

支柱瓷绝缘子的超声检测有效性

李晓红, 王敏, 吴敏, 陈开路

(1. 武汉大学动力与机械学院, 湖北省武汉市 430072; 2. 福建省电力试验研究院, 福建省福州市 350007)

Ultrasonic Testing Validity of Porcelain Post Insulators

LI Xiao-hong, WANG Min, WU Min, CHEN Kai-lu

(1. College of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China;

2. Fujian Electric Power Test & Research Institute, Fuzhou 350007, Fujian Province, China)

ABSTRACT: The results of ultrasonic testing depend on consistent degree of calibration between blocks and the tested objects. According to surface characteristics and defects status of porcelain post insulators, a series of similar porcelain calibration blocks with different defects were designed. While the probes were made with different frequencies and refractive angles. Then the blocks were tested by small angle longitudinal wave and creeping wave, in order to heighten reliability and validity of testing post porcelain insulators in service. The probes were made with different frequencies and refractive angles. Experimental results show that small angle longitudinal wave can detect internal defects sensitively, but it is interfered by porcelain sands seriously when detecting small surface defects. Creeping wave can detect surface defects sensitively ignoring effects of porcelain sands. Hence, small internal and surface defects of porcelain insulators can not be detected completely by single small angle longitudinal wave or creeping wave. Testing technique combining two methods is put forward to insure testing validity.

KEY WORDS: porcelain insulator; ultrasonic; validity

摘要: 超声检测的结果依赖于试块与实际检测对象的吻合程度。为了提高运行中支柱瓷绝缘子检测的有效性和可靠性, 结合支柱瓷绝缘子的瓷柱表面特征、以及产生的缺陷状况, 设计制作了含有不同缺陷的系列模拟试块, 并用研制的不同频率、不同折射角的小角度纵波探头和爬波探头对其进行测试研究。试验结果表明, 小角度纵波探头对瓷柱内部缺陷有很好的检测灵敏度, 而检测表面小裂纹时会受到瓷柱表面瓷砂的严重干扰; 爬波探头不受瓷砂的影响, 能灵敏地检测瓷柱表面裂纹。所以, 单独使用小角度纵波方法或爬波方法, 均不能完全检测出绝缘子瓷体内部与表面的小缺陷; 应将两种方法结合使用, 才能保证实际检测的有效性。

关键词: 瓷绝缘子; 超声波; 有效性

0 引言

绝缘子的劣化和失效直接影响电网运行, 如何对其进行检测一直是研究的重要课题^[1-5]。近年来, 超声检测技术在绝缘子检测中倍受关注^[6-9], 针对支柱瓷绝缘子频繁发生的断裂^[10], 文献[11]研究用小角度纵波检测支柱瓷绝缘子; 文献[12-14]研究用爬波进行检测的方法。然而, 在役支柱瓷绝缘子的瓷体表面粘有一层瓷砂, 而非光洁的釉面; 瓷体表面的裂纹与人工切槽在宽度、平整度及取向上也很不相同, 仅用瓷试块人工切槽或钢试块切槽进行研究, 必然影响实际检测的有效性。此外, 爬波的有效检测还与探头距缺陷的远近密切相关。所以, 本文针对在役支柱瓷绝缘子的实际检测条件, 设计制作了粘有瓷砂的系列模拟试块(表面有烧结裂纹和自然裂纹), 深入研究了影响在役瓷绝缘子检测的各种因素, 提出一套有效、可靠的探伤工艺方法, 并在实际检测中取得良好效果。

1 研制的试块与探头

本文设计了系列模拟试块, 由绝缘子生产厂家配合制作, 不仅试块的材质、烧结工艺等与支柱瓷体相同, 而且试块表面烧结的瓷砂也与瓷绝缘子相同。考虑实际瓷体裂纹与人工切槽差别较大, 还制作了表面自然裂纹、烧结裂纹(在坯样上预制裂纹再烧结), 以及瓷体内部缺陷; 各试块的表面裂纹位于试块中间, 呈弓形沿周向分布, 与绝缘子失效断裂的取向一致, 编号如下: 1# 试块有四条表面烧结裂纹, 深度分别为 1、3、5、7mm, 表面粘结瓷砂, 见图 1。2# 试块内部有一缺陷: 厚 2mm、直径 1.5mm, 与试块端面平行, 表面有 1、3、5、7mm

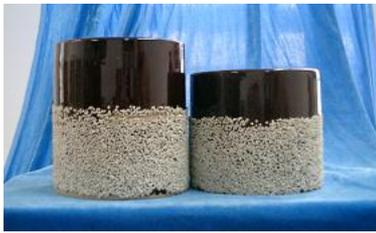


图1 1#瓷砂试块

Fig.1 1# porcelain calibration block covered sands

深烧结裂纹，釉面不粘结瓷砂。3#试块有两条表面自然裂纹，深度分别为12、20mm。4#试块有人工切槽，深度分别为1、3、5、7mm。自然裂纹、烧结裂纹、人工切槽开口缝隙分别为0.2、0.7、1.4mm。

研究用的探头编号为：1-1~1-4#小角度纵波探头，频率5MHz、折射角分别为9°、10°、11°、12°；2-1~2-4#小角度纵波探头，频率2.5MHz，折射角分别为9°、10°、12°、14°；3-1~3-4#爬波探头，频率2.5MHz、晶片的倾斜角度不同。

本研究所用仪器为“HS510”数字探伤仪，实验方法为接触式超声脉冲反射法，以机油作耦合剂。

2 小角度纵波检测的有效性研究

2.1 表面裂纹的检测

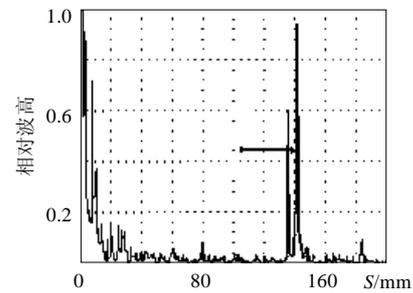
2.1.1 裂纹类型的影响

小角度纵波一般指在第二介质中折射角小于15°的纵波，由于其独特的传播特点，被用于检测奥氏体不锈钢小裂纹^[15]、铝合金胶接界面的紧粘型脱粘^[16]，以及支柱瓷绝缘子裂纹等缺陷。

为研究缺陷类型及瓷砂对小角度纵波检测的有效性影响，用两组小角度纵波探头，对1~2#试块烧结裂纹、3#试块自然裂纹进行检测，并与4#试块人工切槽进行比较。

2#釉面试块表面有深度不同的烧结裂纹，用5MHz和2.5MHz的两组探头检测，仅当探头移动很慢时，才能将7mm及以上深度的裂纹波与底波分辨出来，分别为图2所示的前后两个波，否则仅出现底波。用上述探头测试4#试块上的人工切槽，很容易扫查到5mm深切槽回波。在同一灵敏度下，5mm深切槽的回波较7mm深的烧结裂纹回波平均高出4~5dB，而且切槽回波显示灵敏，所以，用切槽试块调节实际探伤灵敏度偏低。

表面烧结裂纹与人工切槽相比，其开口细小，裂纹尖端更细小，也无人工切槽平直光滑，对超声



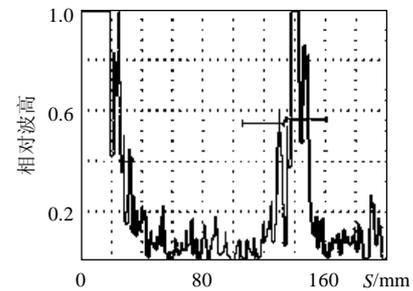
$H=50.4\text{mm}; L=126.1\text{mm}; S=135.8\text{mm};$

闸门锁定相对波高0.6的回波波幅43.9dB。

图2 7mm深烧结裂纹回波

Fig.2 Echo of 7mm deep sintering crack

波的散射、绕射作用增强，反射降低；而自然裂纹的开口缝隙只有0.2mm，裂纹尖端更加细小。两组探头对3#试块中的自然裂纹检测，发现信噪比较烧结裂纹和切槽都要差，见图3，并且探头扫查的速度要很慢时，自然裂纹回波才有反应。



$S_1=130.0\text{mm}; S_2=138.1\text{mm};$

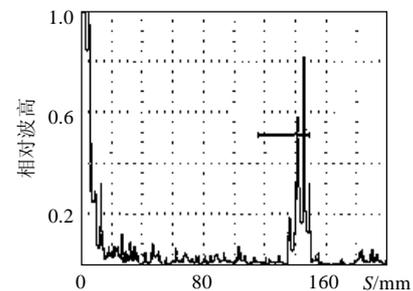
闸门锁定相对波高0.6的回波波幅41.4dB。

图3 12mm深自然裂纹回波

Fig.3 Echo of 12mm deep natural crack

2.1.2 瓷砂的影响

用上述两组探头对1#试块和2#试块研究比较，发现扫查2#试块底波处无杂波，无表面裂纹时底波单一；而1#试块因其表面的瓷砂影响，使底波位置的杂波增多，无表面裂纹时底波处也有双波，甚至多波，见图4和图5。因此，用小角度纵波检测在役瓷绝缘子时，瓷砂的不良影响很大，在底波处产生的杂波，严重干扰了表面裂纹回波的识



$H=52.8\text{mm}; L=132.0\text{mm}; S=142.1\text{mm};$

闸门锁定相对波高0.6的回波波幅44.0dB。

图4 无缺陷处底波(1#瓷砂试块)

Fig.4 Bottom echo (1# calibration block)

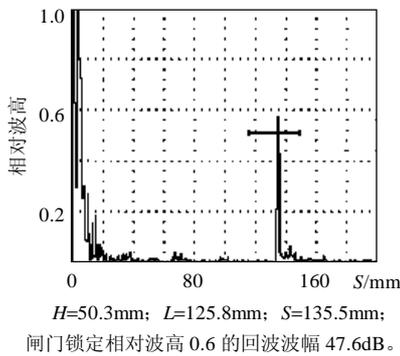


图 5 无缺陷处底波 (2# 釉面试块)
Fig.5 Bottom echo (2# calibration block)

别,尤其是小裂纹的识别。但随着裂纹深度的增加,其回波与底波之间的声程差随之增加,使得较深的表面裂纹波可与底波处杂波分开,见图 6。

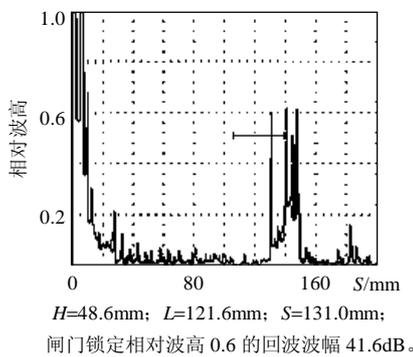


图 6 10mm 深裂纹回波
Fig.6 Echo of 10mm deep crack

上述研究表明,用小角度纵波探伤在役瓷绝缘子时,若裂纹深度不大,识别裂纹回波困难,易误判和漏检,检测的有效性和可靠性低;用人工切槽试块代替自然裂纹调节探伤灵敏度,更易引起表面裂纹的漏检。

2.2 内部缺陷的检测

用小角度纵波探头,径向探测 2# 试块直径为 1.5mm 内部缺陷,以满屏的 60% 波幅为基准,各探头检测结果见表 1,检测波形见图 7,缺陷波位于底波之前。可见,小角度纵波检测直径为 1.5mm 缺陷的灵敏度很高,回波清晰;实测缺陷波幅仅比底波低 12~15dB,该数据可作为现场用底波调节探伤灵敏度的依据。

表 1 检测 1.5mm 缺陷的波幅
Tab.1 Echo amplitude of 1.5mm defect

探头	缺陷波高/dB	探头	缺陷波高/dB
1-1	37.4	2-1	43.8
1-2	35.6	2-2	46.0
1-3	38.1	2-3	46.4
1-4	39.8	2-4	47.5

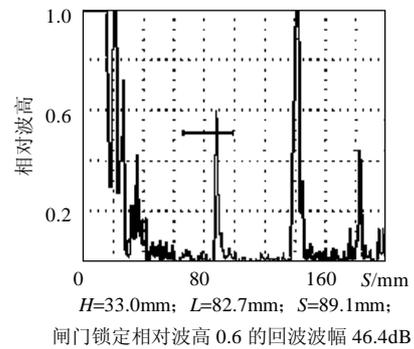


图 7 F 1.5mm 缺陷波形
Fig.7 Echo of F 1.5mm defect

3 爬波检测的有效性研究

3.1 检测距离、裂纹深度及裂纹回波高度的关系

爬波能量(或质点位移)集中于表面附近,但极大值并不沿表面,而与表面成一定角度;随着入射角的增大,幅度极大值射线方向角随之增大,但极大值随之减小^[17]。此外,爬波与体纵波相比衰减快,传播的距离很有限^[18]。所以,检测距离(爬波探头至裂纹距离)、裂纹深度、裂纹回波高度之间的关系,是爬波有效性检测中非常重要的因素。据在役绝缘子的事统计,裂纹约 95% 发生在法兰口内 30mm 到第一伞裙之间^[19-20]。因此,要保证爬波对在役绝缘子的有效性检测,其灵敏度至少为能检测出 30mm 远的瓷体表面 1mm 深的小裂纹。

本文在研究中发现,若无检测距离的要求,爬波探头容易检测出 1mm 深的瓷体表面裂纹,但随着检测距离的增加,爬波探头仅可检测出较深的裂纹。如用 3-1#、3-2# 爬波探头,在 1# 试块上检测深度不同的烧结裂纹时,30mm 远的距离,1mm 深的裂纹回波很低,与杂波混在一起区分不开;而当探头移向裂纹时,其回波增加,分别在 16mm 和 19mm 处,1mm 深的裂纹回波才能与杂波区分开(波幅相差 6dB 以上)。同样 30mm 远的距离,在检测 5mm 及以上深的裂纹时,裂纹回波明显高于杂波,检测人员很容易识别确定。上述实验表明,若用 3-1#、3-2# 爬波探头检测在役绝缘子,仅能检出瓷体在法兰口附近 1mm 深的裂纹;离法兰口 20~30mm 远的范围,4mm 深以下的裂纹易漏检。因此,在役绝缘子检测前,必须对爬波探头进行有效检测距离和裂纹深度的测试。

在 30mm 远的距离,用 3-3#、3-4# 探头能灵敏的检测出 1mm 深的裂纹,其回波波幅很高。以 60% 裂纹回波高为基准,记录 3-3#、3-4# 探头在 30mm 远测得不同深度的裂纹波高,列入表 2。可

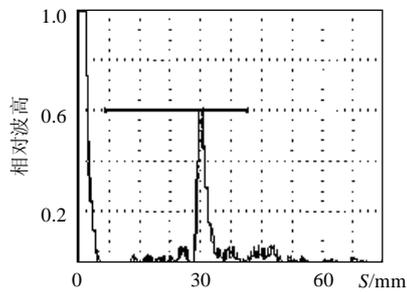
表2 30mm远不同深度裂纹对应的回波高度
Tab.2 Echo amplitude of defects in 30mm distance

探头 编号	不同深度裂纹对应的波幅/dB			
	1mm	3mm	5mm	7mm
3-3	34.5	38.4	38.8	40.5
3-4	35.4	39.1	39.5	40.3

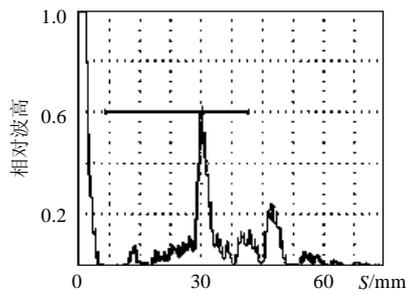
可以看出,只要爬波探头设计制作合适,可以灵敏的检测出30mm远1mm深的表面裂纹;裂纹深度在7mm内,随裂纹深度增加,其回波波幅随之增加,信噪比提高,裂纹更易检出。

3.2 瓷砂对爬波的影响

用3-3#、3-4#爬波探头分别对1#瓷砂型试块和2#釉面型试块上的裂纹进行测试比较,发现二者同距离、同深度的裂纹回波波形差别很小,说明瓷砂并没有对检测产生影响,图8为两个试块中5mm深的裂纹波形。所以,用爬波检测支柱瓷绝缘子表面小裂纹灵敏、可靠。



(a)1#瓷砂型试块



(b)2#釉面型试块

图8 瓷砂试块和釉面试块的裂纹回波波形比较
Fig.8 Waveform comparison of calibration blocks with and without sands

4 应用

本文用小角度纵波与爬波相结合的方法、以及所研究的探伤工艺,对某电业局下设的两个变电站三百多根220kV支柱瓷绝缘现场检测,发现上、下法兰结合处11根内部缺陷和4根表面裂纹,拆下后解剖均得到确定。

5 结论

通过在系列试块上用小角度纵波和爬波进行有效性检测研究,得出下列结论:

(1) 受自然裂纹反射条件差与瓷体表面粘结瓷砂的影响,小角度纵波检测在役支柱瓷绝缘子表面小裂纹的信噪比很低;用切槽试块调节探伤灵敏度,表面小裂纹漏检几率更大。

(2) 利用小角度纵波可灵敏地检测出在役支柱瓷绝缘子内部直径1mm以上缺陷。

(3) 瓷砂不影响爬波探头的裂纹检测,但选用爬波探头时,必须测试在30mm有效检测距离,检出1mm深表面裂纹的能力,并以此确定探伤灵敏度。

(4) 应采用一套小角度纵波与爬波相结合的探伤工艺,以保证检出在役支柱瓷绝缘子表面和内部的小缺陷,提高检测的有效性和可靠性。

参考文献

- [1] 程养春,李成榕.电晕指纹法地面检测不良绝缘子串的研究[J].中国电机工程学报,2000,20(4):54-58.
Cheng Yangchun, Li Chengrong. Detecting the insulator string with faulty insulators on ground based on corona discharge fingerprints[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(4): 54-58(in Chinese).
- [2] 安玲,江秀臣.检测劣质绝缘子的新方法——敏感绝缘子法[J].中国电机工程学报,2002,22(9):108-112.
An Ling, Jiang Xiuchen. Sensitive insulator method—a new method to detect the faulty insulator[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(9): 108-112(in Chinese).
- [3] 张炳达,陈伟乐.放电强度矢量不平衡法识别劣化绝缘子的研究[J].中国电机工程学报,2003,23(8):130-134.
Zhang Bingda, Chen Weile. Identifying faulty insulators by the method of discharge strength vector imbalance[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 130-134(in Chinese).
- [4] 聂一雄,尹项根.用模糊逻辑方法对绝缘子串在线检测结果的评定[J].中国电机工程学报,2003,23(3):131-136.
Nie Yixiong, Yin Xianggen. Evaluation on the on-line detection results of insulator strings using fuzzy logic method[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 131-136(in Chinese).
- [5] Chu E Y, Sawicka B D. The application of gamma-ray computed tomography in solid insulator diagnostics[C]. Boston: Electrical Insulation Conference Record of the 1988 IEEE International Symposium on 5-8 June, 1988: 368-371.
- [6] Fleszynski J, Ranachowski P, Ranachowski Z, et al. Non-destructive ultrasonic measurements of ceramic post insulators used in electricity distribution systems[J]. Insight, 2003, 45(7): 493-497.
- [7] Joseph A, Thavasimuthu M, Jayakumar T. Non-destructive examination of porcelain insulators used in electricity transmission lines[J]. Insight, 1996, 38(11): 797-799.
- [8] Person L, Jnsson A. Ultrasonic inspection of line pin post insulators and solid core insulators in switch gear stations[J]. NDT&E International, 1993, 26(3): 115-117.

- [9] 梁曦东, 戴建军. 超声法检测绝缘子用玻璃钢芯棒脆断裂纹的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 110-114.
Liang Xidong, Dai Jianjun. Ultrasonic detection on crack of FRP rod n brittle fracture of composite insulator[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 110-114(in Chinese).
- [10] 国电公司输电运营部支柱绝缘子事故调查小组. 高压支柱瓷绝缘子事故调查分析及预防措施[R]. 北京: 国家电网公司, 2003.
- [11] 何喜梅, 丁辉. 支柱瓷绝缘子超声波检测研究[J]. 青海电力, 2003, 71(1): 7-11.
He Ximei, Ding hui. Study of strut porcelain insulator's ultrasonic detection[J]. Qinghai Electric Power, 2003, 71(1): 7-11(in Chinese).
- [12] 王怀席. 电站绝缘瓷瓶裂纹的超声波检验[J]. 无损检测, 2001, 23(3): 122-125.
Wang Huaixi. Ultrasonic detection of the cracks in the porcelain insulators of power stations[J]. Nondestructive Testing, 2001, 23(3): 122-125(in Chinese).
- [13] 李明晶, 胡大武. 超声评价棒形支柱绝缘子[J]. 无损探伤, 1996, 20(5): 30-32.
Li Mingjing, Hu Dawu. Ultrasonic evaluation of rod-like strut insulator[J]. Nondestructive Inspection, 1996, 20(5): 30-32(in Chinese).
- [14] 蔡成良. 支柱绝缘子的超声波探伤[J]. 湖北电力. 1997, 9(6): 25-28.
Cai Chengliang. Analysis of support insulator disruption fault and application of ultrasonic flaw detecting technology[J]. Hubei Electric Power. 1997, 9(6): 25-28(in Chinese).
- [15] Ahmed S R, Saka M. A new ultrasonic angle-beam technique for sensitive evaluation of close cracks[J]. NDT&E Int, 2000, 33(4) : 261-271.
- [16] Vine K, Cawley P, Kinloch A J. Comparison of normal and oblique incidence ultrasonic measurements for the detection of environmental degradation of adhesive joints[J]. NDT&E International, 2002, 35(4): 241-253.
- [17] Л. М. Бреховский. Волны в слоистых среда[M]. Москва: Наука, 1973.155-206.
- [18] Gabriel F H. Empirical-computational methods in the study of creeping waves[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1990, 38 (1): 51-59.
- [19] 姚忠森, 吴光亚, 何宏明, 等. 高压支柱瓷绝缘子运行事故分析[J]. 高电压技术, 2002, 28 (10): 57-58.
Yao Zhongshen, Wu Guangya, He Hongming, et al. On-line failure analyses for high voltage post insulators of ceramic material[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28 (10): 57-58(in Chinese).
- [20] 田新民, 曾庆立. 瓷瓶断裂原因及防护措施[J]. 东北电力技术, 2002, 23(4): 43-44.
Tian Xinmin, Zeng Qingli. The breakage cause of insulators and the preventative measures[J]. Northeast electric power technology, 2002, (4): 43-44(in Chinese).

收稿日期: 2005-12-08。

作者简介:

李晓红(1959—), 副教授, 长期从事电力行业关键部件的无损检测研究, lding@whu.edu.cn。

(编辑 车德竞)