

doi: 10.11857/j.issn.1674-5124.2018.10.003



装药水下接触爆炸驱动能力测量技术研究

张显丕, 刘建湖, 潘建强, 毛海斌, 张克明

(中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082)

摘要: 因为传递介质的不同, 装药水下接触爆炸载荷输出与空气中存在较大的差异。而由于水下接触爆炸破坏程度高及水中测试难度大等因素, 装药水下接触爆炸驱动能力的试验测量一直处于停滞状态。该文基于空气猛度摆的原理设计用于测量水下接触爆炸驱动能力的弹道摆, 装置主要通过测量炸药水中爆炸作用下摆锤的摆角获取炸药对接触刚性表面的冲量, 从而得到表征装药水下爆炸冲击波及爆轰产物的驱动能力。通过对装置多阶段的整体及局部设计, 建立猛度弹道摆试验方法, 获得炸药端面冲量输出特性, 为水下接触爆炸载荷定量分析提供技术支撑。

关键词: 水下接触爆炸; 驱动能力; 测量方法; 水中弹道摆

中图分类号: O384

文献标志码: A

文章编号: 1674-5124(2018)10-0014-06

Investigation on measurement technology of driving capability for underwater contact explosion

ZHANG Xianpi, LIU Jianhu, PAN Jianqiang, MAO Haibin, ZHANG Keming

(China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China)

Abstract: Because of the difference of transmission medium, the load output of underwater contact explosion of charge is quite different from that of air. Because of the high damage degree of underwater contact explosion and the difficulty of underwater test, the test measurement of the driving ability of underwater contact explosion of charge has been in a stagnant state. In this paper, a ballistic pendulum is designed to measure the driving ability of underwater contact explosion based on the principle of air-force pendulum. The pendulum angle of the pendulum under underwater explosion is measured to obtain the impulse of the explosive on the contact rigid surface, and the driving ability of the shock wave and the detonation product of underwater explosion is obtained. Through multi-stage overall and local design of the device, the test method of the violent ballistic pendulum is established, and the impulse output characteristics of the end face of the explosive are obtained. This measurement technology provides technical support for quantitative analysis of underwater contact explosion load.

Keywords: underwater contact explosion; driving capability; measurement method; underwater ballistic pendulum

收稿日期: 2018-05-01; 收到修改稿日期: 2018-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51409234)

作者简介: 张显丕(1981-), 男, 辽宁庄河市人, 工程师, 博士, 主要从事水下爆炸载荷测量技术研究。

0 引言

相比于水下非接触爆炸,水下接触爆炸对结构的破坏程度更高,要确定其载荷输入才能更深度地进行舰船结构抗接触爆炸研究。但也正是由于其载荷的强度非常大,导致目前尚无有效的测量及评估方法。

目前关于接触爆炸载荷测量方法的研究主要还是集中于空爆情形。空气中用猛度来定义炸药爆炸时粉碎和破坏与其接触物体的能力,通常用铅柱压缩法或者弹道摆法来测定^[1-2]。Manfred Held^[3]利用效应物法研究了柱形炸药近场动能分布,首先在炸药周围布置若干个圆柱铝筒,然后测量爆炸抛掷下各个铝筒的位移,再根据时间得到速度,从而得到动能。针对水下接触爆炸载荷测量研究较少,且大部分是关注于结构的动响应而非装药输出载荷的情况,Kumar等^[4]以水中背气固支方板作为效应物,结合水下爆炸峰压和冲量评估了铝粉含量对PBX类炸药爆炸性能的影响;Nurick等^[5-9]研究了高强度低合金圆钢板在接触及近距爆炸下塑性响应,并重点考虑了空泡和气泡的重加载作用;Murata等^[10]研究了固支夹紧圆板在近距离下冲击波和气泡的联合作用;吴林杰等^[11-12]采用背气板模型舰艇空舱,分析了接触爆炸下固支方板的破坏特征。

虽然空气中接触爆炸载荷测量研究的比较多,

也取得了很多成果,但由于水与空气介质的不同,两者在载荷输出及传播机理上存在明显的不同,空爆结论及测量方法都不适用于水中爆炸。现有的水下爆炸接触爆炸研究中所涉及到的效应板,一定程度上定性反应了装药的破坏作用,但并不适合作为载荷输出的定量评估方法。鉴于接触爆炸时作用于结构上的冲量是一个非常重要的载荷输入参数,其决定了装药爆炸对结构的破坏程度,因此本文基于空气猛度摆的原理,对水中弹道摆的设计方法、测量方法进行了分析,以建立装药水下接触爆炸驱动能力测量技术。

1 装置设计

1.1 总体设计

整个试验装置包括摆体、摆臂、角位移测量装置及支架4个部分^[8]。其中,摆臂由两根细钢丝绳构成,长为1.5 m。摆体包括摆锤和击砧,摆锤为直径170 mm长270 mm实心圆柱钢体,一端为半球形密封罩,以减小运动时的流体阻力和涡流;另一端带凹槽,击砧一端配合于摆锤凹槽中,另一端与炸药接触。角位移传感器安装于支架与摆臂连接处。装置的摆体及炸药均位于水下,支架顶端及角位移测量装置露出水面,如图1所示。试验时,通过测量得到的摆角,然后再换算至初始速度,从而计算得到冲量,以冲量表示装药水下接触爆炸对结构的驱动能力。

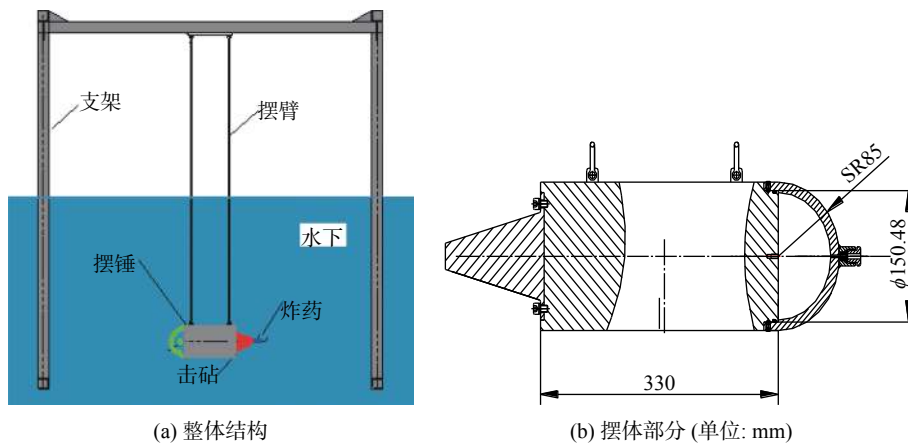


图1 水中弹道摆结构

1.2 弹道摆击砧形式的确定

弹道摆端面尺寸与装药大小相关,此阶段以30 g TNT柱形装药为设计及测量对象,药柱尺寸为 $\Phi 30.0 \text{ mm} \times 28.0 \text{ mm}$ 。而弹道摆作为一个驱动能力的测量装置,是用初速度来反应接触爆炸冲量,应

将装药输出尽可能的转化为摆体动能,所以应要求直接与装药接触的击砧能有足够高的强度,能保证在装药爆炸下其端面不产生明显破坏,这样也有助于保持其测量结果的一致性。由于水下接触爆炸的载荷量级高,达到了十几个吉帕,其对接触的物体

破体威力大,因此关于击砧形式的强度设计是一个难点及关键点。

弹道摆击砧端面形式经历了3个阶段的改进,第一阶段为等端面直颈式击砧,击砧端面设计成与药柱端面同样大小。击砧材料为Q345,整体调质HRC32~38。试验后击砧情况如图2所示。



图2 等端面直颈式击砧试验后击砧端面情况

试验后击砧沿径向产生明显裂口。分析认为主要有两点共同导致击砧上的应力及应变不均匀才产生裂口:1)击砧与药接触端面边界条件不一致。由于击砧为直线渐近缩小,其纵剖面为梯形,击砧端面周边的支撑比中心区域强,即刚度大。2)药柱在爆轰的轴向输出时,由于受到侧向产物膨胀的影响,轴向输出非理想平面波形式,在药柱外缘相对于中心区域要弱些。

鉴于等端面直颈式击砧试验及分析结果,在第二阶段对击砧端面重新进行了设计。设计为曲颈式,端部有约20 mm平直段,而后平滑过渡至根部。且端面略小于药柱直径,以尽可能使端面刚度一致,使所承载荷更加均匀。击砧材料由Q345改为锻45钢,但在热处理时分为两种情况,一种是整体调质HRC32~38,另一种是先整体调质HRC32~38,然后表面再进行高频淬火处理,深度0.5 mm,使表面HRC50~55。图3和图4为试验后击砧端面情况。



图3 整体调质的两次试验后击砧端面情况

从图3可以看出,主要裂纹并非沿径向扩展,而是沿环向扩展。对于直颈式击砧而言,受到正应力及泊松效应导致的径向拉应力,所以裂纹沿径向扩展。对于曲颈式击砧而言,当端部钝化变粗后,



图4 表面硬度提高后两次击砧端面情况

边界效应更加明显,侧面拉应力沿端面将形成两个区域,所以在边缘会形成环向裂纹,而在中间部分情形同直颈式一样,亦会形成径向裂纹。图4是表面硬度提高后两次试验击砧端部情况,并没有发现裂纹产生,径向扩张和轴向压缩量也小于硬度提高前情形。曲颈式击砧虽然从理论上分析使应力更加均匀,但是相比于直颈式,会有明显的钝化增粗现象,导致端面产生环向裂纹表面高频淬火,提高硬度有助于击砧抵抗塑性变形。

通过前两个阶段的试验,可以看出接触爆炸时很难有材料能在GPa级的应力反复作用下只产生较小的变形。基于这种考虑,第三阶段设计了分体式击砧结构,保留了曲颈击砧的根部,击砧的前半部用约50 mm长的独立直颈式结构代替,通过一个长螺栓与击砧后半部连接,后半部依然为曲颈式。两部分之间约为2 mm厚橡胶,以尽量缓冲前半部对后半部的冲击破坏,当击砧头变形较大或产生裂纹时,可以更容易地进行更换。材料及热处理同曲颈式击砧,图5为试验后击砧端面变化情况。



图5 分体式试验后击砧端面情况

经过两次试验击砧端部径向扩张和轴向压缩都比较小,几乎看不到毛边产生,也不见有裂纹出现。从分体式击砧试验可以看出:1)在继续保持端面高硬度情况下,去掉平直段后,变形情况得到明显改善;2)所设计的结构基本满足猛度测量要求。

2 测试方法的建立

2.1 摆角测量

摆角测量使用角位移传感器,其量程为 $\pm 60^\circ$,频响为1 kHz,试验时摆臂与一轴相连,角位移传感器安装于轴上,配以轴承以减小转动阻力。角位移测量装置如图6所示。

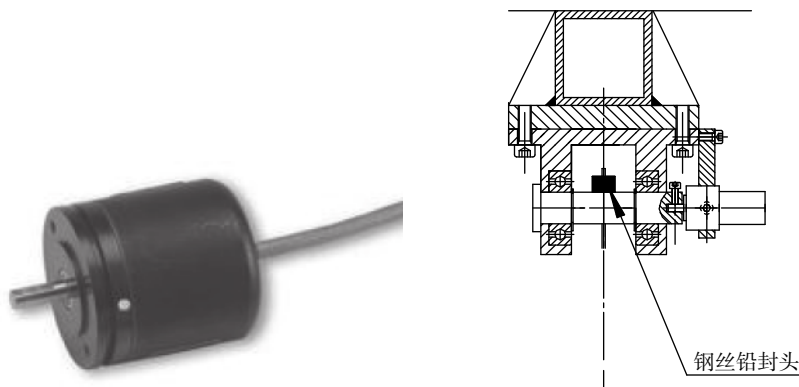


图6 角位移测量装置

2.2 摆角-速度标定曲线建立

测量最大摆角目的是想获得炸药爆炸驱动下摆体的初速度。从理论计算上说,可以从摆体的运动方程根据测量摆角换算到摆体初始速度,但是由于方程中的阻力系数和附加质量有一定的不确定性,影响了最终结果的精度。从测量角度来说,似乎通过测量的加速度曲线和角位移曲线,积分或者微分可以得到速度,但是实际爆炸时的测量曲线总是存在很大非理想性,尤其是角位移,曲线的起始作为最大速度点即为微分所求点,更给微分带来很大困难。因此有必要从准静态层次上建立摆角和速度的对应关系,即两者的标定曲线。

摆角-速度标定的程序为:将浸于水中的摆人为地拉至不同的角度,然后释放,通过对角位移测量曲线微分,求出速度最大值,并记录第一次经过最低点后的最大上升摆角,建立起初速度与摆角的对应关系。

摆体两端一端为半球面,一端为截顶圆锥面,两者在分别作为迎流面时,由于形状不同,其阻力也有所差别。为了尽量保持与爆炸时情形一致,取半球面为迎流面时经过最低点的速度作为爆炸后摆体初始速度,而取随后在1/4周期内到达最高点时的角度为摆角,标定试验即要建立这两者的函数关系。试验时分别考察初始释放后第一次经过最低点的运动参数,如图7所示。

图8为角位移和速度测量结果。角位移间接测量线性拟合关系式为 $V = 0.0688\theta - 0.0042$,可以将此速度与角度关系式作为标定式并应用于正式试验中。

3 测量技术的可靠性分析

3.1 气泡膨胀对摆体运动影响分析

由于水下爆炸不仅有冲击波作用,还存在爆轰

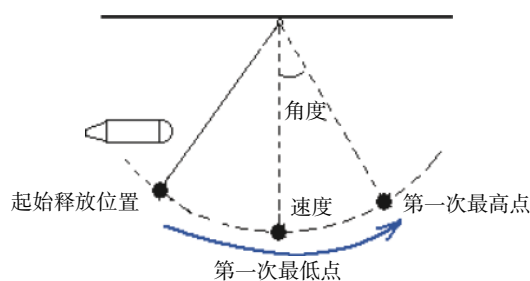


图7 第一次过最低点时的速度和角度

产物形成的气泡脉动,而弹道摆的摆体在初始驱动下运动以后,势必会受到气泡膨胀作用,有必要分析气泡脉动收缩对摆体运动的影响。摆体的角位移曲线可简化为几个折线过程,如图9所示。摆体在初始运动的1/4周期内,其震荡过程是由于气泡脉动所引起,而整个过程可分为扰动、恢复及惯性3个阶段。气泡在最初两个脉动周期内使摆体偏离原本运行轨道,而摆体在拉力、重力及浮力共同组成的恢复力作用下又逐渐还原至原轨道,随后由于惯性继续震荡衰减直至进入平稳摆动过程。摆体在平稳运动时向心力是不做功的,只有流体阻力做负功,而摆体在震荡过程中扰动力及恢复力在克服流体阻力做功,相当于一个平衡过程,对摆体自身的摆动动能及摆角并不产生明显影响,所以气泡脉动对摆动的影响也可不予考虑。

3.2 测量结果的可靠性分析

分体式击砧的测量结果如表1所示。

用空气中药柱端面输出载荷计算公式与试验结果进行简单比较。药柱的约束条件对爆轰成长及产物扩散有着非常重要的影响。对于空气和水两种介质来说,在炸药与介质界面处都会存在向产物内部传播的稀疏波,对爆轰产生不利影响。但由于水的密度及声阻抗远大于空气,且不可压缩性显著,所

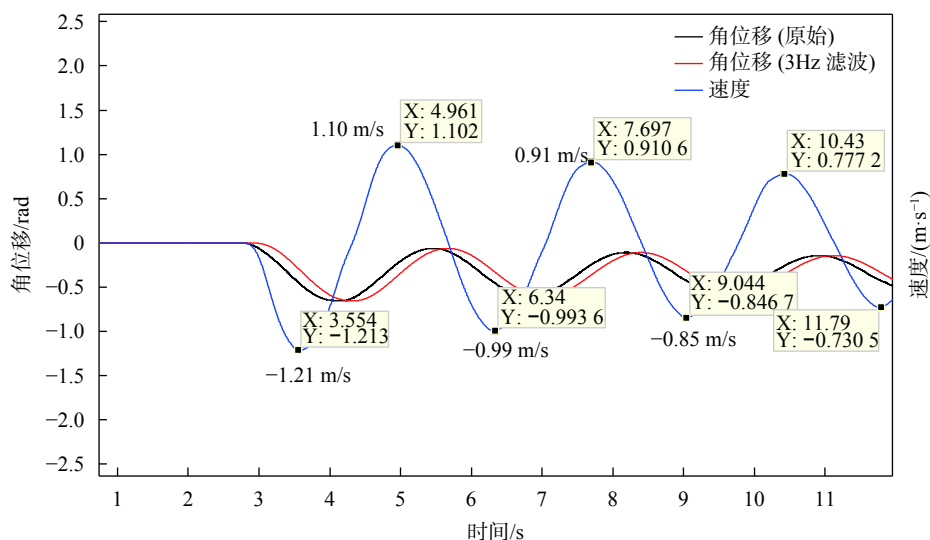
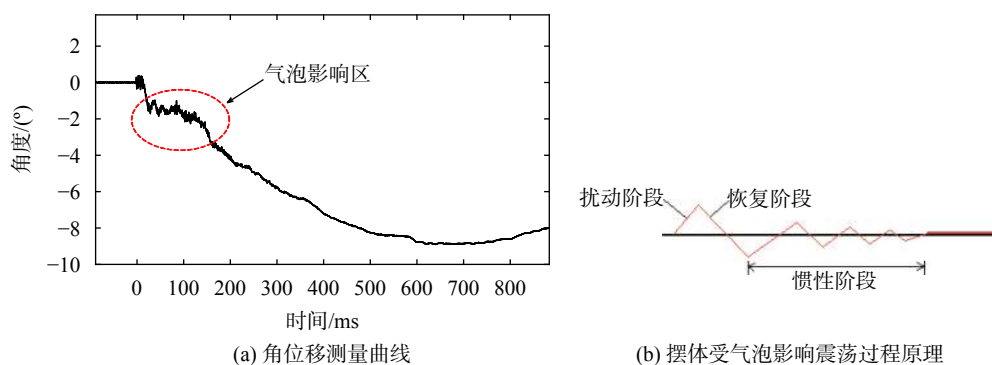


图8 角位移曲线及微分速度曲线



(a) 角位移测量曲线

(b) 摆体受气泡影响震荡过程原理

图9 气泡脉动对摆动影响分析示意图

表1 非等端面曲颈式击砧爆炸试验结果¹⁾³⁾

编号	药量/g	角度/(°)	速度/(m·s ⁻¹)	试验冲量/(N·s)	无阻尼理论计算冲量/(N·s)	试验冲量比无阻尼理论冲量/(N·s)	端面面积/mm ²	比冲量/(N·s·m ⁻²)
1#	30.3	13.88	0.95	63.99	18.05	3.55	657.8	97 279
2#	29.7	13.85	0.95	63.85	17.66	3.62	784.3	81 410
3#	30.3	14.17	0.97	65.33	18.05	3.62	918.6	71 119
4#	29.8	13.18	0.90	60.74	17.76	3.42	624.6	97 246
5#	31.1	14.35	0.98	66.16	18.53	3.57	629.0	105 183

注: 1)速度根据标定曲线获得; 2)冲量计算时已考虑摆体的附加质量; 3)无阻尼冲量表示空气中理论计算结果。

以其约束能力也明显强于空气, 冲击波及产物的衰减也慢得多。空气中计算端面输出有两个比较成熟的计算公式, 一个是不考虑侧向膨胀, 即为刚体约束; 另一个是考虑了空气约束时的侧向膨胀, 即存在“爆轰头”的有效装药现象。但两个公式都把药柱起爆端作为真空处理。所以不考虑侧向膨胀的计算公式基本上可以代表装药水中爆轰时的端面输出能力。

$$I = \frac{8}{27}WD \quad (1)$$

式中: W —装药量, kg;

D —爆轰速度, m/s;

I —总冲量, N·s。

以式(1)对30g TNT装药计算可得冲量为62.2 N·s, 而表1击砧的测量结果平均值约为64.0 N·s, 两者基本相当。再考虑爆轰时对其接触物体的驱动速

度,文献[13]指出,当装药量相对较少或者刚体质量较大时,可用瞬时爆轰模型来近似处理,即假设整个炸药柱在同一时刻全部起爆,炸药一瞬间全部转变为爆轰产物,计算公式为

$$v_0 = \sqrt{\frac{3}{8}} D \left[1 + \frac{6}{(6+\bar{m})\bar{m}} \left(3 + \bar{m} - \sqrt{9 + 12\bar{m} + 2\bar{m}^2} \right) \right] \quad (2)$$

式中: $\bar{m} = W/m$, m 为摆体质量, kg;

v_0 —爆轰结束时摆体初始速度, m/s。

用式(2)计算可得初始速度为 0.96 m/s, 与表 1 中速度平均值 0.95m/s 相近。从冲量和速度两个参数的比较来看,不需要考虑击砧端面变形和气泡脉动的影响,也说明测量结果基本上是合理的。

4 结束语

本文以猛度来表征装药水下爆炸对其接触物体的破坏能力,基于弹道摆试验技术的研究建立了水下爆炸猛度测量方法。通过 3 个阶段的整体设计,确定了装置整体结构及试验环境;通过多次局部设计,确定了击砧的结构形式及材料工艺要求。并研究了弹道摆测量的标定方法及测量结果的影响因素,最后对测量的炸药端面冲量输出特性进行了分析讨论。此项测量技术为水下接触爆炸载荷定量分析及装药水下爆炸威力评估奠定了基础。

参考文献

- [1] 揭太元. 用双弹道摆测定垂直穿甲动量耗损的实验方法[J]. 兵工学报, 1990(4): 70-75.
- [2] 夏天赦. 改进威力弹道摆的研究[J]. 火炸药, 1982(4): 63-67.
- [3] HELD M. Impulse method for the blast contour of cylindrical high explosive charges[J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 1999, 24(1): 17-26.
- [4] KUMAR A S, VEPAKOMMA B R, SINHA R K, et al. Evaluation of plastic bonded explosive (PBX) formulations based on RDX, aluminum, and HTPB for underwater applications[J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2010, 35(4): 359-364.
- [5] NURICK G N, SHAVE G C. The deformation and tearing of thin square plates subjected to impulsive loads-an experimental study[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1996, 18(1): 99-116.
- [6] NURICK G N, MARTIN J B. Deformation of thin plates subjected to impulsive loading-a review part II: experimental studies[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1989, 8(2): 171-186.
- [7] RAJENDRAN R, NARASIMHAN K. Underwater shock response of circular HSLA steel plates[J]. *Shock and Vibration*, 2015, 7(14): 251-262.
- [8] TEELING-SMITH R G, NURICK G N. The deformation and tearing of thin circular plates subjected to impulsive loads[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1991, 11(1): 77-91.
- [9] KUMAR A S, GOKUL K U, RAO P V K, et al. Blast loading of underwater targets - A study through Explosion Bulge Test experiments[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015(76): 189-195.
- [10] MURATA K, TAKAHASHI K, KATO Y. Underwater shock and bubble pulse loading against model steel cylinder[J]. *Materials Science Forum*, 2004(456-466): 283-288.
- [11] 吴林杰, 侯海量, 朱锡, 等. 水下接触爆炸下防雷舱舷侧空舱的内压载荷特性仿真研究[J]. *兵工学报*, 2017(1): 143-150.
- [12] 吴林杰, 侯海量, 朱锡, 等. 水下接触爆炸下防雷舱舷侧空舱的内压载荷特性[J]. *爆炸与冲击*, 2017(4): 719-726.
- [13] 李维新. 一维不定常流与冲击波[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 430-456.

(编辑:李刚)