

水压控制爆破药量计算公式

朱立昌

(西南工程物理研究院上海曙光爆破技术服务部)

摘要 本文分析研究了常用的九个水压爆破药量计算公式, 根据十几次水压爆破的成败经验, 建立了水压爆破药量计算的综合经验公式, 其计算结果与实际用药量的爆破效果表明, 这个公式符合得比较好。最后给出了五个实例的对比计算结果。

关键词 爆破技术; 控制爆破; 水压爆破。

1. 引言

水压控制爆破是用水作为介质, 把炸药的爆炸能传递给待拆除的建筑物, 达到破坏建筑物的目的。

大家知道, 水是一种难压缩物质, 在0.1 GPa压力下, 它的体积仅缩小5%左右, 与空气相比, 炸药在水中爆炸时水本身消耗的变形能很少, 能量利用率比较高, 可以有效地破坏建筑物。

水压控制爆破有很多优点: 爆破前施工量小, 工程进度快, 爆破时无烟尘, 不易出现飞石, 空气冲击波弱等。但是, 要想得到预想的破碎结果, 必须要有比较准确的药量计算。因为对其它形式的爆破可以通过“试爆”来校核设计的药量, 但水压爆破则不能。因此, 水压爆破的成败主要取决于用药量的计算, 这就需要有一个较好的药量计算公式。国内外不少专家通过大量实践和理论分析, 得出了许多经验的、半经验半理论公式, 给爆破设计者提供了有用的设计依据。但是, 这些经验公式都有一定的适用范围, 而且有些参数的选取范围很大, 初用者往往不知如何处理。本文试图在分析研究这些经验公式的基础上, 根据一定的实践, 得出一种适用范围较广, 所有系数仅取决于结构参数的综合经验公式。并通过工程实例进行计算比较列于表1。由表中可见, 根据这个公式计算的药量与实际用药量比较接近。

2. 常用的经验公式及分析

(1) 常用公式——9*公式的单位为克, 其余公式的单位为千克。

$$\begin{aligned}
 1^* \quad Q &= K \delta \sigma_c U^{2/3} & 2^* \quad Q &= K_B \cdot K_C \delta B^2 \\
 3^* \quad Q &= K_5 K_c S & 4^* \quad Q &= K_1 (K_B \cdot K_C \delta)^{1.5873} R^{1.4126} \\
 5^* \quad Q &= K_2 (K_B \cdot S)^{1.5873} R^{1.4126} & 6^* \quad Q &= K_3 V \\
 7^* \quad Q &= K_4 \delta^{1.6} R^{1.4} & 8^* \quad Q &= \left(\frac{K_B K_C R_1 b \delta}{811.4 K_1 Q C} \right)^{1.5873} R^{1.4126} \\
 9^* \quad Q &= K_5 R_2 R_1
 \end{aligned}$$

(2) 各参数的意义及取值范围:

Q ——炸药量 (kg);

δ ——结构物壁厚;

U ——注水体积 (m^3);

σ_c ——结构材料强度

	取 值 范 围 (kg/cm^2)						
抗压强度 σ_r	75	100	150	200	250	300	400
抗拉强度 σ_e	6	8	12	16	19	21	25

K ——与炸药性能和爆破方式等因素有关的系数, 对硝酸炸药开口爆破 $K = 0.1$, 封闭式 $K = 0.08$;

B ——结构物内直径或短边长 (m);

K_B ——与爆破方式或结构特征有关的系数, 封闭式爆破 $K_B = 0.7 \sim 1.0$, 开口式 $K_B = 0.9 \sim 1.2$;

K_1 ——药量系数, 根据爆破对象的材料、爆破要求和破碎程度等取 $K_1 = 2.5 \sim 10$ 对钢筋混凝土取 $K_1 = 4$;

K_c ——材质系数及与环境条件有关的系数, 混凝土 $K_c = 0.1 \sim 0.4$, 钢筋混凝土 $K_c = 0.5 \sim 1.0$;

R ——圆筒内半径 (m);

K_f ——系数, 与结构受力特点及材质有关,

混凝土标号	150	200	250	300	350	400
$k_1 (\times 10^{-1})$	0.1225	0.1593	0.1952	0.2282	0.3045	0.3610

K_h ——厚壁圆筒修正系数

δ/R	0.05	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
K_h	1.0256	1.1091	1.2333	1.3692	1.5143	1.6667

K_p ——破碎程度系数: 完全破碎 $K_p = 18 \sim 22$, 松动破裂 $K_p = 4 \sim 7$;

K_s ——材质系数, 混凝土 $K_s = 0.2 \sim 0.25$, 钢筋混凝土 $K_s = 0.3 \sim 0.35$, 砖石砌体 $K_s = 0.18 \sim 0.24$;

S_1 ——通过药包中心水平面的周壁断面积 (m^2);

S ——环向钢筋截面积 (1米宽度范围内) (cm^2);

K_2 ——结构受力特点及材质系数,

混凝土标号		100	150	200	250	300	350	400
K ₂	3号钢×10 ⁻³	2.560	2.173	1.966	1.822	1.756	1.688	1.629
	5号钢×10 ⁻³	3.084	2.618	2.367	2.194	2.115	2.036	1.962
	16锰钢×10 ⁻³	3.488	2.927	2.647	2.453	2.365	2.277	2.194

K_e——炸药换算系数，黑梯炸药 K_e=1.0，2号硝铵炸药 K_e=1.10，铵油炸药 K_e=1.15；

K₃——单位耗药系数 (kg/m³)，K₃=0.25~0.33 (kg/m³)；

V——爆破物体积 (m³)，无自由面的池底不算；

δ——爆破体容器的等效壁厚 (m) δ=Ŕ [(1+S_δ/S_R)^{1/2}-1]，其中S_R为爆破体内容的横截面积，S_δ为爆破体的横切面积；

Ŕ——爆破体容器的等效半径 (m)，Ŕ=(s_R/π)^{1/2}；

K_b——爆破程度系数，表层混凝土开裂剥落，K_b=10~11；结构局部破坏，K_b=20~22；结构完全破坏，K_b=40~44；

K_D——材料的动力强度提高系数，取值为

材料	混凝土	3号钢	5号钢	16锰钢	25锰钢
K _D	1.40	1.35	1.25	1.20	1.13

R₁，C——混凝土的静抗拉强度和纵波声速，取值为

混凝土标号	100	150	200	250	300	350	400
R ₁ (×10 ⁴ Pa)	78.4	102.9	127.4	151.9	171.5	210.7	240.1
C (m/s)	2760	3060	3260	3420	3500	3585	3670

Ω、K₁——频率系数和弯矩系数，取值为

b/L	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
Ω	16.4	15.95	15.20	14.40	13.35	12.18	11.10	9.85	8.75
K ₁	0.0658	0.0633	0.0625	0.0633	0.0658	0.0700	0.0758	0.0833	0.0925
b/L	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
Ω	7.80	7.00	6.25	5.35	4.60	3.70	2.90	2.20	1.4
K ₁	0.1033	0.1158	0.1300	0.1458	0.1633	0.1825	0.2033	0.2258	0.2500

L 、 b 、 δ ——分别为容器的长、宽、壁厚， R_2 为药包中心距壁的距离。

(3) 分析：以上九个公式均未涉及容器高度 H ，而 H 对能量利用率有很大影响，这就限制了有些公式的使用范围。另外，对有无顶盖及顶盖的厚薄、钢筋的粗细、布筋疏密等因素，有些公式虽已作了考虑、但是把这些因素隐含在系数的取值上，这样就不得不扩大系数的取值范围，带来更大的人为因素。

3. 建立综合公式的思路

(1) 对容器各结构参数的分析

1) 容器的高度 H 越大，埋药深度（通常取 $2/3 H$ ）也就越大，爆炸冲击波出水自由面的时间就越长，有利于容器壁的破坏，所以 H 应与 Q 成反比关系。

2) 随着半径或等效半径 R 的增加，容器壁所受的压力要降低，相应的药量应增加，即 R 应与 Q 成正比关系。

3) 容器顶盖的质量（体积），对于灌满水的容器，就消除了水的自由面，爆炸时阻碍水的自由逸出，增加了侧面的作用时间，则相应的药量要减少。

4) 布筋的影响，我们只考虑钢筋作弹性变形，当然不排除由于钢筋的局部缺陷而断裂，或钢筋接头处拉开的情况。从纵横布筋情况来看，横向布筋截面面积通常较小而且首尾连接，无变形自由端；纵向布筋通常较粗而且至少有一个变形自由端。因此，对破碎影响较大的是横向布筋，引进一个布筋密集系数 K_r ，考虑到纵向布筋在变形中也要消耗能量，因此用 $(1 + K_r)$ 。

5) 体积 V ，所要破坏的容器体积越大，消耗的功越大，故 V 与 Q 成正比关系。

6) 破碎因子 C_p ，破碎程度越好所消耗的功越大，故 C_p 与 Q 成正比例关系。

7) 容器密封性好，有利于破碎，药量可以相应减少，因此用 $1 - K_d$ 减密封系数 K_d 。

(2) 综合公式和式中符号的定义及说明

$$Q = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{3R}{H}} (1 - K_d) (1 + K_r) C_p V \quad (\text{kg})$$

式中， $R = \sqrt{S/\pi}$ 为容器的等效半径，其中 S 为容器的横切面积；系数 $1/4$ 是参考 6* 公式中 K 的取值范围为 $0.25 \sim 0.33$ ，为方便计算而采用定值，其变化影响可由其他结构系数来调整； $\sqrt{3R/H}$ 是由 $\sqrt{D/(2H/3)}$ (D 为等效直径， $2H/3$ 为通常埋药深度) 变演，取用开方是调整灵敏度的需要根据经验定的。

H ——容器的高度。（对非筒体状的容器高要折算成筒体高）

K_d ——容器的封闭程度系数。 $K_d = (V_D S_1 / V_2 S_2)^{1/2}$ ， V_D 容器顶盖的体积； V_2 容器侧向体积之和； S_1 顶盖的实有面积； S_2 顶盖的结构面积。

K_r ——钢筋的密集系数。 $K_r = 2(S_3/S_4)^{1/2}$ ， S_3 横向布筋的横切面积， S_4 每根横筋平均担负容器壁纵切面的面积。

C_p ——破碎系数。 $C_p = 0.8$ ，裂而不散，基本无飞石； $C_p = 1.0$ ，部分脱筋，少量飞石； $C_p = 1.2$ ，基本脱筋，有飞石。

V ——容器能破碎的体积（无自由面的容器底属于不能破碎的体积）。

4. 实例计算比较

表 1 被爆炸建筑物结构

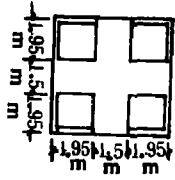
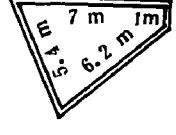
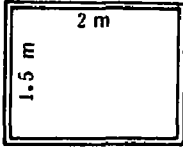
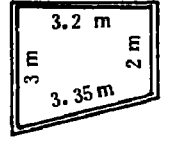
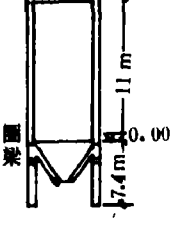
 <p>图 1</p>	 <p>图 2</p>	 <p>图 3</p>	 <p>图 4</p>	 <p>图 5</p>
<p>上海针织五厂曝气池</p>	<p>上海针织五厂碱池</p>	<p>上海针织五厂小碱池</p>	<p>上海针织五厂蓄水池</p>	<p>上海石英玻璃厂水泥车间生料库</p>
<p>正方形水池, 边长 5.4 m, 高 4.4 m, 壁厚 0.25 m, 等效半径 3.05 m, 顶盖有两条宽为 1.5 m, 长 5.4 m, 厚 0.25 m 的盖板, 双层布筋。</p>	<p>四边形水池, 边长分别为 7 m, 1 m, 6.2 m, 5.4 m, 高 2.6 m, 壁厚 0.25 m, 等效半径 $R = 2.5$ m, 双层布筋、开口。</p>	<p>长方形池, 长 2 m, 宽 1.5 m, 高 1.5 m, 壁厚 0.2 m, 单层布筋, 横筋 $\phi 8$。</p>	<p>直角梯形水池, 四边长分别为 3.2 m, 2 m, 3.5 m, 3 m, 高 2 m, 壁厚 0.24 m, 等效半径 1.6 m, 单层布筋, 横筋 $\phi 8$ (a) 200。</p>	<p>筒高 11 m, 锥高 4.8 m, 外径 7.06 m, 壁厚 0.15 m, 200° 水泥, 双层布筋, 横筋 $\phi 10$ (a) 150, 顶盖厚 0.10 m。</p>

表 2 水压爆破公式及选用参数值和用药量

序号	公 式	参数	单位	图 1 数据	图 2 数据	图 3 数据	图 4 数据	图 5 数据
1*	$Q = K\delta\sigma_s U^{2/3}$	K		0.09	0.1	0.1	0.1	0.08
		δ	m	0.25	0.25	0.2	0.24	0.15
		σ_s	Pa	156.8×10^4	156.8×10^4	156.8×10^4	156.8×10^4	156.8×10^4
		U	m ³	99.64	42.38	2.64	11.1	474.08
		Q	kg	7.74	4.9	0.61	1.91	11.69
2*	$Q = K_b K_c \delta B^2$	K_b		0.8	0.8	1.0	1.0	0.8
		K_c		1.0	0.9	1.0	1.0	1.0
		δ	m	0.25	0.25	0.2	0.24	0.15
		B	m	5.4	3.2	1.5	2	6.7
		Q	kg	5.83	1.83	0.45	0.96	5.39
3*	$Q = K_s K_e S$	K_s		0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
		K_e		1.1	1.1	1.1	1.1	1.1

续表 2

序号	公 式	参数	单位	图1 数据	图2 数据	图3 数据	图4 数据	图5 数据
3*	$Q = K_1 K_2 S$	S	m ²	5.4	4.9	1.4	2.77	3.16
		Q	kg	2.08	1.89	0.54	1.07	1.22
4*	$Q = K_1 K_2 K_3 \cdot \delta)^{1.5873} \times R^{1.426}$	K_1		0.1593	0.1593	0.1593	0.1593	0.1593
		K_2		1.1	1.1	1.1	1.1	1.0
		K_3		18	18	18	18	20
		R	m	3.05	2.5	1.0	1.6	3.35
		δ	m	0.25	0.25	0.2	0.24	0.15
		Q	kg	9.74	7.36	1.42	3.67	5.03
5*	$Q = K_2 (K_3 \cdot S)^{1.5873} \times R^{1.426}$	K_2		1.96×10^{-3}	1.96×10^{-3}	1.96×10^{-3}	1.96×10^{-3}	1.96×10^{-3}
		K_3		18	18	18	18	20
		S	cm ²	15.7	11.775	3.32	2.512	10.2
		R	m	3.05	2.5	1	1.6	3.35
		Q	kg	73.61	35.33	1.29	1.61	50.28
6*	$Q = K_3 V$	K_3	kg/m ³	0.31	0.31	0.28	0.27	0.25
		V	m ³	27.25	12.74	2.1	5.54	66.8
		Q	kg	8.45	3.95	0.588	1.50	16.7
7*	$Q = K_1 \hat{\delta}^{1.6} \hat{R}^{1.4}$	K_1		8	8	8	8	8
		\hat{R}	m	3.05	2.5	1.0	1.6	3.35
		$\hat{\delta}$	m	0.25	0.25	0.2	0.24	0.15
		Q	kg	4.15	3.17	0.61	1.61	2.09
8*	$Q = R_2^{1.426} \times \left(\frac{K_1 K_3 R_1}{811.4 \times K_1} \times \frac{b \delta}{Q C} \right)^{1.5873}$	K_b		40	40	40	40	40
		K_3		1.35	1.35	1.35	1.35	1.35
		R_1	$\times 10^4$	13	13	13	13	13
		b	m	5.4	3.2	1.5	2.5	7.0
		K_1		0.0833	0.0833	0.066	0.070	0.0833
		Q		9.85	15.2	13	12.18	9.85
		C	m/s	3260	3260	3260	3260	3260
		δ	m	0.25	0.25	0.20	0.24	0.15
		R_2	m	2.45	2.5	0.75	1.34	3.35
		Q	kg	4.05	8.19	0.87	4.07	18.71

续表2

序号	公 式	参数	单位	图1 数据	图2 数据	图3 数据	图4 数据	图5 数据
9 [*]	$Q = K_3 R_2 R_1$	K_3		12.1	12.1	12.1	12.1	12.1
		R_2	m	2.45	1.35	0.75	1.34	3.35
		R_1		13	13	13	13	13
		Q	kg	0.39	0.22	0.12	0.21	0.53
10 [*]	$Q = \frac{1}{4} (3R/H) \cdot C_p V \times (1 + K_s)$	R	m	3.05	2.5	1	1.6	3.53
		H	m	4.4	2.6	1.5	2	12.6
		K_d		0.265	0	0	0	0.304
		K_s		0.158	0.16	0.095	0.065	0.236
		C_p		1	1	1.2	1.2	1.2
		V	m ³	27.25	12.74	2.1	5.54	66.8
		Q	kg	8.36	6.27	0.97	2.74	15.8
实际用药量	Q	kg	8.1	6	1.05	3	15	

表 3 爆破结果

	图1 结构	图2 结构	图3 结构	图4 结构	图5 结构
爆破结果	顶盖分成四块，有三面基本脱筋，一面有裂纹，底面严重裂纹	小部分脱筋，部分龟裂，有两面有严重裂纹，底部有少量裂纹。	彻底脱筋，底部有严重裂纹，有少量飞石。	彻底脱筋，底部有严重裂纹，10m以内有飞石。	分成四大块，其余脱筋，圈梁有少量裂纹。
备注	此池从空中放下来，底和地面非密切接触，与水平倾斜3度，药包中心向脱筋的面偏心20cm	分两个药包1.8-1.2(kg) 分别置于两角平分线的交点上。			分三个药包3kg, 6kg, 6kg, 布药高度为-2m, +2m, +6m, 布药不合理，因此上部破坏严重，圈梁未受应有破坏。

5. 结束语

此综合经验公式是在分析了容器各结构参数在水压爆破中，对破碎效果所起的作用以后建立的，各参数在公式中的灵敏度（即方次）则是凑合起来的。从所选的五个不同类型的实例来看此式都能适用，计算结果和实际用药量比较接近。但是否有较广的适用性有待于以后更多的实践验证。

参 考 文 献

- [1] 冯叔瑜等, 城市控制爆破, 中国铁道出版社, (1985) .
[2] 刘清荣主编, 爆破技术, 武汉建材学院爆破教研室编, (1984) .

**CALCULATING FORMULA FOR THE QUANTITY
OF CHARGE IN WATER PRESSURE
CONTROLLED BLASTING**

Zhu lichang

*(Shanghai Shuguang Explosion Technique Service of
Southwest Academy of Engineering Physics)*

ABSTRACT Based upon the analysis of nine common used formulae for the quantity of charge in water pressure controlled blasting and the experience over ten times of practice, the author gives a new experimental formula. The calculating results and the effects of explosion show that they are in accord with each other. Five illustrations are given.

KEY WORDS blasting, technique, controlled blasting, water pressure blasting.