

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2313286

基于微波透射法的输变电钢筋混凝土腐蚀检测*

王中华^{1,2} 林 军^{1,2} 喻红林^{3,4} 黎子晋^{3,4} 黎 鹏^{3,4} 吴 田^{3,4}

(1. 国网浙江省电力有限公司武义供电公司 金华 321200; 2. 浙江武义电气安装工程有限公司 金华 321200; 3. 湖北省输电线路工程技术研究中心(三峡大学) 宜昌 443002; 4. 三峡大学电气与新能源学院 宜昌 443002)

摘 要: 为更好地评估输变电钢筋混凝土结构质量安全,提出了基于微波透射法的输变电钢筋混凝土结构腐蚀检测方法,开展了钢筋通电加速腐蚀试验,获得了不同腐蚀程度钢筋混凝土模型;搭建了微波检测试验平台,通过对不同腐蚀程度钢筋混凝土模型进行微波无损检测,分析了透射系数 S_{21} 幅值和相位的变化规律。结果表明:湿盐沙环境下通电加速腐蚀试验能在较短时间内获得不同腐蚀程度的钢筋;当提高距离为 4 mm 时,通过透射系数 S_{21} 幅值和相位变化趋势可有效识别混凝土内部钢筋腐蚀状态。研究可为输变电钢筋混凝土结构腐蚀检测提供参考。

关键词: 输变电钢筋混凝土;钢筋腐蚀;微波检测;透射系数;加速腐蚀

中图分类号: TU529.33 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420.4

Corrosion detection of reinforced concrete for power transmission and transformation based on microwave transmission method

Wang Shenhua^{1,2} Lin Jun^{1,2} Yu Honglin^{3,4} Li Zijin^{3,4} Li Peng^{3,4} Wu Tian^{3,4}

(1. State Grid Zhejiang Wuyi Electric Power Supply Company, Jinhua 321200, China; 2. Zhejiang Wuyi Electric Installation Engineering Co., Ltd., Jinhua 321200, China; 3. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Power Transmission Line, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 4. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: To better evaluate the quality and safety of reinforced concrete structures used in power transmission and transformation, a corrosion detection method was proposed for reinforced concrete structures in power transmission and transformation based on the microwave transmission method. The accelerated corrosion test of steel bars was carried out, and reinforced concrete models with different corrosion degrees were obtained. A microwave detection test platform was built. The variation of the amplitude and phase of the transmission coefficient S_{21} was analyzed through microwave nondestructive testing of reinforced concrete models with different degrees of corrosion. The results show that the accelerated corrosion test in a wet salt sand environment can obtain steel bars with different corrosion degrees in a short time. When the lift-off distance is 4 mm, the corrosion state of steel bars in concrete can be effectively identified by the amplitude and phase change trend of transmission coefficient S_{21} . The research can provide a reference for corrosion detection of power transmission and transformation-reinforced concrete structures.

Keywords: power transmission and transformation reinforced concrete; reinforcement corrosion; microwave transmission detection; transmission coefficient; accelerated corrosion

0 引 言

随着我国电网的高速发展,钢筋混凝土结构作为重要的承力基础被大量使用^[1-2],而在沿海和强腐蚀地区的输变电钢筋混凝土结构面临腐蚀威胁^[3]。据统计,浙江省162条输电线路中20%铁塔存在腐蚀情况^[4]。输变电钢筋

混凝土发生腐蚀会导致结构的承载力明显下降^[5-6],严重威胁电力设备安全稳定运行。因此,开展输变电钢筋混凝土结构腐蚀状态检测具有重要的实际意义。

针对钢筋混凝土结构腐蚀的检测方法主要有:半电池电位法、超声波检测法、X射线计算机断层扫描技术(micro-X-ray computed tomography, XCT)等。半电池电

收稿日期:2023-04-06

* 基金项目:国网浙江省电力有限公司科技项目(BD60ZHJS20 20001)、国家自然科学基金(51807110)项目资助

位法^[7]可通过检测钢筋混凝土结构内部电位值判断腐蚀情况,但该方法受检测环境影响较大,具有一定的局限性;超声波检测法^[8-9]是利用超声波在不同介质中发生反射和散射的特性差异,通过对比其信号的变化来判断混凝土内部钢筋腐蚀程度,但其检测结果受传感器与被测对象之间贴合程度的影响较大,且存在缺陷定性困难的问题^[10];XCT^[11]是对钢筋混凝土结构内部进行三维重构,通过重构后的图像分析结构内部腐蚀缺陷的分布情况,但该方法实际操作复杂且X射线会对人体造成伤害。微波透射检测法是以微波作为信息载体,通过分析透射波信号的变化情况来判断钢筋混凝土内部腐蚀程度,相较于其他检测方法,该方法拥有穿透性强、无接触、易于小型化等优点^[12-14],具有较高的应用价值。

为有效检测钢筋混凝土结构内部腐蚀,并提升检测效率,本文基于微波透射法,提出了输变电钢筋混凝土结构腐蚀微波无损检测方法,通过钢筋通电加速腐蚀试验获得了不同腐蚀程度的钢筋混凝土模型,并设计了微波透射检测试验平台,对不同腐蚀程度模型进行微波检测,分析了 S_{21} (透射系数)幅值和相位的变化规律,验证了方法的可行性,为输变电钢筋混凝土结构腐蚀检测提供了新思路。

1 钢筋通电加速腐蚀试验

1.1 试验平台及方法

利用通电加速钢筋腐蚀试验获得的不同腐蚀程度钢筋试件,试验平台设计如图1所示,主要由直流电源、湿盐沙、铜棒、钢筋组成。

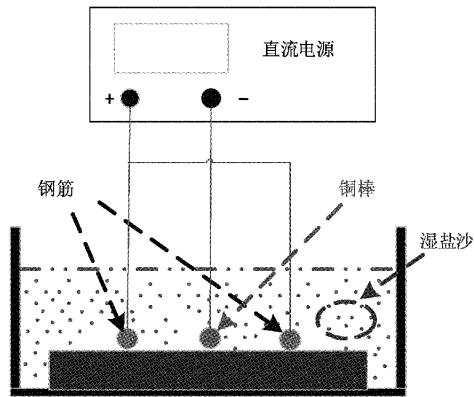


图1 钢筋通电加速腐蚀试验平台

直流电源用于为钢筋提供稳定电流;为防止通电过程中腐蚀层掉落,选用湿盐沙代替传统盐溶液作为电解质^[15],湿盐沙通过向细河沙中喷洒浓度8% NaCl溶液获得;铜棒直径为20 mm、长度350 mm,用作通电阴极材料,与直流电源负极连接;钢筋型号为HRB400、公称直径22 mm、长度350 mm,与直流电源正极连接。

钢筋分为A、B、C三组,腐蚀程度预设分别为0%、10%、20%,每组设置两根钢筋(一根用于分析腐蚀程度,一根用于制作钢筋混凝土模型)并联通电加速腐蚀,通电电流大小

统一为0.5 A,通过调节各组钢筋通电时间控制其腐蚀程度,根据法拉第电解定律^[16],不同腐蚀程度钢筋所需通电时间如表1所示。

表1 钢筋通电时间

| 组号 | 腐蚀程度/% | 电流大小/A | 通电时间/h |
|----|--------|--------|--------|
| A | 0 | 0 | 0 |
| B | 10 | 0.5 | 191 |
| C | 20 | 0.5 | 382 |

各组钢筋达到表1设定的通电时间后,切断电源,从沙土取出钢筋,选取其中一根进行腐蚀情况分析,依据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082-2009)^[17]步骤去除钢筋表面腐蚀层,然后按照失重法的步骤对各组钢筋实际腐蚀率进行定量分析。

1.2 腐蚀结果分析

腐蚀后钢筋表面形态如图2所示,两组钢筋都发生了较为严重的腐蚀,表面覆盖了一层铁锈,且沿其表面均匀分布;从腐蚀产物的颜色可以看出,其主要为红褐色的红锈,成分为 Fe_2O_3 ^[18],与自然环境下腐蚀效果基本相同,可见,湿盐沙环境下钢筋通电加速腐蚀试验能够较好地模拟自然环境腐蚀。

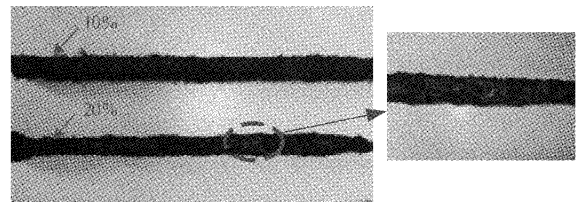


图2 钢筋腐蚀后表面形态

对各组钢筋进行实际腐蚀率分析,首先用12%盐酸溶液对钢筋进行酸洗,然后经过清水漂洗后再用石灰水中和,最后用清水冲洗干净,将试件擦干后烘干,称取未腐蚀钢筋重量,结果如表2所示。根据表2中数据可以看出:钢筋实际腐蚀率均略高于理论预设值,这是由于在湿盐沙为电解质的通电过程中,氯离子会在钢筋电解反应过程中充当催化剂角色,加速钢筋腐蚀电化学反应,所以造成钢筋实际腐蚀率略大于理论腐蚀率^[19]。

表2 钢筋腐蚀情况

| 组号 | 初始重量/g | 腐蚀后重量/g | 实际腐蚀率/% |
|----|--------|---------|---------|
| A | 1 010 | 1010 | 0 |
| B | 1 003 | 875 | 12.8 |
| C | 1 001 | 654 | 34.7 |

钢筋试件通电完成后,制作不同腐蚀程度钢筋混凝土模型,拟制作的模型大小为:150 mm×150 mm×300 mm,混凝土强度等级为C30,模型制作过程中将A、B、C三组不

同腐蚀程度钢筋固定于模具中心位置,然后加入配置好的湿混凝土,在室温下养护 28 天,拆卸模具即可得到不同腐蚀程度钢筋混凝土模型。

2 钢筋混凝土结构微波检测试验

2.1 试验平台及布置

钢筋混凝土结构腐蚀微波检测试验平台如图 3 所示,主要由矢量网络分析仪、钢筋混凝土模型、波导支架、同轴线、微波接收和发射波导等组成。

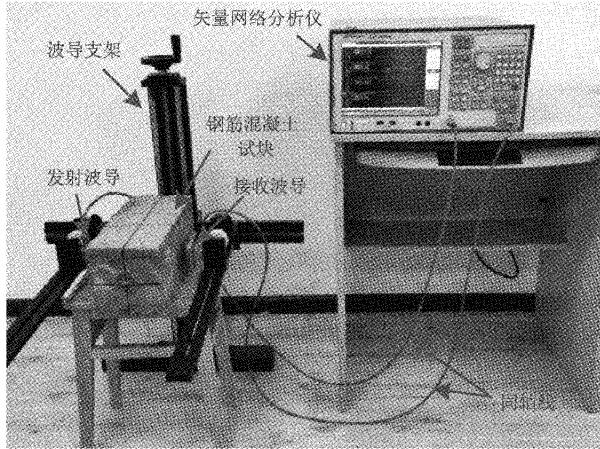


图 3 微波检测试验平台

矢量网络分析仪型号为安捷伦 E5071C,工作频率为 100 kHz~8.5 GHz,用于微波信号的产生和接收处理;钢筋混凝土模型由通电加速腐蚀试验获得;波导支架能实现 XYZ 三个方向的调节,用于支撑波导;同轴线特性阻抗为 50 Ω,用于矢量网络分析仪和波导之间的连接,传输微波信号;微波发射和接收波导的型号为 WR187 矩形波导,频率范围为 4~6 GHz,接口类型为 N-50K,内截面长 47 mm、宽 22 mm、高 54 mm。

2.2 微波检测方法步骤

钢筋混凝土模型微波透射检测布置如图 4 所示,首先将微波发射和接收波导分别放置在模型两侧中心位置(腐蚀缺陷所在位置),波导垂直放置,检测过程中波导位置保持不变,进行 4~6 GHz 全频段微波扫频,获取微波 S_{21} 参数变化规律。

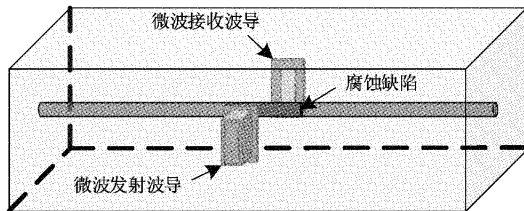


图 4 波导放置方法

钢筋混凝土结构腐蚀微波透射检测试验步骤如下:

1) 搭建微波检测试验平台,设置矢量网络分析仪频率

为 4~6 GHz、扫频间隔 0.01 GHz、微波发射功率 10 dBm;

2) 利用波导校准工具对矢量网络分析仪进行 TRL(直通-反射-线路)校准;

3) 将微波发射和接收波导分别放置于模型两侧,调节波导支架,使两个波导水平中心线对齐并与模型内部腐蚀钢筋所在位置保持一致;

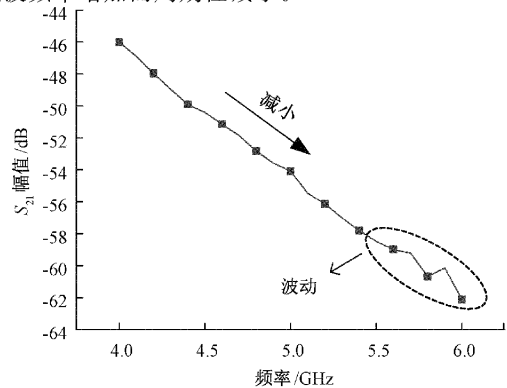
4) 分别以提离距离(波导与试块之间的距离)0、2、4、6、8 和 10 mm 对腐蚀程度 0% 试块进行微波透射检测,确定最佳检测提离距离;

5) 依据最佳检测提离距离对腐蚀程度 0%、10%、20% 三个模型进行微波透射检测,获取 S_{21} 参数变化规律。

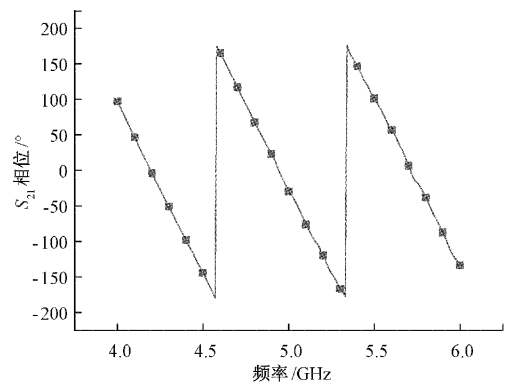
2.3 影响因素分析

1) 微波频率的影响

探究微波频率对 S_{21} 幅值和相位参数的影响,对腐蚀程度 0% 模型进行微波透射检测,微波频率为 4~6 GHz,提离距离为 4 mm,检测结果如图 5 所示。由图 5(a)可以看出: S_{21} 幅值随微波频率增加而减小,在 4~5.5 GHz 之间基本线性下降,5.5~6 GHz 出现较大波动,由于微波频率越高,其在混凝土介质中的衰减速度越大,所以导致 S_{21} 幅值随频率增大而减小,且波动程度变大;由图 5(b)可以看出: S_{21} 相位随微波频率增加出现周期性变化,在 4.6 GHz 和 5.4 GHz 两个频点处线性上升,但其他频点处随微波频率增加而周期性减小。



(a) S_{21} 幅值曲线



(b) S_{21} 相位曲线

图 5 微波频率对 S_{21} 参数的影响

2) 提高距离的影响

波导提高距离会对试验结果产生影响,首先对腐蚀程度0%试块以提高距离0、2、4、6、8和10 mm进行微波透射检测,探究提高距离对 S_{21} 参数的影响。不同提高距离下 S_{21} 幅值变化如图6所示, S_{21} 幅值随频率增大而减小,在提高距离为0~6 mm时幅值曲线较为光滑,当提高距离大于6 mm之后幅值曲线在频率5~6 GHz出现大幅波动。

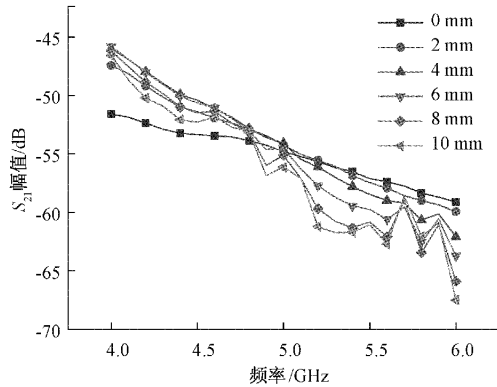


图6 不同提高距离 S_{21} 幅值

不同提高距离下 S_{21} 相位变化如图7所示,在提高距离0~10 mm时, S_{21} 相位随频率呈现周期性变化,同一频点下 S_{21} 相位随提高距离增大而减小,在提高距离为0~6 mm之间时相位曲线较为光滑,当提高距离大于6 mm时曲线出现波动。

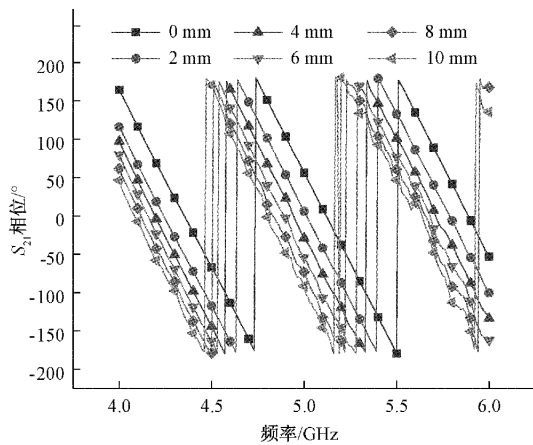


图7 不同提高距离 S_{21} 相位

通过 S_{21} 幅值和相位随提高距离变化情况可知,钢筋混凝土结构腐蚀微波检测的最佳提高距离为0~6 mm,由于提高距离过小不便于检测,过大会使电磁波能量产生较大衰减^[20],影响检测精度,所以后续试验提高距离定为4 mm。

2.4 结果及讨论

1) S_{21} 幅值分析

对腐蚀程度0%、10%和20%模型进行微波透射检测,微波频率设置为4~6 GHz,波导提高距离设置为4 mm。

检测结果如图8所示,钢筋发生腐蚀后, S_{21} 幅值明显减小,当腐蚀程度为10%和20%时, S_{21} 幅值随腐蚀程度增大而增大。分析认为:钢筋发生腐蚀后,微波信号会在混凝土-腐蚀层-钢筋交界处之间产生多次折反射,使得 S_{21} 出现较大衰减,所以钢筋腐蚀后 S_{21} 幅值出现明显减小;但当腐蚀程度为10%和20%时,腐蚀程度越大,内部未腐蚀钢筋直径越小,微波信号的透射能力越强,所以 S_{21} 幅值随腐蚀程度增大而增大。

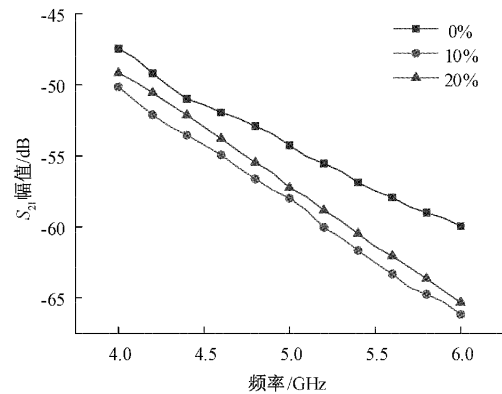


图8 不同腐蚀程度模型 S_{21} 幅值

2) S_{21} 相位分析

不同腐蚀程度模型 S_{21} 相位变化如图9所示,钢筋腐蚀前后, S_{21} 相位均呈现周期性变化规律,但不同腐蚀程度模型 S_{21} 相位之间存在明显差异,同一频点下 S_{21} 相位随腐蚀程度增大而减小,且相位曲线整体随腐蚀程度的增大出现左移趋势。钢筋发生腐蚀后,由于腐蚀层的存在和钢筋直径的变化会影响微波的折反射,所以 S_{21} 相位出现左移。

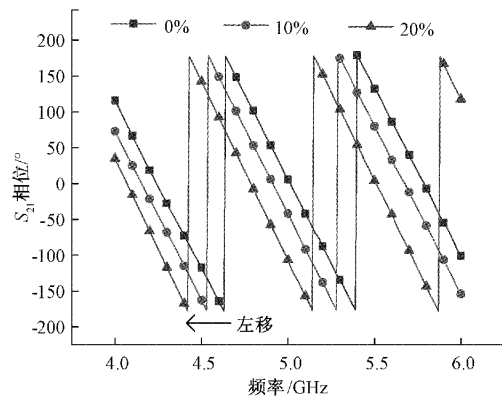


图9 不同腐蚀程度试块 S_{21} 相位

综上所述,通过对钢筋混凝土结构进行微波检测,并对比分析 S_{21} 幅值大小,同时结合相位曲线变化趋势,可实现对混凝土结构内部钢筋不同腐蚀程度的有效检测。

3 微波腐蚀检测机理分析

为进一步分析输变电钢筋混凝土腐蚀微波检测机理,

依据试验混凝土模型建立的微波检测数值仿真模型如图 10 所示。提取矩形波导接收端电场和磁场强度进行分析:将波导正对混凝土试块进行扫描,确定提离距离 d 为 4 mm;在接收端口与模型中心位置设置如图所示场强探针,用于监测电场和磁场数值变化情况。

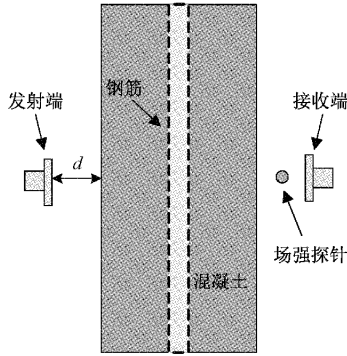


图 10 微波检测数值仿真模型

假设混凝土与钢筋的分界面为无限大的平面,如图 11 所示。设 E 、 H 分别为对应介质层的电场、磁场强度分量;微波从混凝土层垂直入射钢筋层,其入射波大小为 E_i 、 H_i ;混凝土层反射波为 E_r 、 H_r ;进入钢筋层的透射波为 E_t 、 H_t ; n 为沿波传播方向的单位矢量;混凝土层介电常数为 ϵ_0 、磁导率为 μ_0 ,钢筋层介电常数为 ϵ_1 、磁导率为 μ_1 。

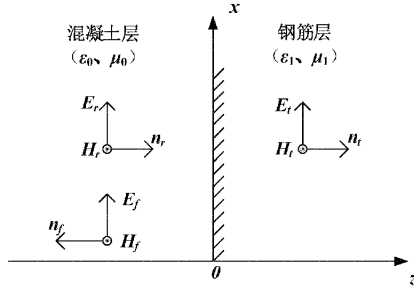


图 11 微波入射钢筋混凝土界面

引入 $\eta_1 = \sqrt{\mu_1/\epsilon_1}$ 、 $\beta_1 = \omega \sqrt{\mu_1\epsilon_1}$, 分别为微波在钢筋层的波阻抗、相位系数^[21]。

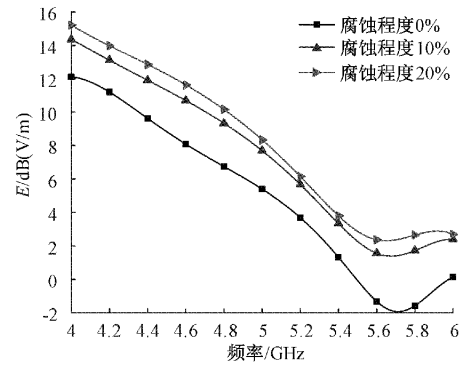
$$E_1 = E_i e^{-i\beta_1 z} \quad (1)$$

$$H_1 = \frac{1}{\eta_1} E_i e^{-i\beta_1 z} \quad (2)$$

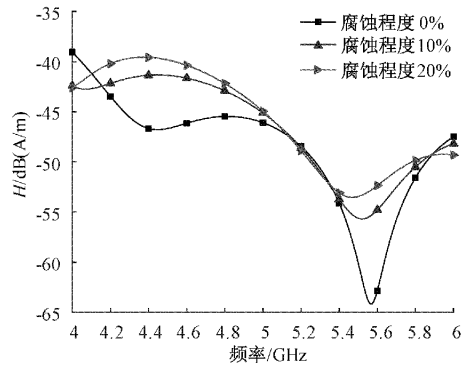
式中: E_1 、 H_1 分别为钢筋层的电场、磁场强度分量。

当钢筋发生不同程度腐蚀时,提取探针所在位置电场和磁场强度数值随微波工作频率的变化情况,其结果如图 12 所示。由图 12 可知,当钢筋发生不同程度腐蚀时,电场和磁场强度数值整体随腐蚀程度的增大而增大,结合式(1)和(2)分析可知:当钢筋发生腐蚀时,其介电常数 ϵ_1 减小,使得钢筋层的波阻抗 η_1 减小,相位系数 β_1 增大,导致电场和磁场强度数值均增大。

在图 12(a)中,不同腐蚀情况下获得的电场强度数值



(a) 电场强度均值



(b) 磁场强度均值

图 12 电场和磁场强度均值

曲线变化趋势基本一致,即随频率的增加而逐渐减小,且当腐蚀程度增加时,数值曲线呈上移趋势,具有一定的规律性。由图 12(b)可知,在频率段 4.2~5.1 GHz 和 5.4~5.8 GHz 获得的磁场强度数值差异较大,数值曲线均随腐蚀程度的增加而上移;在其他频率段内磁场强度数值曲线差异较小,且无明显规律性。

根据定义,微波透射系数 S_{21} 为透射波强度与入射波强度之比,则有:

$$S_{21} = E_t/E_i = 2\eta_1/(\eta_1 + \eta_0) \quad (3)$$

由此说明:钢筋发生腐蚀后,其介电常数 ϵ_1 和磁导率 μ_1 等参数都会发生变化^[22],改变了微波在钢筋层的波阻抗 η_1 ,使得在微波作用下波导接收端口处电场和磁场强度数值整体增大,进而导致透射系数 S_{21} 的变化^[23]。因此,通过分析透射系数幅值和相位的变化情况可实现对输变电钢筋混凝土结构腐蚀状态检测。

4 结 论

本文开展了钢筋通电加速腐蚀试验和钢筋混凝土腐蚀微波透射检测试验,分析了微波 S_{21} 幅值和相位变化规律,得到了如下结论:

湿盐沙环境下,钢筋通电加速腐蚀能获得不同腐蚀程度钢筋试件,其实际腐蚀程度略大于理论腐蚀程度,腐蚀产物主要成分与自然环境下钢筋腐蚀产物基本相同。

钢筋混凝土结构微波透射系数 S_{21} 幅值随微波频率的增大而减小, S_{21} 相位随频率的增大呈现周期性变化;波导提高距离过大会影响检测精度,最佳检测提高距离为 0~6 mm。

钢筋混凝土腐蚀后, S_{21} 参数会发生明显变化,通过 S_{21} 参数变化可识别出腐蚀程度。钢筋腐蚀后, S_{21} 幅值出现明显减小,但随腐蚀程度增大而增大; S_{21} 相位随腐蚀程度增大而减小,整体呈现左移趋势。微波透射法能够检测钢筋腐蚀深度,但对于钢筋腐蚀长度的检测还需要进一步研究。

参考文献

- [1] 黄道春,黎鹏,阮江军,等. 山火引发输电线路间隙放电机理与击穿特性综述[J]. 高电压技术, 2015, 41(2): 622-632.
- [2] 于津,卢纯义,余忠东,等. 基于电磁感应的钢筋定位及埋深检测方法研究[J]. 电子测量技术, 2021, 44(20): 119-125.
- [3] 冯鹏,胡家宇,陈春超,等. 环境因素对江苏沿海输变电钢筋混凝土的劣化机制分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(S1): 448-454.
- [4] 单旷怡,李天,严传标,等. 塔脚腐蚀对输电铁塔安全性能的影响[J]. 腐蚀与防护, 2021, 42(3): 28-33, 63.
- [5] 戴沁楠,周斌,钟景阳,等. 基于超宽带步进频 GPR 和 EMI 的钢筋检测[J]. 电子测量技术, 2021, 44(5): 34-40.
- [6] 王伟,李永恒,李思琪,等. 基于改进 BP 神经网络的钢筋混凝土井壁极限承载力随机分析[J]. 中国测试, 2023, 49(6): 36-41.
- [7] 林旭梅,刘帅,石智梁. 基于改进 PSO-FNN 算法的钢筋混凝土腐蚀检测研究[J]. 中国测试, 2020, 46(12): 149-155.
- [8] 张睿哲,周恺,任志刚,等. 输电杆塔接地扁钢 SH 导波腐蚀缺陷检测方法研究[J]. 中国测试, 2021, 47(8): 51-57.
- [9] 王琳,王黎明,聂鹏飞,等. 非连续阻抗结构超声传播特性分析[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(10): 140-144.
- [10] ZHAO L, WANG X, ZHAO B, et al. Non-destructive testing method for crack based on diamond nitrogen-vacancy color center[J]. Instrumentation, 2022, 9(1): 56-64.
- [11] 孙红芳,赵钊钊,李冠桦,等. 利用 X 射线微型计算机断层扫描技术(Micro-XCT)进行钢筋的通电腐蚀行为及裂缝的三维分布研究[J]. 电子显微学报, 2015, 34(6): 514-520.
- [12] 王若男,李勇,何沛林,等. 涡轮叶片热障涂层减薄缺陷的微波扫频定量检测[J]. 传感器与微系统, 2022, 41(8): 104-107.
- [13] 徐兴明,牛玉广,胡博,等. 波导内飞灰灰位与折射率的微波测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(4): 169-178.
- [14] 周萌,毛岩鹏,王文龙,等. 应用于微波场的温度测量方法的研究进展[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(11): 221-235.
- [15] 冯琼,乔宏霞,朱彬荣,等. 湿盐砂环境下钢筋混凝土加速锈蚀试验研究[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(4): 568-575.
- [16] 温婷. 钢筋混凝土构件通电锈蚀试验适用性研究[D]. 宜昌:三峡大学, 2014.
- [17] GB/T 50082-2009, 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S]. 国家市场监督管理总局, 2009.
- [18] ZHAO Y X, REN H Y, DAI H, et al. Composition and expansion coefficient of rust based on X-ray diffraction and thermal analysis[J]. Corrosion Science, 2011, 53(5).
- [19] 徐港,艾天成,刘德富,等. 掺盐率对钢筋混凝土试件通电锈蚀特征的影响[J]. 混凝土, 2010, (3): 58-60.
- [20] 秦鸿. 基于微波透射原理的木材含水率检测方法研究[D]. 成都:电子科技大学, 2021.
- [21] 周在杞,周克印,许会. 微波检测技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2008.
- [22] 王旭杰,王中华,陈建斌,等. 基于微波反射法的输变电钢筋混凝土腐蚀检测[J]. 浙江电力, 2022, 41(4): 62-67.
- [23] 翟超宇,刘善军,郭嘉兴. 基于微波干涉理论的岩石介电常数测试方法[J]. 电子测量技术, 2022, 45(15): 1-5.

作者简介

王中华,高级工程师,主要研究方向为配电网管理、科技管理、信息新技术管理等。

E-mail: 83680177@qq.com

林军,高级工程师,主要研究方向为继电保护、信息新技术管理。

E-mail: linjun2009@163.com

喻红林,硕士研究生,研究方向为高电压绝缘技术。

E-mail: 939957008@qq.com

黎子晋,硕士研究生,研究方向为高电压绝缘技术。

E-mail: 850544376@qq.com

黎鹏(通信作者),博士,副教授,主要研究方向为电力设备智能运维、电工装备多物理场分析等。

E-mail: lipeng_ctgu@163.com

吴田,博士,副教授,主要研究方向为带电作业、高电压与绝缘技术等。

E-mail: wutian_08@163.com