

文章编号:1006-3080(2013)05-0625-04

# 应力腐蚀裂纹的电涡流法检测及裂纹模型

王 晶<sup>1,2</sup>, 遊佐訓孝<sup>2</sup>, 潘红良<sup>1</sup>, 橋爪秀利<sup>2</sup>

(1. 华东理工大学机械与动力工程学院, 上海 200237;

2. 東北大学工学院量子与能源工程系, 日本仙台 9808579)

**摘要:**建立合理的应力腐蚀裂纹模型对于利用电涡流法定量评估裂纹大小起着至关重要的作用。通过对应力腐蚀裂纹的电涡流法检测实验信号与模拟信号的分析,研究了应力腐蚀裂纹的导电性。结果表明,讨论应力腐蚀裂纹的等效电阻比单独讨论等效宽度及等效电导率更有意义。采用应力腐蚀裂纹的分布导电性模型更有利于重建基于电涡流信号的裂纹形貌。

**关键词:**电涡流检测; 应力腐蚀裂纹; 导电性; 无损检测

中图分类号:TB303

文献标志码:A

## Inspection and Modeling of Stress Corrosion Crack by Eddy Current Testing

WANG Jing<sup>1,2</sup>, YUSA Noritaka<sup>2</sup>, PAN Hong-liang<sup>1</sup>, HASHIZUME Hidetoshi<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 2. Department of Quantum Science and Energy Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University, Sendai 9808579, Japan)

**Abstract:** The electric characteristic of stress corrosion crack (SCC) in eddy current testing (ECT) through analyzing experimental and simulated signals was discussed. Inspection of SCC firstly was carried out. In the following simulation SCC was modeled based on the results of destructive testing. The results show that it is more appropriate to focus on equivalent resistance of SCC in the eddy current simulation. Furthermore considering the distribution of conductivity enables the better reconstruction of SCC.

**Key words:** eddy current testing; stress corrosion crack; conductive character; nondestructive testing

作为一种清洁高效的能源,核能在如今能源紧缺的局势下,扮演着举足轻重的作用。我国已明确指出要大力发展核电,争取在2020年达到核电年发电量约 $2.7 \times 10^{12}$  kW·h。为了确保核电站的安全运行,对核设备制造材料的性能有很高的要求。不锈钢具有较高的热强性,良好的抗氧化、抗腐蚀能力和焊接性能,所以被广泛用于核电站堆内构件、一回路冷却循环系统等的建设中。然而由于不锈钢对应力腐蚀的敏感性,不锈钢件的应力腐蚀开裂成为严

重威胁核电站安全及高效运行的问题之一,定期对核电设备进行检测,加强对应力腐蚀裂纹(SCC)的监测,具有重大意义。在检测应力腐蚀裂纹的过程中,通常先利用目视检测及电涡流检测法对其进行定性评估,以确定裂纹出现的位置,再使用超声探测的方法进行定量评估。然而近些年随着电磁检测的计算机辅助技术的快速发展,使用电涡流检测对裂纹进行定量评估不再遥不可及<sup>[1]</sup>。另一方面,相比超声探测的方法,电涡流法检测无需用耦合剂,利于

实施快速检测。因而研究使用电涡流法检测应力腐蚀裂纹对于维护核电站的安全及高效运行具有重要的意义。

国内外不少学者已经进行了电涡流法检测应力腐蚀裂纹方面的研究工作<sup>[2-8]</sup>。已有研究表明电涡流法能有效地检测应力腐蚀裂纹,建立合理的应力腐蚀裂纹模型对于真实裂纹形貌的准确反演,即电涡流检测的逆问题的解决,具有重要作用。这些研究中,应力腐蚀裂纹被视为导电性区域,然而由于对模型的导电性能缺少细致的研究,仅仅将其定义为能够导电,则利用电涡流法反演出的裂纹与其真实的形貌有时仍相差甚大。因此建立更加合理的应力腐蚀裂纹的模型对于应用电涡流法进行定量评估有着非常重要的意义。

本文对涡流检测的实测信号与模拟信号进行对比,通过分析基于两种不同的裂纹模型的涡流信号,对应力腐蚀裂纹的导电性做了深入研究。该研究结果为涡流检测应力腐蚀裂纹中的模型优化问题提供了可靠依据。

## 1 试样的制备及涡流信号的采集

### 1.1 应力腐蚀裂纹试样的制备

本文以人工应力腐蚀裂纹为考察对象,选用长度、宽度、厚度分别为 160、100、15 mm 的奥氏体不锈钢板(电导率为  $1.3 \times 10^6$  S/m, 相对磁导率为 1)为裂纹生成的基体。模拟应力腐蚀裂纹的生长环境,首先对试样实施了 4 点弯曲试验,再将其浸入酸性溶液,最终引入 3 条应力腐蚀裂纹。详细的人工应力腐蚀裂纹制作方法见参考文献[9]。

### 1.2 涡流检测信号的采集与标定

采用如图 1 所示的差动式探头。探头由两个矩形线圈垂直交叉组成,每个线圈同时作为激励与检出,两个线圈的信号差值为输出信号。电涡流检测所用频率为 50 kHz 和 100 kHz,探头提离为 1.0 mm。首先采集由标准裂纹产生的信号,实验标定用标准裂纹的长度、宽度和深度分别为 10.0、0.3 mm 和 5.0 mm。具体标定方法如下:通过对标准裂纹信号幅值乘以一定的比例因子,将其幅值化为 1,同时旋转原相位,使其为 45°;然后采集应力腐蚀裂纹的信号,再利用与上述归一化过程相同的比例因子乘以裂纹信号的幅值,并且以相同的角度转换信号相位,最终得出经过标定的应力腐蚀裂纹的电涡流实测信号。

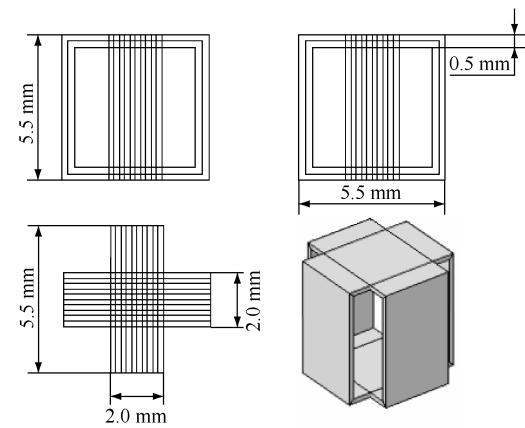


图 1 电涡流检测用差动式探头

Fig. 1 Differential type probe of eddy current testing

### 1.3 裂纹形貌的获取

电涡流检测完毕后,通过对试样进行渗透检测,得到了 3 条应力腐蚀裂纹的表面长度,分别为 15.0、27.0 mm 和 13.0 mm。另一方面,对裂纹进行破坏性实验。根据裂纹表面的长度,沿裂纹长度方向将试样切割成厚度为 2 mm 的多个薄片。通过测量每一薄片上的裂纹深度获得较完整的自然裂纹形状参数,即裂纹的深度。薄片处所示裂纹典型形貌如图 2 所示。

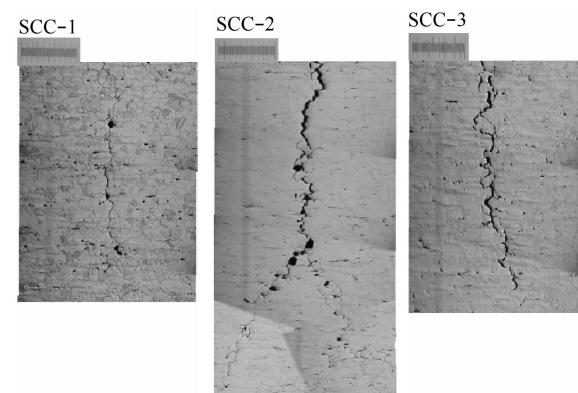


图 2 应力腐蚀裂纹沿深度方向的典型截面

Fig. 2 Cross-sectional profiles of SCC

## 2 电涡流法检测应力腐蚀裂纹的导电模型

### 2.1 应力腐蚀裂纹的均匀导电性模型

采用有限元软件 Comsol Multiphysics 4.2a 的 AC/DC 模块进行仿真计算。AC/DC 模块可用来求解静电场、静磁场、直流交流电磁场及与其他物理场的无限制耦合问题。本文属于求解交流电磁场范畴,基本方程如下:

$$(j\omega\sigma - \omega^2\epsilon)\mathbf{A} + \nabla \times (\mu^{-1} \nabla \times \mathbf{A}) = J_0 \quad (1)$$

式中:  $\omega$  为角频率;  $\sigma$ 、 $\epsilon$  和  $\mu$  分别为电导率、介电常数和磁导率;  $\mathbf{A}$  为矢量磁位;  $J_0$  为激励电流的电流密度;  $j$  为虚部单位量;  $\nabla \times \mathbf{A}$  表示对矢量磁位  $\mathbf{A}$  求旋度。

建立如图 3 所示的电涡流法检测应力腐蚀裂纹的模型。应力腐蚀裂纹的长度和深度由先前的渗透和破坏性检测结果可得。基于均匀导电性模型的理念, 仿真中, 首先设定应力腐蚀裂纹区域的宽度为一系列可变值, 再针对每一个宽度, 选取不同的电导率进行仿真, 得出模拟信号, 然后采用与实验中相同的方法标定模拟信号, 最后在分析模拟信号与实验信号的基础上, 可得出应力腐蚀裂纹的等效宽和等效电导率。等效宽和等效电导率定义为当模拟信号和实验信号的差值(仿真信号最大值与实测信号最大值之差)达到最小时的裂纹宽与电导率<sup>[10]</sup>。本文设定的裂纹宽为 0.03, 0.04, 0.05, 0.10, 0.20, 0.40, 0.60, 0.80, 1.00 mm; 裂纹电导率占基体电导率的比例为 0.05%, 0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.4%, 0.5%, 0.6%, 0.7%, 0.8%, 0.9%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 2.5%, 3.0%, 3.5%, 4.0%, 4.5%, 5.0%, 5.5%, 6.0%, 6.5%, 7.0%, 7.5%, 8.0%, 8.5%, 9.0%, 10.0%。3 条应力腐蚀裂纹在不同检测频率下的等效宽和等效电导率如表 1 所示。

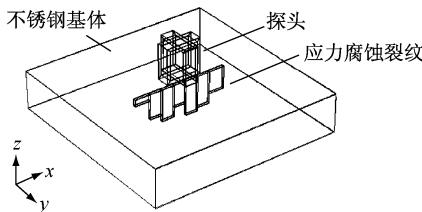


图 3 电涡流检测应力腐蚀裂纹模型

Fig. 3 Geometric model of simulation

## 2.2 应力腐蚀裂纹的分布导电性模型

采用分布导电性模型对应力腐蚀裂纹进行模拟, 如图 4 所示, 假定裂纹区域的导电率沿深度方向变化, 即裂纹区域沿深度方向被划分为 2 部分, 每部分具有不同的深度和电导率。为了调查应力腐蚀裂纹边缘的相对高导电性的可能性, 变化下半部分(可视为裂纹的边缘)电导率占基体电导率的比例为 5.0%, 6.0%, 7.0%, 8.0%, 9.0%, 10.0%, 20.0%, 30.0%, 40.0%, 50.0%, 60.0%, 70.0%, 80.0%, 90.0%。与此同时, 裂纹上半部分的电导率仍设为等效电导率。依据破坏性实验得到的裂纹最大深度, 为了合理地划分裂纹区域, 针对不

同的裂纹, 假定其具有不同深度的边缘, 具体来讲, 设 SCC-1 的高导电性边缘可能值为 1.0、2.0 mm 和 3.0 mm, SCC-2 为 2.0、3.0 mm 和 4.0 mm, SCC-3 为 1.0、1.5 mm 和 2.0 mm。对每一条裂纹, 按照之前所述, 设置其高导电性边缘的电导率和深度, 得出多组仿真结果。再将仿真结果和实验结果进行比较, 求出最小的实验与仿真的差值。利用分布导电性模型得出的结果在表 2 中列出, 若设置裂纹边缘具有表中数据所示的电导率和边缘深度, 则实验与仿真的差值达到最小。

表 1 应力腐蚀裂纹的等效宽和等效电导率

Table 1 Equivalent width and equivalent conductivity of SCC

裂纹	$f/\text{kHz}$	等效宽/mm	等效电导率 <sup>1)</sup> /%	实验与仿真的差值
SCC-1	50	0.10	4.0	0.052 1
	100	0.03	1.3	0.056 1
SCC-2	50	0.60	4.0	0.069 6
	100	0.40	3.0	0.060 2
SCC-3	50	0.05	3.2	0.024 5
	100	0.04	2.4	0.024 2

1) 占基体电导率的比例

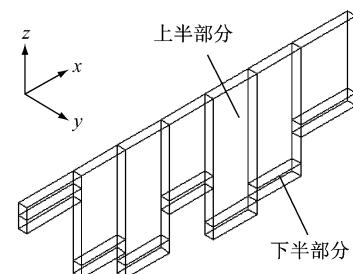


图 4 应力腐蚀裂纹的分布导电性模型

Fig. 4 Model of SCC with distributed conductivity

## 3 基于实验与仿真的信号讨论

电涡流检测信号包含了幅值和相位两方面的信息, 所以需要从这两方面对模型的合理性进行评价。对比表 1 和表 2 最后一栏, 实验与仿真的差值减小为原来差值(由均匀导电性模型得出)的 40% 左右。因此从幅值的角度出发, 由分布导电性模型得出的电涡流检测信号更好地反映了应力腐蚀裂纹的实测信号。从相位的角度出发, 表 3 列出了使用两种裂纹模型时涡流信号相位的变化。结果表明, 由分布导电性模型得出的信号相位与实测信号相位的差明

显小于由均匀导电性模型得出的差,前者约为后者的50%。说明应力腐蚀裂纹区域的导电性具有从表面沿深度方向增大的趋势,使用分布导电性模型更加合理,有利于信号的准确重构;另一方面,对应力腐蚀裂纹沿深度方向切片,然后实际测量其电导性的实验,也证实了这一结论<sup>[11]</sup>。

表2 由应力腐蚀裂纹的分布导电模型得出的结果

Table 2 Results of model of SCC with distribution of conductivity

裂纹	$f/\text{kHz}$	裂纹本体 电导率 <sup>1)</sup> /%	裂纹边缘 电导率 <sup>1)</sup> /%	边缘深度/ mm	实验与仿 真的差值
SCC-1	50	4.0	10	3.0	0.037 9
	100	1.3	10	3.0	0.037 5
SCC-2	50	4.0	30	3.0	0.044 2
	100	3.0	10	4.0	0.036 1
SCC-3	50	3.2	20	1.5	0.015 4
	100	2.4	8	2.0	0.010 8

1) 占基体电导率的比例

表3 实验与模拟得出的电涡流信号相位比较

Table 3 Comparison of measured and simulated phase of signal

裂纹	$f/\text{kHz}$	信号相位/(°)		
		均匀导电性模型	分布导电性模型	实测值
SCC-1	50	37.723 5	42.790 8	49.525 7
	100	36.235 4	42.574 6	48.462 2
SCC-2	50	37.016 3	41.628 6	43.999 7
	100	35.837 5	39.416 8	41.895 2
SCC-3	50	38.672 1	43.720 5	46.016 2
	100	35.823 7	41.356 9	43.019 4

本文使用了两种频率来检测应力腐蚀裂纹。参考检测频率的变化,依据表1的结果,可以得出:尽管裂纹的等效宽度和等效电导率随频率的升高而降低,且变化较明显,但是等效电阻(定义为等效宽与等效电导率的比值)的改变相对很小<sup>[7]</sup>,说明在求解电涡流的逆问题时,为了准确重构应力腐蚀裂纹,应合理地限制裂纹的等效电阻值,而不是等效宽或者等效电导率。

进一步分析表1的结果,在本文研究的3种应力腐蚀裂纹中,SCC-2明显具有较大的等效宽,而其他两条裂纹的等效宽则较小。由此可看出,模拟得出的结果与破坏性实验(图2)吻合。SCC-2沿裂纹生长方向具有分支,而SCC-1和SCC-3分别只有一个生长方向。

另外,由表2还可知,应力腐蚀裂纹具有分布的电导率。然而导电性更好的边缘区域大小以及其导

电率的取值无明显变化规律,该模型尚需要进一步研究。

## 4 结 论

本文研究了电涡流检测应力腐蚀裂纹的模型优化问题。在分析两种模型的模拟信号与真实裂纹实验信号的基础上,探讨模型的合理性,说明了研究应力腐蚀裂纹的等效电阻相比单独讨论等效宽度及等效电导率更具意义,同时也指出了应力腐蚀裂纹具有分布导电性,为电涡流逆问题求解中的裂纹模型优化提供了依据。

致谢:本文在写作过程中承蒙日本发电设备技术检查协会熔接与非破坏检查技术中心程卫英博士的悉心指导,谨致谢忱。

## 参 考 文 献:

- [1] Auld B A, Moulder J C. Review of advances in quantitative eddy current nondestructive evaluation[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 1999, **18**(1): 3-36.
- [2] Chen Z, Aoto K, Miya K. Reconstruction of cracks with physical closure from signals of eddy current testing[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, **36**(4): 1018-1022.
- [3] 张思全,陈铁群,刘桂雄. 应力腐蚀裂纹涡流检测信号的处理及形状重构[J]. 核动力工程,2008,**29**(6): 50-53.
- [4] Tanaka M, Tsuboi H. Finite element model of natural crack in eddy current testing problem[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, **37**(5): 3125-3128.
- [5] Yusa N, Perrin S, Mizuno K, et al. Numerical modeling of general cracks from the viewpoint of eddy current simulations [J]. NDT and E International, 2007, **40**(8): 577-583.
- [6] Badics Z, Matsumoto Y, Aoki K, et al. Finite Element Models of Stress Corrosion Cracks (SCC) in 3-D Eddy Current NDE Problems, Nondestructive Testing of Materials[M]. Paddy field: IOS Press, 1995: 21-29.
- [7] 黄太回,张东利,陈振茂. 基于涡流信号的应力腐蚀裂纹区域电导率特性研究[J]. 测试技术学报,2010, **24**(1): 58-61.
- [8] Ohshima K, Hashimoto M. Research on numerical analysis modeling of SCC on eddy current testing[J]. Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2002, **10**(4): 384-388.
- [9] Yusa N, Perrin S, Miya K. Eddy current data for characterizing less volumetric stress corrosion cracking in nonmagnetic materials[J]. Materials Letters, 2007, **61**(3): 827-829.
- [10] Yusa N, Hashizume H. Evaluation of stress corrosion cracking as a function of its resistance to eddy currents[J]. Nuclear Engineering and Design, 2009, **239**(12): 2713-2718.
- [11] Yusa N, Hashizume H. Four-terminal measurement of the distribution of electrical resistance across stress corrosion cracking[J]. NDT and E International, 2001, **44**(7): 544-546.