

超声法检测绝缘子用玻璃钢芯棒脆断裂纹的研究

梁曦东, 戴建军, 周远翔, 陈以方

(清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京市 海淀区 100084)

ULTRASONIC DETECTION ON CRACK OF FRP ROD IN BRITTLE FRACTURE OF COMPOSITE INSULATOR

LIANG Xi-dong, DAI Jian-jun, ZHOU Yuan-xiang, CHEN Yi-fang

(Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: Brittle fracture is a severe mechanical failure accident of high voltage composite insulator, it occurs when insulator suffers a very low mechanical load. Up to now, researches have shown that it is a stress corrosion cracking leading to the brittle fracture of Fiber Reinforced Plastics (FRP) rod. According to the characteristic of brittle fracture in FRP rod, a method for detecting the crack in the cross-section of FRP rod using the oblique incident longitudinal waves of ultrasonic was presented, and a special ultrasonic transducer probe was made to detect the crack propagation in the process of brittle fracture of FRP rod. Test results show the variation of the amplitude of pulse-echo ultrasonic due to crack propagation in FRP rod subjected to tensile load and acid, and has a significant value for understanding the mechanism of brittle fracture of composite insulators.

KEY WORDS: Composite insulator; FRP rod; Brittle fracture; Ultrasonic detection; Crack

摘要: 脆断是高电压复合绝缘子在很低的日常载荷下发生的恶性断裂事故, 国内外研究认为应力腐蚀造成了绝缘子芯棒脆断的发生。文中根据芯棒脆断的特点, 提出以超声纵波斜入射检测芯棒脆断横截面上的裂纹, 同时据此研制了一种用于芯棒脆断裂纹检测的超声探头, 并对芯棒脆断时裂纹的扩展过程进行了检测, 得到了芯棒脆断裂纹发展过程中超声脉冲回波幅值的变化并对其进行了讨论分析, 这对于进一步了解复合绝缘子的脆断机理有重要意义。

关键词: 复合绝缘子; 玻璃钢芯棒; 脆断; 超声检测; 裂纹

1 引言

复合绝缘子由于其优异的性能在高电压输电线路中得到了广泛应用, 然而运行过程中, 却意外

地发生了脆性断裂, 造成电力系统的恶性事故, 脆断事故数量虽然极少, 危害却十分严重^[1-3]。复合绝缘子发生脆断时, 其负荷远低于正常断裂负荷, 且断裂时间无法预料, 因而受到研究者的格外重视。

脆断的绝缘子芯棒断口光滑平整, 断面垂直于芯棒轴向受力方向, 国内外的研究者一般都认为脆断是受力的绝缘子芯棒在酸蚀环境作用下发生的, 并称之为应力腐蚀^[1-6]。

芯棒应力腐蚀过程中, 开始先在芯棒表面产生小裂纹, 然后小裂纹不断沿垂直于芯棒受力方向的横截面扩展, 最终发展成较大的裂纹直至产生脆断断口。目前还没有有效检测芯棒脆断裂纹形成和扩展的手段, 致使对脆断的发生发展过程了解甚少。一些研究者采用声发射检测技术对应力腐蚀裂纹扩展过程中芯棒纤维发出的声发射信号进行了检测, 以此来研究脆断的发生发展过程, 得到了不少有价值的研究成果^[7-8]。然而声发射信号仅能间接的反映材料的断裂过程。与声发射检测相比, 超声对于材料内部的裂纹非常敏感, 利用超声技术能直接检测到材料内部的裂纹等各种缺陷, 超声检测已被成功的用于机械无损探伤和复合材料的检测中等。A.P. Mouritz 等人研究了超声脉冲回波法检测玻璃纤维增强复合材料的疲劳损伤状况, 发现超声易于探测高应力疲劳引起的复合材料裂纹^[9]。F.Aymerich 等人将超声检测法引入到复合板由于冲击载荷导致的损伤裂纹检查中^[10]。Wisheart M 等人也用超声扫描来辅助评估低速冲击载荷对拉挤玻璃纤维聚酯复合材料的作用结果^[11]。实际上, 对于瓷支柱绝缘子和电机定子绝缘的老化状态, 已经开始采用超声波进行探伤和检查^[12-13]。

基金项目: 国家杰出青年基金 (50025720); 高等学校博士学科点专项科研基金 (2000000315)。

本文模拟了复合绝缘子芯棒脆断的单一断口，研制了专用超声探头对芯棒脆断时裂纹的扩展过程进行了检测，通过超声波折反射变化信息来反映绝缘子芯棒脆断时裂纹的扩展过程。

2 芯棒脆断裂纹的超声检测

2.1 超声法检测原理

由于超声穿透力强、超声束具有较好的方向性、分辨力高等特点，使超声检测得到广泛应用。当超声波从一种介质传到另一种介质时，则在两介质的分界面上，一部分声能被反射回到原介质，这路波称为反射波；另一部分能量则透过界面，在另一介质内继续传播，这路波称为折射波。人们利用超声波这种在不同界面上的折反射和波型转换性质来检测试件中的缺陷，当试件中有裂纹、分层、气隙等缺陷时，便形成了不同的界面，超声波传过时便产生折反射现象。超声波通过不同类型的缺陷，接收端会接收到不同的信息，从而可以对缺陷进行检测。

复合绝缘子芯棒材料属于典型的单向纤维增强塑料，芯棒应力腐蚀过程中的裂纹沿垂直于芯棒轴向逐渐向内部扩展，形成由环氧树脂玻璃纤维和空气组成的界面，超声波通过时可通过探头在示波器上测量到出现该裂纹的反射波，由时间轴上反射波的大小及位置即可判断绝缘子芯棒中裂纹的情况。

2.2 纵波斜入射专用检测探头的研制

2.2.1 设计思想

超声探头是发射接收超声波的关键部件，根据复合绝缘子芯棒的特点，设计制作了一个用于检测断面裂纹的专用探头。

脆断实验中，对于所需探测的玻璃钢芯棒，其长度较长，用端部检测法声衰减较大，需要把探头置于芯棒圆周上靠近裂纹的地方。同时横波入射时波速太低，穿透力差。因此，采用第一临界入射纵波折射后在芯棒圆周表面沿轴线平行方向传播的纵波进行检测，即探头发射的超声波经过界面折射后，使主声束沿着芯棒轴向传播，这样主声束便能辐射到芯棒的裂纹区域，遇到裂纹发生反射，从而得到裂纹的信息^[4]。具体的示意图如图1。

当压电晶片产生的超声纵波以入射角 α_L 从有机玻璃块中入射到芯棒表面时，通过耦合剂，声波大部分被折射到芯棒内。同时由于界面的波型转换，在芯棒中会产生折射纵波和折射横波，折射角分别为 β_L 、 β_T ，传播速度分别为 c_{2L} 、 c_{2T} 。与几何

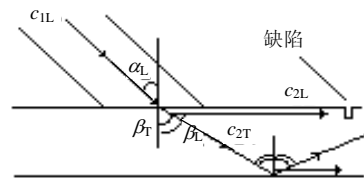


图1 纵波斜入射超声脉冲回波法示意图

Fig.1 Sketch map of oblique incident longitudinal waves for pulse echo ultrasonic method

光学类似，超声波在两种不同介质界面上折反射时遵从斯奈尔（Snell）定律

$$\frac{\sin \alpha_L}{c_{1L}} = \frac{\sin \beta_L}{c_{2L}} = \frac{\sin \beta_T}{c_{2T}} \quad (1)$$

当取 $\beta_L = 90^\circ$ 时，即折射纵波沿平行于芯棒表面传播，可得

$$\alpha_L = \arcsin \frac{c_{1L}}{c_{2L}} \quad (2)$$

据测定结果，在所采用的有机玻璃中，超声纵波波速为2700m/s，在不同材料芯棒中的纵波传播速度为(5150~5380)m/s，因此取 $c_{1L} = 2700$ ， $c_{2L} = 5250$ ，可求得 $\alpha_L = 30.95^\circ$ 。

此时折射纵波将沿芯棒轴向传播，在传播过程中遇到裂纹时，将反射回被探头接收。

另外从图中可知，折射横波 c_{2T} 将在芯棒的下表面遇到空气界面产生界面反射与波型转换，绝大部分声能被反射回芯棒中，产生反射横波和反射纵波，此时反射纵波角度为 90° ，沿芯棒下表面平行的方向传播，若在传播过程中遇到裂纹也将产生反射而沿原传播路径返回。

2.2.2 频率和楔块

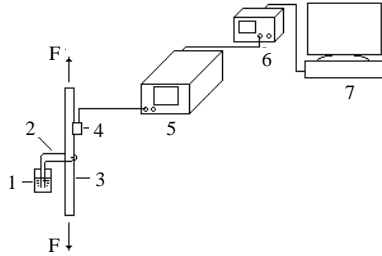
为提高对裂纹探测的灵敏度，往往希望提高探头频率，但超声波的频率与超声波的衰减直接相关，频率高，衰减大，超声波传播距离近。综合上述因素，经过对材料相应性能的测试和直接试验，选用了4MHz频率。

探头的楔块是探头和芯棒的接触部分，用来传输超声波，并保证探头晶片产生的纵波按一定角度入射。探头楔块制作时使用有机玻璃，制作成使晶片产生的超声纵波按前面所计算出的角度传输，同时，根据芯棒的特点，将探头楔块的曲率做成与芯棒的曲率相同，以保证耦合效果。这样便实现了用探头探测时，折射纵波主声束被传输入芯棒，并沿芯棒表面平行入射。

2.3 检测系统及试验方法

检测原理确定后，试验中的脆断实验及建立的

检测系统示意简图如图2所示。超声检测系统主要包括超声探头、CTS-26 超声波探伤仪、带采集卡的TDS210 数字化示波器及计算机等。



1—硝酸溶液；2—酸液传递棉带；3—FRP 芯棒；4—探头；
5—超声探伤仪；6—数字化示波器；7—计算机

图2 脆断实验及其超声检测系统示意图
Fig.2 Brittle fracture test facility
and ultrasonic detection system

试验之前，在芯棒表面预先制作一条微小裂纹，裂纹表面通过缠绕一条细棉带而连续不断的接触 HNO_3 溶液。试验开始时，给芯棒两端加上拉伸负荷，将超声探头通过耦合剂置于小裂纹的正上方，此时可从超声仪上探测到小裂纹的回波，然后监视回波变化，即可观察到裂纹的发展情况。实验时采用硅脂做耦合剂，以减小声能在探头—芯棒界面造成的衰减，同时由前述可知，探头前端楔块与芯棒曲率相同，因此能使表面的声能较好的传入芯棒。

3 试验结果及分析

3.1 模拟裂纹检测结果

由于采用的超声波传入方向与需探测的裂纹面垂直，当超声波遇到裂纹的前端面时，为固体—气体界面，几乎完全被此界面反射，因此认为反射波幅值与裂纹面大小即裂纹深度有关，而与裂纹宽度无关。试验首先应用上述方法和检测系统对一组不同深度的环形槽模拟裂纹进行了检测。结果表明，反射波可以有效反映芯棒中不同深度的裂纹，检测灵敏度较高。

试验中将探测仪调试好，探头离槽前端4cm，对于固定槽宽2mm、槽深0.2mm到1.2mm的模拟芯棒裂纹进行了检测，超声检测模拟槽裂纹示意图见图3。用超声波探测槽深0.2mm的芯棒时，反射波脉冲图见图4，其中R为反射波，由图中可以看出，此时基本能够探测到，探测能够分辨的最小裂纹约为0.2mm。当槽深增大为1.2mm时反射波脉冲见图5，反射脉冲R的幅值较高。将以上不同裂纹深度与其对应的反射波幅值绘制成曲线，如图6所示（图中反射波幅值是探测仪在一定条件下裂

纹反射超声波脉冲所转换对应的电压大小，图8同)。从图中可以看出，反射回波的幅值随着模拟裂纹深度的增加逐渐变高，与裂纹深度基本成线性关系，这反映了裂纹大小和深度的变化。



图3 超声检测芯棒模拟裂纹示意图

Fig.3 Detection simulated notch crack in FRP rod

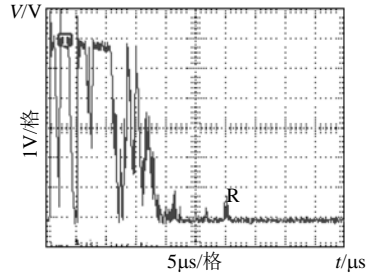


图4 槽深0.2mm时反射波形

Fig.4 Reflected ultrasonic pulse obtained from notch depth of 0.2 mm

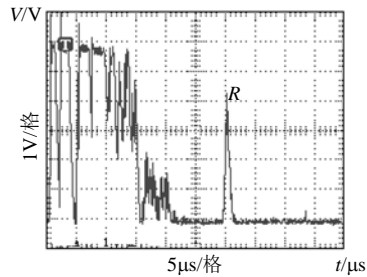


图5 槽深1.2mm时反射波形

Fig.5 Reflect ultrasonic pulse obtained from notch depth of 1.2 mm

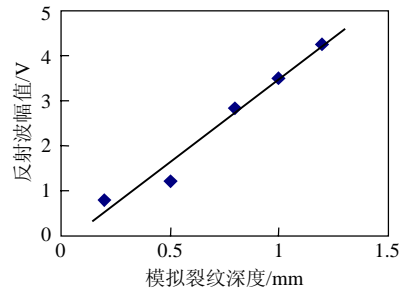


图6 超声波探伤仪反射波幅值随模拟裂纹深度的变化关系曲线

Fig.6 Amplitude of reflected ultrasonic pulse vs. depth of simulated notch crack curve

3.2 脆断过程检测

按前所述的试验方法，在实验室的应力腐蚀试验装置上对一根复合绝缘子芯棒的脆断过程进行了超声检测试验。整个试验在室温下进行，对芯棒施加67%额定负荷，所加酸液为2N的 HNO_3 溶液。试验开始前，在芯棒表面预先制作一条深1mm的小裂纹，试验过程中观察超声脉冲回波的变化，同

时采集了不同时刻的超声回波。由于试验中探头耦合好后一直保持不变，所有探测结果都是在同一耦合状态下进行的，因此超声脉冲回波的幅值变化主要是裂纹扩展引起的，图 7 所示为试验过程中某一时刻超声脉冲回波示意图。

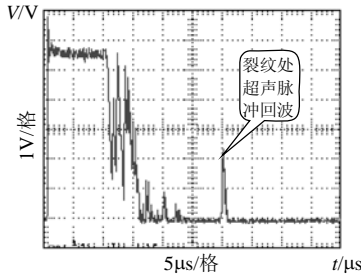


图 7 应力腐蚀裂纹超声脉冲回波

Fig.7 Backward ultrasonic pulse of corrosion crack

将试验过程中所有采集到的脆断裂纹反射回波幅值随时间的变化关系绘制成曲线如图 8 所示。试验结束时，芯棒脆断裂纹深度约为 4mm。根据前面波幅与裂纹之间的关系，当反射波幅值越大时，裂纹也越深越大，因此可以从反射波幅值之间的相对关系反映出不同时刻裂纹大小的相对关系。

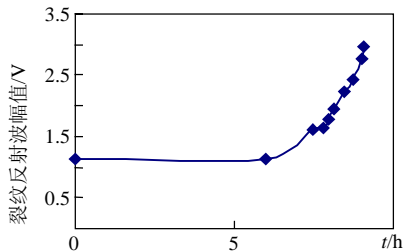


图 8 应力腐蚀裂纹发展过程中超声反射波幅值随时间变化关系

Fig.8 Amplitude of reflected ultrasonic pulse vs. time of stress corrosion cracking

由图 8 可见，在开始加载后很长时间内，脉冲的幅值保持不变，在后阶段较短时间内脉冲回波的幅值增长很快，且增长速度愈来愈快。说明开始时芯棒中的裂纹没有什么变化，经过一段较长时间后，脆断裂纹开始向前扩展，扩展速度愈来愈快。图 9 所示为用声发射技术探测到的芯棒脆断过程声

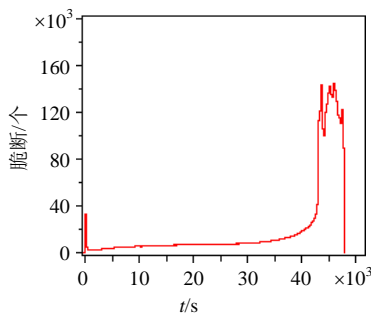


图 9 芯棒脆断过程的声发射信号全图

Fig.9 AE signals in process of brittle fracture of FRP rod

发射信号图，可以看出，超声探测结果与其基本一致。声发射技术采集到的声信号是芯棒中纤维断裂时产生的，对裂纹起始阶段的探测灵敏度较高，而超声波探测的结果反映脆断裂纹面的大小，更直接。

4 结论

采用超声检测原理提出以超声纵波斜入射检测绝缘子芯棒脆断横截面上的裂纹，设计研究了纵波斜向入射的超声探头并对芯棒发生脆断时裂纹的扩展过程进行了检测，检测到了芯棒脆断裂纹发展过程中超声脉冲回波的变化。结果表明，当芯棒脆断到出现一定大小的裂纹时，超声脉冲回波法能够检测到裂纹并能反映裂纹的发展过程。

绝缘子芯棒应力腐蚀过程表现为，开始一段时间内芯棒中裂纹并没有发生，这时处于脆断裂纹的萌生起裂阶段，起裂阶段时间较长。过了此阶段后，芯棒中纤维逐渐发生断裂，开始产生裂纹，裂纹很快向前扩展，扩展速度愈来愈快，是一个加速发展的过程，直至芯棒最终断裂。

参考文献

- [1] 张鸣, 陈勉. 500kV 罗北甲线合成绝缘子芯棒脆断原因分析[J]. 电网技术, 2003, 27(12): 51-53.
Zhang Ming, Chen Mian. Analysis on core brittle fracture of composite insulators in a certain 500kV transmission line[J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 51-53.
- [2] 谭章英, 舒先民, 马建国, 等. 500kV 葛双一回复合绝缘子芯棒脆断原因分析[J]. 电网技术, 2001, 25(1): 67-69.
Tan Zhangying, Shu Xianmin, Ma Jianguo et al. Analysis of a polymeric insulator core fracture on 500kV GE-SHUANG No. 1 transmission line [J]. Power System Technology, 2001, 25(1): 67-69.
- [3] 张畅生, 王晓刚, 黄立虹. 500kV 惠汕线合成绝缘子芯棒脆断事故分析[J]. 电网技术, 2002, 26(6): 71-73.
Zhang Changsheng, Wang Xiaogang, Huang Lihong. Analysis of composite insulator mandrill breaking on 500kV huishan line [J]. Power System Technology, 2002, 26(6): 71-73.
- [4] 梁曦东, 王成胜, 范炬. 芯棒脆断性能及试验方法的研究[J]. 电网技术, 2003, 27(1): 34-37.
Liang Xidong, Wang Chengsheng, Fan Ju. Research on brittle fracture of FRP rods and the test method[J]. Power System Technology, 2003, 27(1): 34-37.
- [5] Ely T, Kumosa M. The Stress Corrosion Experiments on an E-Glass/Epoxy Unidirectional Composite[J]. Journal of Composite Materials, 2000, 34(10): 841-878.
- [6] De Tourreil C, Pargamin L, Thévenet G et al. "Brittle Fracture" of Composite Insulators: Why and How they Occur[C]. IEEE 2000 Summer Meeting Seattle: Power Engineering Society Summer Meeting, 2000, 2569-2574.
- [7] Kumosa M, Hull D, Price J N. Acoustic Emission from Stress Corrosion Cracks in Aligned GRP[J]. Journal of Materials Science, 1987, 22(2): 331-336.

- [8] Armentrout D L, Kumosa M, McQuarrie T S. Boron-free fibers for prevention of acid induced brittle fracture of composite insulator GRP rods[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(3): 684-692.
- [9] Mouritz A P, Townsend C, Shah Khan M Z. Non-destructive detection of fatigue damage in thick composites by pulse-echo ultrasonics [J]. Composites Science and Technology, 2000, 60(1): 23-32.
- [10] Aymerich F, Meili S. Ultrasonic evaluation of matrix damage in impacted composite laminates[J]. Composites Part B: Engineering, 2000, 31(1): 1-6.
- [11] Wisheart M, Richardson M O W. Low velocity response of a complex geometry pultruded glass/polyester composite[J]. Journal of Materials Science, 1999, 34(5): 1107-1116.
- [12] 蔡成良, 涂明, 罗功银. 220kV 变电站管形母线落地事故分析[J]. 电网技术, 1999, 23(4): 68-70.
Cai Chengliang, Tu Ming, Luo Gongyin. Analysis of accident of falling to ground of 220kV pipe-structure busbar in substation [J]. Power System Technology, 1999, 23(4): 68-70.
- [13] 郝艳捧, 阎波, 王国利, 等. 基于超声脉冲反射法评估大电机定子绝缘的老化状态[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 91-95.
Hao Yanpeng, Yan Bo, Wang Guoli *et al.* Insulation condition diagnosis of large generator stator bars based on ultrasonic pulse-echo method[J]. Proceedings of CSEE, 2003, 23(4): 91-95.
- [14] 杨奕, 陈以方, 洪玉萍, 等. 合成绝缘子的超声检测方法[J]. 无损检测, 2003, 25(7): 337-339.
Yang Yi, Chen Yifang, Hong Yuping *et al.* Ultrasonic inspection of composite insulator[J]. Nondestructive Testing, 2003, 25(7): 337-339.

收稿日期: 2004-07-20.

作者简介:

梁曦东(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 在跨学科的范围从事高电压外绝缘的研究, 涉及电工、化工、材料、力学等多个学科领域;

戴建军(1979-), 男, 博士研究生, 从事高电压外绝缘方面的研究;

周远翔(1966-), 男, 副教授, 从事电介质与绝缘技术、电气设备绝缘诊断技术等的研究。