文章编号:1000-5773(2008)04-0402-07

圆柱形水下爆炸实验容器壁部强度设计研究*

樊自建[1,2],沈兆武[1],廖学燕[1],刘原栋[1]

(1. 中国科学技术大学近代力学系,安徽合肥 230027;
2. 国防科技大学指挥军官基础教育学院,湖南长沙 410072)

摘要:基于薄壁壳理论和水下爆炸理论,对圆柱形水下爆炸实验容器在爆炸冲击波作用下弹性范围内的壁部应变进行了理论分析和实验研究。导出了圆柱形水下爆炸实验容器在爆炸冲击波作用下壁部弹性应变与容器直径、壁厚及内部爆炸药量之间的关系,并对计算结果进行了实验验证。实验表明,公式求解结果与实验结果具有较好的一致性。

关键词:水下爆炸;爆炸容器;流构耦合;壁部弹性应变
中图分类号:TD235.1 **文献标识码**:A

1 引 言

水下爆炸实验容器是炸药水下爆炸作用规律研究和金属爆炸加工的主要设备。与野外自然水域实验条件相比,利用水下爆炸实验容器进行水下爆炸实验有着实验仪器便于安放、实验数据便于采集、实验外部条件便于控制、实验样品便于回收、爆炸实验对周围环境的影响便于消除等优点,是实验室根据水下爆炸相似原理,利用小药量进行炸药水下爆炸作用规律研究的主要手段。

20 世纪 40 年代初,洛斯阿拉莫斯实验室的科学家,为了减少爆炸实验带来的意外事故和损失,提出了利用爆炸容器将爆炸控制在一定范围内的思想。W. E. Baker 和 A. F. Demchuk[1] 首先开始了爆炸容器的研究工作。到 20 世纪 70 年代末,空中爆炸实验容器设计在理论研究和应用研究上都取得了巨大的进展。现在常用的空中爆炸实验容器强度设计方法是:用空气中点爆炸自模拟解和强激波条件,近似计算爆炸载荷特征参数(如峰值、上升时间、持续时间、衰减特性等),或用有限元软件中的欧拉算法计算出爆炸载荷作用的时间历程,然后用等效静载法将动载荷转化为静载荷,并用动强度代替静强度,再按传统压力容器的方法进行强度设计校核,最后通过实验研究来评估容器的安全性。虽然空气和水都为流体介质,但由于水相对于空气具有可压缩性小,对冲击波能量传递效率高等特点,所以空中爆炸实验容器的强度设计理论并不能直接运用到水下爆炸实验容器的设计中。

水下爆炸实验容器壁部与内部爆炸冲击波的相互作用,属于内爆冲击波引起的流构耦合问题。从查阅文献情况看,有关这方面的研究文献较少,查找到的与之相关的研究主要有以下几个方面:文献[2]利用声学近似原理和镜像法,分析了柱状水容器直径、注水深度、装药位置及壁部约束条件等,对水中爆炸冲击波最大超压及冲量的影响。文献[3]应用实验和 LS-DYNA 商用有限元软件,对开口水下爆炸实验容器在爆炸作用下,内部冲击波压力的动态分布进行了研究,并指出基于峰值反射压力的静态压力容器设计标准并不适用于水下爆炸实验容器的强度设计,文中重点论述了爆炸冲击波对容器的举升作用,但并未研究炸药爆炸作用与壁部应变的关系;文献[4]依据 Taylor 的壳体破碎理论,利用圆柱壳在破碎时轴向、周向应力为零,径向应力达到屈服应力的假设条件,推导了水压爆破中炸药药量与被破坏壳体壁厚的关系,但此关系不能用于判断容器壁部弹性应变与内爆炸药药量之间的关系;文献[5]把作用在

* **收稿日期**:2007-12-25;**修回日期**:2008-03-02
作者简介:樊自建(1978—),男,硕士,讲师,主要从事爆炸力学研究. E-mail:zjfan97@mail.ustc.edu.cn
通讯作者:沈兆武(1953—),男,教授,博士生导师,主要从事爆炸力学研究. E-mail:zwshen@ustc.edu.cn

容器壁部的爆炸载荷等效成薄壁壳所获得的冲量,运用薄壁壳理论,推导了薄壁壳的破坏应变与炸药药量的关系,但推导中未考虑壁部振动时流构耦合的影响,致使计算结果偏大;文献[6]考虑了容器壁部向外运动引起的水中稀疏波对壁部振动的影响,但水只能承受压力,而不能承受过高的拉力,故这种处理方式高估了水中稀疏波对壳壁的阻尼作用,使计算得出的壁部应变小于实际应变值。为了在确保水下爆炸实验容器使用安全的同时,充分发挥实验设备的效能,必须较为准确地确定容器壁部弹性范围内的应变与水下爆炸药量、容器直径和壁厚之间的关系。为此,本研究对爆炸冲击载荷作用下容器壁的弹性应变与炸药药量、容器直径和壁厚之间的关系进行探讨,从而为水下爆炸实验容器的强度设计提供理论依据。

为了消除爆炸冲击波角反射应力集中的影响,水下爆炸实验容器常设计成球缺封顶的圆柱型结构,其直径远大于壁厚,所以在进行壁部应力分析时,可以将其视为薄壁壳结构;为了计算分析的简便,可以假设炸药在容器中心爆炸,器壁受到轴对称爆炸冲击作用;冲击波对器壁作用时,器壁将产生径向应力、轴向应力和周向应力,但周向应力远大于径向和轴向应力,器壁为各向同性材料,故容器承受爆炸冲击波的能力主要取决于周向应力;容器壁较薄,冲击波作用的时间远大于其在器壁中传播时间,故可以不考虑冲击波在器壁中传播的影响;与水中药包位于同一水平线的壁部受到的冲击波作用最大,是容器的最不利位置,若能确保此处的壁部应变在冲击波作用下位于弹性范围内,则容器的其它部位也应在弹性范围内,故在模型验算时只考虑正入射击波对壁部的作用。

2　水下爆炸实验容器内部爆炸冲击波强度的确定

对于球形药包,距爆心距离为 R 位置的水中冲击波峰值压力为[7]

$$p_{\mathrm{m}}=K(\sqrt[3]{W}/R)^{\alpha} \tag{1}$$

式中:p_{m} 为测量点波阵面上的峰值压力,单位 Pa;K 为与炸药性质有关的常数;W 为药量,单位 kg;R 为测量点距药包中心的距离,单位 m;α 为与炸药性质有关的常数。

测量点水中爆炸冲击波超压 p 随时间 t 的衰减可表示为[7]

$$p(t)=p_{\mathrm{m}}\exp(-t/\theta) \tag{2}$$

式中:θ 是水下爆炸冲击波衰减时间常数(单位为 s),对于球形装药由下式确定[8]

$$\theta=\sqrt[3]{W}\left(R/\sqrt[3]{W}\right)^{0.24}\cdot 10^{-4} \tag{3}$$

水中冲击波对障碍物作用的持续时间 τ(单位为 s)由下式给出[8]

$$\tau=2\cdot\sqrt[4]{WR}\cdot 10^{-4} \tag{4}$$

作用于薄壁筒的正入射冲击波的反射击波强度 p_{r},因受到壁部向外振动时在内部产生的稀疏波的影响,其强度应为

$$p_{\mathrm{r}}(t)=2p(t)-\rho_0 cv \tag{5}$$

式中:ρ_0 为水的密度,单位 kg/m^3;c 为水中声速,v 为壁部振动速度,单位 m/s。

3　水下爆炸实验容器壁部强度计算及验证

3.1　薄壁壳弹性变形范围内的基本方程

圆柱形水下爆炸实验容器为轴对称结构,在柱坐标系(r,θ,z)内,若只有内部均布径向载荷作用,则容器的变形可以看作平面应变,此时筒体只产生径向膨胀,即只有径向位移 u 不为零,在这种应变条件下圆柱壳的本构方程为

$$\varepsilon_r=\frac{1-\mu^2}{E}\left(\sigma_r-\frac{\mu}{1-\mu}\sigma_\theta\right) \tag{6}$$

$$\varepsilon_\theta=\frac{1-\mu^2}{E}\left(\sigma_\theta-\frac{\mu}{1-\mu}\sigma_r\right) \tag{7}$$

3.2 几何方程

$$\varepsilon_r = \mathrm{d}u/\mathrm{d}r \tag{8}$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{u}{R} \tag{9}$$

式中:σ_r、σ_θ 为径向应力和切向应力,单位 Pa;ε_r、ε_θ 为径向应变和切向应变;E 为壳体材料的弹性模量,单位 Pa;μ 为壳体材料的泊松比;R 为柱壳的内部半径,单位 m;u 为径向位移,单位 m。

由于在模型简化中略去了冲击波在壁部的传播过程,因此在近似计算中可以认为径向应力为零。此时圆柱壳的周向应力可表示为

$$\sigma_\theta = \frac{uE}{R(1-\mu^2)} \tag{10}$$

3.3 冲击波作用下容器壁部振动方程

爆炸实验容器壁部振动,依据水中冲击波对壁部作用持续时间 τ 与容器振动周期 T 之间的关系可分为以下两种情况:第 1 种情况是当冲击波作用时间小于容器振动周期的四分之一时,壁部振动分为如下 3 个阶段,第 1 阶段是水、壁结合一起向外运动阶段,此时容器壁部振动既有水中爆炸冲击波的激励作用,也有水中稀疏波和壁部周向应力的阻止作用;第 2 阶段是水壁分离运动阶段,在此阶段水中爆炸冲击波作用消失,由于水不能承受较大的拉应力作用,水壁之间形成空化区,容器壁部在水的空化拉应力和壁部周向应力作用下继续振动;第 3 阶段容器壁部与水再次结合,壁部振动受到水的阻止和壁部周向应力作用。容器壁部以后的振动重复第 2、第 3 阶段。第 2 种情况是当冲击波作用时间大于容器振动周期的四分之一时,由于冲击波压力的存在,容器壁部初期振动不存在水、壁之间的分离振动,即在冲击波压力存在的情况下不考虑水的空化对振动的影响,当冲击波压力消失后,再按照第 1 种情况的第 2、第 3 振动阶段进行计算。不论是哪一种情况,在内部爆炸冲击波的激励下,容器壁的振动为阻尼振动,其振幅随时间的增长逐渐变小,因此在容器壁部强度校核时,只需确定第一次达到最大振动位置时的壁部应变即可。对第 1 种情况其振动数学表达式如下。

第 1 阶段($0 \leqslant t \leqslant \tau_1$),取单位高度容器壁部微元体作为研究对象,容器壁部振动方程可表示为

$$m\frac{\mathrm{d}^2u}{\mathrm{d}t^2} + \rho c\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} + \frac{\sigma_\theta h}{R} = 2p_\mathrm{m}\exp(-t/\theta) \tag{11}$$

式中:ρ 为水的密度,单位 kg/m^3;c 为水中声速,单位 m/s;h 为柱壳壁厚,单位 m;m 为单位面积柱壳材料的质量,单位 kg/m^2;τ_1 为冲击波作用结束的时刻。

(11)式为弹性支撑下质量块有阻尼振动方程。结合(9)式,可以将其改写成以径向位移 u 表示的运动方程

$$\frac{\mathrm{d}^2u}{\mathrm{d}t^2} + 2\xi\omega\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} + \omega^2u = \frac{2p_\mathrm{m}\exp(-t/\theta)}{m} \tag{12}$$

式中

$$\omega = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{Eh}{m(1-\mu^2)}} \tag{13}$$

$$\xi = \frac{\rho cR}{2}\sqrt{\frac{1-\mu^2}{mEh}} \tag{14}$$

方程的定解条件为初始时刻壁部振幅和振速均为零。当 ξ 取不同值时,微分方程(11)有如下 3 种形式的解

当 $\xi > 1$ 时,

$$u = \varphi\left\{\exp(-t/\theta) - \exp(-\xi\omega t)\left[\cosh\left(\omega t\sqrt{\xi^2-1}\right) + \frac{\xi\omega\theta - 1}{\omega\theta\sqrt{\xi^2-1}}\sinh\left(\omega t\sqrt{\xi^2-1}\right)\right]\right\} \tag{15}$$

当 $\xi < 1$ 时,

$$u = \varphi\left\{\exp(-t/\theta) - \exp(-\xi\omega t)\left[\cos\left(\omega t\sqrt{1-\xi^2}\right) - \frac{1-\xi\omega\theta}{\omega\theta\sqrt{1-\xi^2}}\sin\left(\omega t\sqrt{1-\xi^2}\right)\right]\right\} \tag{16}$$

当 $\xi=1$ 时,

$$u=\varphi\left[\exp(-t/\theta)-\exp(-\omega t)\left(1-\frac{t}{\theta}+\omega t\right)\right] \tag{17}$$

式中

$$\varphi=\frac{2p_{\mathrm{m}}\theta^2}{m(1-2\xi\omega\theta+\omega^2\theta^2)} \tag{18}$$

第 2 阶段($\tau_1\leqslant t\leqslant\tau_2$),可把水的空化力 P_{w}看作是常数,根据文献[9]和文献[10]其大小根据水的纯净度和温度不同在 0.5～4.25 MPa 之间。振动方程可以表示为

$$\frac{\mathrm{d}^2u}{\mathrm{d}t^2}+\frac{p_{\mathrm{w}}}{m}+\omega^2u=0 \tag{19}$$

其解的形式为

$$u=c_1\cos(\omega t)+c_2\sin(\omega t)-\frac{p_{\mathrm{w}}}{\omega^2m} \tag{20}$$

$$c_1=\left(u_0+\frac{p_{\mathrm{w}}}{\omega^2m}\right)\cos(\omega\tau_0)-\frac{u'_0}{\omega}\sin(\omega\tau_0) \tag{21}$$

$$c_2=\left(u_0+\frac{p_{\mathrm{w}}}{\omega^2m}\right)\sin(\omega\tau_0)+\frac{u'_0}{\omega}\cos(\omega\tau_0) \tag{22}$$

式中:u_0、u_0'分别为壁部振幅和振速,其值由第一阶段等式在 $t=\tau_1$ 时确定,τ_2 为壁部振动与水再次接触的时刻。

第 3 阶段($\tau_2\leqslant t\leqslant\tau_3$),在此阶段壁部振动再次受到水的阻碍作用,其振动方程如下

$$\frac{\mathrm{d}^2u}{\mathrm{d}t^2}+\frac{\rho c}{m}\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t}+\omega^2u=0 \tag{23}$$

此式可改写成如下形式

$$\frac{\mathrm{d}^2u}{\mathrm{d}t^2}+2\zeta\omega\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t}+\omega^2u=0 \tag{24}$$

式中

$$\zeta=\frac{\rho c}{2m\omega} \tag{25}$$

依据 ζ 取值的不同,微分方程(24)有如下 3 种形式的解

当 $\zeta>1$ 时

$$u=C_3\exp\left[\omega t\left(-\zeta+\sqrt{\zeta^2-1}\right)\right]+C_4\exp\left[\omega t\left(-\zeta-\sqrt{\zeta^2-1}\right)\right] \tag{26}$$

当 $\zeta<1$ 时

$$u=\exp(-\omega\zeta t)\left[C_3\cos\left(\omega t\sqrt{1-\zeta^2}\right)+C_4\sin\left(\omega t\sqrt{1-\zeta^2}\right)\right] \tag{27}$$

当 $\zeta=1$ 时

$$u=(C_3+C_4t)\exp(-\omega\zeta t) \tag{28}$$

式中:C_3、C_4 的定解条件由第 2 阶段 $t=\tau_2$ 时的壁部振动状态确定。

壁部振动属第 2 种情况时,振动初始阶段的数学表达式为第 1 种情况的第 1、第 3 阶段的表达式,在冲击波压力作用消失后,振动的数学表达式为第 1 种情况的第 2、第 3 阶段的表达式。

3.4　算例

文献[6]列举了美国丹弗大学和 LOUISVILIE. KY 海军兵械站的实验结果。丹弗大学实验容器是一个壁厚为 1.4 cm、高 122 cm、直径 122 cm 的圆柱形容器,容器的材质为软钢,弹性模量为 200 GPa,泊松比为 0.3,密度为 7.8 g/cm^3,炸药为注装彭特莱特(Pentolite),装药形式为球形,中心起爆。根据文献[6],计算时炸药水下爆炸的爆压参数 $K=5.7\times10^7$,$\alpha=1.13$。由以上条件结合(13)式得容器的振动周期为 0.723 ms,在这一振动周期下由(4)式可得在爆炸药量小于 1 kg 时容器振动均属第一种情况。再由(14)式得 $\xi=0.788$,因此容器壁部第 1 阶段的振幅应由(16)式确定,再根据第 2 阶段的振幅确定(20)式,利用编写的计算程序,在一定的时间步长下可用计算机计算出壁部的最大振幅,并将其代入

(9)式便可得出最大的壁部应变。不同药量下实测最大应变和利用本理论计算得出的壁部周向最大应变见表 1(根据文献[10],取水的空化压力为－3 MPa)。

美国 LOUISVILIE. KY 海军兵械站,测量了一个直径为 152 cm,壁厚 0.95 cm 的柱形钢质水下爆炸容器的壁部弹性应变。实验所用炸药为注装球形彭特莱特(Pentolite)(结果见表 2)。由(13)式可以求出容器振动周期为 0.886 ms,在这一振动周期下由(4)式可得在爆炸药量小于 2 kg 时容器振动均属第一种情况。再由(14)式得 $\xi=1.42$,因此容器壁部的第 1 阶段的振动振幅应由(15)式确定。用同样的方法可以求出容器的壁部最大周向应变。

表 1 计算与实测结果

Table 1 Theoretical results and experimental data

Charge/(g)	Experimental strain/(10^{-6})	Theoretical strain/(10^{-6})	Error/(%)
11.8	674	732	8.6
12.5	725	762	5.1
15.1	849	862	1.5
20.0	974	1 043	7.1

表 2 计算与实测结果

Table 2 Theoretical results and experimental data

Charge/(g)	Experimental strain/(10^{-6})	Theoretical strain/(10^{-6})	Error/(%)
50	1 430	1 514	5.8
75	1 770	1 921	8.5
100	2 350	2 278	－3.1

3.5 实验验证

为了进一步验证计算结果,实验在一个壁厚为 0.8 cm、高 60 cm、直径为 60 cm 的钢质圆柱形容器中进行(如图 1 所示)。弹性模量为 200 GPa,泊松比取 0.3。密度为 7.83 Mg/m^3。计算时水的密度取为 1.0 Mg/m^3,水中波速 1 500 m/s。采用粉末状的太安(PENT)炸药,将其压装在一个自制的雷管中,密度为 1 kg/m^3,计算时炸药水下爆炸的爆压参数 $K=5.5\times10^7$,$\alpha=1.13$。药包设置在容器中心。

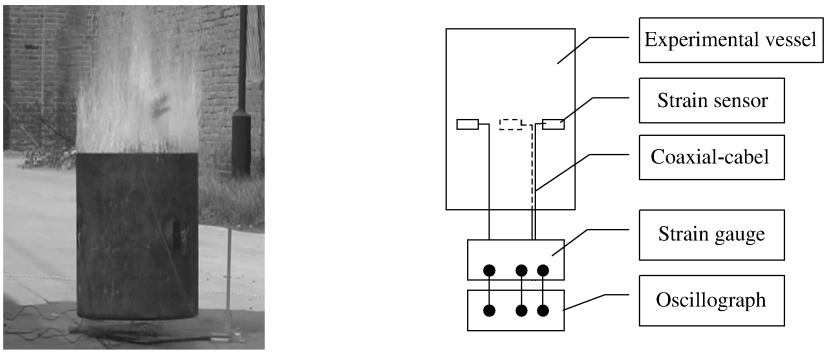


图 1 水下爆炸实验容器及测试系统

Fig. 1 Experimental tank and testing system for underwater explosion

为了精确测量容器侧壁的应变,减少药包安放偏离中心位置引起的测量误差,增强输出应变信号的强度,降低外部干扰对应变信号的影响,在距端部 30 cm 的侧壁中间位置,间隔 120°粘贴 3 组应变片,每组应变片两个串联,每次实验取 3 组应变片测量值的平均值。为减少偶然因素对测试数据的影响,对每种药量进行 3 次实验,取 3 次的平均值。在不同药量爆炸作用下,按上述方法计算结果和测量数据的平均值如表 3 所示。在两种药量下实测和计算的应变曲线如图 2、图 3 所示。

表 3　计算与实测结果

Table 3　Theoretical results and experimental data

Charge /(g)	Average of experimental strain/(10^{-6})	Theoretical strain/(10^{-6})	The time of first experimental spike/(μs)	The time of first theoretical spike/(μs)	Strain error /(%)
0.4	401	403	114	86	0.5
0.7	543	570	116	87	5
1.0	685	704	118	89	2.8
1.7	916	958	121	92	4.6

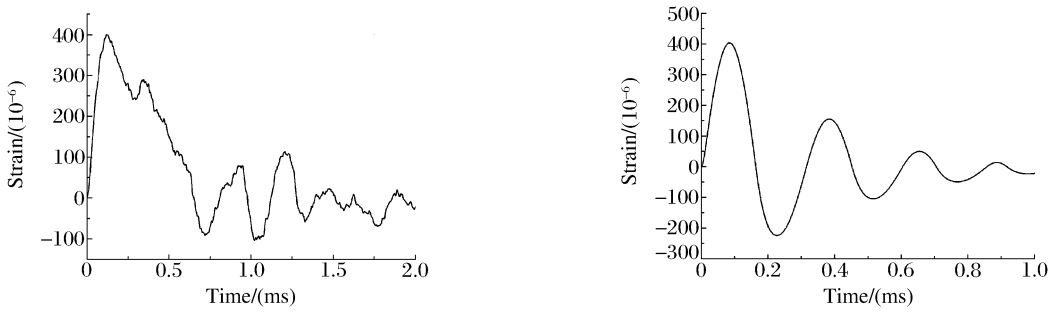


图 2　0.4 g 炸药作用下实测与计算的壁部应变曲线

Fig. 2　Shell strain produced by 0.4 g explosive

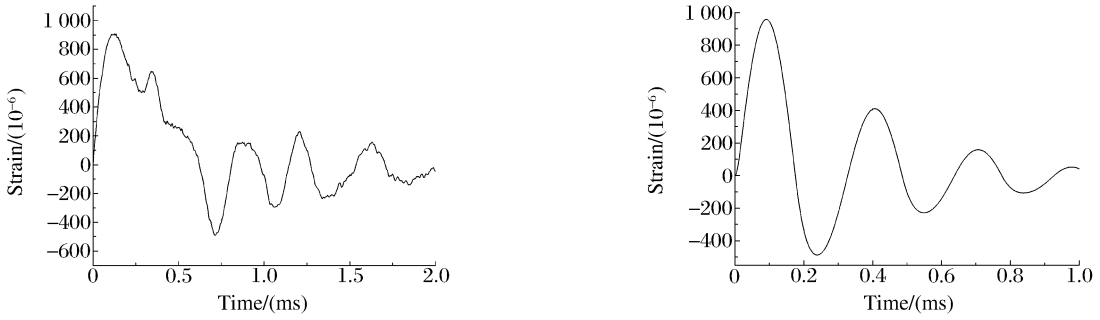


图 3　1.7 g 炸药作用下实测与计算的壁部应变曲线

Fig. 3　Shell strain produced by 1.7 g explosive

对比表 1～表 3 的计算和实测数值,可以看出,应变、壁部振动至最大振幅经历时间的实测值与计算值基本一致。应变的实测值略小于计算值,这主要是因为在计算模型中将球形装药爆炸引起的球面波简化为了一维柱面波,忽略了容器壁部剪切波的影响所导致。从应变曲线图 2、图 3 中可以看出,在内部水中爆炸冲击波作用下,壁部拉伸应变远大于压缩应变,且壁部振幅均小于初次拉伸振幅,故壁部强度校核时只需校核最大拉伸应变。应变曲线在第一次回振历时较长且出现了波动,从时间判断并不是爆炸气泡二次脉动的影响所致,而是由于壁部受到容器底部反射冲击波的影响。从实测和计算应变曲线中还可以看出,计算和实测应变曲线上升趋势和历时基本一致,其规则振动的周期基本吻合,但由于计算中没有考虑水中复杂的反射击波对壁部的作用,所以其余部分计算和实验实测曲线有一定的差别。

4　结　论

在对内部爆炸冲击波作用下、水下爆炸实验容器壁部强度进行校核时,可以将其简化为薄壁壳结构,计算中可以略去轴向及径向应力,将其视为平面应变。经过这些简化后得出的力学模型,在弹性应变范围内,可以较准确地确定容器壁部应变与容器直径、壁厚和内部爆炸药量之间的关系。内爆水中冲击波与壁部的流构耦合作用应当分情况、分阶段考虑,不同的情况和阶段水、壁之间的作用力不同。本数学模型只能较准确地描述壁部首次振动到最大振幅的过程,其余阶段的振动还需进一步的分析研究。

References:

[1] Zhu W H, Xue H L, Han J W, et al. The Research Advances in the Dynamics of Explosive Chambers [J]. Advances in Mechanics, 1996, 26(1): 68-77. (in Chinese)
朱文辉, 薛鸿陆, 韩钧万, 等. 爆炸容器动力学研究进展评述 [J]. 力学进展, 1996, 26(1): 68-77.

[2] Wu D Y, Li H H, Yang J M. Pressure Measurement and Analysis of a Liquid Cylinder under Different Blasting Conditions [J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2002, 16(4): 81-91. (in Chinese)
吴德义, 李辉煌, 杨基明. 不同条件下圆柱状容器水压爆破压力测试及其分析 [J]. 流体力学实验与测量, 2002, 16(4): 81-91.

[3] Brett J M, Ritzel D V, Slater J E, et al. Dynamic Response an Open Water-Filled Tank Subjected to an Internal Explosion [A]//PVP(351), Structures under Extreme Loading Conditions [C]. ASME, 1997: 35-44.

[4] Cui Y H, WU T F, Zhu L X, et al. Application of the Shells Theory in Hydraulic Blasting [J]. Blasting, 2002, 19(2): 54-56. (in Chinese)
崔云航, 吴腾芳, 朱立新, 等. 壳体理论在水压爆破中的应用 [J]. 爆破, 2002, 19(2): 54-56.

[5] Zhang L G, Li S J. Analysis on Dynamics Response of Thin Shell Cylindrical Structure in the Water Pressure Blasting [J]. Engineering Blasting, 1998, 4(1): 7-11. (in Chinese)
张立国, 李守巨. 水压爆破圆柱薄壳结构物的动力响应分析 [J]. 工程爆破, 1998, 4(1): 7-11.

[6] Ezra A A. Principles and Practice of Explosive Metal Working [M]. Translated by Zhang T S, Liang Y Q, Tan B. Beijing: Defense Industry Press, 1981: 185-190. (in Chinese)
埃拉兹 A A. 金属爆炸加工的原理与实践 [M]. 张铁生, 梁宜强, 谭 渤, 译. 北京: 国防工业出版社, 1981: 185-190.

[7] Li J Q, Ma S Z. Explosion Mechanics [M]. Beijing: Science Press, 1992: 346-349. (in Chinese)
李翼祺, 马素贞. 爆炸力学 [M]. 北京: 科学出版社, 1992: 340-349.

[8] Henrych J. The Dynamics of Explosion and Its Use [M]. Translated by Xiong J G. Beijing: Science Press, 1987: 155-157. (in Chinese)
亨利奇 J. 爆炸动力学及其应用 [M]. 雄建国, 译. 北京: 科学出版社, 1987: 155-157.

[9] Cole P. Underwater Explosive [M]. Translated by Luo Y J, Han R Z, Guan X. Beijing: Defense Industry Press, 1960: 234-235. (in Chinese)
库尔 P. 水下爆炸 [M]. 罗耀杰, 韩润泽, 官 信, 译. 北京: 国防工业出版社, 1960: 234-235.

[10] Gu W B, Su Q L, Liu J Q, et al. Formation Process of Cavitations Region Effected by Underwater Plane Blast Shock Wave and Its Characteristics [J]. Blasting, 2004, 21(4): 8-11. (in Chinese)
顾文彬, 苏青笠, 刘建青, 等. 水下平面爆炸冲击作用下空化区域形成及其特征 [J]. 爆破, 2004, 21(4): 8-11.

Study on the Intensity of the Cylindrical Vessel by the Inner Underwater Explosion Shock Wave

FAN Zi-Jian[1,2], SHEN Zhao-Wu[1], LIAO Xue-Yan[1], LIU Yuan-Dong[1]

(1. *Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei* 230027, *China*;
2. *School of Military Officer Elementary Education, National University of Defense Technology, Changsha* 410072, *China*)

Abstract: The elastic shell strain of the cylindrical vessel produced by the inner underwater explosion shock wave was analyzed and evaluated, according to the thin shell and underwater explosion theory. The relationship between the elastic shell strain and three main factors, i. e. the vessel diameter, the shell thickness and the mass of the inner explosion, is revealed by numerical simulation, and is examined by detailed experiments. The experimental results show a better consistency with the numerical results.

Key words: underwater explosion; explosive vessel; fluid-structures interaction; elastic strain of shell