敞口薄壁圆筒形构筑物水压爆破药量计算

范喜生　徐天瑞
(冶金部安全环保研究院　武汉　430081)

摘要　从理论上对水压爆破的载荷、结构的动力响应、水压爆破的机理与药量计算等问题进行了分析，所得结果可直接用于工程实践。

关键词　水中冲击波　动力响应　拆除爆破
中图分类号　TD235.36

水压爆破是构筑物拆除爆破中常用的一种方法。虽然已经进行过大量的工程爆破实践，但关于水压爆破的研究[1,2,3,4,5]还远未达到令人满意的程度。如文献[1]的实验工作没有考虑 δ/A 的影响；文献[2]纯属经验公式，根本不符合量纲原理；文献[3,4,5]均假设载荷沿高度均布等。另一方面，上述研究结果[2,3,4,5]均带有变化范围较大的经验系数，给公式的应用带来不便。

本文试图在文献[1]试验工作的基础上，以典型的水压爆破为例，从理论上较系统地研究水压爆破问题，为水压爆破的进一步研究开辟方向。

1　水压爆破的载荷

水压爆破时，水中爆炸发生在有限水域，难以形成气泡脉动。水压爆破的载荷主要来自水中冲击波及其滞后流的动压。

装药一定时，随着距装药距离的增大，冲击波的作用越来越小，而动压的作用越来越大（两者相对而言）。因此，水压爆破的载荷与 δ/R 有关。δ/R 越小，动压的作用越明显，冲击波的作用则相对变弱。通常 δ/R 不是很小。水压爆破的载荷主要来自水中冲击波的反射压力，而滞后流只是起到进一步破碎的作用[6]。作者主要考虑这种情况，即 δ/R 不是很小（如 $\delta/R\geqslant 0.01$）的薄壳问题。

球面冲击波在圆柱形内表面上的反射问题没有解析解。精确确定壁面上的压力及冲量分布只能采用数值计算或试验测量[7]。为了估算构筑物内壁上的压力或冲量，可将球面冲击波局部视为平面波，按平面冲击波的斜反射理论，近似求解水压爆破的载荷问题。

水压爆破时，入射冲击波压力峰值通常小于100MPa，属弱冲击波，入射角通常小于75°，冲击波反射属正规斜反射，可用声学理论近似。

1993年10月13日收到原稿，1994年1月15日收到修改稿。

水压爆破时，冲击波在底板和自由面（水面）的反射对壁面上的压力分布有较大影响[6,7]。但对文献[6]的试验数据分析发现，压力作用时间与构筑物自振基频圆频率的乘积仍小于 0.4（底板的存在使得作用时间增长）。因此，可以认为水压爆破的载荷为冲量载荷。由几何声学理论求得距底板高度 $\alpha(=x/R)$ 处（图 1）的冲量为[8]，

$$i = 2lQ^{1/3}(Q^{1/4}/R)^m f(\alpha) \tag{1}$$

式中：i 为比冲量，Pa·s；Q 为装药量，kg；l,m 为与装药种类有关的经验系数，对密度为 1.52g/cm³ 的 TNT 炸药，l 取 5768，m 取 0.89；R 为几何参数，m；而

$$f(\alpha) = [1 + (\alpha - \frac{h_0}{R})^2]^{-(1+\frac{m}{2})} + [1 + (\alpha + \frac{h_0}{R})^2]^{-(1+\frac{m}{2})} - [1 + (\alpha - \frac{2H - h_0}{R})^2]^{-(1+\frac{m}{2})} \tag{2}$$

式中：h_0,H 为几何参数，m。

实践中，一般取 $h_0/R=H/3R$，则式(2)简化成

$$f(\alpha) = [1 + (\alpha - \frac{1}{3}\frac{H}{R})^2]^{-(1+\frac{m}{2})} + [1 + (\alpha + \frac{1}{3}\frac{H}{R})^2]^{-(1+\frac{m}{2})} - [1 + (\alpha - \frac{5}{3}\frac{H}{R})^2]^{-(1+\frac{m}{2})} \tag{3}$$

2 结构物的动力响应

按 δ/R 的大小，通常将圆柱壳粗略分成薄壳与厚壳两种。当 $\delta/R<0.2$ 时为薄壳，$\delta/A>0.2$ 为厚壳。本文仅考虑薄壳的情形。这种情况比较简单，因在载荷持续时间内，构筑物壁面内的应力波已来回反射多次，不必考虑固体中应力波的传播，只需考虑结构对外部载荷的动力响应。

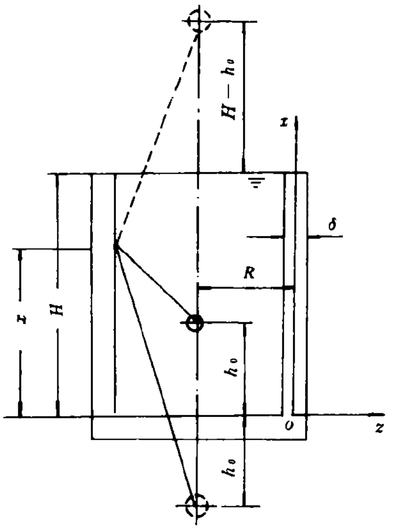

图 1

Fig. 1

显然，问题是轴对称的，且环向位移为零，轴向位移与径向位移都比较小，为避免数学上的麻烦，假设轴向位移为零。则径向位移 w 满足下述偏微分方程及初、边值条件[9]：

$$\frac{1-\mu^2}{E}\rho R^2 \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + c^2 \frac{\partial^4 w}{\partial \alpha^4} + w = 0 \tag{4}$$

$$w|_{\alpha=0} = \frac{\partial w}{\partial \alpha}|_{\alpha=0} = \frac{\partial^2 w}{\partial \alpha^2}|_{\alpha=H/A} = \frac{\partial^3 w}{\partial \alpha^3}|_{\alpha=H/R} = 0 \tag{5}$$

$$w|_{t=0} = 0 \tag{6}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t}|_{t=0} = \frac{i}{\delta\rho} \tag{7}$$

式中：μ、E 和 ρ 分别为构筑物材料的泊松比，弹性模量和密度。泊松比无量纲；弹模单位 Pa；密度单位 kg/m³。对混凝土，可取 $\mu=0.15$，$E=2.5\times10^{10}$ Pa，$\rho=2300$kg/m³；w 为位移，m；t 为时间，s；δ、H 为几何尺寸，m；$c^2=\delta^2/12R^2$。

用分离变量法求解初边值问题(4)～(7)式。

令

$$w = \varphi(\alpha)T(t) \tag{8}$$

代入(4)式,得

$$\frac{c^2 \dfrac{d^4\varphi}{d\alpha^4}}{\varphi} = -\frac{\dfrac{1-\mu^2}{E}\rho R^2 \dfrac{d^2T}{dt^2}}{T} - 1 = \lambda^2$$

即

$$c^2 \frac{d^4\varphi}{d\alpha^4} - \lambda^2\varphi = 0 \tag{9}$$

$$\frac{1-\mu^2}{E}\rho R^2 \frac{d^2T}{dt^2} + (1+\lambda^2)T = 0 \tag{10}$$

令

$$\left(\frac{\lambda}{c}\right)^2 = \left(\frac{\nu}{H/R}\right)^4 \tag{11}$$

则式(7)变为

$$\frac{d^4\varphi}{d\alpha^4} - \left(\frac{\nu}{H/R}\right)^4\varphi = 0 \tag{12}$$

其解为

$$\varphi = a\sin\frac{\nu\alpha}{H/R} + b\cos\frac{\nu\alpha}{H/R} + c\,\mathrm{sh}\frac{\nu\alpha}{H/R} + d\,\mathrm{ch}\frac{\nu\alpha}{H/R} \tag{13}$$

利用边界条件(5)式可得方程组

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin\nu & -\cos\nu & \mathrm{sh}\nu & \mathrm{ch}\nu \\ -\cos\nu & \sin\nu & \mathrm{ch}\nu & \mathrm{sh}\nu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{14}$$

方程组(14)有非零解的必要条件,其系数行列式等于零。由此得 ν 满足的方程为

$$\cos\nu\,\mathrm{ch}\nu = -1 \tag{15}$$

由方程(15)可确定 $\nu_n(n=1,2,\cdots\cdots)$。将 ν_n 代入式(13)可求得 φ_n,代入式(11)可求得 λ_n,继而由方程(10)求得 T_n,

$$T_n = e_n\cos\omega_n t + f_n\sin\omega_n t \tag{16}$$

式中,e_n、f_n 为待定系数,

$$\omega_n = \sqrt{\frac{1 + c^2\left(\dfrac{\nu_n}{H/R}\right)^4}{\dfrac{1-\mu^2}{E}\rho R^2}} \tag{17}$$

由方程组(14)可确定 a、b、c、d 之比为 $a:b:c:d = 1:-\dfrac{\sin\nu+\mathrm{sh}\nu}{\cos\nu+\mathrm{ch}\nu}:-1:\dfrac{\sin\nu+\mathrm{sh}\nu}{\cos\nu+\mathrm{ch}\nu}$。由于振型(13)式的正交性[9],可将圆筒的振动按振型展开,即有

$$\begin{aligned} w(\alpha,t) = \sum_{n=1}^{\infty}\phi_n(\alpha)T_n(t) = \sum_{n=1}^{\infty}\Big(&\sin\frac{\nu_n\alpha}{H/R} - \frac{\sin\nu_n+\mathrm{sh}\nu_n}{\cos\nu_n+\mathrm{ch}\nu_n}\cos\frac{\nu_n\alpha}{H/R} \\ &- \mathrm{sh}\frac{\nu_n\alpha}{H/R} + \frac{\sin\nu_n+\mathrm{sh}\nu_n}{\cos\nu_n+\mathrm{ch}\nu_n}\cos\frac{\nu_n\alpha}{H/R}\Big)(E_n\cos\omega_n t + F_n\sin\omega_n t) \end{aligned} \tag{18}$$

利用初始条件(6)、(7)式,可确定 E_n、F_n,

$$E_n = 0, \tag{19}$$

$$F_n = \frac{\int_0^{H/R} \frac{i}{\delta\rho}\phi_n \mathrm{d}\alpha}{\omega_n \int_0^{H/R} \phi_n^2 \mathrm{d}\alpha} \tag{20}$$

代入式(18)可得 $w(\alpha,t)$ 的最终表达式。

求得 w 即可按几何方程,物理方程求内力及应力。求轴向应力为

$$\begin{aligned}
\sigma_1\big|_{z=-\frac{\delta}{2}} &= \frac{E}{(1-\mu^2)R}\left(\mu w - \frac{\delta}{2R}\frac{\partial^2 w}{\partial \alpha^2}\right) \\
&= \frac{2lQ^{1/3}(Q^{1/3}/R)^m}{\delta}\sqrt{\frac{E}{(1-\mu^2)\rho}}\sum_{n=1}^{\infty}\Big[\mu\Big(\sin\frac{\nu_n\alpha}{H/R} - \frac{\sin\nu_n + \mathrm{sh}\nu_n}{\cos\nu_n + \mathrm{ch}\nu_n}\cos\frac{\nu_n\alpha}{H/R} \\
&\quad - \mathrm{sh}\frac{\nu_n\alpha}{H/R} + \frac{\sin\nu_n + \mathrm{sh}\nu_n}{\cos\nu_n + \mathrm{ch}\nu_n}\mathrm{ch}\frac{\nu_n\alpha}{H/R}\Big) - \frac{\delta}{2R}\Big(\frac{\nu_n}{H/R}\Big)^2\Big(-\sin\frac{\nu_n\alpha}{H/R} \\
&\quad + \frac{\sin\nu_n + \mathrm{sh}\nu_n}{\cos\nu_n + \mathrm{ch}\nu_n}\cos\frac{\nu_n\alpha}{H/A} - \mathrm{sh}\frac{\nu_n\alpha}{H/A} + \frac{\sin\nu_n + \mathrm{sh}\nu_n}{\cos\nu_n + \mathrm{ch}\nu_n}\mathrm{ch}\frac{\nu_n\alpha}{H/A}\Big)\Big] \\
&\quad \times \frac{\int_0^{H/R} f(\alpha)\phi_n \mathrm{d}\alpha}{\sqrt{1 + c^2\left(\frac{\nu_n}{H/R}\right)^4}\int_0^{H/R}\phi_n^2 \mathrm{d}\alpha}\sin\omega_n t
\end{aligned} \tag{21}$$

若记 $A_n = \dfrac{\sin\nu_n + \mathrm{sh}\nu_n}{\cos\nu_n + \mathrm{ch}\nu_n}$,则式(21) 可简写为

$$\begin{aligned}
\sigma_1\big|_{z=-\frac{\delta}{2}} &= \frac{2lQ^{\frac{1}{3}}(Q^{\frac{1}{3}}/R)^m}{\delta}\sqrt{\frac{E}{(1-\mu^2)\rho}}\sum_{n=1}^{\infty}\Big\{\Big[\mu + \Big(\frac{\nu_n}{H/R}\Big)^2\frac{\delta}{2R}\Big]\Big(\sin\frac{\nu_n\alpha}{H/R} \\
&\quad - A_n\cos\frac{\nu_n\alpha}{H/R}\Big) - \Big[\mu - \Big(\frac{\nu_n}{H/R}\Big)^2\frac{\delta}{2R}\Big]\Big(\mathrm{sh}\frac{\nu_n\alpha}{H/R} - A_n\mathrm{ch}\frac{\nu_n\alpha}{H/R}\Big)\Big\} \\
&\quad \times \frac{\int_0^{H/R} f(\alpha)\phi_n \mathrm{d}\alpha}{\sqrt{1 + c^2\left(\frac{\nu_n}{H/R}\right)^4}\int_0^{H/R}\phi_n^2 \mathrm{d}\alpha}\sin\omega_n t
\end{aligned} \tag{22}$$

3　水压爆破的机理与药量计算

水压爆破的构筑物多数是混凝土、钢筋混凝土等脆性材料。其力学特征是,构筑物变形较小即发生破裂,且直到破坏之前的过程均可采用弹性理论近似,不必考虑塑性效应。

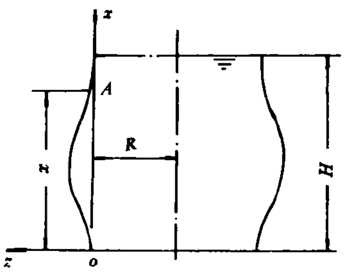

图 2

Fig. 2

由文献[1]所述试验发现,水压爆破的破坏形态如图 2 所示, A 点的内表面 $\sigma_1|_{z=-\frac{\delta}{2}}$ 为正,轴向受拉。取 $\sigma_1|_{z=-\frac{\delta}{2}}=\sigma_b$(混凝土抗拉强度极限)利用式(22)反算药量,发现与实验结果吻合很好。当 x/H 取值较小时药量较小,x/H 取值较大时药量较大,存在单个集中装药的上,下限问题[1]。

取 $\sigma_1|_{z=-\frac{\delta}{2}}=\sigma_b$,将有关参数代入式(22)作数值计算,可将式(22)简化为下式(Q 的最小值)

$$Q = B\delta^{1.587}R^{1.413} \tag{23}$$

式中的系数 B 见表 1。

表 1　公式 $Q=B\,\delta^{1.587}R^{1.413}$ 系数表

Table 1　Calculated coefficients of the formula(23)

B		x/H								
		0.5			0.7			0.9		
$\delta/R=$ 0.05 H/R	2	4.149	6.549	9.336	6.148	9.705	13.835	16.434	25.942	36.981
	3	7.822	12.348	17.602	12.522	19.766	28.177	28.195	44.508	63.447
	4	11.873	18.742	26.718	20.316	32.070	45.717	44.284	69.904	99.650
$\delta/R=$ 0.1 H/R	2	2.470	3.899	5.557	3.705	5.848	8.336	16.514	26.070	37.160
	3	5.622	8.876	12.652	8.962	14.149	20.167	28.243	44.588	63.555
	4	9.522	15.033	21.428	16.101	25.419	36.232	44.384	70.069	99.875
$\delta/R=$ 0.2 H/R	2	1.222	1.930	2.751	1.856	2.930	4.176	16.655	26.293	37.478
	3	3.394	5.358	7.637	5.832	8.496	12.111	28.388	44.817	63.881
	4	6.593	10.409	14.837	10.993	17.355	24.738	44.484	70.228	100.102

注:表中 x/H 分三级,即 0.5、0.7、0.9。每一级下又有三列,其中第一列系按 $\sigma_b=30$MPa 算得,第二列按 $\sigma_b=40$MPa 算得,第三列按 $\sigma_b=50$MPa 算得。没有考虑钢筋的影响。

由表 1 可见,系数 B 确与常用的经验系数[3]相当,证明计算结果的正确性。同时可看出,系数 B 不仅是破碎程度 x/H 的函数[3,4],它与 δ/R,H/R 有关,即 Q 实质上与 δ、R 和 H 有关,与 δ 和 R 的关系不是简单的 $\delta^{1.587}R^{1.413}$关系[10]。

由表 1 可见,x/H 越大,B 越大;H/R 越大,B 越大;而 δ/R 越大,B 反而越小。这一点应引起注意。实事上,H/R 和 x/H 一定时,虽然 δ/R 越大,B 反而越小,但 Q 仍是越大。这可由表 1 数据进行验证。

需要时,可对表 1 中的数据进行插值或拟合处理。

工程算例

笔者曾炸毁一批(计八根)钢筋混凝土下水管。截面形状为圆筒形,半径 $R=0.325$m,壁厚 $\delta=0.05$m,高 $H=1.5$m,$H/R=4.6$,$\delta/R\approx0.15$。取 $x/H=0.5$,$\sigma_b=30$MPa,利用表 1 数据进行作图,算得 $\delta/R=0.1$ 时,$B=12$,$\delta/R=0.2$ 时,$B=10$,因此可取本问题的 $B=11$,利用式(23)求得的药量为 19.4g,实际装药量为 20gTNT,爆破效果与预期效果非常一致。

4　结束语

从工程实践方面看,水压爆破是简单高效的;从理论分析方面看,它又是比较复杂的。本文从理论上分析了敞口薄壁圆筒形构筑物的水压爆破问题,其结果既反映了破碎程度的影响,又反映了 δ/R、H/R 的影响,消除了以往公式的盲目性。

关于水压爆破,还有许多工作要做,如炸药种类、密度、颗粒度对水压爆破的影响;充水高度与装药位置问题;顶端密闭情形;厚壁问题;构筑物截面为非圆柱截面情形;多药包问题;偏炸技术等,都是值得进一步研究的。

本文在成文过程中得到中国科学院力学所许连坡研究员的指导，谨致谢意。

参 考 文 献

1 徐天瑞，范喜生. 水压爆破的药量计算. 爆破，1990，7(3)：33
2 エギヨウ 火 ヤク キヨウ 会编. 爆 ハツ ハンドゲツオ. 山海堂：株式会社 ハツ 行，1976，298
3 杨人光，等. 建筑物爆破拆除. 北京：中国建筑工业出版社，1985. 第六章
4 王中黔，等. 水压爆破药量计算及其应用. 土岩爆破文集(第二辑)，北京：冶金工业出版社，1985. 191～198
5 吴新霞. 圆筒形容器状构筑物水压控制爆破机理及药量公式. 爆炸与冲击，1988，8(2)：106
6 张建华，严忠礼. 水压爆破测试结果的初步总结(私人通信). 中国科学院力学所，1984.
7 Thompson S T, Herrmann W. Eulerian Finite-Difference Calculations of Explosion in Partially Water-Filled Overstrong Cylindrical Containment Vessels, SAND-77-1342.
8 孙业斌，等. 爆炸作用与装药设计. 北京：国防工业出版社，1987. 第七章
9 科列涅夫 Б Г. 等主编；沈聚敏，等译. 房屋与构筑物动力计算设计手册. 北京：科学出版社，1990. 第九章
10 许连坡. 关于爆破相似律的一些问题. 爆炸与冲击，1985，5(4)：1

SOME BASIC ASPECTS OF THE DESTRUCTION WORK UTILIZING UNDERWATER EXPLOSIONS (DWUWE)

Fan Xisheng Xu Tianrui

(Safety and Environmental Protection Research Institute, Ministry of Mertarllurgy, Wuhan, 430081)

ABSTRACT In this paper the loading of DWUWE, the response of structure, the mechanism of DWUWE and the weight of explosive are investigated theoritically. Some problems to be studied are proposed.

KEY WORDS underwater explosion, shock wave, response of structure, destruction work