文章编号:1000-3630(2003)03-0150-03

用 Terfenol－D 驱动的凹筒型换能器

蔡志恂， 高毅品， 申扣喜， 张余丰
(海鹰企业集团有限责任公司,江苏无锡 214061)

摘 要:文章介绍了自行研制的用稀土超磁致伸缩材料作为激励器的凹筒型换能器。这是一种新型弯张式发射换能器,具有频率低、功率大、尺寸小等可贵特性。采用 Terfenol-D 棒径向开槽结构可有效降低材料中的涡流损耗;采用钐钴稀土磁钢提供永久型偏置磁场,从而避免了常用的直流偏磁结构中因激励线圈过热损害而带来的不可靠因素;采用特殊工艺措施保证 6 根应力螺杆上施加足够且均匀的应力。研制的换能器最大外型尺寸为 Φ130mm×250mm,谐振频率为 990Hz,发射电流响应级为 170dB(0dB=1μPa·m/A),声源级为 190dB(0dB=1μPa at 1m)。在 1kHz 附近谐振点的等效电阻为 13.6Ω。

关键词:稀土合金;磁致伸缩材料;凹筒型换能器
中图分类号:TB552 **文献标识码**:A

Flextensional barrel-stave projector with terfenol-D

CAI Zhi-xun, GAO Yi-pin, SHEN Kou-xi, ZHANG Yu-feng
(Haiying Group Ltd., Wuxi 214061, China)

Abstract: This paper describes a barrel-stave projector that uses a rod of Terfenol-D as the driving element. It is a new type of flextensional transducer that combines low frequency and high power performance in a compact design. Radial slots are used to effectively control eddy currents in the Terfenol-D rod. The permanent magnets with samarium-cobalt rare-earth material provide magnet biasing. This avoids the uncertain fact that the coil is too hot to work normally due to DC current. Special measures are taken to ensure uniform pressure on the 6 stress bolts. Maximum size of the projector is 130mm in outside diameter and 250mm in length, with a resonance frequency at 990Hz. The transmitting current response is 170dB (0dB=1μPa m/A), and the source level is 190dB (0dB=1μPa at 1m). The equivalent resistance at resonance frequency is 13.6Ω.

Key words: rare-earth alloy; magnetostrictive material; barrel-stave transducer

1 前 言

稀土超磁致伸缩材料铽镝铁合金,又称 Terfenol-D,是一种新型磁致伸缩材料。因其能量密度是压电陶瓷的 20～30 倍、应变是压电陶瓷的 10 倍、声速只有压电陶瓷的 1/3,常被应用于制作低频、大功率、小体积发射换能器。近年来对该材料在纵向振子和弯张Ⅳ型(椭圆管)换能器中的应用研究取得了较大进展,但在凹筒型弯张式换能器方面的应用研究在国内尚未报道。本文介绍了自行研制的该型换能器的技术性能及与国外同型换能器的性能比较,并就进一步设计该型换能器进行了分析讨论。

2 换能器简介

图 1 是稀土材料凹筒型换能器的结构示意图。超磁致伸缩稀土棒激励器通过轴向压缩的应力螺杆紧固在上下两个端质量块上,外围一圈凹筒型长侧板的两端也固定在端质量块上[1]。当稀土材料激励器带动端质量块产生轴向位移时,凹侧板则由于沿其长度方向的位移而产生径向位移,从而使伸长运动转换成凹板的弯曲运动。与径向运动相关的体积速度可以是伸长运动的 2 倍[2]。

凹筒型弯张换能器具有体积小、重量轻、频率低、功率大、外型结构适合于组排基阵等一系列优

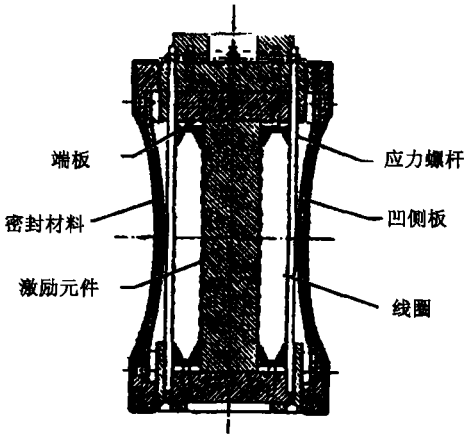

图 1 换能器结构

收稿日期:2002-01-25;修回日期:2002-07-25
作者简介:蔡志恂(1942-),男,上海人,研究员,从事水声换能器研究设计工作。

点，因此在低频声呐中极具应用价值。稀土材料凹筒型换能器结构和工作原理与陶瓷材料凹筒型换能器相同，差别是换能器中的压电陶瓷堆改用稀土激励棒，中心的应力螺杆相应地由稀土棒及激励线圈与壳体之间均匀分布的6根应力螺杆所代替。

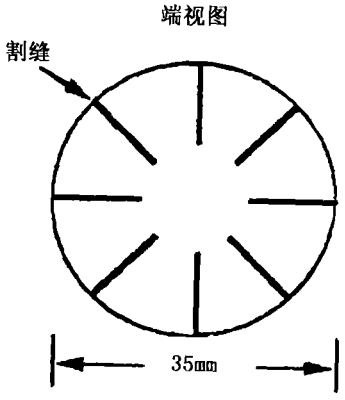

图2　割缝示意图

3　设计与制作

研制的换能器最大外径为Φ130mm，高250mm。换能器的凹筒壳体是由10块间缝为0.8mm的凹型弯板组成的，弯板厚为4mm，曲率半径为220mm。凹筒壳体的结构以及密封橡胶套包覆与压电陶瓷凹筒型换能器[3]完全相同。

激励器所用的超磁致伸缩材料为甘肃天星稀土功能材料有限公司生产的直径为35mm、高为101mm的稀土棒。Terfenol-D激励元件的涡流损耗是重要的技术指标之一，因为涡流损耗导致热量耗散和棒的内场与外场激励之间存在相位差而降低换能器效率。采用稀土材料薄片迭层式结构可以均匀材料中的磁场强度并有效降低稀土棒中轴向涡流，但由于Terfenol-D材料价格昂贵，约为压电陶瓷材料价格的10倍，采用迭层结构，稀土材料加工过程中材料损失的代价将增加。因此我们采用激励棒径向均匀开槽的方法(见图2)。割缝的目的同样是阻止涡流损耗，割缝数过多影响稀土棒的强度，过少则降低阻挡涡流的效果。用一个高为5mm左右的小线圈套在棒的中点处测量线圈的电感量与割缝数的关系，实验证明在1kHz时，当割缝数为6～8条时，电感量已趋于稳定，而在10kHz时，电感量仍随割缝数的增加而缓慢上升。我们取割缝数为8，对于1kHz频率使用已经足够，其抑制涡流损耗的有效性已被实验研究和有限元模拟所证实[2]，而对10kHz高频，去涡流效果仍显不足。

割缝深度取决于涡流损耗的趋肤深度δ，它可由下式计算：

$$\delta=\sqrt{\frac{1}{\pi f\mu\sigma}} \tag{1}$$

式中f是频率(Hz)、μ是磁导率(H/m)、σ是材料电导(1/Ω)。

根据简单的估算并加上30%的余量，我们取割缝深度为7mm，割缝宽度取决于最小线切割金属丝的直径，所用的钼丝直径为0.1mm，实际缝宽为0.2mm。Terfenol-D是一种硬而易碎的金属，深缝根部易产生龟裂，必须仔细清理缝中残渣，并通过环氧树脂真空灌封来增加强度和恢复结构上的完整性。

加拿大1992年进行的该型换能器研究中采用了激励线圈直流偏磁的设计，这对换能器测试和使用带来了诸多麻烦，而且高达20A的偏磁电流使线圈容易过热而损坏。因此我们设计用钐钴稀土磁钢来提供永久偏磁，通过在空气中试装以及结合Terfenol-D材料磁滞回线的特性来确定偏磁强度，以确保有足够动态范围的线性工作段。在永久磁钢两端加一定厚度的铁氧体垫片，用以改善Terfenol-D棒中的磁场均匀性。采用永久偏磁设计，不但满足了换能器在使用中简单方便的要求，而且很大程度上改善了换能器大功率条件下的工作可靠性。

激励线圈不必加直流偏磁，相对工作电流较小，设计时只要考虑10A～15A的激励信号的动态范围不超过Terfenol-D材料的磁场饱和强度，并兼顾换能器内部允许空间尺度来确定线圈尺寸和匝数。换能器装配时，必须施加足够的预应力，采用特殊工艺措施保证6根应力螺杆上施加均等的预应力。

4　换能器性能

换能器的性能是在新安江水库试验场水下20m自由声场中测量的。换能器水平无指向性，在谐振频率附近，垂直指向性起伏在±1dB以内。

图3和图4是换能器的发射电流响应曲线。在换能器谐振频率990Hz处，发射电流响应级为170.5dB(ref. 1μPa·m/A)。当用10A电流信号激励时，声源级为190.5dB(0dB=1μPa at 1m)，发射电压响应级的-3dB带宽为220Hz。测试结果表明换能器在弯曲基频谐振点以后具有多个高阶谐振点和其他振动模式(如纵向振动)的谐振点，当用作发射声源时，其工作频带可拓宽到0.5kHz～10kHz。

图5是在谐振频率附近换能器的效率，在谐振点效率为7.3%，换能器在1kHz附近的等效阻很低，只有13.6Ω，使用相当方便。

表 1　性能比较

项目 / 厂家	偏磁方式	谐振频率 /Hz	发射电流响应级/dB (ref. 1μPa·m/A)	最大声源级/dB (ref. 1μPa at 1m)	效　率 /%
SPARTON	直流偏磁	1300	167	187.7	6.2
721	永磁偏磁	990	170.5	190.5	7.3

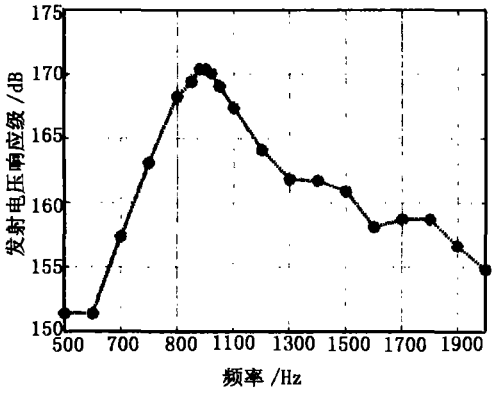

图 3　发射电流响应级(0.5kHz～2kHz)

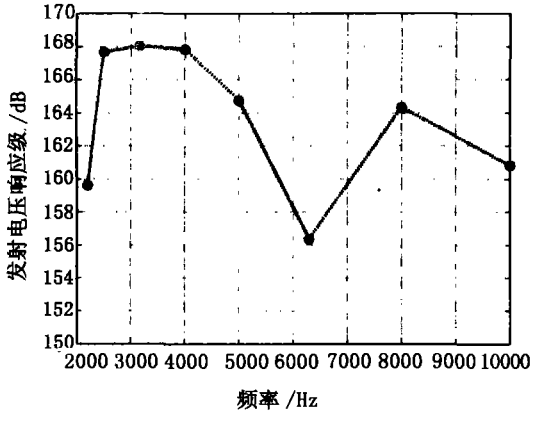

图 4　发射电流响应级(2kHz～10kHz)

表 1 是换能器与加拿大 1992 年研制的同型换能器的性能比较。从表中可见，研制的凹筒型稀土换能器性能略优于国外同型换能器，达到了低频、大功率、小尺寸的预期目的。

5　结　论

● 研制的凹筒型稀土超磁材料换能器填补了国内研究空白，其谐振频率低于 1kHz，有较高的发射响应和声源级；

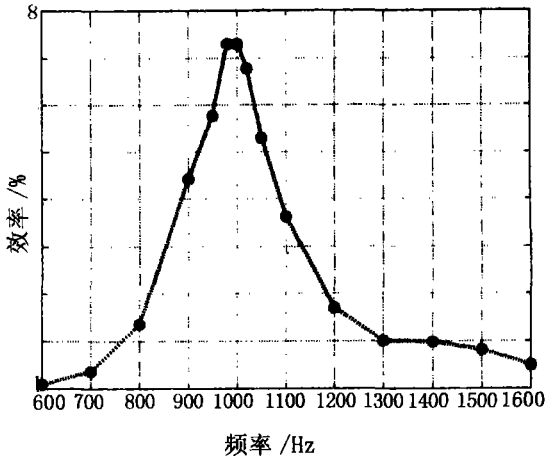

图 5　换能器效率

● 换能器采用永久偏磁设计，使用方便、工作可靠，谐振频率较相同尺寸的同型压电陶瓷换能器更低，而且工作阻抗比压电陶瓷型换能器低得多，不需要配置匹配变压器，具有更广泛的应用前景；

● 稀土超磁材料换能器的效率低于同型压电陶瓷换能器，进一步降低涡流损耗，提高激励磁场的均匀性，并设计低磁阻磁通回路可以提高换能器的发射效率，是进一步改型设计的研究方向。

致谢　感谢本单位宋受镒、姚传江、黄阿三等同志在换能器研制、密封及测量过程中提供的帮助和支持，同时感谢甘肃天星稀土功能材料有限公司在稀土材料生产加工中提供的帮助。

参考文献：

[1] McMahon G W, Jones D F. Barrel-stave projector [P]. U.S.: 4.922.470, 1990-05-01.

[2] Purcell C J. Terfenol driver for the barrel-stave projector [A]. Transducers for sonics and ultrasonic [C]. U.S., 1992: 160.

[3] 蔡志恂，高毅品，申扣喜等. 凹筒型弯张式低频发射换能器[J]. 应用声学，2003，22(3)：19-22.