

纪念《声学技术》创刊 30 周年特邀文章——

水下液电强声技术的研究进展与展望

刘平香^{1,2}, 陈耀娟¹, 闫 峥^{1,2}

(1. 上海船舶电子设备研究所, 上海 201108; 2. 水声对抗技术重点实验室, 上海 201108)

摘要: 主要从强声技术的应用需求出发, 阐述了水下液电强声的产生机理、物理特性和传播特性, 介绍了水下强声能领域的研究进展, 总结了水下强声能武器发展中的关键和瓶颈问题, 最后给出了水下强声技术的发展展望。

关键词: 液电效应; 强声; 水下脉冲放电

中图分类号: TM89 TB561

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2012)-02-0133-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2012.02.004

Research progress and prospect of underwater high-energy acoustic technology by electro-hydraulic effect

LIU Ping-xiang^{1,2}, CHEN Yao-juan¹, YAN Zheng^{1,2}

(1. Shanghai Marine Electronic Equipment Research Institute, Shanghai 201108, China;

2. Science and Technology on Underwater Acoustic Antagonizing Laboratory, Shanghai 201108, China)

Abstract: This paper focuses on the application of high-energy acoustic technology. The characteristics of high-energy sound produced by EHE(electro-hydraulic effect)are explained, such as the principle of EHE, the physical and spread character of intense sound. The actuality of the high-energy acoustic technology is also introduced, and the key factor and choke point for this technology are summarized. Finally, the prospect of high-energy underwater acoustic technology is described.

Key words: electro-hydraulic effect; high-energy sound; underwater pulsed discharge.

0 引言

激光、微波或高能粒子束等高能武器是当前正在发展的一类重要的新概念武器^[1-3], 能够实现定向发射、聚束、远距离传输、快速攻击并毁伤目标。与常规武器相比, 这类武器具有能量集中、传输速度快、精确射击、转向灵活、作用距离远、抗干扰、杀伤效率高、效费比高等特点, 如激光武器通过激光器和光束定向器形成定向发射的激光束直接攻击并摧毁目标, 可攻击飞机、导弹和卫星等战略、战术目标。美海军的兆瓦级舰载激光武器已成功地进行了拦截巡航导弹的试验, 计划部署于完全采用电力推进系统的对陆攻击驱逐舰; 美国用于战略防御的天基激光武器已成功进行过兆瓦级高功率激光器与光束控制、瞄准子系统的集成综合试验, 未来有可能进行星座式部署, 拥有对战略弹道导弹的全球防御能力。又如高功率微波武器将高功率微波源产生的微波经高增益定向天线发射出去,

形成高功率、能量集中且具有方向性的微波射束, 它通过毁坏敌方的电子元器件、干扰敌方的电子设备来瓦解敌方武器的作战能力, 破坏敌方的通信指挥与控制系统, 并能造成人员的伤亡, 能对雷达、预警飞机、通信电子设备、军用计算机、战术导弹与隐身飞机等形成对抗能力。高功率微波武器涉及脉冲功率源技术、高功率脉冲开关技术、高功率微波源技术、天线技术、超宽带和超短脉冲等关键技术。美国海军已研制出舰载防空高功率微波武器样机, 用于对付反舰导弹; 美国空军正在研制用于控制空间的高功率微波武器系统, 其攻击的主要目标可能是敌方的通信卫星和电子侦察卫星。

水下强声技术是一种基于上述同类武器概念而开展的用于水下作战的新概念武器技术, 有传播速度快、反应能力良好和使用安全等诸多优点。

1 水下液电强声的产生机理与物理特性

1.1 水下液电强声的产生机理和物理过程^[4-9]

水下强声主要可以通过水下爆炸、常规电声换能器、高压气枪、液电效应等方式产生。基于液电

收稿日期: 2012-02-01; 修回日期: 2012-04-20

作者简介: 刘平香(1965—), 男, 江苏南通人, 研究员, 研究方向为水声对抗。

通讯作者: 刘平香, Email: liupingx@sina.com

效应原理产生强声相比于其它方式因其具有可重复使用、可接受的基阵体积以及具备足够高的声源级等综合特点，已在某些工程领域得到较好应用，如医疗碎石、石油钻探碎石、机械成形等领域。

水下液电强声的产生主要通过高压强流在水中快速放电而形成，其原理图可参见图 1。电容 C 上的高压 U 突然加到水下放电间隙 G 上，使 G 立即击穿，接着电容 C 经 S 和 G 迅速放电，产生极强的放电电流。由于巨大能量瞬间释放于 G 的放电通道内，通道中的水迅速汽化、膨胀并引起爆炸，爆炸可引起巨大的冲击压力，因为放电时间很短(纳秒至毫秒级)，所以电功率 N 能够达到很高的数值。水中爆炸产生的压力相当高，使通道高速向外膨胀，又由于水介质的不可压缩性，可以形成强有力的冲击波以超声速向外传播，然后衰减成声脉冲。放电结束后，放电通道内形成气泡，在其内很高的压力作用下，以稍小的膨胀速度向外扩张，对周围介质做功。

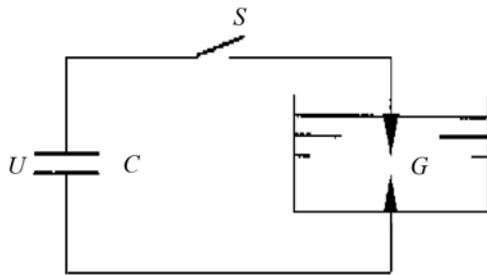


图 1 液电效应原理图
Fig.1 The principle of EHE

液电效应的本质是能量的高速转换，即电能通过放电方式转化为热、光、力和声等其他形式的能量。液电效应的产生机理由于其微观过程(包括水下脉冲放电的现象和过程)复杂而存在不同的解释。总体来说，水下液电效应产生强声大致可分为 4 个阶段：水中脉冲放电预击穿过程、高温高压等离子体的形成、气泡的膨胀与收缩、强声的产生与传播。

水中脉冲放电预击穿过程，包括电子发射理论和热模型等观点。电子发射模型类比于空气中的电子崩模型，在高电压(10 kV 以上)作用下，电子从阴极发射，进入液体介质以后，在足够强的电场作用下，获得足够高的能量，电离液体分子或原子，电离后形成的正离子增强了阴极表面的电场强度，进一步促使了电子的发射，电子累积形成电子雪崩，最终导致液体介质的击穿。

热模型基于在低电压情况下电极尖端的场强达不到形成先导的临界值时，初始的电子场致发射带来的焦耳热效应对电极周围区域的液体介质加

热，以降低附近区域的粒子密度。在电极尖端，由于场强相对较大，电流密度大，因此电极尖端附近的水层受到加热，先被汽化而形成气泡，气泡中粒子密度相对较低，电子的平均自由程较长，因而有足够的能量引发电子雪崩。然后再对下一区域进行加热，使密度降低，进而电离。同时这一区域形成等离子体。这样一直继续下去，直到贯穿两个电极。热力击穿的特征除了电压较低外，其击穿间隙不大和击穿延时随着液体静压力的增长而迅速增大。基于热模型的液电效应原理图如图 2 所示。

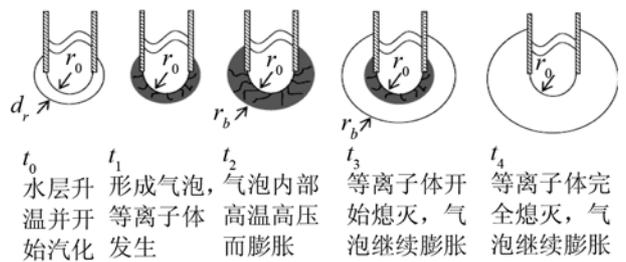


图 2 基于热模型的液电效应原理图^[8]
Fig.2 The heat model for EHE

高温高压等离子体的形成，通道击穿后，电容器储能向液体介质中放电通道释放，放电电流达几十 kA 至几百 kA，放电电极附近的液体介质被电离而形成大量的等离子体，在大放电电流的作用下，等离子体具有极高的温度和压力。在放电接近完毕时温度下降，通道截面的增大和电弧放电电导率的某些增长，使通道电阻在开始击穿阶段迅速下降，到临近放电终了时，由于电弧中等离子体冷却和冷却引起的去游离过程，通道电阻又增大。

气泡的膨胀与收缩，强声的产生与变化，液中放电时电容器中储能使放电通道内的介质分子电离形成等离子体，电子离子吸收能量使等离子体温度升高，通道周围液体介质汽化而迅速膨胀，而液体介质的惯性企图阻止气体的膨胀，使通道内气体有一个膨胀收缩过程而形成巨大的冲击波，这里一般假设气体按照绝热规律膨胀，气泡周围的液体是无粘性不可压缩的无限水域。

在形成初始冲击波的同时，放电形成的等离子体迅速向外膨胀，以气泡的形式推动周围的水，沿径向向外运动。气泡的压力随膨胀而不断下降，当降至周围介质的静压力时，气泡膨胀并不停止，由于水流的惯性运动，气泡做过度膨胀，一直到最大半径。这时，气泡内的压力低于周围介质的平衡压力，周围的水开始反向运动，即向中心聚合，同时压缩气泡，使气泡不断收缩，气压力逐渐增加。同样聚合水流惯性运动的结果，气泡被过度压缩，其内部压力会高于周围的平衡压力，直到气体的压力

高到能够阻止气泡的压缩而达到新的平衡。这种过程称为气泡的胀缩脉动或气泡的脉动, 由于水的密度比空气的密度大很多, 惯性大, 这种气泡脉动过程有时可能会很长。这种气泡脉动产生的压力波如图 3 所示。

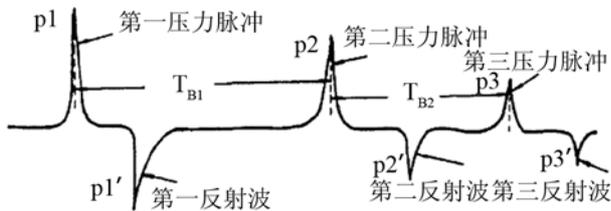


图 3 液电效应产生的压力波形
Fig.3 The shock wave produced by EHE

1.2 水下液电强声的物理特性和传播特性

高功率脉冲电源产生的高压大电流在水中放电的液电效应, 能形成能量巨大的冲击波。这种冲击波在时域上具有很短的下陷时间、比较窄的持续时间、较强的幅度。在频域上, 具有较宽的频谱分布。冲击波也是弹性介质中的压力波, 从本质上说这种冲击波也是一种声波。但是, 冲击波也有其固有的特点。首先, 冲击波的波阵面为不连续面, 其前后的物质状态(压力、密度、速度、温度等)是间断的, 或者近似间断, 且冲击波阵面速度比声速快得多。其次, 冲击波传播的能量, 除了媒质在其平均位置前后震动的声能外, 还伴随其波后的液体流动的动能。冲击波的峰值压力与有效值的比值较高, 振幅上升和下降的速度较快, 持续时间较短。冲击波在水中的传播衰减比一般声波的衰减更快。当冲击波传播到一定距离后, 波速下降为声速就蜕变为声波。但是冲击波过渡到声波的界限是难以明确确定的。冲击波过渡到声波的这个边界范围的距离叫做临界距离。研究大振幅声波时, 描述声学现象的各个参量之间的关系不再能满足线性关系。大振幅声波在传播时, 非线性效应变得显著, 对于液电强声产生的冲击波在近场情况下应用非线性声学描述, 传播一定距离后可视为通常的脉冲声波。

2 水下液电强声技术研究与应用现状

水下液电强声技术在海洋资源勘探、石油勘探、医学体外碎石、机械成形及液电清砂和除垢等商用领域得到较多应用, 同时将应用于军事领域。

2.1 冲压成形与清洗

将液电力学效应作为“压机”, 再结合成形模具的使用, 电水锤成形技术可用于板料的浅拉延、

压印、冲孔、管件胀形等。其特点是模具结构简单, 适应性强, 工序少, 生产率高, 工件质量好。尤其是在电水锤成形加工中可使用石膏等作模具材料, 因此若将其用在新产品的研制上, 可大大降低加工成本。目前, 美国、日本等发达国家采用电水锤成形法已能制造 300 多种不同的高精度零件, 其成形速度可达 400m/s, 可以成形各种高强度、耐高温合金, 得到的成形件回弹小, 不需校正, 成形精度达 0.013~0.05mm。

电水锤清洗是利用液电效应产生的强激波, 对结垢管道、容器壁进行冲击振荡, 由于管道容器与污垢间的弹性模数及自身振动频率不同, 在激波反复作用下, 污垢将受迫与管道及容器壁分开, 并被粉碎分散入液相中随液相带走, 从而达到清洗除垢的目的。应用电水锤除垢术, 由于金属材料的强度远大于污垢的强度, 只要选取适当的放电能量和放电形式, 就能保证污垢全部清理干净而不至于工件本身受到任何损伤。因此电水锤除垢术具有清除污垢效果好、生产效率异常高的显著优点。

2.2 医学体外碎石

体外冲击波碎石技术是高压强脉冲放电技术在医疗领域的一项成功的应用。利用水中发生高功率脉冲放电时形成“液电效应”而产生冲击波, 以及冲击波可以被聚焦这一物理现象和特性, 基于液电效应产生的聚焦冲击波从人体外部传入人体内部并在人体内部结石处聚焦, 处于冲击波焦点范围内的结石在聚焦后的强烈冲击波反复冲击下逐渐破碎, 从而实现无伤口治疗。冲击波的产生一般利用高压强脉冲液中放电的“液电效应”, 使电极在半椭球形反射体的第 1 焦点处产生放电, 从而产生强烈的冲击波, 并聚焦于第 2 焦点处, 形成一个压力峰值高达几十 MPa 的压力区。或电极阵按球面布放, 在球心处(焦点区域)形成冲击声波的聚焦。

2.3 水下低频宽带声源

20 世纪 40 年代以来, 强电流脉冲水下放电已广泛应用于工业生产的各个领域, 其中最重要的一项是用来进行地质勘测。美国和西欧等国家利用高压脉冲技术在水下的放电作为电火花震源, 其产生的能量极强的冲击声波在遇到一般的岩石层所产生的反射与遇到石油或其他地质矿藏所产生的反射, 通过分析各种反射波差异可以来判断海底是否有石油等矿物质的储藏, 而且这一技术也被用来进行地震勘测, 并且已经相当成熟。在海洋资源勘探中利用水下电火花放电技术形成低频大功率声源实现对海底石油资源的勘探。其中荷兰 Geo- re-

source 公司已研制多种主动探测系统中的电火花声源,系统主要有电极阵、高压脉冲电源以及高压大电流传输模块等组成。其最大的系统有包含 800 个电极组成的强电火花声源,可以按照能量的选择产生中心频率为 500~2000Hz 的大功率脉冲信号(见图 4)。



图 4 电火花声源及其实验图

Fig.4 The equipment of electric-spark sound and the experiment

最新的研究是将高压脉冲放电应用于军事上,以产生作为声纳探测的声源。一般的声纳探测其主动声纳的声波频率是几千赫兹,可被水下普通的目标所反射。但对于一些新型的具有“隐身”功能的潜艇,上述频率常被吸收而不能被反射。研究发现对于一些较低频率(1~4 kHz)的声波,他们仍能反射。利用强流脉冲放电所产生的电脉冲压力波就可以达到这一频率,而且声强可以得到很好的控制和调节。

2.4 水下钻探与新概念武器

在石油钻探中,美国 Tetra 公司利用液电效应技术研制了液电钻头和液电矿石粉碎机进行油井钻探碎石(见图 5)。

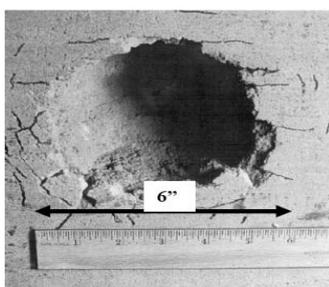


图 5 液电钻头冲击效果图

Fig.5 The impact of EHE aiguilles

韩国的研究机构利用液电技术开展碎石实验,使用 500kJ 的储能系统,通过 3 根 30m 同轴电缆并行连接至优化的电极金属片进行放电,试验结果使得 2.5m×1.5m×1.5m 的岩石产生了裂纹(见图 6)。

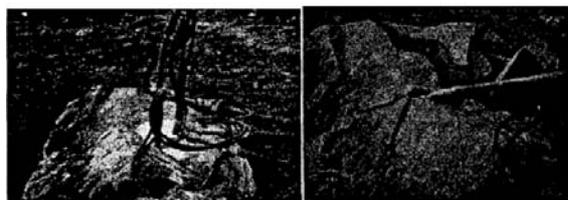


图 6 液电矿石粉碎机

Fig.6 Ore shattering machine by EHE

水下强声正式应用于军事领域还没有见到相关报道,但国外对此技术的研究已开展多年。美国 Tetra 公司应用这种技术作为硬杀伤武器,在鱼雷和水雷领域开展了可行性试验研究,使用一套由 16 个发射器组成的 1 m² 的发射电极阵产生了 2600 psi 的超压和 5200 psi 的滞压,或 264 dB(参考声压 1 μPa,在 1m 的开放水池)的压力,使其作用于水雷、鱼雷壳体相近材质的金属平板上,结果发现金属板产生明显变形,该试验结果表明水下放电技术可以应用于舰艇的鱼雷防御(见图 7)。



图 7 液电效应对钢板的冲击作用

Fig.7 The impact of EHE on armor plate

据美国国防高级研究计划局(DARPA)透露,美英两国的研究人员已开发出一种新型水面舰艇保护系统,可有效摧毁敌方来袭鱼雷。该项目主要利用压电换能器基阵发射大功率声波通过聚焦形成定向声能而实现对鱼雷的硬对抗,目前该项目处于可行性论证阶段,并已开展了单个阵元的研究。他们设计了一个基元的方案并进行了测试,1 m² 的阵列产生了等效于 240dB 声源级的声波,而概念研究中将 6×60 个这样的阵元按照相控的方式布设在船舷水线以下构成一大型阵列,形成超强超指向性的强声能波,用于对来袭鱼雷的近程快速对抗(见图 8)。

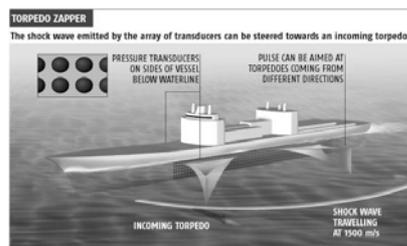


图 8 新型水面舰艇保护系统

Fig.8 New protecting system for naval ship

3 水下液电强声技术的发展展望

3.1 影响水下液电强声技术发展的关键因素

高压强流脉冲放电技术的实质是利用高压脉冲电源进行能量压缩,通过放电回路在脉冲功率负载上释放,从而产生脉冲功率。一般的衡量标准是能够在 10⁻⁹~10⁻³ s 时间内在负载上获得 10²~10⁹ J 或更多的能量。高压强流脉冲放电技术的关键在于能量压缩。能量压缩是指在时间和空间上增加能量密

度的过程,空间上的能量压缩能增大能量的体密度;而时间上的能量压缩可以提高功率。空间上的能量压缩实际上是减小体积,对于电容储能,应尽量提高允许使用的电场强度;对于电感储能,应尽量提高电感器材料抗电磁力的机械强度。时间上能量的压缩可以提高功率,其实质是缩短能量的释放时间。缩短释能时间,必须在储能元件和受能元件间加入第三元件(压缩元件),第三元件是中间储能和脉冲形成系统,或者是开关转换系统。图9是典型的液电强声设备组成示意图。在硬件方面影响水下液电强声技术发展的关键因素有电容、电缆、开关、电极等部件。受限于目前电子器件尤其是大储能电容器水平,要想获得高能量大功率的脉冲电源设备,其体积将十分庞大。值得关注的是,最近美国 Atomic Energy 公司的高密度电容已达到 5KJ/L,比传统电容高 10 倍左右,尽管这些新型电容器还存在着使用寿命短、稳定性差等问题,但已经为液电强声技术的进一步发展带来了机遇。在其他相关电子器件方面,如大电流全固态开关、低损耗传输电缆等相关技术也逐渐进步和成熟。

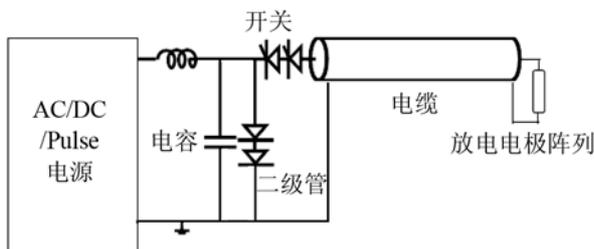


图9 液电强声发生设备

Fig.9 The sound generation equipment by EHE

另一方面,液电效应过程复杂,它涉及电学、物理学、化学、等离子体物理、水声学及电力电子等众多学科,液电效应的本质是将电能通过水下放电方式在极短的时间内转化为热、光、力和声等其他形式能量的过程,目前液电效应的电声转换效率过低,制约了液电强声作为声能新概念武器应用的进程。如何提高电能转化为声能的效率是液电强声技术发展的关键和瓶颈。因此,需加强液电强声技术的基础研究,进一步掌握液电效应的机理和规律,提高电声转换效率,为液电强声技术的进一步发展奠定基础。

3.2 水下液电强声技术的发展展望

基于液电效应的水下声能武器将具有如下优点:1)反应时间短,强声发射由电路控制,可与目标探测系统结合,即时发射;2)传播速度快,可以水下声波的速度接近目标并进行打击;3)可重复利用,摆脱了传统爆炸武器的消耗性本质;4)安全性高。考虑到这些特点和优势,基于液电效应的水下强声技术的研究将具有迫切的需求。随着液电强声技术研究的深入及电力电子器件的进步,液电强声技术将在水下声能武器,尤其是水下非致命性声能武器的发展中具有良好的应用前景,并将在快速对抗近程高速来袭目标领域具有潜在应用价值,值得大力发展和研究。

参 考 文 献

- [1] 雷开卓. 定向能武器发展现状及未来展望[J]. 鱼雷技术. 2010, 18(3): 161-166.
LEI Kaizuo. Overview of Directed Energy Weapons[J]. Torpedo Technology. 2010, 18(3): 161-166.
- [2] Spencer J, Carafano J J. The Use of Directed-Energy Weapons to Protect Critical Infrastructure[J]. Heritage Foundation, 2004 (1783): 1-6.
- [3] Bettencourt M T, Amdahl D J, Bowera L A, et. al. Virtual Prototyping of Directed Energy Weapons[C]// Proceedings of the HPCMP Users Group Conference, 2006: 252-258.
- [4] 于家珊译. 液电效应[M]. 科学出版社, 1962.
YU Jiashan. Electro-hydraulic effect[M]. Science Press, 1962.
- [5] 秦曾衍. 高压强脉冲放电及其应用[M]. 北京工业大学出版社, 2000.
QIN Zengyan. High voltage pulse discharge and its applications[M]. Beijing University of Technology Press, 2000.
- [6] 刘强. 水中脉冲电晕放电研究[D]. 中国科学院研究生院硕士学位论文. 2006.
LIU Qiang. Study of underwater pulse corona discharge[D]. Chinese Academy of Sciences. 2006.
- [7] 金名剑. 水下等离子体声源电特性的基础性研究[D]. 中国科学院研究生院硕士学位论文. 2004.
JIN Mingjian. Basic research of the electrical characteristics of underwater plasma sound source[D]. Chinese Academy of Sciences. 2004.
- [8] 王揆洋. 海洋浅地层高分辨率多道地震探测技术及应用[M]. 海洋出版社. 2010.
WANG Kuiyang. Oceanic high resolution multichannel seismic technology and application[M]. Ocean Press, 2010.
- [9] 黄双喜. 水下电火花声源装置中充放电回路系统的设计[D]. 大连理工大学硕士学位论文. 2003.
HUANG Shuangxi. Charge and discharge circuit design of underwater spark sound source[D]. Dalian University of Technology. 2003.