



水深对毁伤效应的影响实验研究

王长利, 周刚, 冯娜, 陈春林, 马坤, 赵南, 李名锐

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 对于浅水中耐压舱体结构的毁伤效应人们开展了相关研究, 由于深水环境中(50~300 m)静水压力的存在, 处在其中的耐压舱体承受一定的预压力, 预压力的存在对耐压舱体在聚能装药作用下的毁伤效应产生的影响尚不明确。该文设计单次使用模拟深水爆炸实验装置, 开展不同模拟水深条件下耐压舱体结构在聚能装药作用下的毁伤效应研究。研究表明: 在0~3 MPa静水压力条件下, 水深对耐压舱体靶板的破坏、水中冲击波压力峰值以及耐压舱体前板中心位移无明显影响, 对于耐压舱体结构, 浅水中的研究结果可以应用于深水环境中。

关键词: 水下爆炸; 深水; 毁伤; 聚能装药

中图分类号: O383

文献标志码: A

文章编号: 1674-5124(2018)10-0089-07

Experimental research on influence of depth on damage effect

WANG Changli, ZHOU Gang, FENG Na, CHEN Chunlin, MA Kun, ZHAO Nan, LI Mingrui

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: The research on damage effect of pressure-proof cabin structure in shallow water had been carried out, due to the presence of hydrostatic pressure in deep water environment (50-300 m), the pressure-proof cabin in which it is subjected to a certain pre pressure, the effect of pre pressure in the damage effect of pressure-proof cabin under the action of shaped charge is not clear. An experimental equipment for simulating deep water explosion was designed, and damage effect research of pressure-proof cabin affected by shaped charge under different simulated depth was conducted. The research shows that depth has no appreciable influence on failure of pressure-proof cabins, shock peak or displacement of the front plate center of the pressure-proof cabin under 0-3 MPa hydraulic pressure. The results in low depth can be extended to the cases of deep water for the pressure-proof cabin in this research.

Keywords: under water explosion; deep water; damage; shaped charge

0 引言

伴随聚能型水中兵器的发展, 国内外对聚能装药水下爆炸以及耐压舱体的毁伤效应开展了相关研究。B.S.G.Janzon等^[1]通过研究爆炸成型弹丸在水

中运动的情况, 对比了铜和钽两种药型罩的效果, 给出优化的聚能装药模型参数。Robert Tosell等^[2]针对耐压舱体, 设计串联式聚能爆炸成型弹丸来增加侵彻体的穿透能力, 给出了设计模型与方法。

收稿日期: 2018-05-10; 收到修改稿日期: 2018-07-09

作者简介: 王长利(1980-), 男, 黑龙江尚志市人, 副研究员, 博士, 主要研究方向为爆炸与冲击效应及防护工程。

A. Blanche 等^[3]对比了爆炸成型弹丸及聚能杆式弹丸对含水目标的侵彻效果, 给出不同方案的设计方法。国内对耐压舱体在聚能装药作用下的毁伤研究主要集中在实验与数值计算方面, 文献[4-7]等通过实验和数值计算对聚能侵彻体侵彻含水装甲的毁伤效应、聚能侵彻体的运行规律开展了研究, 认为聚能侵彻体在水中会产生速度衰减, 高速侵彻体在水中运动过程中由于压力和温度的原因会产生空化, 聚能侵彻体贯穿钢板、水、钢板复合结构, 最终会对钢板造成穿孔, 产生较为严重的损伤, 毁伤效果与弹丸直径以及速度密切相关。

以上研究大多从聚能装药设计的角度出发, 着眼于研发具有更好的水弹道特性和侵彻效果的聚能装药, 没有研究典型结构在侵彻及水下爆炸冲击波联合作用下的毁伤, 更没有考虑静水压力的存在对结构产生的影响。

聚能装药对耐压舱体的作用环境通常位于一定深度的水中, 由于静水压力的存在, 对爆炸载荷以及结构产生了一定的影响。1965年, Baum 等理论分析了静水压变化对冲击波的强度、冲量、能量, 以及气泡脉动的周期、最大半径的影响, 并进行了模拟静水压 10 MPa 至 40 MPa 压力范围内的水下爆炸实验, 验证了理论分析的结论, 但实验分析不够充分^[8]。1967年, Slifko 通过大量的海上实验对深水爆炸载荷的特性进行了细致研究, 给出深水爆炸相关载荷与水深、比距离等参数关系的拟合曲线^[9]。1975年, Gaspin 通过修改深水爆炸压力波形中负压段曲线, 获得了在爆炸深度减小的情况下的水下爆炸压力波形, 并对波形进行频域分析, 该方法具有一定的工程应用价值^[10]。1988年, Temkin 回顾了不同深度下水下爆炸冲击波峰值的实验研究成果, 提出了一种非线性衰减的理论表达式, 该表达式在小药量、中等爆距条件下与实验值吻合良好^[11]。中船重工七〇二所为开展相关研究, 设计了大型深水爆炸压力罐, 球罐直径 7 m 的, 能够在加压 6 MPa 条件下进行最大 1 kg TNT 药包的水下爆炸试验研究。受实验方式、场地等因素的影响, 目前国内对于深水中爆炸载荷规律的研究还处于起步阶段, 对于耐压舱体在深水中的毁伤研究未见报道。

当耐压舱体置于深水中时, 由于静水压力的存在, 导致舱体结构承受预压力, 对结构强度带来一定的影响。在前期研究过程中, 作者团队得到了浅

水中聚能装药的爆炸冲击载荷特性以及结构的毁伤规律, 浅水中的研究结果是否适用于不同水深, 尚未有明确认识。由于结构的复杂性及其毁伤因素的多元性, 目前尚无可靠的理论和数值计算方法对此类问题进行研究, 实验研究是较为可行的手段^[12]。

由于在真实的深水环境开展研究较为困难, 为了模拟深水环境, 通常在爆炸容器中填充水介质, 并通过改变水压模拟装药在不同水深条件下的水下爆炸。真实深水环境爆炸试验费用高、周期长、实施难度大, 目前也仅有美国等少数国家开展过相关试验, 在这种情况下, 产生了通过压力容器来模拟深水爆炸的试验技术^[13], 而重复使用大爆炸当量模拟深水容器设计复杂, 成本高昂。为研究耐压舱体结构在深水环境中在聚能装药作用下的毁伤, 本文设计了可用于模拟 300 m 水深的单次模拟深水实验装置, 并开展了不同模拟水深条件下的结构毁伤实验研究。

1 实验设计

1.1 $\phi 36$ mm 聚能装药

实验用 $\phi 36$ mm 聚能装药如图 1 所示, 药型罩为紫铜, 采用雷管加起爆药柱 (JH-14) 起爆。实验过程中, 为避免其与水接触, 整个聚能装药密封在耐压筒中, 雷管线采用密封转接法兰进行转接, 确保在 3 MPa 静水压力下能够可靠起爆。



图 1 $\phi 36$ mm 聚能装药及起爆药

1.2 实验用靶板

实验用靶板如图 2 所示。靶板为直径 200 mm 的 Q235 钢, 由聚能装药端部开始, 第一层板厚度为 1 mm, 耐压舱体前板厚度为 4.5 mm, 耐压舱体前板后每间隔 25 mm 放置厚度为 2 mm 的后效靶, 后效靶板置放于密封筒体中, 箱体中为空气。密封箱体采用圆筒结构, 以保证靶板的支撑结构稳固。



图2 模拟典型结构图

1.3 模拟深水实验装置设计

部分研究者利用爆炸密封容器模拟深水环境开展水下爆炸实验研究,其研究对象主要是克级 TNT 当量的裸炸药,由于当量小,且大多不产生碎片,采用压力容器较易实现。聚能装药爆炸过程中,除产生冲击波外,还有聚能侵彻体以及碎片,会对容器造成破坏。同时,为实现聚能效应,确保侵彻体成型以及对结构作用的有效性,必须保证实验在一定尺度进行,装药的最小当量不能小于 40 g TNT,这就对模拟实验装置提出了更高的要求。

该实验条件,目前无法满足,因此采用单次实验容器的设计思路进行实验设计,基本原则是满足静水压力要求,在爆炸压力作用下,容器将产生破裂,容器为一次性使用。以容器直径为 600 mm 计算,设计耐受压力 $p_c=4$ MPa,设计安全余量为 130%。

圆筒的计算厚度:

$$\delta = \frac{p_c D_i}{2[\sigma]^t \varphi - p_c} = \frac{4 \times 600}{2 \times 163 \times 1 - 4} = 7.45 \text{ mm} \quad (1)$$

式中: φ ——焊接接头系数,取 1;

D_i ——圆筒直径,mm;

p_c ——耐受压力,MPa;

$[\sigma]^t$ ——材料许用应力,MPa。

取圆筒厚度 8 mm,根据 GB150—1998《钢制压力容器》,计算平封头约为圆筒厚度的 5 倍,取 40 mm。图 3 为按照上述设计的模拟深水实验装置,容器上部预留静压测量孔、冲击波压力测量孔、起爆孔。测量法兰和起爆法兰采用密封设计,确保在 3 MPa 压力下的可靠起爆以及传感器正常工作。筒体下部设置加压通道,采用电动加压泵进行加压。容器采用泄压设计,螺栓满足静压设计要求(16 个 M10 螺栓固定平封头与筒体),在爆炸冲击波动态压力作用下,螺栓断裂,从端盖处卸压,可以保证容器主体

安全。设计过程中,要解决的主要问题是实验装置的密封问题以及起爆系统的耐压问题,确保实验聚能装药在模拟深水压力作用下可靠起爆。模拟深水实验装置组装完毕后,将装置压力加至 3.5 MPa,保持压力 5 min,压力无明显变化,装药安装筒与空气筒工作正常,内部无进水现象。

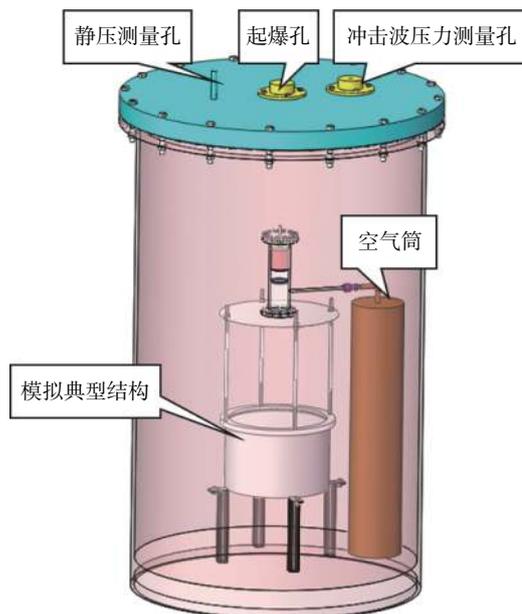


图3 模拟深水实验装置结构图

1.4 加压装置

电动加压泵(见图 4)主要技术参数:工作压力 4 MPa,流量 360 L/h,功率 0.75 kW。实验过程中,容器上部法兰上好好后,打开加压泵阀门及压力表阀门,开启加压泵,待压力达到要求后,关闭加压泵阀门,连接起爆线,进行实验。



图4 电动加压泵

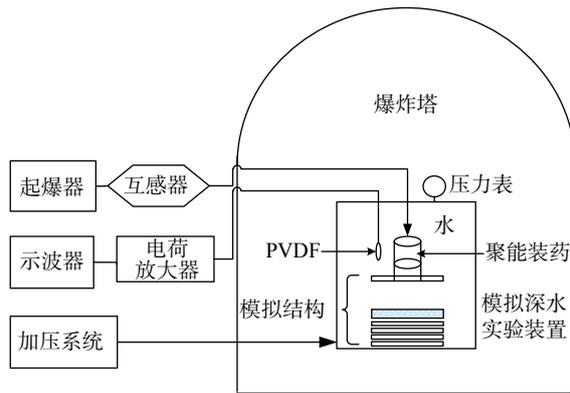
1.5 实验设计

实验中,将聚能装药及起爆系统密封后放入模拟深水实验装置中,采用PVDF压力传感器测量距离爆心150 mm处的自由场压力。模拟深水实验装置放置在5 kg爆炸塔中,实验布局如图5所示。实验过程中,根据不同的模拟水深,进行了4次实验,具体如表1所示。

2 实验结果及分析

2.1 靶板破坏情况分析

实验后靶板的破坏情况见图6,可以看出,耐压舱体前板中心位置产生较为规则的穿孔,靶板向内产生较大的中心位移,平均中心位移约35 mm。从



(a) 实验系统组成



(b) 实验现场

图5 实验布局图

表1 实验设计参数表

序号	第一层厚度/mm	第二层厚度/mm	静水压/MPa	模拟水深/m
1	1.0	4.5	1.0	100
2	1.0	4.5	2.0	200
3	1.0	4.5	0	0.5
4	1.0	4.5	3.0	300



图6 实验后靶板的破坏情况

不同模拟水深条件下的结构的毁伤情况如表2所示。从表中可知,随静水压变化,后效靶板

耐压舱体前板毁伤形式上看,与浅水中聚能装药实验得到的结构毁伤模式相同,即结构大变形(圆盘凹陷)加中心穿孔模式。第一层板的穿孔是由聚能装药的爆轰产物以及弹体安装筒共同作用的结果,各次实验的结构毁伤形式基本一致。

耐压舱体前板的穿孔如图7所示,平均穿孔直径为12 mm,约为装药直径的1/3,穿孔形态均匀,穿孔模式为延性穿孔。

将密封筒体解剖后,取出各层后效靶板,其毁伤情况如图8所示。可以看出,聚能侵彻体穿透耐压舱体前板后,仍能穿透多层后效靶,各层靶板的穿孔呈均匀圆形。



(a) 0.5 m 水深

(b) 100 m 水深

图7 耐压舱体前板上的穿孔

的侵彻深度以及耐压层的孔径相差不大,平均侵彻孔径为12.25 mm,约为聚能装药口径的1/3。由于第一层板较薄(1.0 mm Q235 钢板),在爆炸过程中,装药安装筒对第一层薄板产生了剪切破坏。

2.2 水深对靶板破坏的影响

耐压舱体前板无量纲穿孔直径(孔径/装药直径)与模拟水深之间的关系如图9所示。在模拟水深由0.5 m向300 m变化的过程中,聚能侵彻体在

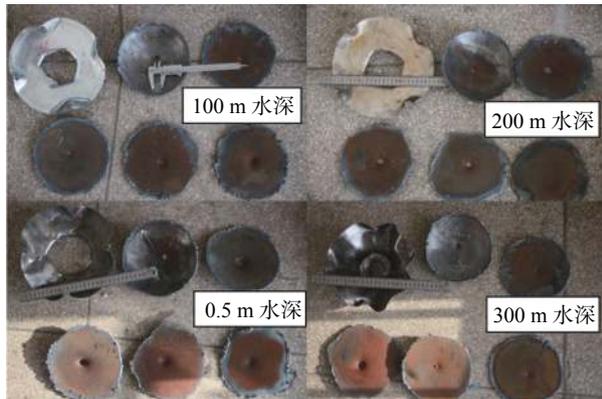


图 8 实验后各层靶板的毁伤情况

耐压舱体前板上穿孔直径以及穿透靶板总厚度未见明显变化。

奥尔连科等^[14]研究了静水压力条件下聚能装药对岩石侵彻的影响, 在岩石层处于压力下, 静水压力会使穿孔深度降低, 并使穿孔直径缩小; 当压力增加到 150 MPa, 穿深变动 15%~45%, 穿孔直径变动约为 40%。岩石由于全方位受压, 增加了岩石的抗拉强度与抗剪强度, 因此会造成穿深以及孔径的减少。岩石等非均质材料, 其屈服强度对静水压力是敏感的, 而钢板为各向同性的均质材料, 其屈服行为对静水压力没有依赖型, 在本文的压力研究范围内(0~3 MPa), 钢板的物理性能(抗拉强度与抗剪强度)不会发生明显变化, 因此静水压力对钢板性能影响可以忽略。

表 2 模拟深水实验结果

序号	第一层板孔径/mm	水层厚度/mm	耐压舱体前板孔径/mm	孔径/装药口径	后效靶板/mm ²	耐压舱体前板中心位移/mm
1	Φ84.0	222	Φ12.5	0.35	3×2	34.5
2	Φ85.2	222	Φ13.0	0.36	3×2	38.0
3	Φ85.2	222	Φ12.0	0.33	3×2	32.0
4	Φ85.2	222	Φ11.5	0.32	3×2	36.0

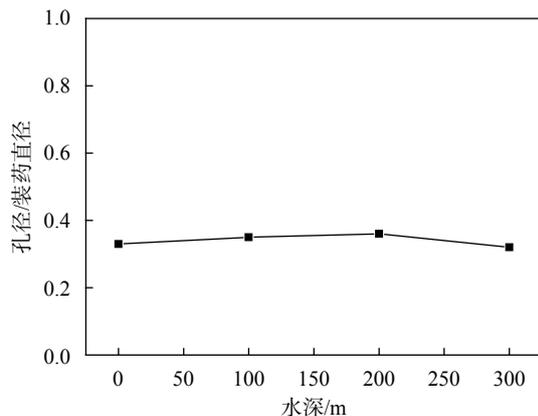


图 9 无量纲穿孔直径与水深的关系

在聚能侵彻体贯穿第一层靶板后, 侵彻体进入水中, 由于空化效应的存在, 弹体一直在空腔中运行, 不受静水压力的影响, 其速度变化、质量变化规律与常压下基本一致, 所以静水压增加对聚能侵彻体终点效应(靶板的穿孔以及侵彻深度)影响可以忽略。

2.3 水深对冲击波压力的影响

相同药量、爆心距 150 mm 处, 不同模拟深度情况下冲击波压力测量结果如图 10 所示。可以看出, PVDF 压力传感器的测量波形形态差别不大; 测

量最大压力 134 MPa, 最小压力 122 MPa, 平均压力为 128.75 MPa, 压力变化不明显。

爆炸冲击波压力随模拟水深的关系如图 11 所示, 冲击波峰值在不同模拟水深之间并没有明显的差别。盛振新等^[15]认为爆炸深度增加时, 水下爆炸冲击波的峰值压力增大, 差值为静水压力值。本文研究最大静水压力与测点冲击波压力峰值的比值约为 2%, 该比值小于测量系统的测量误差(5%)。分析认为, 数据之间的差别为实验本身的误差所造成的, 冲击波压力峰值受水深增加的影响较小, 不能在实验数据中体现出来。

马坤^[16]在 0~60 m 水深范围内对球形装药爆炸冲击波压力峰值进行了研究, 未见冲击波峰值随静水压增大而发生明显变化, 与本文结果较为一致。

2.4 水深对耐压舱体前板中心永久位移的影响

耐压舱体前板中心永久位移与水深的关系如图 12 所示。耐压舱体前板的中心永久位移为静水压力与动态压力共同作用的结果。最大静水压力/耐压舱体前板表面压力 $\approx 3 \text{ MPa}/150 \text{ MPa}=2\%$, 由于静水压力在对结构中心产生位移的影响所占比例过

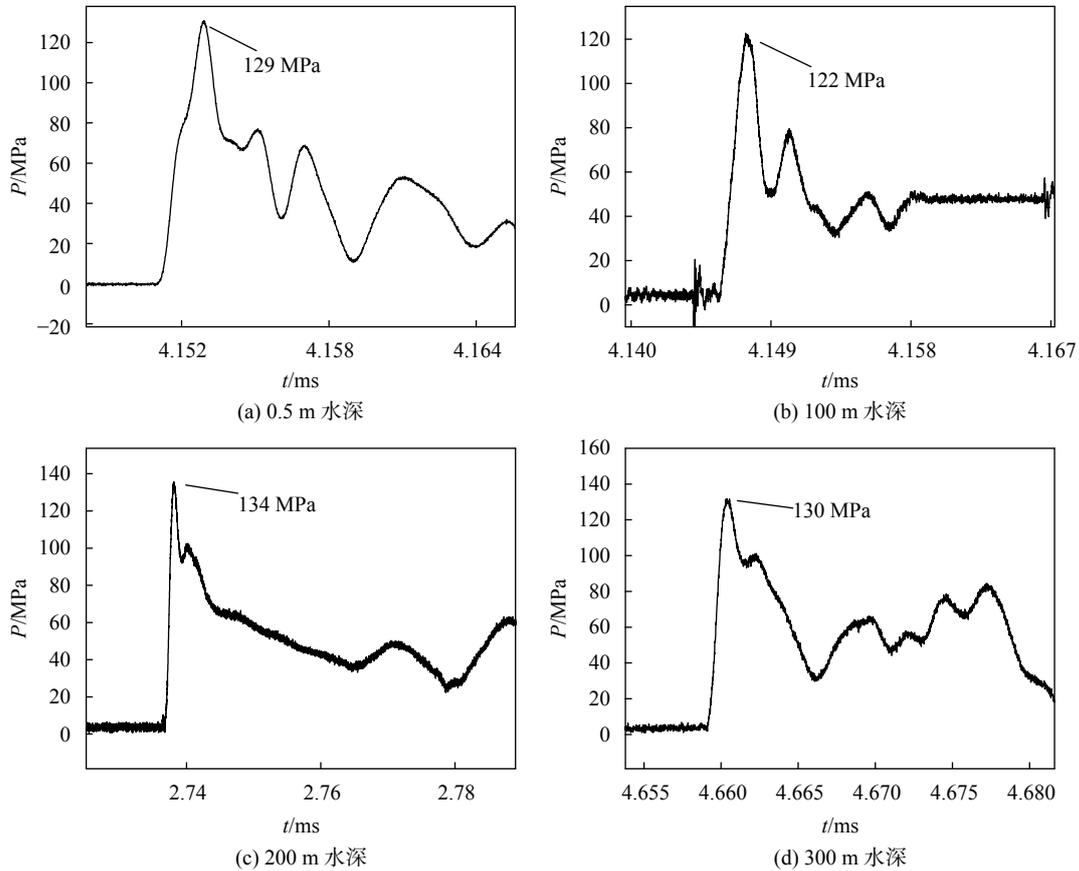


图10 爆心距150 mm处冲击波压力波形

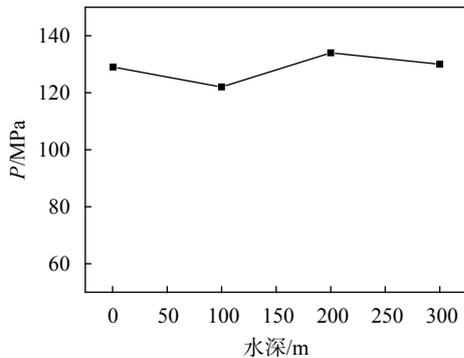


图11 冲击波压力与水深的关系

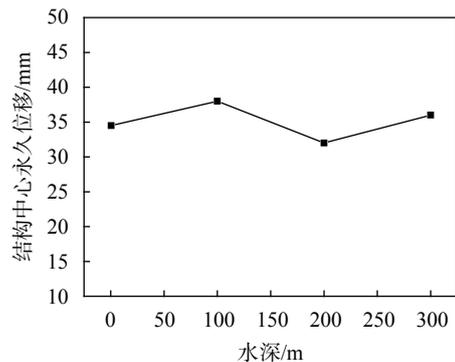


图12 结构中心永久位移与水深的关系

低,并未在结构中心永久位移上看出明显差别。因此,可以认为本文的研究条件下,静水压力对耐压舱体变形的影响可以忽略,但随着深度的进一步增加,静水压力对结构的影响所占比重将增大。在实际的耐压舱体结构中,静水压力对耐压舱体结构产生预应力,对整体结构带来影响,影响强度安全余量,整体结构的破坏先在冲击波载荷和静水压力联合作用下发生材料失效而失稳,而后在静水压力作用下发生大变形而破裂^[17]。

3 结束语

本文针对水深对毁伤效应的影响进行了实验研究,提出单次容器的思想,设计了模拟深水实验装置,开展不同模拟水深条件下的模拟典型结构毁伤实验,主要结论为:

1)采用8 mm厚圆筒加40 mm厚平封头结构的圆柱形压力容器,可以耐受3.5 MPa静水压力,满足实验需求。实验过程中,在冲击波压力作用下,容器端盖螺栓断裂,压力泄放后,容器主体基本保

持完好。本设计易于实现,为研究此类问题提供了一种方便可行的技术手段。

2)不同模拟水深条件下,自由场压力、穿孔孔径、耐压舱体前板中心永久位移以及穿孔深度无明显变化。耐压舱体结构的毁伤主要是由聚能侵彻体及冲击波产生,在本文研究范围内,这两个毁伤因素受静水压变化的影响有限,因此静水压力对模拟典型结构毁伤的影响可以忽略。

3)在3 MPa静水压力以内,针对本文的耐压舱体结构,常压下得到的聚能装药冲击波载荷规律、聚能侵彻体与典型结构的作用以及耐压舱体的综合毁伤等结果适用于0~300 m水深环境中。

参考文献

- [1] JANZON B S G, CHICK M, BUSSEL T. Penetration and failure of explosively formed penetrators in water-an experimental and computational study[C]//14th International Symposium on Ballistics, 1993: 26-29.
- [2] TOSELL R, VIVES M, TRONCHE A. Twin EFPs for underwater applications[C]//16th International Symposium on Ballistics, 1996.
- [3] BLANCHE A, WEIMANN K. Shaped Charge with jetting projectile for extended targets[C]//17th International Symposium on Ballistics, 1998.
- [4] 叶本治,冯民贤,戴君全,等.射弹在水介质中的运动规律及破甲效果[J].*爆轰波与冲击波*, 1993(12): 16-22.
- [5] 陈高洁,程素秋.聚能战斗部侵彻水介质装甲仿真试验[J].*兵工自动化*, 2012(6): 90-92.
- [6] PEI M J, LI C B. Experimental investigation of SCRSP penetration the compound target with water interlayer[J].*Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2008(3): 15-19.
- [7] 王团盟,向春.鱼雷聚能战斗部 EFP 侵彻潜艇结构模拟靶数值模拟[J].*鱼雷技术*, 2008, 16(1): 44-47.
- [8] BAUM F A, SANASARYAN N S. On influence of hydrostatic pressure on parameters of underwater explosion [M]//*Physics of Combustion and Explosion No.4*. Novosibirsk: Nauka Publishing House, Siberian Branch, 1965: 52-62.
- [9] SLIFKO J P. Pressure-pulse characteristics of deep explosions as functions of depth and range[R]. AD-661804, 1967.
- [10] GASPIN J B. Depth scaling of underwater explosion source levels[R]. AD-A020473, 1975: 48-52.
- [11] TEMKIN S. A review of the propagation of pressure pulses produced by small underwater explosive charges[R]. AD-A194642, 1988.
- [12] 尹群,陈永念,胡海岩,等.水下爆炸研究的现状和趋势[J].*造船技术*, 2003(6): 6-11.
- [13] 郝轶,毛海斌,周章涛,等.球形密闭空间内水下爆炸载荷特性分析[C]//第十一届全国爆炸力学学术会议论文集, 2016.
- [14] 奥尔连科.爆炸物理学[M].孙承纬,译.北京:科学出版社, 2011: 598-601.
- [15] 盛振新,刘荣忠,郭锐.壳体厚度和爆炸深度对水下爆炸冲击波的影响[J].*火炸药学报*, 2011, 34(3): 45-47.
- [16] 马坤.深水爆炸载荷特性模拟实验研究[D].西安:西北核技术研究所, 2012.
- [17] 贾宪振,胡毅亭,董明荣,等.深水环境中水下爆炸冲击波作用下圆柱壳动态响应的数值模拟研究[J].*振动与冲击*, 2008, 27(5): 160-165.

(编辑:李刚)