

高频换能器功率疲劳分析

许 光¹, 吴培荣¹, 刘振君²

(1. 海军驻上海地区水声导航系统军代表室, 上海 201108; 2. 上海船舶电子设备研究所, 上海 201108)

摘要: 压电陶瓷元件因疲劳破坏而失效是造成高频发射换能器损坏的重要原因之一。以一款高频换能器为例分析了换能器功率疲劳现象和压电陶瓷功率疲劳机理; 针对高频换能器水中阻抗与空气中阻抗比较接近的特点, 设计了空气中大功率发射以加速复现功率疲劳的实验方法, 制作了实验样机; 实验较好地复现了电导值下降、发送电压响应下降的功率疲劳故障现象, 验证了发射功率是换能器功率疲劳的主要因素。当发射功率较大时, 散热环境是诱发功率疲劳的重要因素。为避免换能器产生功率疲劳, 必须重视发射功率、工作环境和散热情况; 发射功率越大对工作环境散热要求越高。

关键词: 高频换能器; 压电陶瓷; 功率疲劳

中图分类号: TS936

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2015)-03-0283-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2015.03.019

Research on the power fatigue problem of high frequency underwater transducer

XU Guang¹, WU Pei-rong¹, LIU Zhen-jun²

(1. Office of Navl deputation shanghai, shanghai 201108; 2. Shanghai Marine Electronic Equipment Research Institute, shanghai 201108, china)

Abstract: The piezoelectric ceramics invalidation caused by fatigue damage is one of the most important problems which results in transducer array inefficacy. The power fatigue phenomenon and piezoelectric ceramics power fatigue mechanism of a typical high-frequency transducer has been analyzed in this paper. Since the characteristic that the impedance of high frequency transducer in the air is close to that in the water, the high-power transmission repeated in air has been designed to speed up the launch of fatigue and the experimental prototype has also been made. Experiment recreates the power fatigue failure including conductance value falls and declining of sending voltage response. The results show that transmitting power is the main factor of transducer power fatigue; heat loss state is also a important factor. To avoid transducer power fatigue, more attention must be paid to transmitting power and heat loss state. The requirement of heat dissipation depends on the level of transmission power.

Key words: high-frequency transducer; piezoelectric ceramics; power fatigue

0 引言

高频换能器广泛应用于避碰声呐、侧扫声呐等各种高频声呐, 高频发射换能器一般采用 1-3 型压电复合材料作为电声转换元件。1-3 型压电复合材料的压电陶瓷元件工作于力电耦合场中, 是典型的易疲劳元件; 疲劳破坏是其主要失效形式^[1,2]。压电陶瓷元件因疲劳破坏而失效是造成高频发射换能器损坏的重要原因之一。高频发射换能器存在多个损伤极限, 包括功率极限、机械极限、电极极限等, 超过任一极限就会损坏换能器。而发射功率接近功

率极限时, 则容易发生功率疲劳, 长时间工作就会显著缩短换能器寿命。

本文以某型声呐高频发射换能器为例, 针对 1-3 型压电复合材料压电陶瓷元件的功率疲劳机理、换能器工作环境等进行了高频换能器的功率疲劳分析。

1 换能器功率疲劳现象

某型声呐 1-3 型压电复合材料高频发射换能器的谐振频率处电导约 16 mS, 发送电压响应约 160 dB, 可工作频率范围为 300~700 kHz。在使用半年后因出现作用距离下降等故障现象, 返厂维修检查, 发现发射换能器性能发生显著变化: 谐振频率电导值下降至 6.3 mS, 发送电压响应下降至 140 dB, 发射波束内指向性起伏显著增加了约 10 dB。

收稿日期: 2014-06-20; 修回日期: 2014-09-17

作者简介: 许光(1973—), 男, 江苏无锡人, 工程师, 研究方向为信号与信息处理。

通讯作者: 刘振君, E-mail: lzjun@smmail.cn

故障换能器出厂前正常状态与返厂维修时故障状态的水中电导曲线如图 1 所示,指向性如图 2 所示。图 2(a)为正常状态指向性图,图 2(b)为故障状态指向性图。

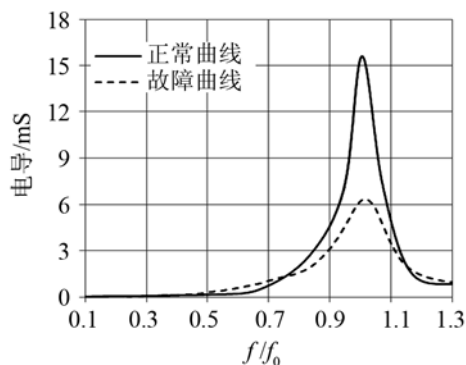


图 1 换能器故障前后电导曲线(水中)

Fig.1 G-f curve cross-reference of the transducer (underwater)

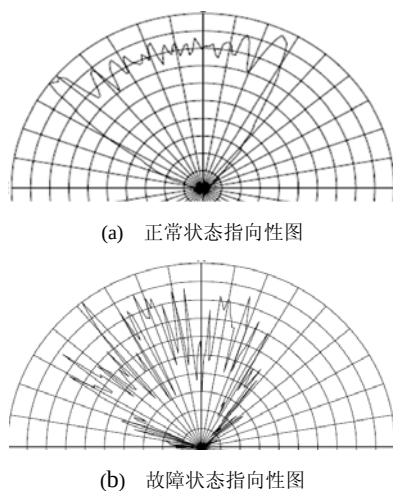


图 2 故障换能器指向性图(线性坐标)

Fig.2 Directionality of the transducer(linear coordinates)

声呐开机工作,继续给故障换能器施加工作电压信号,发现故障换能器的水中谐振频率处电导值随着工作时间的增加进一步下降,与发射时间成单调下降趋势,表明换能器故障存在一个性能逐步下降的过程。电导曲线变化如图 3 所示。

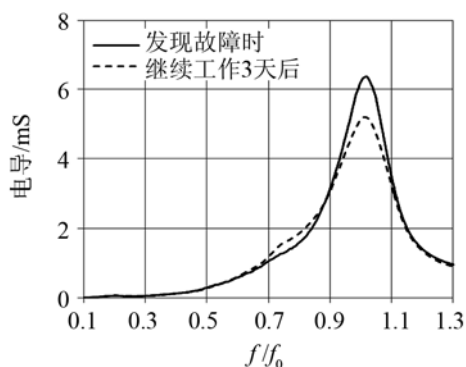


图 3 故障换能器继续工作 3 天电导曲线前后对比

Fig.3 A contrast for G-f curve of the transducer after working 3 days

解剖故障换能器发现,水密层与外电极粘接良好,外电极与压电复合材料元件粘接良好,内电极与压电元件大部分粘接良好,局部存在胶水失效。失效胶水呈现褐色粉末状,形状规则与压电陶瓷粒子形状一致。测量压电陶瓷粒子的阻抗,发现粒子性能离散性较大,大部分陶瓷粒子的压电性能显著下降甚至已经完全失效。

电导下降、发送电压响应降低表明压电陶瓷性能下降,指向性变化表明压电陶瓷粒子性能下降具有离散性,解剖后测量结果验证了压电陶瓷粒子出现功率疲劳,功率疲劳程度是离散的,出现了离散性的性能下降或失效。

2 功率疲劳机理

压电陶瓷微观结构上具有气孔缺陷或微裂纹,由于气孔形状和周围介质强度的不同或微裂纹的存在,使得压电陶瓷元件内部应力分布不均匀;在大功率工作时,可引起气孔塌陷或微裂纹生长。造成气孔发生塌陷的压力点和时间也不尽相同,呈现为一个较宽的区间^[3]。在一定频段内,频率越高压电陶瓷也越容易产生疲劳^[3-5],这是因为高频交变电场作用于压电陶瓷上时,引起压电陶瓷在纵向的高频振动,即极化方向的伸缩,很容易导致 90° 畴无序化,电畴快速反转也产生大量的热,并容易加剧或产生应力集中而引起微裂纹。高频交变电场可在几小时之内导致性能大幅度降低甚至退极化^[4]。

高频换能器采用的 1-3 型压电复合材料是采用切割压电陶瓷片制备的,压电陶瓷切割面不可避免地存在微小凹坑、裂纹等缺陷,这些压电陶瓷表面的缺陷也会造成大功率工作时的应力集中和微裂纹产生、生长,从而引起功率疲劳。

压电陶瓷的功率疲劳除与材料、工作电压与频率等因素有关外,还与环境温度等因素有关^[3-7]。当温度过高时,电偶极子就会回到无序状态(退极化),在居里点以上压电性能完全消失。因此,要连续工作而又不会出现明显的退极化,必须在远低于居里点的温度下工作。一般安全温度的极限是在 0℃ 和居里点之间的 1/2 处^[3]。

如果环境温度较高、散热差,压电陶瓷在大功率发射时,由于自身损耗而产生的热能,使压电陶瓷内部的温度会有一定升高。虽然环境温度远低于 1/2 居里点温度,但是压电陶瓷内部温度可能已经超过 1/2 居里点温度。这时换能器就会容易发生功率疲劳甚至直接损坏。本文中换能器压电陶瓷功率疲劳即属于这种情况。

3 功率极限

压电陶瓷的功率极限，可由工作频率、材料体积和柔顺系统等参数通过公式(1)计算^[8]。

$$P_M = V \omega s_{11}^E \frac{1}{Q_M} T_1^2 \tag{1}$$

式中： P_M 为连续发射声功率，单位：W； V 为压电陶瓷体积，单位： m^3 ； ω 为工作频率，单位： rad/s ； s_{11}^E 为柔顺系数，单位： m^2/N ； Q_M 为机械品质因数； T_1 为动态抗张强度，单位： N/m^2 。

脉冲发射时功率极限会有一定程度的提高，最大可提高1个量级，综合来说，一般连续功率的2倍以下是比较安全的。功率极限不是一成不变的，还受发射信号形式、换能器结构、环境温度等很多因素影响。功率越大，对散热能力、温度等环境要求就更高；反之，环境温度越高，功率极限也越小。

4 功率疲劳试验

该型声呐发射信号为单频脉冲，频率为换能器水中谐振频率，该型声呐换能器的水中阻抗与空气中阻抗比较接近。根据该型换能器的特点，借鉴发射换能器寿命试验规范中让换能器在空载条件下进行激励的方法，因此设计了实验换能器样机在空气中大功率发射以加速复现功率疲劳并以不同功率进行对比的实验方法。图4是该型声呐换能器在水中和空气中的电导曲线对比。

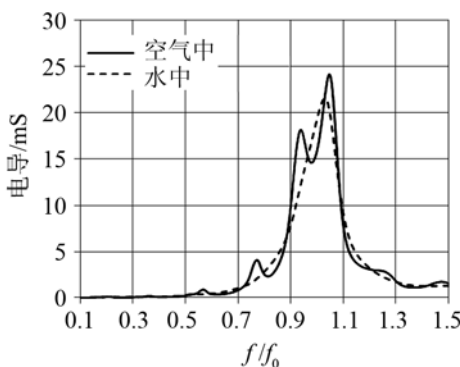


图4 换能器在水中和空气中的电导曲线
Fig.4 Contrast for G - f curve of the transducer

利用与该型声呐换能器中相同规格的压电复合材料元件，制作了二个实验换能器样机。实验换能器连续信号发射功率极限为200 W，若取连续信号发射功率极限的2~10倍，则短脉冲低占空比信号发射功率极限可达400~2000 W。二个实验换能器在进行功率疲劳试验前电导和发送电压响应基

本相同，谐振频率发送电压响应约168 dB，电导约1.5 mS。实验信号为脉宽0.2 ms、周期200 ms的短脉冲低占空比信号，信号频率为水中谐振频率 f_0 。考虑到实验对比效果和功放发射能力，实验功率分别为160 W和1000 W。因此以下分别称之为160 W实验换能器和1000 W实验换能器。二个实验换能器同时在相同环境中工作，通过监测阻抗(C_p - G)变化反映压电陶瓷元件性能的变化情况。

二个实验换能器在功率实验前后的性能见表1、表2和图5。水中发射5.5 h后，谐振点阻抗略有减小，静态电容略有增加。继续工作10 h阻抗参数保持稳定，二个实验换能器的变化趋势是相同的，只是160 W实验换能器变化量相对较小。这是由于水中散热状态良好，发射时产生的热量使压电陶瓷温度升高，引起阻抗减小，静态电容增加；此时压电陶瓷通过水中散热达到平衡温度，且温度较低，尚未引起功率疲劳。二个实验换能器在空气中发射半小时后，阻抗变化趋势出现显著不同：160 W实验换能器静态电容和谐振点电导继续小幅增加，并在接下来的3 h内基本保持不变(图5)，说明内部压电陶瓷温度继续升高，并达到新的平衡；1000 W实验换能器静态电容和谐振点电导则出现相对明显的下降，并在接下来的3 h内继续缓慢下降(图5)，说明压电陶瓷粒子已经出现功率疲劳，并在逐步发展，那些存在气孔缺陷或微裂纹的压电陶瓷粒子在最初的半小时内相对集中地产生了功率疲劳，并迅速发展，而那些没有缺陷或缺陷较少的陶瓷粒子则较晚产生功率疲劳，且发展缓慢。

表1 160 W实验换能器阻抗监测情况
Table 1 Impedances of 160 W sample in experiment

参数	起始	5.5 h	7.5 h	15.5 h	空气中 0.5 h	空气中 3 h
C_p/pF	206	224	220	224	226	228
G/mS	1.52	1.56	1.54	1.54	1.57	1.58

表2 1000 W实验换能器阻抗监测情况
Table 2 Impedances of 1000 W sample in experiment

参数	起始	5.5 h	7.5 h	15.5 h	空气中 0.5 h	空气中 3 h
C_p/pF	226	278	283	281	220	212
G/mS	1.51	1.62	1.60	1.64	1.36	1.33

测量二个实验换能器经过相同试验过程后的发送电压响应 S_v ，160 W实验换能器发送电压响应为167.7 dB，与功率疲劳实验前保持一致。1000 W实验换能器发送电压响应为163.1 dB，下降了4.6 dB(图6)，验证了功率疲劳后的发送电压响应下降现象。

试验过程中，电导和静态电容的小幅上升是压电陶瓷及换能器的温度升高引起的，说明在具有良

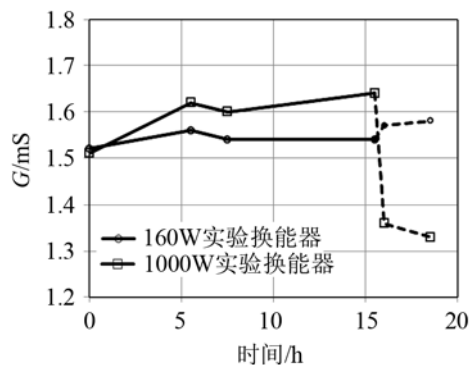
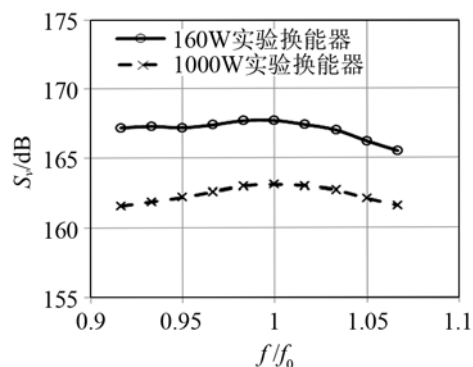


图5 实验换能器阻抗变化

Fig.5 Contrast for G - f curve of the samples图6 两个实验换能器经历相同试验过程后发送电压响应 S_v 对比Fig.6 Contrast for S_v of the samples after experimentation

好散热条件的水中, 换能器未达到功率极限, 没有出现功率疲劳现象, 换能器可以比较稳定地正常工作。在空气中工作半小时前后, 1000 W 实验换能器电导由 1.64 mS 降低到 1.36 mS, 发送电压响应下降 4.6 dB, 说明在工作环境散热能力下降后, 虽然输入功率没有增大, 换能器内部的压电陶瓷粒子开始出现功率疲劳现象。

上述试验较好地复现了电导值下降、发送电压响应下降的功率疲劳故障现象, 验证了发射功率是换能器功率疲劳的主要因素。当发射功率较大时, 散热环境是诱发功率疲劳的重要因素。为避免换能器产生功率疲劳, 设计时须考虑发射功率、工作环境和散热情况等。发射功率越大, 压电陶瓷发热量也越大, 温度升高越快, 因此对工作环境温度和散热的要求也就越高。

受条件限制, 试验功率仅达到降低换能器寿命的程度, 未达到立即损坏的程度。把 1-3 型压电复合材料中的每一个陶瓷粒子看作一个独立电子元件, 其功率疲劳故障率仍应服从浴盆曲线规律。因此, 复现大部分陶瓷粒子失效需要较长的试验时间。图 3、图 5 也说明在现有试验条件下需要较长的试验时间才能达到电导值显著下降 3/5。因此, 在实验样机进行 3 天试验后, 实验样机的阻抗和发

送电压响应等参数的下降虽然未达到返厂维修的故障换能器下降值, 但其变化趋势已经基本复现了功率疲劳现象, 我们即结束了试验。

5 结 论

以高频发射换能器为例分析了换能器功率疲劳现象和压电陶瓷功率疲劳机理, 通过实验验证了发射功率是换能器功率疲劳的主要因素, 工作状态或不良散热环境也是重要因素, 为避免换能器产生功率疲劳, 必须重视发射功率、工作环境和散热情况。本文对其它换能器包括低频换能器亦有参考价值, 可以为换能器设计和应用提供参考。

参 考 文 献

- [1] 邓启煌, 王连军, 王宏志. 锆钛酸铅陶瓷在机电耦合场下疲劳性能的评价[J]. 无机材料学报, 2012, 27(4): 358-362.
DENG Qihuang, WANG Lianjun, WANG Hongzhi. Evaluation of fatigue of the lead zirconate titanate ceramics under electromechanical coupling field[J]. Journal of Inorganic Materials, 2012, 27(4): 358-362.
- [2] 刘焱, 接勤, 谢海峰, 等. 共振型气体泵用压电振子的疲劳寿命[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(4): 941-947.
LIU Yan, JIE Meng, XIE Haifeng, et al. Fatigue life of piezoelectric actuator used in resonance-type air pump[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(4): 941-947.
- [3] 栾桂东, 张金铎, 王仁乾. 压电换能器和换能器阵[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005, 79-80.
LUAN Guidong, Zhang Jinduo, WANG Renqian. Piezoelectric transducers and arrays[M]. Beijing: Peking University Press, 2005, 79-80.
- [4] 王伟强. 压电陶瓷的场致疲劳与非线性研究[D]. 北京: 清华大学, 硕士学位论文, 2006.
WANG Weiqiang. Study on field-induced fatigue and nonlinearity of piezoelectric ceramics[D]. Beijing: Tsinghua University, Master's degree dissertation, 2006.
- [5] 叶正芳, 李彦峰, 贾付云, 等. 压电陶瓷电性能老化问题的研究[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2001, 37(3): 45-51.
YE Zhengfang, LI Yanfeng, JIA Fuyun, et al. Study on the aging of the electronic properties of piezoelectric ceramic[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Science, 2001, 37(3): 45-51.
- [6] 杨刚, 岳振星, 李龙土. 压电陶瓷场致疲劳特性与机理研究进展[J]. 无机材料学报, 2007, 22(1): 1-6.
YANG Gang, YUE Zhenxing, LI Longtu. Research progress on the characteristics and mechanism of applied field-induced fatigue in piezoelectric ceramics[J]. Journal of Inorganic Materials, 2007, 22(1): 1-6.
- [7] 陈学锋, 刘雨生, 冯宁博, 等. 冲击压力和温度老化对 PZT 95/5 铁电陶瓷放电的影响[J]. 电子元件与材料, 2009, 28(7): 1-4.
CHEN Xuefeng, LIU Yusheng, FENG Ningbo, et al. Effects of shock pressure and temperature aging on the discharge behavior of PZT 95/5 ferroelectric ceramics[J]. Electronic Components and Materials, 2009, 28(7): 1-4.
- [8] 赵春山, 金亨焕, 陈守六. 压电陶瓷材料在大功率高静压力下的性能的实验研究[J]. 声学学报, 1981, 6(5): 322-327.
ZHAO Chunshan, JIN Henghuan, CHEN Shouliu. Study on the high-power and high-pressure statics experiment of piezoelectric Ceramic[J]. Acta Acustica, 1981, 6(5): 322-327.