

多层复合壁构筑物水压爆破 药量计算及应用*

张宪堂 陈士海

(山东矿业学院 泰安 271019)

摘要 根据水中爆炸荷载的特点,应用能量准则和声学近似公式,计算出水压爆破作用于构筑物每层壁的等效静载。以声波在各层介质中传播时波速的加权平均值作为构筑物的平均声波波速,计算出结构自振频率。再考虑构筑物的强度和动力特性,以及预期的破坏程度,把每层介质假设为一独立的构筑物,提出了多层复合壁构筑物水压爆破药量计算的模型,并列举了工程实例。

关键词 多层复合壁 水压爆破 装药量

中图法分类号 TD235.37

1 引言

水压爆破是拆除容器状构筑物的一种有效的方法。与常规的钻眼爆破法相比,它具有施工工艺简单,经济效益好,爆破噪声小,空气冲击波和爆破地震波的作用较弱等优点。目前水压爆破的药量计算大部分是针对混凝土或钢筋混凝土的容器状构筑物讨论的,而且构筑物的壁只由一层材质构成。对于由多层不同材质构成的复合壁构筑物,如:在钢筋混凝土壁外面再加一层砖砌体或石砌体,还有在两层钢筋混凝土中间有一层片石混凝土夹层等等。关于这类构筑物水压爆破药量计算的研究很少。我们依据水中爆炸荷载的特点,构筑物的强度和动力特性,以及预期的破坏程度,利用声学近似公式和声波波速在不同介质中传播时波速的加权平均值,以球形装药拆除圆筒状构筑物为例,对多层复合壁构筑物的水压爆破药量计算进行了分析,提出了药量计算模型,并且将此模型应用到工程实际中,取得了良好的效果。

2 水压爆破荷载计算

对于各种炸药在水中爆炸时,炸药的气态爆轰产物首先在水中激起冲击波。由于水压爆破的持续时间比在空气中爆炸的持续时间小近两个数量级,同时水压爆破的炸药量都比较小,因此可以把水压爆破时对结构的破坏作用看成是冲量 I 的作用。球形装药时,在距离 R 处单位面积的冲量 I 可按下面经验公式计算^[1]

$$I = 5880W^{1/3} (W^{1/3}/R)^{0.89} \quad (1)$$

$$p_1 = I \omega \quad (2)$$

式中: I 为单位面积冲量值, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$; p_1 为水作用于容器内壁面的等效静载,即在 p_1 这样的静载作用下,结构产生的位移与激波冲量 I 作用所产生的最大位移是一样的, Pa ; R 为距药包中

* 张宪堂:男,1973年11月生,硕士研究生。

1998-11-24 收到原稿,1999-02-05 收到修改稿。

心的距离, m ; ω 为无阻尼的结构自振圆频率, s^{-1} ; W 为所用炸药的梯恩梯当量质量, kg 。可根据公式^[2]

$$W = W_s Q_s / Q_T \quad (3a)$$

计算。式中: W_s 为所用炸药的装药质量, kg ; Q_s 为所用炸药的爆热, kJ/kg ; Q_T 为梯恩梯的爆热, $Q_T \approx 4200 kJ/kg$ 。

把(1)式代入(2)式, 得到水压爆破作用于构筑物第一层壁内表面的计算荷载

$$p_1 = 5880 W^{1/3} (W^{1/3} / R)^{0.89} \omega \quad (4)$$

对于柱状装药, 在距离 R 处单位面积的冲量为^[2]

$$I = 7200 W_c^{1/2} (W_c^{1/2} / R)^{0.27} \quad (5)$$

式中: W_c 为所用炸药的梯恩梯当量质量, kg/m , 可根据公式

$$W_c = W_{cs} Q_s / Q_T \quad (3b)$$

计算。式中, W_{cs} 为所用炸药的装药(每单位长度)相对质量, kg/m 。

将(5)式代入(2)式, 得到柱状装药的计算荷载为

$$p_1 = 7200 W_c^{1/2} (W_c^{1/2} / R)^{0.27} \omega \quad (6)$$

水激波作用于第一层壁后, 在水介质与壁的界面处要发生透射, 透射压力为

$$p_1' = p_1 \frac{2}{1 + \frac{\rho_0 D}{\rho_1 c_1}} \quad (7)$$

式中: p_1' 为第一层壁中的透射压力, Pa ; ρ_0 为水介质密度, kg/m^3 ; D 为水中冲击波速度, m/s ; $\rho_1 c_1$ 为第一层壁介质的波阻抗, $kg/(s \cdot m^2)$ 。由于水激波传播速度很快, 对于适合用水压爆破拆除的构筑物, 各层壁都很薄, 且层数一般在 2~3 层, 故可认为透射波压力在同一介质的壁体中传播时不衰减, 即将 p_1' 看作第二层壁内壁面处入射应力波压力值。当此应力波到达两层壁的分界面时, 要发生应力波的透射和反射, 对于各种建筑材料, 它们的波阻抗值都相差不大, 一般反射应力波压力值很小。在计算过程中, 可忽略反射应力波对内层壁的作用。因此, 作用于第二层壁内壁面单位面积的压力为

$$p_2 = p_1' \frac{2}{1 + \frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2}} \quad (8)$$

式中: p_2 为作用于由内向外第二层介质内壁面的压力, Pa ; $\rho_2 c_2$ 为第二层壁介质的波阻抗, $kg/(s \cdot m^2)$, 依此类推, 作用于第 i 层介质内壁面单位面积上的压力为

$$p_i = p_{i-1} \frac{2}{1 + \frac{\rho_{i-1} c_{i-1}}{\rho_i c_i}} \quad (i \geq 2) \quad (9)$$

式中: p_{i-1} 、 p_i 分别为作用于第 $i-1$ 、 i 层介质内壁面的压力, Pa ; $\rho_{i-1} c_{i-1}$ 、 $\rho_i c_i$ 分别为第 $i-1$ 、 i 层介质的波阻抗, $kg/(s \cdot m^2)$ 。

3 水压爆破药量计算

在水压爆破拆除作业中, 构筑物的形状有圆筒形、矩形等, 而且每种形状的构筑物一般又分为薄壁和厚壁两种。这里以球形装药拆除圆筒状构筑物为例分析水压爆破的药量计算。

定义 $\delta/R < 0.1$ 的薄壁圆筒, 其中 δ 为圆筒的壁厚, R 为圆筒的内半径。由于在药量计算分析过程中, 把构筑物的各层壁都作为一独立结构来对待, 因此大部分是薄壁圆筒结构。若是厚壁圆筒, 可按薄壁圆筒求出所需药量后, 再乘以厚壁圆筒修正系数 K_1 , 当 δ/R 分别为 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 时, 修正系数 K_1 分别为 1.16、1.38、1.64、1.92、2.22^[1]。

设筒壁由 n 层不同介质组成, 各层壁厚由里向外依次为 δ_1 、 δ_2 、 δ_3 、……、 δ_n 。则 $\delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \dots + \delta_n$, 圆筒的自振圆频率为^[3]

$$\omega = \frac{c}{R \sqrt{1 - \mu^2}} \quad (10)$$

式中: R 为圆筒内半径, m; μ 为圆筒壁材料的泊松比; c 为圆筒壁的平均声波速度, m/s。

多层复合壁构筑物的声波速度可以取各层介质声波速度的加权平均值^[4]

$$c = \sum_{i=1}^n C_i \delta_i / \delta \quad (11)$$

式中: c_i 为第 i 层介质中的声波速度, m/s。

如果水压爆破的药包处在圆筒中心, 则圆筒受均匀内压时, 筒壁第 i 层的应力为

$$\sigma_i = p_i R_i / \delta_i \quad (12)$$

当这一应力远超过筒壁该层介质的强度时, 构筑物将发生不同程度的破坏, 由此可得^[1]

$$\sigma_i = \frac{p_i R_i}{\delta_i} \geq K_b^i K_d^i f_i \quad (13)$$

式中: σ_i 为筒壁第 i 层的应力, Pa; K_d^i 为第 i 层介质的动力强度提高系数; K_b^i 为结构的爆破破坏程度系数; R_i 为第 i 层壁的内半径, m; f_i 为第 i 层介质的静抗拉强度, Pa。

按拆除爆破的要求, 结构的破坏远远超出塑性变形的程度, 故采用破坏程度系数来描述。其大小可根据水压爆破的已有资料和模拟试验来确定。这里给出王中黔先生总结出来的等级划分标准, 他将破坏程度分为三个等级, 并确定出相应的 K_b 值。

I. 混凝土裂缝纵横, 表层剥落: $K_b = 10$;

II. 结构局部破坏, 混凝土破碎但挂在钢筋网上, 有少量飞块: $K_b = 20$;

III. 结构完全破坏, 混凝土破碎大部分脱笼, 有大量飞块: $K_b = 40$;

上述划分是针对混凝土得出的, 仅供读者参考。

对于多层复合壁构筑物, 由于应力波压力经多次透射后, 一般最外层的压力较小, 所以要使其破坏, 首先得保证最外层壁破坏。于是需先计算最外层壁所需药量。假定最外层壁为第 n 层壁, 则由(13)式得

$$p_n \geq K_b^n K_d^n f_n \delta_n / R_n \quad (n \geq 2) \quad (14)$$

由 p_n 值, 根据(7)式、(8)式和(9)式依次求出 p_{n-1} 、 p_{n-2} 、……、 p_2 、 p_1 和 p_1 的值。当所装药量爆炸后使得水作用于构筑物内壁面的等效静载为 p_1 时, 最外层壁所受压力才能达到 p_n , 从而使最外层壁破坏, 故将 p_1 的值代入(4)式, 并与(10)和(3a)式联立求解, 可得最外层壁所需药量 W_{S_n} 。求出 W_{S_n} 后需验算里面各层壁是否能按预期破坏程度破坏。将求出的 p_1 、 p_2 、……、 p_{n-1} 的值代入(13)式验证。若各层壁所受压力均满足或超过破坏要求, 则 W_{S_n} 即为整个水压爆破所需药量。若各层壁或某几层壁不能达到预期的破坏程度, 则应对不能按设计要求破坏的各层壁中最外面的一层壁进行修正。若需修正的各层壁最外面一层壁为第 i 层壁, 即

第 i 层壁在装药量为 W_{S_n} 时不能按设计要求破坏。假设使第 i 层壁破坏还需施加 Δp_i 的压力。于是由 Δp_i , 根据(7)式、(8)式和(9)式依次求出 Δp_{i-1} 、 \dots 、 Δp_2 、 Δp_1 和 Δp_1 , 仿照求 W_{S_n} 的步骤求出 ΔW_{S_i} 。依此类推, 直到装药量能使每层壁均达到设计破坏要求为止, 此时所需装药量为

$$W_{S_{\text{总}}} = \Delta W_{S_1} + \Delta W_{S_2} + \dots + \Delta W_{S_i} + W_{S_n} \quad (15)$$

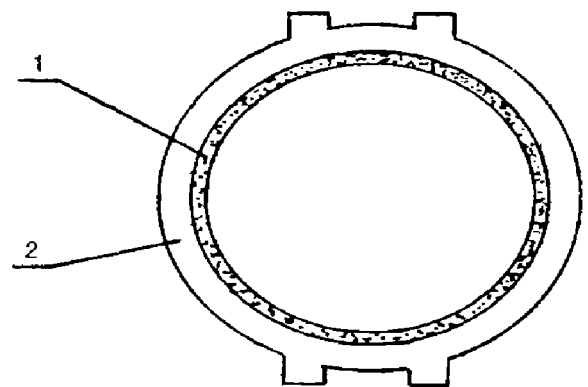
式中: $W_{S_{\text{总}}}$ 为水压爆破所需总药量, kg; ΔW_{S_i} 为各层壁所需增加的药量, kg; 凡第一次达到设计破坏要求的各层壁的 $\Delta W_{S_i} = 0$; W_{S_n} 为构筑物最外层壁破坏所需药量, kg。

上述药量计算公式是以球形装药拆除圆筒状构筑物为例, 根据构筑物的强度和动力特性, 以及预期的破坏程度推导的。若是采用柱状装药形式, 只需在计算压力时用柱状装药水中冲击波冲量公式(5)和(6)即可, 其余步骤和球形装药相同。对于其它形状的构筑物可以通过折算求其所需装药量。

此外, 在实际工程中, 考虑到构筑物的结构特征, 以及爆破作业所处周围环境不同, 装药量、装药结构和位置等参数均会变化。对于圆形或正方形容器结构, 当充水深度与内半径 R 之比 $(H/R) < 3$ 时, 一般用单个集中药包, 装药设置在结构的竖直中心线上; 当 $(H/R) > 4$ 时, 一般在纵深方向设置两层或两层以上的装药, 各层装药的药量均为 $W_{S_{\text{总}}}$ 。若是采用群药包布置方式时, 群药包的总药量应为 $W_{S_{\text{总}}}$ 。矩形截面(长宽比 $(a/b) > 1.5$ 时)的容器结构将药量分成 2~3 个分群装药布置, 使各装药爆炸后作用在筒壁上的压力相等。对壁厚不同的容器状构筑物, 装药应靠近壁厚的一侧。另外, 在实际装药时还需根据飞石及防护措施等环境因素综合确定装药量。

4 应用

山东某厂内有一圆筒形铵水塔需拆除, 塔高 7.0m, 外直径 11.2m, 壁厚 0.6m, 是双层复合壁结构。内层为 0.2m 厚的双层双向钢筋混凝土结构, 当初设计的混凝土强度等级为 C_{30} , 环筋直径为 $\phi 12\text{mm}$, 竖筋直径为 $\phi 16\text{mm}$, 间距均为 0.15m, 钢材型号为 3 号钢。外层为 0.4m 厚的水泥砂浆细料石砌体结构, 砌块原料为大理岩, 水泥砂浆强度等级为 $M_{7.5}$, 据从门口塔壁的断面观察分析, 砌体中有少量配筋与钢筋混凝土壁相连接。塔顶为预制钢筋混凝土顶板, 由两道钢筋混凝土梁支撑, 两道梁两端与内层壁相连接, 外面是 $0.4\text{m} \times 0.4\text{m}$ 的料石砌柱。塔的横断面示意图如图 1 所示。塔身东南方向自基础面有一高 2.2m、宽 1.5m 的门口。周围环境较复杂。



1. Reinforced concrete walling;
2. Stone walling

图 1 横断面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the cross section

这次水压爆破所用炸药为 2 号岩石硝铵炸药, 下面求外层砌体所需药量。根据周围环境及拆除要求, 参考混凝土的破坏程度系数, 取 $K_b^2 = 32$ 。在爆炸荷载作用下, 大理岩的动力强度提高系数为 $4 \sim 5^{[5]}$, 而砂浆的动力强度提高系数为 $1.3 \sim 1.5$, 这里取 $K_d^2 = 3$ 。大理岩的静抗拉

强度为 5~20MPa,但对于砌体结构,破坏一般是先从砌体灰缝破坏,而 M_{7.5} 的水泥砂浆抗拉强度大约在 0.2~0.25MPa 之间,同时考虑砌体中有少量环向和径向配筋,因此取 $f_2 = 1.5\text{MPa}$ 。将所列数据代入(14)式得 $p_2 = 11.0 \times 10^6\text{Pa}$ 。C₃₀ 混凝土的密度 $\rho_1 = 2.5 \times 10^3\text{kg/m}^3$,声速 $C_1 = 3500\text{m/s}$;大理岩砌体的密度 $\rho_2 = 2.7 \times 10^3\text{kg/m}^3$,声速 $C_2 = 2500\text{m/s}$;水介质密度 $\rho_0 = 1.013 \times 10^3\text{kg/m}^3$,水中冲击波速度 $D = 1500\text{m/s}$ 。由(8)式和(7)式求得 $p_1' = 12.6 \times 10^6\text{Pa}$, $p_1 = 7.37 \times 10^6\text{Pa}$ 。

用(10)式计算圆筒的自振圆频率。由于钢筋混凝土的泊松比一般为 0.15~0.25,而大理岩的泊松比为 0.16~0.36,对砌体结构来说,泊松比约为 0.15~0.35^[6],因此,大理岩砌体结构的泊松比与钢筋混凝土的泊松比相差不多,取平均值 $\mu = 0.2$ 。由(11)式求得 $C = 2833.3\text{m/s}$,代入(10)式得 $\omega = 578.3\text{s}^{-1}$ 。将 p_1 、 ω 代入(4)式得 $W_2 = 33.2\text{kg}$ 。利用(3a)式求得所需 2 号岩石硝铵炸药量 ($Q_s = 3700\text{kJ/kg}$) $W_{s2} = 37.6\text{kg}$ 。

下面验算荷载 p_1 是否能破坏第一层壁。根据周围环境及拆除要求,取破坏程度系数 $K_b^1 = 35$,混凝土的动力强度提高系数 $K_d^1 = 1.4$,C₃₀ 混凝土的静抗拉强度 $f_1 = 1.75 \times 10^6\text{Pa}$,代入(13)式,得 $p_1 = 7.37 \times 10^6\text{Pa} > K_b^1 K_d^1 f_1 \hat{q}/R_1 = 3.43 \times 10^6\text{Pa}$ 。由于是钢筋混凝土,在计算药量时需乘以药量修正系数 K , K 由下式确定^[1]

$$K = 1 + \frac{K_{dg} f_g (\sum S_g)}{K_d^1 f_1 b \hat{q}} \quad (16)$$

式中: K_{dg} 为钢筋的动力强度提高系数; f_g 为钢筋的静屈服强度,Pa; b 为单位长度,取 $b = 1\text{m}$; $\sum S_g$ 为沿圆筒纵向单位长度 b 内环向钢筋的截面积的总和, m^2 。代入数据得 $K = 1.87$ 。由式(4)计算得破坏第一层壁需药量 $W_{s1} = 1.87 \times 11.2 = 20.9\text{kg} < W_{s2} = 37.6\text{kg}$ 。因此 W_{s2} 能够满足整个构筑物的设计拆除要求。最后考虑周围环境因素,实际装药量为 36.0kg。由于塔东南方向门口的堵塞强度低,药包悬吊时向西北方向偏了 0.3m。

表 1 钢筋屈服强度和动力强度提高系数^[7]

Table 1 Yield strength of reinforced bar and increasing factor under the dynamic load

材料	f_g/MPa	K_{dg}
3 号钢	280	1.35
5 号钢	340	1.25
16 锰钢	380	1.20
25 锰硅钢	420	1.13

施爆后,顶盖的两块钢筋混凝土预制板掀起 1~2m 后,落在铵水塔西侧约 1.5m 处并摔碎,其余的顶板和两道梁一并落入塔内后碎裂。整个塔体的钢筋混凝土上面 4m 纵横开裂,块度均匀,锤击即掉;下部 3m 的混凝土大部分脱离钢筋同时向外凸出,有些部位破碎较严重,钢筋被拉断。砌体部分大部分与钢筋混凝土分离后坍塌在塔周围 3m 左右,块度适中,待施工现场的水排完后即可装运。塔体东南方向堵门的

砖砌体整体推出 5.0m,飞石最远距离基本在 20m 以内,10m 以内的飞石较多。距塔体 10m 远处有一高压线电杆及高压线,由于施爆前采取了较好的防护措施,且被一 2m 高的围墙隔开,因此安然无恙。围墙被砸了两个缺口,周围其它设施均无受损,取得了较为满意的爆破效果。

5 结论和讨论

通过对多层复合壁圆筒状构筑物水压爆破药量计算模型的推导,以及在球形装药拆除双层构筑物中的应用,总结出以下结论和问题:

(1)把多层复合壁构筑物的每一层壁都设为一独立的结构,提出了水压爆破药量计算模型,充分考虑了各种介质不同的强度和动力特性,使药量计算更趋准确适用。

(2)在计算多层复合壁构筑物的自振圆频率时,用各层介质中声波速度的加权平均值作为整个结构的声波速度是可行的。但由于频率还与材料的泊松比、弹性模量等参数有关,所以在计算多层复合壁构筑物自振圆频率方面还有待进一步探讨。

(3)在层与层之间利用声学近似公式计算作用于各层壁的等效静载时,充分考虑了各层壁间的相互作用,使荷载计算更接近实际。

(4)上述药量计算是根据圆筒状构筑物的特性推导的,对矩形或其它形状的构筑物也可以按上述方法讨论其药量计算模型。

(5)公式中构筑物的爆破破坏程度系数是根据混凝土经实验确定的,对于其它材质的结构破坏程度系数还需要通过工程实践经验和模拟试验进一步使其准确。

(6)通过将上述计算模型用于工程实际,取得了满意的爆破效果,具有较高的实用价值。

参 考 文 献

- 1 王中黔,李 铮.水压爆破药量计算及其应用.见:冯叔瑜主编.土岩爆破文集(第二辑).北京:冶金工业出版社,1985.191~198
- 2 李翼祺,马素贞.爆炸力学.北京:科学出版社,1992.112~117
- 3 张立国,李守巨.水压爆破圆柱薄壳结构物的动力响应分析.工程爆破,1998,4(1):7~11
- 4 郑柱坚.波速测试及其在抗震设计中的应用.工程抗震,1998,(2):16~19
- 5 钮 强.岩石爆破机理.沈阳:东北工学院出版社,1990.4~5
- 6 东南大学等编.砌体结构.第二版.北京:中国建筑工业出版社,1995.28~31
- 7 陈华腾,钮 强,谭胜禹,等.爆破计算手册.沈阳:辽宁科学技术出版社,1991.100~101

CALCULATION AND APPLICATION OF WATER PRESSURE BLASTING WITH MULTI-LAYERED COMPOUND WALLS

Zhang Xiantang, Chen Shihai

(Shan dong Institute of Mining and Technology, Taian, 271019)

ABSTRACT According to the peculiarity of explosive load in water, by use of the energy criterion and the sound wave approximate formula, the equivalent static loading on every layer of the wall that is produced by water pressure blasting is calculated in this paper. It treats the weighted average sound velocity in different mediums as the average sound velocity in the structure, thus the natural frequency of the structure is calculated. Based on the intensity, the power character of the structure, and the expected destructive degree, regarding each layer as independent, a blasting formula of water pressure blasting for this structure is presented, and an engineering example is given.

KEY WORDS multi-layered compound wall, water pressure blasting, blasting charge