或絮状物,说明此时已经发生了膜下腐蚀,降低涂层的结合力,甚至造成涂层剥离,暴露铝合金基体发生更严重的腐蚀。

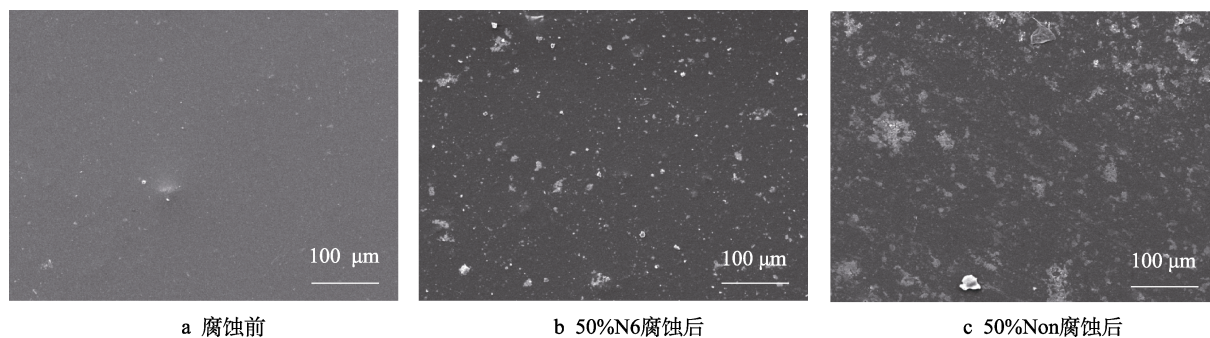


图9 试样在不同除冰液中腐蚀前后的表面形貌

Fig.9 Surface morphologies of samples before and after corrosion in different deicing fluids: (a) before corrosion; (b) after 50% N6 corrosion; (c) after 50% Non corrosion



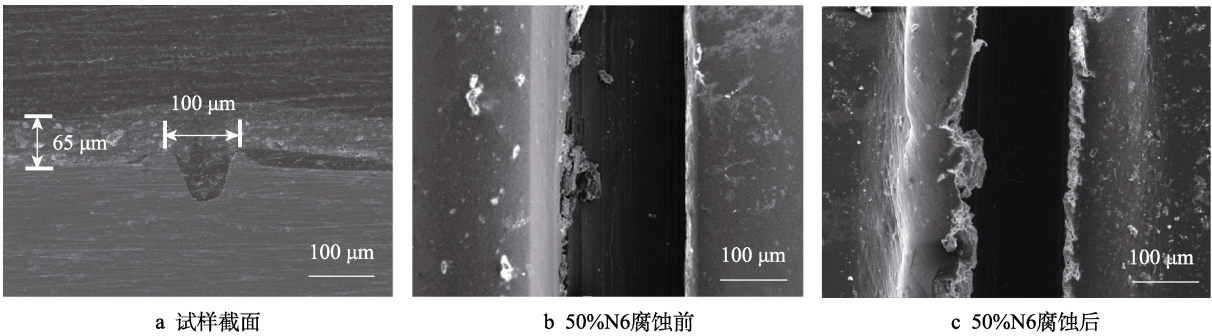


图 10 试样截面图和 50%除冰液中腐蚀前后的表面形貌

Fig.10 Cross section diagram and surface morphologies of samples before and after corrosion in 50% deicing fluid: (a) cross section of specimen; (b) before corrosion in 50%N6; (c) after corrosion in 50%N6

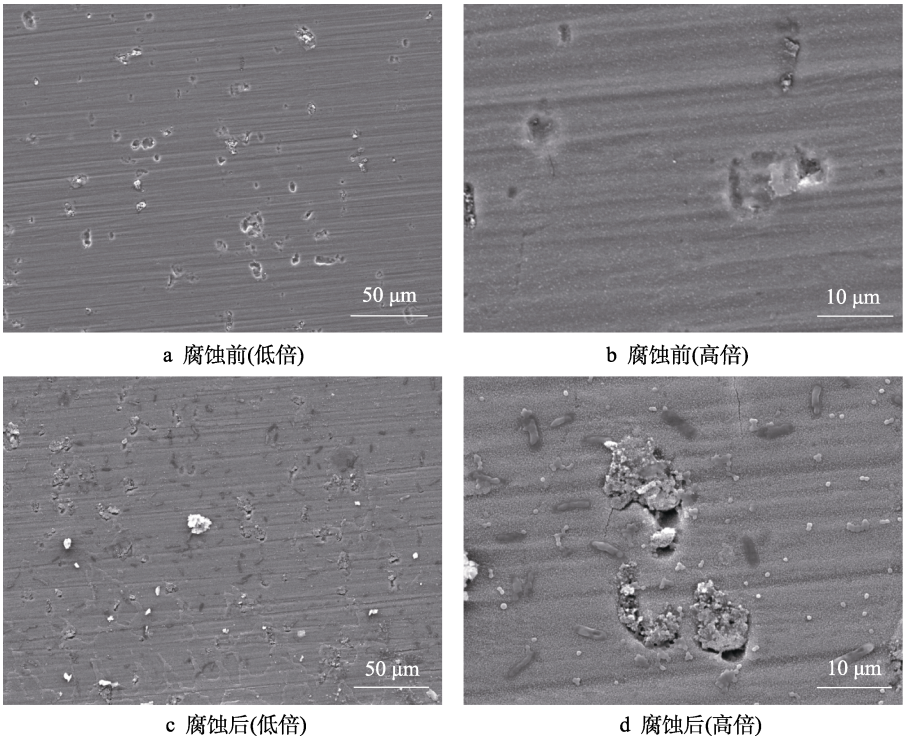


图 11 试样在 50%除冰液中腐蚀前后涂层/基体界面 SEM 图

Fig.11 Surface morphologies of coating/matrix metal interface before and after corrosion in 50% deicing fluid: (a), (b) before corrosion; (c), (d) after corrosion

### 3 结论

1) 醋酸钾型除冰液对飞机蒙皮材料存在一定的腐蚀性,当涂层存在缺陷时尤为明显。缺陷涂层经醋酸钾型除冰液干湿交替腐蚀不同周期后的 Bode 图中存在两个时间常数,高频区时间常数对应的涂层电阻变化不大,低频区时间常数对应的基体金属腐蚀反应的电荷转移电阻存在较大变化。

2) 未加缓蚀剂的除冰液对飞机蒙皮材料有一定的腐蚀性,高浓度除冰液的腐蚀性始终高于低浓度。缓蚀剂对飞机蒙皮材料在除冰液中的腐蚀有较好的缓蚀作用,但其效果受到除冰液浓度和使用时间的影响较大。试验初期,高浓度除冰液中缓蚀剂浓度较高,缓蚀作用明显;但随着腐蚀周期的延长,缓蚀剂逐渐失效,

高浓度除冰液的腐蚀性逐渐增强并高于低浓度除冰液。

3) 腐蚀试验后,在远离缺陷处的涂层表面存在少量絮状腐蚀产物。人造缺陷(划痕)破坏了涂层的完整性,降低了涂层的结合力,甚至产生局部剥离,造成除冰液浸入,在划痕处发生膜下腐蚀。

#### 参考文献:

[1] 胡琪,黄安平,孙涛,等. 机翼防/除冰技术研究进展[J]. 科技导报, 2015, 33(7): 114-119.  
HU Qi, HUANG An-ping, SUN Tao, et al. Progress of airfoil anti-icing and de-icing technologies[J]. Science & technology review, 2015, 33(7): 114-119.

[2] CAO Yi-hua, TAN Wen-yuan, WU Zhen-long. Aircraft icing: An ongoing threat to aviation safety[J]. Aerospace science and technology, 2018(75): 353-385.

- [3] 胡超, 白清顺, 白锦轩, 等. 疏水性微结构表面的抗结冰特性仿真研究[J]. 表面技术, 2016, 45(9): 145-153.  
HU Chao, BAI Qing-shun, BAI Jin-xuan, et al. Simulation research of the anti-icing micro-structured surface[J]. Surface technology, 2016, 45(9): 145-153.
- [4] SAE AMS 1424, Deicing/anti-icing fluid, aircraft, SAE type I [S].
- [5] ISO 11075—2007, Aircraft deicing/anti-icing fluids-ISO type I [S].
- [6] MH 6001—2000, 飞机除冰/防冰液(ISO I 型)[S].  
MH 6001—2000, Aircraft deicing/anti-icing fluids (ISO type I) [S].
- [7] GB/T 20856—2012, 航空器牛顿型除冰防冰液I型[S].  
GB/T 20856—2012, Aircraft Newton type deicing and anti-icing fluid type I [S].
- [8] 夏祖西, 彭华乔, 苏正良, 等. 机场除冰液对环境的影响[J]. 中国民用航空, 2008, 93(9): 51-52.  
XIA Zu-xi, PENG Hua-qiao, SU Zheng-liang, et al. Impact of airport de-icing fluid on the environment[J]. China civil aviation, 2008, 93(9): 51-52.
- [9] CORSI S R, BOOTH N L, HALL D W. Aircraft and runway deicers at general mitchell international airport, biochemical oxygen demand and dissolved oxygen in receiving streams[J]. Environmental toxicology and chemistry, 2001, 20(7): 1474-1482.
- [10] FREEMAN A I, SURRIDGE B W J, MATTHEWS M, et al. Understanding and managing de-icer contamination of airport surface waters: A synthesis and future perspectives[J]. Environmental technology & innovation, 2015(3): 46-62.
- [11] 刘兵, 彭超群, 王日初, 等. 大飞机用铝合金的研究现状及展望[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(9): 1705-1715.  
LIU Bing, PENG Chao-qun, WANG Ri-chu, et al. Recent development and prospects for giant plane aluminum alloys[J]. The Chinese journal of nonferrous metals, 2010, 20(9): 1705-1715.
- [12] DURSUN T, SOUTIS C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys[J]. Materials and design, 2014(56): 862-871.
- [13] 陆文明, 季建霞, 赵宝华, 等. 飞机蒙皮表面的预处理及涂装[J]. 上海涂料, 2016, 54(4): 13-18.  
LU Wen-ming, JI Jian-xia, ZHO Bao-hua, et al. The pretreatment and coating of aircraft skin surface[J]. Shanghai coatings, 2016, 54(4): 13-18.
- [14] YASAKAU K A, KUZNETSOVA A, KALLIP S, et al. A novel bilayer system comprising LDH conversion layer and sol-gel coating for active corrosion protection of AA2024[J]. Corrosion science, 2018(143): 299-313.
- [15] 周如东. 飞机蒙皮表面处理和涂层选择及涂装工艺[J]. 涂层与防护, 2018, 39(6): 51-54.  
ZHOU Ru-dong. Surface treatment and coating process of aircraft skin[J]. Coating and protection, 2018, 39(6): 51-54.
- [16] MIL-PRF-23377, Primer coatings: Epoxy, high solids[S].
- [17] MIL-PRF-85285, Coating: Polyurethane, aircraft and support equipment[S].
- [18] 于美, 刘建华, 李松梅. 航空铝合金腐蚀防护与检测方法[M]. 北京: 科学出版社, 2017.  
YU Mei, LIU Jian-hua, LI Song-mei. Corrosion protection and detection method of aviation aluminum alloy[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [19] 刘旭. 飞机铝合金结构腐蚀与防护研究[J]. 世界有色金属, 2015(11): 103-104.  
LIU Xu. Study on corrosion and protection of aircraft aluminum alloy structure[J]. World nonferrous metals, 2015(11): 103-104.
- [20] DONG C F, SHENG H, AN Y H, et al. Corrosion of 7A04 aluminum alloy under defected epoxy coating studied by localized electrochemical impedance spectroscopy[J]. Progress in organic coatings, 2010, 67(3): 269-273.
- [21] 苏景新, 白云, 关庆丰, 等. 飞机蒙皮结构表面涂层失效的电化学阻抗分析[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2013, 33(3): 251-256.  
SU Jing-xin, BAI Yun, GUAN Qing-feng, et al. Electrochemical impedance spectroscopy analysis of failure of aircraft surface coating[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2013, 33(3): 251-256.
- [22] 王在俊. 民用飞机蒙皮腐蚀研究[J]. 中国民航飞行学院学报, 2011, 22(1): 31-34.  
WANG Zai-jun. Study on the corrosion of civil aviation aircraft skin[J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China, 2011, 22(01): 31-34.
- [23] 黄领才, 刘慧丛, 谷岸, 等. 沿海环境下服役飞机铝合金零件的表面涂层破坏与腐蚀[J]. 航空学报, 2009, 30(6): 1144-1149.  
HUANG Ling-cai, LIU Hui-cong, GU An, et al. Failure and corrosion of coating on aluminum alloy parts used on airplanes serving in coastal environment[J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2009, 30(6): 1144-1149.
- [24] 陈朝轶, 杨京, 李军旗, 等. 模拟海洋大气环境下  $\text{Cl}^-$  质量分数对 3003 铝合金腐蚀行为的影响[J]. 表面技术, 2015, 44(3): 116-121.  
CHEN Chao-yi, YANG Jing, LI Jun-qi, et al. Effect of chloride ion concentration on corrosion behavior of 3003 aluminum alloy in simulated marine atmospheric environment[J]. Surface technology, 2015, 44(3): 116-121.
- [25] 沈雁, 王红星. 负向电压对海洋平台铝合金钻探管表面微弧氧化膜组织和耐蚀性影响[J]. 表面技术, 2016, 45(4): 162-168.  
SHEN Yan, WANG Hong-xing. Effect of negative voltage on properties of micro-arc oxidation coating prepared on the surface of aluminum alloy drill pipe in offshore platform[J]. Surface technology, 2016, 45(4): 162-168.
- [26] HB/Z118—1987, 铝及铝合金铬酸阳极氧化工艺[S].  
HB/Z118—1987, Aluminum and aluminum alloy chromic acid anodizing process[S].
- [27] 曹楚南, 张鉴清. 电化学阻抗谱导论[M]. 北京: 科学出版社, 2002.  
CAO Chu-nan, ZHANG Jian-qing. Introduction to electrochemical impedance spectroscopy[M]. Beijing: Science Press, 2002.