

陆军基地化训练雷达干扰威胁环境构设方法研究

赵顺恺, 李修和, 沈阳, 代强伟
(电子工程学院, 合肥 230037)

摘要: **目的** 研究陆军基地化训练中雷达干扰威胁环境构设方法,重点研究对地面机动目标的威胁环境构设方法。**方法** 从功率等效和空间等效两方面着手,运用干扰信号模拟器逼近目标目标构设雷达干扰环境。**结果** 针对机动目标,给出了两种思路的构设方法,并对其优劣进行了比较。**结论** 通过对构设方法及构设逼真度的研究,明确了实现构设方法的关键在于保证训练场上的装备数据采集和训练场电磁环境监测的实时性和准确性。

关键词: 电磁环境构设; 雷达干扰; 方法研究

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2015.02.016

中图分类号: TJ01; TN974 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2015)02-0075-06

Research on the Methods of Constructing Radar Jamming Threatened Environment for Army in the Training Base

ZHAO Shun-kai, LI Xiu-he, SHEN Yang, DAI Qiang-wei
(Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

ABSTRACT: Objective To study the methods of constructing radar jamming threatened environment for army in the training base, with the emphasis in studying the methods of constructing the threatened environment to ground maneuver targets. **Methods** From the aspects of power equivalent and the space equivalent, the radar jamming environment was constructed by approaching the signal simulators to the target. **Results** For the maneuver target, two construction methods were proposed, and their advantages and disadvantages were comparatively discussed. **Conclusion** Through the research on the methods and fidelity of construction, we concluded that the key to realizing the methods was to ensure the real-time performance and accuracy of both the equipment data acquisition and the monitoring of electromagnetic environment in the training ground.

KEY WORDS: electromagnetic environment construction; radar jamming; method study

信号模拟器是陆军基地化训练中构建战场电磁 威胁环境普遍采用的工具。战场电磁威胁环境主要

收稿日期: 2015-01-30; 修订日期: 2015-03-20

Received: 2015-01-30; Revised: 2015-03-20

基金项目: 国防预研重点基金项目(9140A33020112JB39085)

Fund: Supported by the National Defense Pre-research Key Fund Program(9140A33020112JB39085)

作者简介: 赵顺恺(1987—),男,浙江金华人,硕士研究生,主要研究方向为武器装备电磁环境适应性检验。

Biography: ZHAO Shun-kai(1987—), Male, from Jinhua, Zhejiang, Master graduate student, Research focus: electromagnetic environment adaptability of weapon equipment test.

有监控性威胁环境、降效性威胁环境和毁伤性威胁环境,雷达干扰环境是降效性威胁环境中的一种重要环境,也是基地化训练中构设战场电磁环境工作的重要组成部分。外军在基地化训练构设战场电磁环境过程中,研究了一整套成体系的构设方法,充分利用实装和模拟器,构建高度逼真、动态的战场电磁环境。当前,逼真的复杂电磁环境构设已成为部队基地化训练走向实战化的迫切需求,文中主要针对陆军基地化训练中的雷达干扰威胁环境,从功率等效和空间等效两方面,研究具体构设方法。

1 构设基本思路

雷达干扰环境主要分有源干扰和无源干扰,而电磁环境构设主要是针对有源环境的构设,而雷达有源干扰主要有压制性干扰与欺骗式干扰两类。对这两类干扰环境的等效构设,主要是针对其对于被干扰目标的干扰效果等效上着手,比如被干扰目标的发现概率和跟踪测量精度的下降程度。根据雷达工作效能分析,雷达的发现概率和跟踪测量精度均与雷达接收的干信比有关。因此,在构设雷达干扰威胁环境的过程中,做到干信比等效是适合于压制性干扰和欺骗性干扰两类干扰方式的。根据功率等效准则,采用与实际想定干扰源同等或近似干扰样式的干扰模拟器,使得被干扰目标在接收端针对模拟器和想定干扰源的“干信比”等效,是雷达干扰环境构设过程中的一个普遍的思路。

在构设过程中,为了能够使得被干扰源能够感受到与真实作战环境尽可能相似的环境,除了功率等效准则外,实战化构设中还需要尽可能做到被干扰目标与干扰源在空间位置关系上的等效。因此,空间等效准则,也是雷达干扰环境构设过程中的一个重要思路。

根据功率等效和空间等效两方面构设实战化雷达干扰环境是构设雷达威胁环境中的基本思路。

2 雷达干扰环境等效基本原理

模拟器的发射功率一般要比真实干扰源要小,因此要满足雷达接收机受到的干信比等效,就必须根据模拟器和真实干扰源的发射功率比,合理规划模拟器相对于被干扰目标的抵近程度。具体计算方法可以根据雷达干扰方程来计算。

假设干扰信号带宽覆盖雷达接收机的带宽,根据

干扰方程^[4]推算可知,雷达干扰源实施干扰时的雷达接收机接收端干信比 $(JSR)_j$ 见式(1):

$$(JSR)_j = \frac{P_j G_j}{P_i G_i} \cdot \frac{\Delta f_r}{\Delta f_j} \cdot \frac{4\pi\gamma_j}{\sigma} \cdot \frac{R_i^4}{R_j^2} \cdot \frac{G_i(\theta_j)}{G_i} \cdot \frac{L_i}{L_j} \quad (1)$$

干扰模拟器对雷达接收端的干信比 $(JSR)_m$ 见式(2):

$$(JSR)_m = \frac{P_m G_m}{P_i G_i} \cdot \frac{\Delta f_r}{\Delta f_m} \cdot \frac{4\pi\gamma_m}{\sigma} \cdot \frac{R_i^4}{R_m^2} \cdot \frac{G_i(\theta_m)}{G_i} \cdot \frac{L_i}{L_m} \quad (2)$$

式中: P_i, P_j, P_m 分别为雷达、实际干扰源、干扰模拟器的发射功率, W; $\Delta f_r, \Delta f_j, \Delta f_m$ 分别为雷达接收机、干扰源、模拟器的带宽, Hz; σ 为目标的有效反射面积, m^2 ; R_i, R_j, R_m 分别为雷达和目标之间、雷达和实际干扰源之间、干扰模拟器和雷达之间的距离, m; G_i, G_j, G_m 分别为雷达、实际干扰源、干扰模拟器的主瓣增益, 倍; $G_i(\theta_j)$ 为雷达天线在干扰源方向上的接收增益; $G_i(\theta_m)$ 为雷达天线在模拟器方向上的接收增益; γ_j, γ_m 分别为实际干扰源和干扰模拟器的干扰信号对雷达天线的极化损失, 倍; L_i, L_j, L_m 分别为雷达、实际干扰源、干扰模拟器的损耗因子。

雷达干扰环境功率等效构设的示意如图1所示。 θ_m 为雷达天线主瓣方向与模拟器干扰信号方向所成夹角, θ_j 为雷达天线主瓣方向与干扰源干扰信号方向所成夹角。

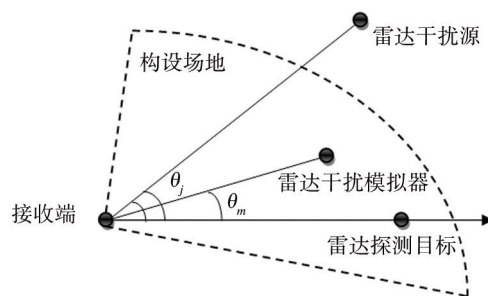


图1 模拟试件结构

Fig.1 Schematic diagram of the specimen structure

要实现功率等效,就是干信比等效,必须使得必须满足 $(JSR)_j = (JSR)_m$,可根据式(1)和式(2)得出等效关系^[5]。传播损耗因子 L_j, L_m 指的是雷达电波在传播途中受到路径损耗,相对于不同的频段、不同的传播路径、不同的雷达类型以及不同的大气状况,其损耗因子是不同的。自由空间损耗已经考虑到雷达方程中,所以不计入损耗因子中去。在想定中,可对影响实际干扰源损耗因子的参数进行限定,可以认定其为一常

数。同时,在构设规划中,通常将模拟器极化方式和带宽直接等效于实际干扰机。

雷达干扰环境功率等效计算方法见式(3),是构设雷达干扰环境的基础。

$$\frac{R_m^2}{R_j^2} = \frac{G_m L_j}{G_j L_m} \cdot \frac{G_i(\theta_m)}{G_i(\theta_j)} \cdot \frac{P_m}{P_j} \quad (3)$$

3 雷达干扰环境构设实现方法

在构设实现过程中,除了满足功率等效这一基本原则,还有一个重要的方面就是满足空间等效。由于功率等效采用的主要是距离压缩法,因此空间等效主要考虑模拟器和目标的角度关系要尽可能与想定干扰源和目标的角度关系一致。

3.1 干扰源对地面固定目标的构设

这种情况主要是针对固定干扰站针对固定目标实施干扰或是侦察的等效构设,也是最简单的一种情况。根据上节等效原理,能够确定雷达干扰模拟器相对目标的抵近程度。为了能达到空间等效,模拟器相对于目标点的空间关系也应尽可能与想定条件一致,所以 θ_j 与 θ_m 尽可能做到一致,因此,构设示意应该如图2所示。式(3)可以简化为:

$$R_m = \sqrt{\frac{G_m L_j}{G_j L_m} \cdot \frac{P_m}{P_j} R_j} \quad (4)$$

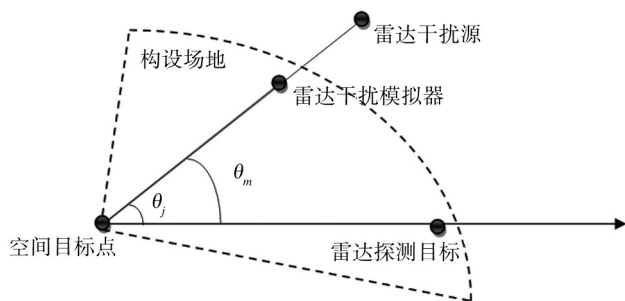


图2 模拟器对固定目标点构设雷达干扰威胁环境示意

Fig.2 Schematic diagram of radar jamming threatened environment construction using simulator for fixed target

3.2 干扰源对地面机动目标的构设

地面固定干扰源对地面机动目标的环境构设是针对地面固定干扰站针对机动目标的电磁环境构设。与3.1所述不同的是,目标点处于运动状态,雷达干扰源与目标的距离和角度关系处在实时的变化之中,如何对模拟器进行控制是保证逼真构设的关键。

针对此类情况的构设相对复杂,就这种情况提出两种构设思路。由于目标与想定干扰源的距离是实时变化的,因此干扰源针对目标的干信比也是实时变化的。要保证等效构设,其中的关键就是保证模拟器相对于目标的干信比变化程度和干扰源等效。可以通过控制模拟器发射功率来保证功率等效问题。固定模拟器对直线运动目标构设雷达干扰威胁环境示意如图3所示。可以看出, θ_j 与 θ_m 在构设初始阶段,保持一致,但是随着目标点的机动, θ_j 与 θ_m 逐渐产生变化。因此构设不能保证干扰机相对接收机的增益相等于模拟器相对于接收机的增益。因此模拟器功率变化控制应符合式(5)规律:

$$P_m(t) = \frac{R_m^2(t)}{R_j^2(t)} \cdot \frac{G_i(\theta_j(t))}{G_i(\theta_m(t))} \cdot \frac{G_j L_m}{G_m L_j} \cdot P_j \quad (5)$$

式中: $R_m(t)$ 和 $R_j(t)$ 分别表示模拟器和想定干扰源距目标点距离。

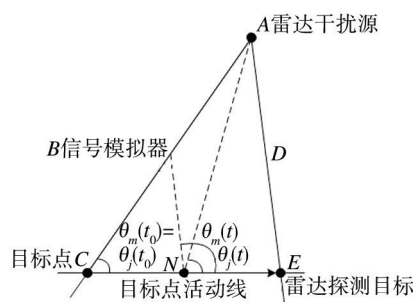


图3 固定模拟器对直线运动目标构设雷达干扰威胁环境示意

Fig.3 Schematic diagram of radar jamming threatened environment construction using fixed simulator for linear motion target

要求得 P_m 随时间变化调整的具体值,取决于 R_m 和 R_j 的变化情况,以及 $G_i(\theta_j)$ 和 $G_i(\theta_m)$ 的变化情况,需要考虑考虑雷达天线随着雷达移动和雷达天线方向的问题。文献[4]给出了雷达接收机相对于干扰源的增益简化模型,同样适用于雷达接收机相对于干扰模拟器:

$$G_i(\theta_j) = \left[\frac{1}{1 + q(2\theta/\varphi_{0.5})^2} \right]^2 \cdot G_i \quad (6)$$

式中: $\varphi_{0.5}$ 为雷达水平方向半功率波瓣宽度。

实际构设中,不同时刻的 R_m , R_j , θ_j , θ_m 可以实时测得。 $G_i(\theta_j)$ 和 $G_i(\theta_m)$ 的变化情况可由公式(6)推算。

这种构设实现方法,保证了功率等效,但信号模拟器与目标之间的空间关系相比真实干扰源与目标之间的空间关系产生了偏差。接收机对想定干扰源和信号模拟器接收增益不能简化,并且可能由于空间

位置关系的变化,干扰模拟器不能起到预想干扰效果。比如,很可能出现由于目标的位移,模拟器和想定干扰源无法同时对目标形成干扰的情况。

为了保证目标点与构造模拟器和真实干扰源稳定的空间位置关系,信号模拟器需要沿一定的轨迹运行,以保证构造在空间关系上的等效。为简化分析,还是以目标沿直线运动来分析。空间位置关系如图4所示。目标点自点 t_0 时刻起,由C点出发至E。根据功率等效关系,推算出信号模拟器初始位置在点B。由等效公式(4)可知, R_m 与 R_j 成线性比例关系,因此信号模拟器沿目标点平行线同时往方向D点处运行,可以同时保证目标点与信号模拟器角度关系与想定辐射源的角度关系保持一致和功率等效。假设目标点运行速度为 $V_j(t)$,相对于想定辐射源角度为 $\theta(t)$,则信号模拟器运行速度 V_m 应满足如式(7):

$$V_m(t) = \frac{L_{AB}}{L_{AC}} V_j(t) \quad (7)$$

式中: L_{AB} 是A与B之间的距离; L_{AC} 是A与C之间的距离。

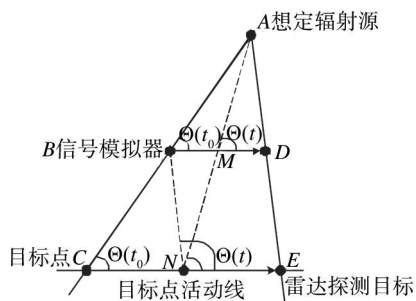


图4 机动模拟器对直线运动目标构造雷达干扰威胁环境示意
Fig.4 Schematic diagram of radar jamming threatened environment construction using maneuver simulator for linear motion target

通常情况,目标点是做不规则曲线运动,如图5所示。这时,在满足功率等效原理的前提下,可以确定信号模拟器的初始位置B。欲保证模拟器相对于运动目标点和想定干扰源相对于运动目标点的几何关系一致,就需要使模拟器与目标点相对于想定干扰源地面机动的角速度相等。同时保证式模拟器与目标点之间的距离满足式(8)。这样既可以满足空间关系等效要求,又满足了基本的功率等效原理。

$$\frac{L_{BC}}{L_{AB}} = \frac{R_m(t)}{R_j(t)} \quad (8)$$

比较两种构造思路可以看出,前者只是通过调整信号模拟器的发射功率进行功率等效。由于信号模

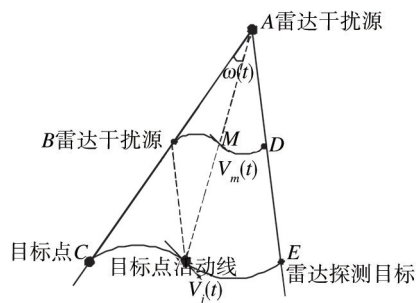


图5 机动模拟器模拟干扰源对运动目标点的构造空间示意
Fig.5 Schematic diagram of radar jamming threatened environment construction using maneuver simulator for maneuver target

拟器和目标点的空间位置关系与干扰源与目标点的空间位置关系的差异性,模拟器发射功率的调整应考虑到发射接收增益的实时变化。实际上,前者并没有做到空间位置关系等效这一点。后者同时兼顾了空间位置关系等效和功率等效,做到了比较好的等效构造。由于模拟器路径规划和实时控制需要根据目标点的移动而实时控制,不确定性很大,因此不仅要精确了解目标的运动状态,还需要对模拟器的运动轨迹进行精确控制,实现难度相对前者更大,实现成本也更高。因此在实际构造过程中,还需要针对具体的需求、具体的想定,确定具体构造方案。

4 逼真度评估

为保证构造活动能做到最大限度的等效,就必须要对构造活动进行评估,而评估的重点应该放在构造环境的逼真度上。逼真度评估应贯穿构造全过程,从构造方案阶段开始,一直到构造完成。

根据构造逼真度评估特点,建立三级逼真度评估体系:装备性能逼真度评估、构造过程逼真度评估,以及综合逼真度评估。

装备性能逼真度评估,是在一些固有性能指标上,对模拟器和模拟对象进行相似性分析,筛选出最优模拟器。构造过程逼真度评估,是在构造过程中,比对构造环境和想定环境之间的过程逼真度,用以实时控制模拟器运行状态。综合逼真度评估有两个目的,一是在构造规划过程中,通过对构造方案和想定方案的仿真推演,评估方案的逼真程度;二是在构造结束时,评估本次构造活动的逼真程度。通过三级逼真度评估,保证构造活动能够达到最大程度等效。三级逼真度评估体系结构如图6所示。

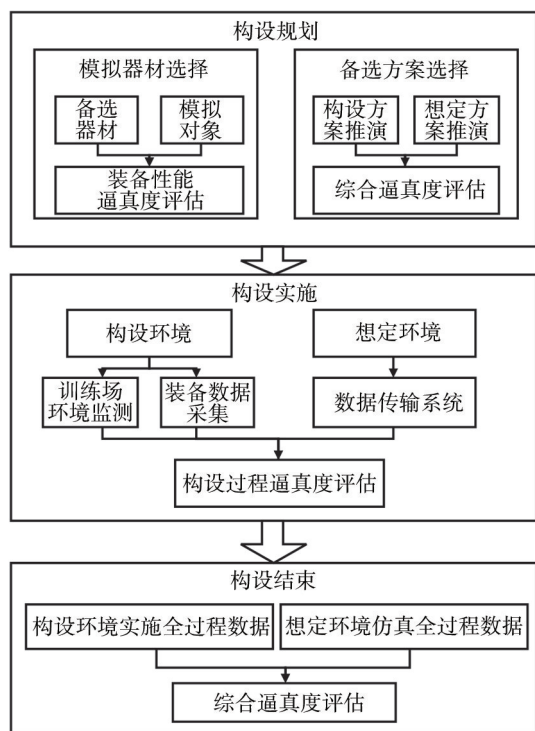


图6 逼真度评估体系结构

Fig.6 Architecture of the fidelity evaluation system

5 结语

文中针对陆军基地化训练中雷达干扰威胁环境构设方法做了一定的研究,重点针对地面移动目标的干扰环境构设提出了两种思路的构设方法,并针对两种思路进行了分析比较,探究其各自优劣,并初步建立构造环境逼真度评估体系。该方法为今后基地化训练中构造雷达干扰威胁环境提供一定的方法指导。针对机动目标提出的两种构设方法,均需要实时、精确地掌控被干扰目标的路径数据、运动状态。针对逼真度评估问题,今后应该重点在信号模拟器和参训装备的数据采集和训练电磁环境监测上作进一步的研究,运用多种手段获取实时、准确的电磁环境构设要素信息,为调控模拟器工作状态和构造逼真度评估提供依据和数据支撑。

参考文献:

- [1] 王汝群. 战场电磁环境[M]. 北京:解放军出版社,2006.
WANG Ru-qun. Battlefield Electromagnetic Environment[M]. Beijing:PLA Press,2006.
- [2] 李修和,薛磊,沈阳,等. 战场电磁环境仿真与训练效果评估[M]. 北京:解放军出版社,2012.
LI Xiu-he, XUE Lei, SHEN Yang, et al. Battlefield Electro-

magnetic Environment Simulation and Training Effect Evaluation[M]. Beijing:PLA Press, 2012.

- [3] 焦培楠,张忠治. 雷达环境与电波传播特性[M]. 北京:电子工业出版社,2007.
JIAO Pei-nan, ZHANG Zhong-zhi. Radar Environment and Characteristics of Wave Propagation[M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2007.
- [4] 邵国培. 电子对抗作战效能分析原理[M]. 北京:军事科学出版社,2013.
SHAO Guo-pei. The Principle of EW Operational Effectiveness Analysis[M]. Beijing: Military Science Press, 2013.
- [5] 李修和. 战场电磁环境构设方法与运用[M]. 北京:解放军出版社,2013.
LI Xiu-he. Battlefield Electromagnetic Environment Construction Method and Application[M]. Beijing: PLA Press, 2013.
- [6] 崔积丰,田益民,韩伟. 电子装备试验电磁环境构建方法[J]. 电子信息对抗技术,2012,1(1):60—64.
CUI Ji-feng, TIAN Yi-min, HAN Wei. Electromagnetic Environment Constructing Method of Electronic Equipment Test[J]. Electronic Warfare Technology, 2012, 1(1): 60—64.
- [7] 柴克军,时光,康健,等. 超短波干扰效能等效替代方法研究[J]. 无线电工程,2010,40(11):46—48.
CHAI Ke-jun, SHI Guang, KANG Jian, et al. Substitute Equivalent Method for Jamming Efficiency of VHF System[J]. Radio Engineering, 2010, 40(11): 46—48.
- [8] 张芳,蔡金燕,朱艳辉. 雷达电磁环境的联合建模与仿真[J]. 装备环境工程,2009,6(2):86—88.
ZHANG Fang, CAI Jing-yan, ZHU Yan-hui. Joint Modeling and Simulation of Radar Electromagnetic Environment[J]. Equipment Environment Engineering, 2009, 6(2): 86—88.
- [9] 李莉,孙振华,李立伟,等. 装备定型试验中复杂电磁环境研究[J]. 装备学院学报,2009,20(2):73—76.
LI Li, SUN Zhen-hua, LI Li-wei, et al. Research on Complex Electromagnetic Environment of Equipment Stereotype Test[J]. Journal of Academy of Equipment Command & Technology, 2009, 20(2): 73—76.
- [10] 吴洁,刘晓刚. 战场电磁环境构建[J]. 长春理工大学学报,2010,5(4):184—185.
WU Jie, LIU Xiao-gang. The Construction of Battlefield Electromagnetic Environment[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2010, 5(4): 184—185.
- [11] 康广,汤敬武,宋文渊. 部队训练复杂电磁环境构建方法研究[J]. 国防科技,2011,32(4):40—43.
KANG Guang, TANG Jin-wu, SONG Wen-yuan. Research on the Construction Method of Training Complex Electromagnetic Environment[J]. National Defense Science and Technology, 2011, 32(4): 40—43.

- [12] 袁兴鹏. 基于半实物仿真的电子对抗效果等效推算方法及模型研究[J]. 舰船电子对抗, 2007, 30(2): 50—54.
YUAN Xing-peng. Equivalent Calculation Method of EW Effect and Model Research Based on Half-object Simulation[J]. Shipboard Electronic Counter Measure, 2007, 30(2): 50—54.
- [13] 朱宇光. 靶场复杂电磁环境构建[J]. 四川兵工学报, 2012, 32(3): 119—120.
ZHU Yu-guang. The Construction of Complex Electromagnetic Environment in Training Range[J]. Journal of Sicuan Ordnance, 2012, 32(3): 119—120.
- [14] 王晶, 李智, 来嘉哲, 等. 虚拟战场电磁环境构建方法研究[J]. 现代防御技术, 2009, 12(37): 11—16.
WANG Jin, LI Zhi, LAI Jia-zhe, et al. Construction Method of Virtual Field Electromagnetic Environment[J]. Modern Defence Technology, 2009, 37(6): 11—16.
- [15] 丁潇, 陈亚洲. 战场复杂电磁环境的仿真与构建方法研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(1): 33—37.
DING Xiao, CHEN Ya-zhou. Research on Simulation and Construction Method of Complex Battlefield Electromagnetic Environment[J]. Equipment Environment Engineering, 2011, 8(1): 33—37.
-
- (上接第 63 页)
- 水腐蚀性的影响[J]. 装备环境工程, 2010, 7(3): 22—26.
PENG Wen-cai, HOU Jian, GUO Wei-min, et al. Effect of Temperature and Dissolved Oxygen on Corrosion Performance of Alloy 5083 in Seawater[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(3): 22—26.
- [25] 郭为民, 李文军, 陈光章. 材料深海环境腐蚀试验[J]. 装备环境工程, 2006, 3(1): 10—15.
GUO Wei-min, LI Wen-jun, CHEN Guang-zhang. Corrosion Testing in the Deep Ocean[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(1): 10—15.
- [26] 孙飞龙, 李晓刚, 卢琳, 等. 5052 和 6061 铝合金在中国南海深海环境下的腐蚀行为研究[J]. 金属学报, 2013, 49(10): 1219—1226.
SUN Fei-long, LI Xiao-gang, LU Lin, et al. Corrosion Behavior of 5052 and 6061 Aluminum Alloys in Deep Ocean Environment of South China Sea [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 49(10): 1219—1226.
- [27] 黄雨舟, 董丽华, 刘伯洋. 铝合金深海腐蚀的研究现状及发展趋势[J]. 材料保护, 2014, 47(1): 44—47.
HUANG Yu-zhou, DONG Li-hua, LIU Bo-yang. Current Status and Development Trend on Corrosion of Aluminum Alloy in Deep Sea[J]. Materials Protection, 2014, 47(1): 44—47.
- [28] 周建龙, 李晓刚, 程学群, 等. 深海环境下金属及合金材料腐蚀研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2010, 22(1): 47—51.
ZHOU Jian-long, LI Xiao-gang, CHENG Xue-qun, et al. Research Progress on Corrosion of Metallic Materials in Deep Sea Environment[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2010, 22(1): 47—51.
- [29] 刘艳洁, 王振尧, 柯伟. 2024-T3 铝合金在模拟海洋大气环境中的腐蚀行为[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(5): 1208—1216.
LIU Yan-jie, WANG Zheng-yao, KE Wei. Corrosion Behavior of 2024-T3 Aluminum Alloy in Simulated Marine Atmospheric Environment[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(5): 1208—1216.
- [30] 张正贵, 周兆元, 刘长勇. 高强度铝合金构件腐蚀疲劳失效分析[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2008, 28(1): 48—52.
ZHANG Zheng-gui, ZHOU Zhao-yuan, LIU Chang-yong. Corrosion Fatigue Fracture Failure Analysis of High-Strength Aluminum Alloy[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2008, 28(1): 48—52.
- [31] 王曰义. 铝合金在流动海水中的腐蚀行为[J]. 装备环境工程, 2005, 2(6): 72—76.
WANG Yue-yi. Corrosion Behavior of Aluminum Alloy in Flowing Seawater[J]. Equipment Environmental Engineering, 2005, 2(6): 72—76.
- [32] 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: 11—14.
SHAN Yi-min, LUO Bing-hui, BAI Zhen-hai. Study on the Electrochemical Corrosion Behavior of 5083 Aluminum Alloy in 3.5% NaCl Solution[J]. Aluminum Fabrication, 2007: 11—14.
- [33] 张波, 韩冰. LF4 铝合金在海水中的腐蚀性能研究[J]. 实验与技术, 2005, 29(7): 4—7.
ZHANG Bo, HAN Bing. Corrosion Performance of LF4 Aluminum Alloy in Seawater[J]. Experiment & Technology, 2005, 29(7): 4—7.
- [34] 郑传波, 李春岭, 益帼, 等. 高强铝合金 6061 和 7075 在模拟海洋大气环境中的腐蚀行为[J]. 材料保护, 2014, 47(6): 38—41.
ZHENG Chuan-bo, LI Chun-ling, YI Jing, et al. Corrosion Behavior of 6061 and 7075 Aluminum Alloy in Simulated Marine Atmospheric Environment[J]. Journal of Materials Protection, 2014, 47(6): 38—41.
- [35] 韩东锐, 韩冰, 隋景堂, 等. 6061 铝合金在高温流动海水中的腐蚀行为[J]. 装备环境工程, 2011, 8(3): 1—4.
HAN Dong-rui, HAN Bing, SUI Jing-tang, et al. Corrosion Behavior of 6061 Aluminum Alloy in High Temperature Flowing Seawater[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(3): 1—4.