

# 飞机结构腐蚀数值仿真模拟的研究进展

王海涛, 韩恩厚

(中国科学院金属研究所 国家金属腐蚀控制工程技术研究中心, 沈阳 110016)

**摘要:** 系统介绍了飞机结构腐蚀数值仿真模拟中应用较为广泛的元胞自动机方法、有限元方法、边界元方法, 尤其是它们在点蚀、电偶腐蚀、缝隙腐蚀、晶间腐蚀仿真的研究现状, 并对各自方法的优点和缺点与适用的范围进行了阐述, 以期对该领域的研究者提供一定的导向作用。

**关键词:** 飞机; 腐蚀; 仿真模拟; 元胞自动机; 有限元; 边界元

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2020.02.010

**中图分类号:** TG172      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2020)02-0061-05

## Research Progress of Numerical Simulation on Corrosion of Aircraft Structure

WANG Hai-tao, HAN En-hou

(National Engineering Research Center for Corrosion Control, Institute of Metal Research,  
Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

**ABSTRACT:** The paper systematically introduced the cellular automata model, the finite element method and the boundary element method widely used in the numerical simulation on aircraft structure corrosion, especially the current research situation on their pitting corrosion, galvanic corrosion, crevice corrosion and intergranular corrosion, and illustrated their advantages, disadvantages and the scope of application, in order to provide a guidance for researchers in this field.

**KEY WORDS:** aircraft; corrosion; numerical simulation; cellular automata; finite element method; boundary element method

腐蚀是影响飞机结构完整性的重要因素之一<sup>[1-5]</sup>。无论是军用飞机还是商用飞机, 大量的服役情况表明, 随着飞机使用年限的增加, 结构腐蚀频繁出现, 特别是诸如点蚀、缝隙腐蚀、电偶腐蚀、晶间腐蚀、腐蚀疲劳等局部腐蚀问题, 呈现逐步上升的发展趋势, 对飞机的飞行安全、出勤率和经济性具有重大的危害<sup>[6]</sup>。腐蚀是飞机维护中重要的组成部分, 不当的维护和对腐蚀的忽视, 会进一步导致腐蚀的蔓延, 其代价将是更加的昂贵。通过腐蚀分析和防护, 将腐蚀破坏的速率降低到最小, 使飞机实际寿命可以达到甚

至超过设计寿命, 能够确保飞机安全和经济运行。

通常而言, 飞机结构的腐蚀损伤分析和防护效果主要通过传统环境试验技术进行检验, 但试验方法的时效性和经济性无法充分满足其性能需求。随着计算机技术在腐蚀与防护科学领域的推广应用, 人们对飞机结构进行腐蚀分析和防护不再只是凭借试验技术, 而是通过建立相应的数值仿真模型, 以便更好地预测飞机结构腐蚀损伤的初始化和生长行为, 对飞机结构的安全评价、寿命评估以及防腐蚀设计都是极其重要的。文中将对元胞自动机方法、有限元方法、边界元

收稿日期: 2019-07-29; 修订日期: 2019-11-06

Received: 2019-07-29; Revised: 2019-11-06

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB0702100); 中国科学院“十三五”信息化专项(XXH13505-03-212)

Fund: National Key Research and Development Program of China (2017YFB0702100); Informatization Program of Chinese Academy of Sciences during the 13th Five-Year Plan Period (XXH13505-03-212)

作者简介: 王海涛(1975—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为腐蚀仿真与安全评价。

Biography: WANG Hai-tao (1975—), Male, Ph. D., Associate researcher, Research focus: Corrosion simulation and safety evaluation.

方法在飞机结构腐蚀数值仿真模拟中研究的现状进行系统地综述,并对各自的特点进行讨论。

## 1 元胞自动机模拟

### 1.1 基本原理

元胞自动机 (Cellular Automata, CA) 是一种时间、空间、状态都离散,空间上相互作用及时间上的因果关系皆局部的网格动力学模型<sup>[7-9]</sup>。元胞自动机模型直接考察模拟体系的局域交互作用,通过计算机模拟来再现这种局域作用导致的总体行为。元胞自动机模型的结构比较简单,然而却具有模拟复杂现象的能力,为从根本上对事物进行研究提供了强有力的工具。元胞自动机基本的组成部分涵盖了元胞、元胞空间、邻居及演变规则。在一个元胞自动机模型中,模拟体系被分解成有限个元胞,并且时间也离散化为间隔步,每个元胞的所有可能状态也划分为离散值。每个元胞在前后时间步的离散状态转变由一定的局部演变规则来决定,所有元胞进行同步状态更新。一个元胞的状态受其邻近元胞状态的影响,反过来也影响了邻近元胞的状态,局部之间相互作用、相互影响,通过演化规则变化而整合成总体复杂的行为。

### 1.2 点蚀模拟

元胞自动机在飞机结构腐蚀研究中很大一部分是用于点蚀行为的仿真模拟。Pidaparti 等人<sup>[10]</sup>建立了飞机用铝合金多点蚀萌生和生长的元胞自动机模型,采用了电化学反应的局部演化规则,并引入了非确定性因素,由此建立了离散的多点蚀动力学系统。通过模拟得到的多点蚀萌生、生长结果和实验结果进行了定性和定量的对比,并且讨论了各种电化学参数对点蚀萌生和生长的影响。结果表明,元胞自动机模型对于构建飞机用铝合金多点蚀萌生和生长具有一定的可行性。王玉君等人<sup>[11]</sup>对飞机蒙皮点蚀生长行为进行了元胞自动机模拟,他们利用简单的局部规则模拟了点蚀的发展演化过程,统计了不同状态的腐蚀元胞数据和腐蚀深度。结果显示,腐蚀元胞浓度越大,腐蚀概率越高,钝化概率越小,金属越容易发生腐蚀,腐蚀元胞数量随时间的变化符合幂指数关系,而腐蚀深度与时间呈线性关系,模拟结果与实际点蚀失重以及点蚀深度变化一致。崔艳雨等人<sup>[12-13]</sup>结合金属的局部腐蚀机理,建立了扩散和空间分离电化学反应耦合的铝合金点蚀元胞自动机模型,基于电化学反应阴极和阳极半反应的物理化学过程,对于点蚀生长、腐蚀产物沉积和离子扩散行为进行了模拟,再现了蚀坑阳极的自催化现象,给出了蚀坑腐蚀形貌的变化。何乐儒等人<sup>[14]</sup>对飞机结构金属的局部腐蚀行为进行了元胞自动机建模,对腐蚀过程中涉及的

转化、渗透、扩散等过程进行了定义,通过引入局部分区腐蚀速率、区域位置和氧化物膨胀因子相关参数,建立了腐蚀速率的参数化模型,并对有/无防护层的金属表面进行了模拟,观察到了有防护层的金属出现点蚀,而无防护层的金属表面发生均匀腐蚀,而金属内部是多种形式的局部腐蚀。王慧等人<sup>[15-16]</sup>通过元胞自动机对飞机结构金属表面的腐蚀损伤演化过程进行了模拟,定义了质量转移、金属溶解和钝化过程、局部金属的脱离现象,给出了单蚀坑等效半径随时间的变化以及溶解概率和钝化概率的影响,并且进行了多蚀坑的模拟。通过蚀坑成核时间的威布尔分布进行了随机抽样,随机产生了大量的蚀坑,得到了金属表面腐蚀损伤形貌,并且研究了在不同腐蚀情况下蚀坑几何形貌随时间的变化规律。

### 1.3 其他类型腐蚀模拟

除了点蚀模拟外,元胞自动机也应用在飞机结构缝隙腐蚀和晶间腐蚀的研究。Ren 等人<sup>[17]</sup>通过元胞自动机表征了电解质浓度、溶解概率、温度对于暴露在侵蚀性环境中的飞机结构金属缝隙腐蚀的影响,定义了一些简单的局部演化规则描述基本的物理化学过程,通过模拟得到的缝隙腐蚀的形貌与实验具有较好的一致性,模拟显示溶解电流随时间的变化遵循幂函数关系。Lishchuk 等人<sup>[18]</sup>建立了 AA2024 铝合金晶间腐蚀的元胞自动机模型,模型基于一系列的演化规则以及随机行走过程,定义了晶界和表面层各自的腐蚀概率,模拟参数通过差分进化算法进行了校准,以适应特定的实验,该模型能够重现和预测 AA2024 铝合金晶间腐蚀的生长。

## 2 有限元仿真

### 2.1 基本原理

描述腐蚀电场的数学物理方程,即所谓的偏微分控制方程,主要是通过能斯特-普朗克方程,结合电中性原则,当腐蚀电场为无源稳态场,可以直接简化为拉普拉斯方程<sup>[19-20]</sup>。为了求得腐蚀电场的控制方程,需要确定相应的边界条件。根据偏微分方程解的唯一性,符合所有边界条件的解即为控制方程唯一的解,进而获得腐蚀电位和腐蚀电流分布。基于相应的边界条件求解控制方程过程中,有限元 (Finite Element Method, FEM) 是一种比较有效的方法<sup>[21]</sup>,适合用于处理复杂的区域。它是根据变分原理和区域剖分取得近似解的方法,将整个求解域进行三维离散,进而划分很多小的单元,建立每个单元的公式,形成方程组,求解连续物理场的解。

### 2.2 电偶腐蚀仿真

Snihirova 等人<sup>[22]</sup>通过有限元仿真研究了 AA2024

铝合金和 Ti6Al4V 钛合金电偶连接结构的腐蚀行为及其时间相关性，模型提供了铝合金局部腐蚀初始化和生长过程的深度理解。该模型能够表征由于铝合金微观组织不均匀性导致的局部腐蚀行为，涵盖了局部 pH 值的变化，反应产物的沉积，强调了铝合金在电偶连接结构中自腐蚀的重要作用。与原位实验获得的结果进行对比，显示了模型可靠性非常的高。Jorcin 等人<sup>[23]</sup>通过有限元方法研究了纯铝-纯铜电偶连接结构在弱导电性硫酸盐溶液中的腐蚀行为，获得了电偶连接结构在浸泡初期的表面电位和电流分布，仿真得到的电位分布和微参比电极实验具有很好的一致性。研究显示，在铜表面发生氧还原反应，而远离于 Al/Cu 界面的铝仍然处于钝化态，在 Al/Cu 界面附近的铜上有相当大的阴极电流，显示了氧还原反应速度增加，使得局部的 pH 值非常的高，导致了 Al/Cu 界面附近的铝发生腐蚀溶解。Radouani 等人<sup>[24]</sup>通过有限元仿真研究了碳钢端板和低合金钢螺栓连接接头的电偶腐蚀，研究表明，碳钢端板作为阳极发生腐蚀，在螺栓头和端板接触区域腐蚀速度快，随着接触区的远离，腐蚀速度降低，螺纹尺寸的增加，导致端板的腐蚀速度加快，并且评估了螺栓材料改变对碳钢端板腐蚀速度的影响。Chen 等人<sup>[25]</sup>通过有限元仿真预测了多金属耦合的腐蚀位置和区域，该模型应用于飞机连接件的仿真。模型的可靠性通过多电极体系试验和数值仿真腐蚀电流和混合电位的对比进行了验证，并且数值模拟的表面电位分布和扫描微参比电极技术测量的实验值也基本相符，模拟的腐蚀损伤特征和浸泡实验导致的腐蚀分布具有很高的重合性。卞贵学等人<sup>[26]</sup>建立了飞机用钛-钢连接件在氯化钠溶液中腐蚀的有限元仿真模型，考虑了 TC18 钛合金、30CrMnSiNi2A 高强度钢，预测了钛-钢连接件腐蚀部位和腐蚀深度，模拟了镀锌层完好和镀锌层完全破损时连接结构的电位和局部电流分布。

### 2.3 缝隙腐蚀仿真

王晨光等人<sup>[27]</sup>通过有限元仿真研究了飞机用 7B04 铝合金缝隙腐蚀的行为，结果显示，缝隙外环境分别是溶液和大气时，缝隙内的 pH 值分别呈现酸性和碱性。当缝隙的宽度较小时，宽度的变化对于缝隙腐蚀的速度基本上没影响，而随缝隙深度的增加，缝隙口和缝隙底的溶液电位相差越来越大。腐蚀面积增加，腐蚀产物增多，并且腐蚀产物多集中在缝隙口附近。电位对缝隙腐蚀影响最为明显，当电位增加时，缝隙腐蚀速度急剧增加。通过仿真计算的缝隙内的 pH 值分布和缝隙腐蚀试验进行了对比，证明了仿真模型的准确性。笔者也通过有限元仿真研究了飞机蒙皮边缘与紧固件周围涂层破损处的缝隙腐蚀<sup>[28]</sup>，仿真发现缝隙内的 pH 值随时间先下降，随后上升，最后

稳定在弱酸状态。缝隙内铝合金基体的阳极电流要远高于氧还原和析氢反应的阴极电流，而且腐蚀产物多集中在缝隙底部。

## 3 边界元仿真

### 3.1 基本原理

腐蚀电场偏微分控制方程除了有限元求解外，边界元方法 (Boundary Element Method, BEM) 是另外一种求解方法<sup>[29-30]</sup>。边界元方法仅对表面进行离散，前提条件是稳态腐蚀电场和均匀的电解质<sup>[31-32]</sup>。它是根据积分定理，将区域内的微分方程转换成边界上的积分方程，将边界分割成有限大小的边界单元，使用给定的边界条件，把边界积分方程离散成代数方程而求得控制方程的解。

### 3.2 电偶腐蚀仿真

Peratta 等人<sup>[33]</sup>通过边界元仿真研究了 AA2024 铝合金-碳纤维增强复合材料飞机连接结构在氯化钠溶液中的电偶腐蚀行为，模型考虑了表面涂层的损伤程度、不同的阳极/阴极面积比以及不同的电解质电导率。仿真结果表明，阴/阳极面积比在电偶腐蚀过程中占主导地位的，而在阳极上制作的涂层破损孔间的距离对电偶腐蚀影响不大。笔者通过实验测量的阴/阳极电位和总电流与计算结果进行了比较，显示具有很好的一致性。王安东等人<sup>[34]</sup>建立了航空用 ZL115-T5 铸铝合金壳体与 C41500 黄铜导轨接触的电偶腐蚀边界元仿真模型，结果表明，ZL115-T5 铸铝合金电位要低于 C41500 黄铜，充当电偶腐蚀的阳极，而 C41500 黄铜的极化曲线出现明显的钝化-活化-再钝化区域，表面耐蚀性较好。随着电解质浓度和结构表面薄液膜厚度的增加，阳极腐蚀速度都会增大，两者相对比，薄液膜的厚度影响更为强烈。张勇等人<sup>[35]</sup>通过边界元模拟了飞机结构材料 2A12 铝合金板和 ML30CrMnSiA 螺栓搭接件的电偶腐蚀行为，研究表明，2A12 铝合金与 ML30CrMnSiA 螺栓接触后作为阳极，电位正移，而螺栓作为阴极。铝合金与螺栓直接接触的区域，阳极极化最大，电偶腐蚀的速度最高，而随着远离接触区，铝合金的电偶腐蚀速度递减。孙宏岩<sup>[36]</sup>通过边界元仿真研究了 ZL115-T5 铸铝合金、30CrMnSiA 钢和 C41500 黄铜三金属电偶连接结构的腐蚀行为。在腐蚀过程中，30CrMnSiA 钢为阳极，加速腐蚀，C41500 黄铜作为阴极得到了保护。探讨了 THFS-10 软膜缓蚀剂和 THFS-15 长效硬膜缓蚀剂对电偶腐蚀的抑制作用，THFS-10 是阴极型缓蚀剂，对于 ZL115-T5 铸铝合金的抑制效果较好，而 THFS-15 则对 C41500 黄铜和 30CrMnSiA 钢的腐蚀有较好的缓释作用。

## 4 结语

飞机结构腐蚀数值仿真模拟中元胞自动机方法、有限元方法、边界元方法均有各自的优点和缺点。元胞自动机方法是从介观尺度出发,构建微观机理和宏观腐蚀行为的桥梁,强项在于对飞机结构材料腐蚀微观过程的表征,揭示宏观性能到底是由什么样的微观过程所决定。它的基本计算单元和单元间的交互作用要根据腐蚀机理进行构建,需要很好的掌控,否则模型容易失真,并且在介观参数和宏观性能的映射关系也需要建立起来。宏观尺度的有限元和边界元仿真,均是对腐蚀电场控制方程的求解,其计算的空间尺度和时间尺度要高于元胞自动机,对于飞机部件结构的模拟具有优势,但微观特性的表征要弱于元胞自动机。有限元方法适用于求解非线性、非均匀腐蚀介质问题,因此对于腐蚀发展、演化的动力学过程的仿真具有一定的优势,但三维结构的离散化计算量大,而且对于无限域、半无限域问题处理较为困难。边界元方法通过降维处理将三维结构降为二维表面,计算量大为减少,因此在处理大型结构比有限元更具优势,特别是无限域、半无限域问题处理更为灵活。由于边界元计算的前提条件是稳态场和均匀的腐蚀介质,因此腐蚀动态过程的计算是其劣势。根据不同的腐蚀体系以及要解决的问题选取合适的仿真模拟方法,才能够扬长避短,充分发挥其优势。

### 参考文献:

- [1] 李东帆. 飞机结构的腐蚀与防护[J]. 装备环境工程, 2016, 13(1): 57-61.  
LI Dong-fan. Corrosion and Protection of Aircraft Structure[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(1): 57-61.
- [2] ANES V, PEDRO R S, HENRIQUES E, et al. Galvanic Corrosion of Aircraft Bonded Joints as A Result of Adhesive Microcracks[J]. Procedia Structural Integrity, 2016(1): 218-225.
- [3] 陈群志, 康献海, 刘健光. 军用飞机腐蚀防护与日历寿命研究[J]. 中国表面工程, 2010, 23(4): 1-6.  
CHEN Qun-zhi, KANG Xian-hai, LIU Jian-guang, et al. Discussion About Military Aircraft Anti-corrosion and Calendar Life Research[J]. China Surface Engineering, 2010, 23(4): 1-6.
- [4] 刘成臣, 鲁国富, 张金奎, 等. 2A12与30CrMnSiA在相同海洋大气环境中的加速环境谱差异[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(7): 609-613.  
LIU Cheng-chen, LU Guo-fu, ZHANG Jin-kui, et al. Differences Between Environment Spectrums of 2A12 and 30CrMnSiA in the Same Ocean Atmospheric Environment[J]. Corrosion and Protection, 2015, 36(7): 609-613.
- [5] SHEKHTER A, CRAWFORD B R, LOADER C, et al. The Effect of Pitting Corrosion on the Safe-Life Prediction of the Royal Australian Air Force P-3C Orion Aircraft[J]. Failure Analysis Engineering, 2015, 55: 193-207.
- [6] 刘文珽, 贺小帆. 飞机结构腐蚀/老化控制与日历延寿技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.  
LIU Wen-ting, HE Xiao-fan. Aircraft Structure Corrosion/Aging Life-extending Technology Control and Calendar[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.
- [7] CHOPARD B, DROZ M. Cellular Automata Modeling of Physical Systems[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- [8] NEUMANN J V. Theory of Self-reproducing Automata[M]. Urbana: University of Illinois Press, 1966.
- [9] WANG H T, HAN E H. Simulation of Metastable Corrosion Pit Development under Mechanical Stress[J]. Electrochimica Acta, 2013, 90: 128-134.
- [10] PIDAPARTI R M, FANG L, PALAKAL M J. Computational Simulation of Multi-pit Corrosion Process in Materials[J]. Computational Materials Science, 2008, 41: 225-265.
- [11] 王宇君, 郭安东, 赵爽, 等. 飞机蒙皮点蚀生长的元胞自动机模拟[J]. 全面腐蚀控制, 2017, 31(8): 80-86.  
WANG Yu-jun, GUO An-dong, ZHAO Shuang, et al. Cellular Automaton Simulations of Pitting Growth of Aircraft Skin[J]. Total Corrosion Control, 2017, 31(8): 80-86.
- [12] 崔艳雨, 赵沅沅. 基于元胞自动机法的铝合金腐蚀行为模拟[J]. 腐蚀与防护, 2018, 39(10): 794-799.  
CUI Yan-yu, ZHAO Yuan-yuan. Simulation of Aluminum Alloy Corrosion Behavior Based on Cellular Automaton Method[J]. Corrosion and Protection, 2018, 39(10): 794-799.
- [13] 赵沅沅. 金属铝腐蚀损伤演化过程的元胞自动机模拟[D]. 天津: 中国民航大学, 2018.  
ZHAO Yuan-yuan. Metal Aluminum Corrosion Damage Evolution Process of Cellular Automata Simulation[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2018.
- [14] 何乐儒, 殷之平, 黄其青, 等. 模拟金属表面局部腐蚀的CA方法[J]. 航空材料学报, 2015, 35(2): 54-63.  
HE Le-ru, YIN Zhi-ping, HUANG Qi-qing, et al. Simulation of Local Corrosion on Metal Surface with CA Method[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2015, 35(2): 54-63.
- [15] 王慧, 吕国志, 王乐, 等. 金属表面腐蚀损伤演化过程的元胞自动机模拟[J]. 航空学报, 2008, 29(6): 1490-1496.  
WANG Hui, LYU Guo-zhi, WANG Le, et al. Cellular Automaton Simulations of Surface Corrosion Damage Evolution[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2008, 29(6): 1490-1496.
- [16] 王慧, 宋笔锋, 王乐, 等. 蚀坑几何形貌的三维模拟[J]. 航空学报, 2009, 30(11): 2185-2192.

- WANG Hui, SONG Bi-feng, WANG Le, et al. Three-dimensional Computational Simulation of Corrosion Pit Growth Morphology[J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2009, 30(11): 2185-2192.
- [17] REN K L, GAO S W, LIU P P, et al. Influence of Environmental Factors on Corrosion Damage of Aircraft Structure[J]. *Theoretical & Applied Mechanics Letter*, 2011(6): 20-23.
- [18] LISHCHUK S V, AKID R, WORDEN K, et al. A Cellular Automaton Model for Predicting Intergranular Corrosion[J]. *Corrosion Science*, 2011, 53: 2518-2526.
- [19] SUN W, WANG L D, WU T T, et al. An arbitrary Lagrangian-Eulerian Model for Modelling the Time-Dependent Evolution of Crevice Corrosion[J]. *Corrosion Science*, 2014, 78: 233-243.
- [20] DESHPANDE K B. Validated Numerical Modelling of Galvanic Corrosion for Couples: Magnesium Alloy (AE44)-Mild Steel and AE44-Aluminium Alloy (AA6063) in Brine Solution[J]. *Corrosion Science*, 2010, 52: 3514-3522.
- [21] 曾攀. 有限元分析及应用[M]. 北京: 清华大学, 2004. ZENG Pan. *Finite Element Analysis and Application*[M]. Beijing: Tsinghua University, 2004.
- [22] SNIHIROVA D, HÖCHE D, LAMAKA S, et al. Galvanic Corrosion of Ti6Al4V-AA2024 Joints in Aircraft Environment: Modelling and Experimental Validation[J]. *Corrosion Science*, 2019, 157: 70-78.
- [23] JORCIN J, BLANC C, PÉBÈRE N, et al. Galvanic Coupling between Pure Copper and Pure Aluminum Experimental Approach and Mathematical Model[J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2008, 155(1): 46-51.
- [24] RADOUANI R, ECHCHARQY Y, ESSAHLI M. Numerical Simulation of Galvanic Corrosion between Carbon Steel and Low Alloy Steel in A Bolted Joint[J]. *International Journal of Corrosion*, 2017, 134: 1-10.
- [25] CHEN Y L, HUANG H L, ZHANG Y, et al. A Finite Element Model (FEM) for Predicting the Corrosion of Multi-material Coupling System on Aircrafts[J]. *Materials and Corrosion*, 2018, 69: 1649-1657.
- [26] 卞贵学, 陈跃良, 黄海亮, 等. 飞机用钛-钢搭接件腐蚀仿真预测与验证研究[J]. *表面技术*, 2018, 47(10): 172-179. BIAN Gui-xue, CHEN Yue-liang, HUANG Hai-liang, et al. Corrosion Prediction and Verification of Titanium-Steel Lap Joints for Aircraft[J]. *Surface Technology*, 2018, 47(10): 172-179.
- [27] 王晨光, 陈跃良, 张勇, 等. 飞机用 7B04 铝合金缝隙腐蚀试验及仿真研究[J]. *装备环境工程*, 2017, 14(3): 39-46. WANG Chen-guang, CHEN Yue-liang, ZHANG Yong, et al. Crevice Corrosion Experiment and Simulation Study of 7B04 Aluminum Alloy for Aircraft[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2017, 14(3): 39-46.
- [28] 王晨光, 陈跃良, 张勇, 等. 飞机铝合金/涂层体系丝状腐蚀的仿真研究[J]. *材料开发与应用*, 2017, 32(1): 80-88. WANG Chen-guang, CHEN Yue-liang, ZHANG Yong, et al. Simulation Study on Filiform Corrosion of Aircraft Aluminum alloy/Coating System[J]. *Development and Application of Materials*, 2017, 32(1): 80-88.
- [29] AOKI S, KISHIMOTO K. Prediction of Galvanic Corrosion Rates by the Boundary Element Method[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 1991, 15: 11-22.
- [30] 王秀通. 海水和海泥中阴极保护系统的边界元计算[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2005. WANG Xiu-tong. *Boundary Element Calculation of Cathodic Protection in System Sea Water and Sea Mud*[D]. Qingdao: Institute of Oceanology Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [31] 吴建华, 云凤玲, 邢少华, 等. 数值模拟计算在舰艇阴极保护中的应用[J]. *装备环境工程*, 2008, 5(3): 1-4. WU Jian-hua, YUN Feng-ling, XING Shao-hua, et al. Application of Numerical Simulation Calculation on Shipboard Cathodic Protection System[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2008, 5(3): 1-4.
- [32] JIA J X, SONG G L, ATRENS A. Experimental Measurement and Computer Simulation of Galvanic Corrosion of Magnesium Coupled to Steel[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2007, 9: 65-74.
- [33] PERATTA A, HACK T, ADEY R, et al. Validation of A Galvanic Corrosion Computer Model for AA2024 and CFRP with Localised Coatings Damage[C]// 2nd International Workshop on Light Weight Metal Corrosion & Modeling for Corrosion Prevention, Life Prediction and Assessment. Rome, Italy, 2010.
- [34] 王安东, 陈跃良, 黄海亮, 等. 异种金属结构电偶腐蚀的边界元仿真及验证[J]. *南京航空航天大学学报*, 2017, 49: 62-68. WANG An-dong, CHEN Yue-liang, HUANG Hai-liang, et al. Boundary Element Simulation and Verification of Galvanic Corrosion of Dissimilar Metal Structures[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2017, 49: 62-68.
- [35] 张勇, 陈跃良, 王晨光. 模拟沿海大气环境下铝合金搭接件电偶腐蚀行为研究[J]. *材料导报*, 2016, 30(5): 152-155. ZHANG Yong, CHEN Yue-liang, WANG Chen-guang. Study on Galvanic Corrosion of Aluminum Alloy Related Joint in Simulated Coastal Wet Atmosphere[J]. *Materials Review*, 2016, 30(5): 152-155.
- [36] 孙宏岩. 基于边界元方法的缓蚀剂对结构电偶腐蚀缓蚀效果研究[J]. *装备环境工程*, 2016, 13(2): 116-122. SUN Hong-yan. Effect of Corrosion Inhibitor on Galvanic Corrosion of Structures Based on Boundary Element Method[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2016, 13(2): 116-122.