

水下定向爆破方法及计算

杨光照

(1984年10月25日收到)

水下定向爆破可以通过减少抛掷方向的介质密度、形成定向坑, 利用定向聚能药包及延期爆破等方法实现。

本文介绍了各种实用水下定向爆破方法及其计算。

在水下采用定向爆破方法不仅能破碎水下岩体, 还能将爆破后的岩碴按照一定角度, 沿着预定方向抛掷, 堆积在指定部位 (图1); 不仅能减少水下清碴量, 或堆积成满足一定要求的水工建筑物 (堤、坝), 而且能够提高水下爆破工程质量。

随着水下施工技术不断发展, 水下定向爆破在我国已日益广泛应用于河道疏浚与拓宽、港口建设、水中筑坝, 拆除废弃的水中构筑物, 以及水下岩塞爆破, 水下预裂爆破、水下控制爆破工程等。

由于水下爆破产生多种多样的爆碴形状; 抛掷岩块初始运动速度难以准确计算; 抛起的岩块在水中运动时, 处于岩块间的部分水体也随着运动, 使抛掷速度和方向剧烈变化, 岩块彼此相互碰撞, 水阻力更难以准确计算。因此, 至今难以建立严格理论公式来准确描述水下定向抛掷爆破全过程及其效果。



图1 堆积在水底聚碴坑中的爆碴

一、利用裸露药包进行水下定向爆破

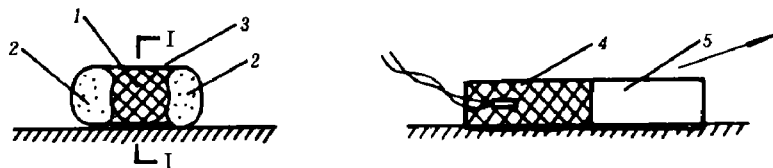


图2 带空气包的药筒

1—炸药筒; 2—砂袋; 3—绳索; 4—炸药; 5—空气包。

利用水底裸露药包进行定向爆破,效果差、耗药量大。在工程中仅用在拟爆目标附近有深槽,又缺乏水下清碴设备情况下,炸除位于水底的少量个别块石、孤石及礁石。

1. 裸露药包水下定向爆破方法

(1) 利用带空气包的药筒(图2),设置提前爆破的辅助药包及气泡帷幕等方法减少要求抛掷方向的介质密度。形成阻力较小的抵抗线,实现水下定向爆破。

(2) 采用设置端侧面药包(图3)、聚能药包(图4)等的定向聚能作用,使爆破岩块沿着预定方向(图中箭头所示方向)抛掷。

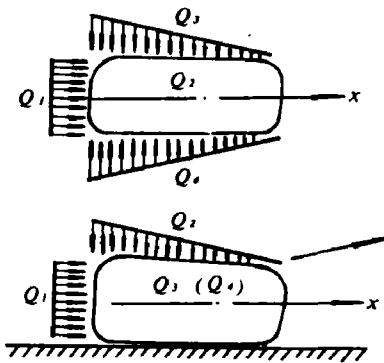


图 3 设置端侧面药包进行水下定向爆破
 Q_1 —主推进药包, Q_2, Q_3, Q_4 —侧面外围药包

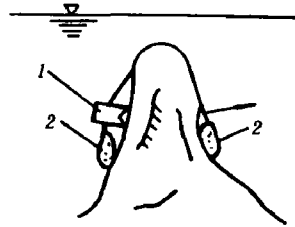


图 4 聚能药包定向爆破
 1—聚能药包; 2—坠石

2. 裸露药包水下定向爆破计算

(1) 当采用端侧面包围药包进行水下定向爆破时,保持抛掷方向的侧面外围药包的总重量($Q_2 + Q_3 + Q_4$,见图3)可取为主推进药包的重量。沿岩块各面设置的药包重量之比为

$$Q_1 : Q_2 : Q_3 : Q_4 = 1 : \frac{1}{3} : \frac{1}{3} : \frac{1}{3} \quad (1)$$

式中: Q_1 —主推进药包重量; Q_2, Q_3, Q_4 —侧面外围药包重量(公斤)。

外围药包不宜均匀布置,靠近主推进药包侧的药量较大,远离端较小,如图3所示。若岩块轮廓不规则,端部药包和侧面外围药包就应当尽可能对称于预定抛掷方向。

(2) 采用主辅裸露药包进行水底定向抛掷爆破时,主辅药包的重量比与主药包的装药量有关。当主药包装药量在200公斤以内时,取1:3; 200~500公斤时,取1:5。主辅药包间距与辅助药包的装药量 Q_B (公斤)及水深有关⁽²⁾

$$\text{水深在 2 米以内} \quad a = 0.7\sqrt[3]{Q_B} \quad (\text{米}) \quad (2)$$

$$\text{水深 2 ~ 4 米时} \quad a = 1.5\sqrt[3]{Q_B} \quad (\text{米}) \quad (3)$$

水下爆炸的冲击波能使附近的药包受到殉爆作用而爆炸。为避免产生殉爆,主辅药包间距还应大于水中可能产生殉爆距离,如图5⁽⁴⁾。当辅助药包用药量超过图示范围时,可按殉

爆距离与辅助药包装药量的平方根成正比求出。

主辅药包之间的迟发间隔应使主药包在辅助药包形成最大炸坑，而水尚未合拢前爆炸。当辅助药包重量小于50公斤时，取10~30毫秒；当辅助药包重量大于50公斤时，取30~50毫秒。

(3) 被爆碎岩块的重心至落地点的抛掷距离根据炸药爆炸传给岩块的总能量和消耗在克服水流阻力与河底摩擦力的能量，以及损失能量之间的平衡关系来确定。主推进药包的装药量与抛掷距离的关系可用下述经验公式表示(图6⁽²⁾)

$$Q_i = 4.03d^{7/2}e^{0.318x/d} \quad (4)$$

式中： d —换算为立方体岩块边长； x 为抛掷距离(米)。

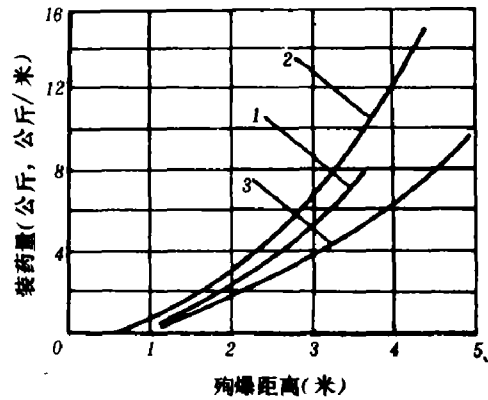


图 5 不同药包的殉爆距离

1—水底裸露药包；2—内部延长药包 3—内部集结药包。(装药量单位：裸露及集结药包为公斤；延长药包为公斤/米)

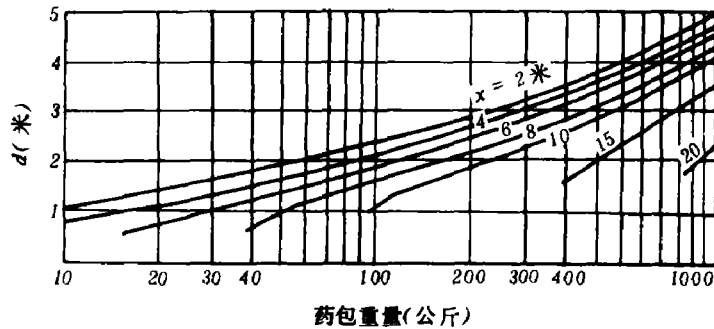


图 6 主推进药包重量与抛掷距离关系

水下堆石体，以及与基岩连接的礁石也可以用(4)式计算抛掷距离或用药量。对堆石体，根据外形尺寸确定密实体积，再求出换算长度 d (即密实体积的立方根)，然后用(4)式计算抛掷距离，或根据要求抛掷距离计算用药量。对礁石，按水下爆破同体积孤石所需药量再增加25%。

当需将体积为1米³岩块水下抛掷2米远，需裸露药包药量10公斤；若要求抛掷6米远，要30公斤炸药。可见，用裸露药包进行水下定向爆破的单位耗药量是相当大的。

二、利用内部药包进行水下定向爆破

利用埋入水底岩层内部的延长药包(水下钻孔爆破)或集结药包(水下药壶爆破、水下洞室爆破)进行水下定向爆破，单位耗药量较水底裸露爆破大为减少，且定向抛掷效果好，还能实现水下大量定向爆破。是水下定向爆破主要形式。

1. 内部药包水下定向爆破方法

(1) 陡坡地形: 一般利用天然有利地形, 将药室布置在适当位置, 使最小抵抗线指向凹面或陡坡处, 并且可以将裸露药包放在岩面最小抵抗线方向, 提前爆炸(图 7), 来加强定向抛掷效果。在地形条件不利情况下, 采用内部辅助药包提前爆破, 产生一个新的、比较短的最小抵抗线(图 8), 使主药包爆破后产生的爆碴沿辅助药包设置方向抛掷。

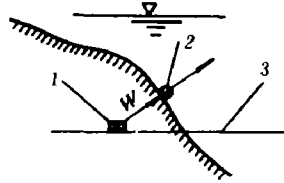


图 7 裸露药包提前爆破法
1—主药包; 2—裸露药包; 3—设计高程

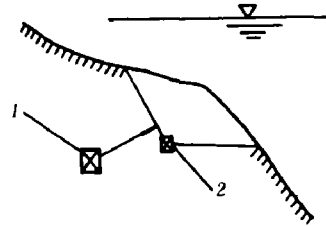


图 8 内部药包提前爆破法
1—主药包; 2—辅助药包

(2) 平底地形: 采用气体腔爆破法或定向槽法实现水下定向爆破。

所谓气体腔爆破法, 是在水底岩面上设置若干个裸露药包作为辅助药包, 以亚临界延时间隔由中央开始依次起爆(图 9 A), 或由远离主药包的辅助药包开始依次起爆(图 9 B), 水层以最佳抛射角 45° 方向抛出。在最后一个辅助药包爆炸瞬间, 同时起爆主药包。由主药包抛掷岩块方向转向气体腔一侧, 实现水下定向爆破^[6]。

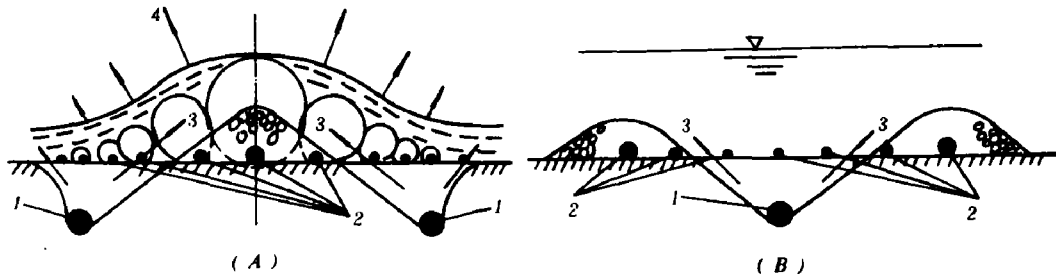


图 9 气体腔爆破法
(A) 定向集中抛掷 (B) 双侧定向抛掷
1—主药包; 2—辅助药包; 3—定向抛掷方向; 4—水面鼓包方向

定向槽法是利用天然的岩石深槽, 陡坎, 或事先在爆破区一侧用前述定向抛掷爆破方法形成定向槽(图 10), 作为第二临水面和弃碴场地。然后依次钻若干排深孔进行单侧定向抛掷爆破。

2. 内部药包水下定向爆破计算

(1) 爆破作用指数与抛掷率

水下定向爆破采用的爆破作用指数 n 值取决于爆破岩体的边坡、地质特性、要求的抛掷距离及抛掷率大小。当水下岩面坡度小于 30° 时, 主药包采用的爆破作用指数 n 值与抛掷率

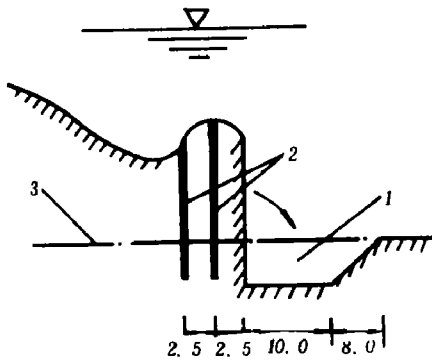


图 10 定向槽

1—定向槽；2—爆破孔；3—设计标高

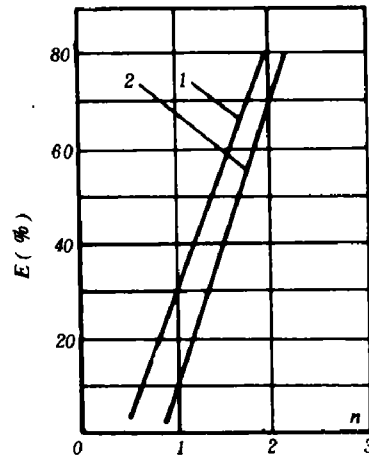


图 11 抛掷率与爆破作用指数 n 的关系

1—临空面位于空气中；2—临空面位于水中

的关系 (见图 11)^(3,4)为

$$n = 1.5E + 1 \quad (5)$$

式中： n —主药包爆破作用指数； E —抛掷率 (%)。当岩面坡度大于 30° 时，可参考下表 1 所列数据⁽⁴⁾，适当降低 n 值。对同时起爆的双排药包宜选用相同的 n 值。若为分排延期爆破，后排药包的 n 值应比前排药包的 n 值大 $0.2 \sim 0.4$ 。若为三排或三排以上药包同时爆破，中间排的 n 值应比两边的 n 值大 $0.2 \sim 0.4$ 。辅助药包的 n 值比主药包的 n 值小 $0.25 \sim 0.5$ 。

表 1 爆破作用指数与岩面坡度关系

水下岩面坡度 (度)	0 ~ 30	30 ~ 45	45 ~ 75
n 值	2.2 ~ 1.8	1.8 ~ 1.4	1.4 ~ 1.0

(2) 主药包装药量

在水下抛掷爆破中，由于水的密度、粘滞系数均较空气大得多，爆破运动的初速又很大，必将遇到很大阻力，爆破漏斗上面的水柱体可看成是一种特殊岩层，增大抵抗线，按下式计算的药包装药量⁽⁵⁾

$$Q = e \cdot K \cdot W_p^3 \cdot f(n) \quad (6)$$

式中： $f(n) = 0.4 + 0.6n^2$ ； $W_p = W + \mu \cdot H$ ； Q —主药包装药量 (公斤)； W_p —考虑水深影响的计算抵抗线 (米)； W —主药包距辅助药包爆炸后所形成岩面的距离 (米)； n —爆破作用指数； μ —水层厚度影响系数，见表 2； e —炸药换算系数 (硝酸炸药为 1.0，胶质炸药为 0.78)； K —水下抛掷爆破单位炸药消耗量 (公斤/米³)； $K = 0.8 + 0.09N$ ， N —按 10 级分类的岩石等级； H —水深 L (米)。

表 2 水层厚度影响系数 μ 值表

H/W		0.0	0.25	0.5	1.0	2.0	4.0	> 6.0
μ 值	砂土	0.0	0.15	0.22	0.27	0.34	0.42	0.55
	砂砾石	0.0	0.11	0.18	0.25	0.31	0.38	0.50
	中等硬度以上岩石	0.0	0.08	0.14	0.21	0.28	0.33	0.40

(3) 辅助药包装药量

当采用裸露药包作为辅助药包时, 药包装药量应满足在爆炸时, 能在水面形成水冢和喷泉 (图 12) 要求, 应满足下式⁽¹⁾⁽⁷⁾

$$Q_b > \left(\frac{H_b}{9} \right)^3 \quad (7)$$

式中 Q_b —辅助药包重量 (公斤); H_b —辅助药包在水面下的深度 (米)。

并应满足按下式计算敷设在岩面的裸露药包重量:

$$Q_b = K_w \cdot H_b^3 \cdot f(n) \quad (8)$$

$$f(n) = 0.4 + 0.6n^3$$

式中: K_w —水层单位耗药量, 为 0.2 公斤/米³; n —造成抛掷所需爆破作用指数, 取 1.5 ~ 2.0。

内部集结药包作为辅助药包时的装药量计算公式同主药包。

(4) 药包间距

药包间距按后排药包的抵抗线方向应大致垂直于前排药包形成的爆破漏斗边缘的原则确定, 由图 13 得出

$$b = W_2 / \cos \theta_2 \quad (9)$$

式中: b —一排距 (米); θ_2 —第二排药包最小抵抗线与水平面的夹角 (度);

W_2 —第二排药包最小抵抗线 (米)。

同一排内药包间距按各爆破漏斗间不留残埂要求, 按下式计算⁽³⁾

$$a = \left(\frac{W}{2} \right) (n + 1) \quad (10)$$

式中: a —药包间距 (米); W —最小抵抗线 (米); n —该排药包的爆破作用指数。

(5) 水下定向抛掷距离计算

根据广义理论弹道公式, 在有水阻力情况下的抛掷距离可以表示为⁽⁶⁻⁷⁾ (图 14)



图 12 水下裸露爆破时形成的喷泉

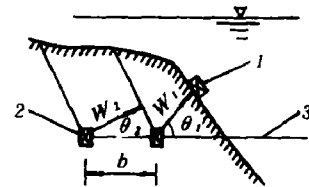


图 13 药包间距计算示意图

1—裸露药包; 2—主药包; 3—设计高程

$$x = F_w \cdot \frac{2V_o^2}{g} (\operatorname{tg} \phi + \operatorname{tg} \theta) \cos^2 \theta$$

即

$$x = F_w \cdot \frac{V_o^2}{g} (2 \operatorname{tg} \phi \cdot \cos^2 \theta + \sin 2\theta) \quad (11)$$

式中： θ —最小抵抗线与水平面夹角（度）； ϕ —落地点与抛掷点联线与水平面夹角（度）； F_w —水阻力系数，见表 3。

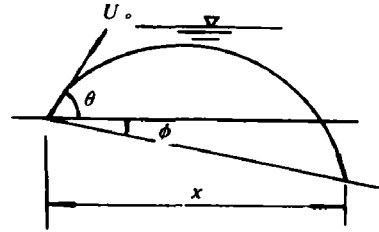


图 14 水下定向抛掷距离计算简图

表 3 水阻力系数 F_w 值

水深 (米)		0.5 ~ 1.5	2.0 ~ 3.0	3. ~ 5.0
F_w 值	x	0.69 ~ 0.58	0.67 ~ 0.55	0.64 ~ 0.53
	x_{max}	1.28 ~ 1.05	1.11 ~ 0.94	1.00 ~ 0.83

表中 x 表示定向抛掷堆积体重心至药包中心距离； x_{max} 表示堆积体外边缘至药包中心距离。

由能量守恒定律，得

$$\frac{1}{2} \frac{G}{g} \cdot U_o^2 = K_y \cdot E_B \cdot Q$$

式中： G —爆破漏斗岩体重量（公斤）； g —重力加速度（9.81米/秒²）； U_o —抛掷初速（米/秒）； E_B —单位重量炸药所产生的爆炸能量（硝铵炸药为 4×10^6 公斤·米/公斤，胶质炸药为 6×10^6 公斤·米/公斤）； K_y —水下爆炸能量有效系数，为 0.11 ~ 0.15； Q —装药量（公斤）。

则

$$U_o = \sqrt{\frac{2K_y \cdot E_B \cdot Q \cdot g}{G}}$$

代入式 (11)，得

$$x = F_w \sqrt{\frac{2K_y \cdot E_B \cdot Q}{G \cdot g}} (2 \operatorname{tg} \phi \cdot \cos^2 \theta + \sin 2\theta) \quad (12)$$

定向爆破堆积体积为

$$V = V_i \cdot C_y (1 - K_z) \quad (13)$$

式中： V_i —抛掷体积（为爆破方量与抛掷率的乘积）； K_z —飞散到其他方向的爆破系数，水下爆破取 0.1 ~ 0.2； C_y —岩石松散系数。

三、水下定向爆破效果

在浅水区及陡坡地区采用水下定向爆破效果比较理想。我国某水下爆破工程采用辅助药包提前爆破方法进行水下定向爆破。水深仅 1.5 米，主药包间距 1.5 米，主药包延发时间 10~30 毫秒。抛掷到指定方向的爆碴达 50~80%。

但在深水区，水的阻力过大，定向抛掷效果往往不理想。我国另一工程曾在水深达 24 米处进行水下定向抛掷爆破。采用的爆破作用指数达 2.3。爆破时，没有看到爆碴抛出水面。水下测量和潜水检查结果证明，爆碴大多落在附近，没有达到预定抛掷效果。

一般说来，对于水底裸露药包，当水深小于 $0.5\sqrt{Q}$ （米）时，水下定向抛掷效果比较理想。对于埋入式内部药包，当水深满足 $H < 1.5W$ ，且 $H < 5$ （米）时，水下定向抛掷效果比较好。超过上述水深，定向抛掷效果比较差。

四、水下定向抛掷爆破计算实例

江中礁石长约 45 米，横剖面尺寸如图 15 所示。由于当地缺乏水下清碴设备，采用水下定向抛掷爆破炸除礁石（Ⅶ级砂岩），满足通航水深不小于 3.5~4.0 米要求。

1. 最小抵抗线

为满足航深要求，礁石炸去厚度不应小于 2.5 米。考虑到定向抛掷爆破虽可以将大部分爆碴抛向两侧，仍会有部分爆碴就地堆积，减少有效通航水深，故按爆破岩层厚度不小于 4 米设计。

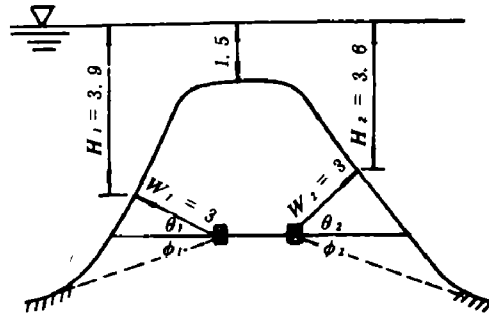


图 15 礁石横剖面及药室布置图

在水下抛掷爆破中，一般取

$$\frac{W}{H} = 0.6 \sim 0.8$$

今 $H = 4$ 米，则 $W = 2.4 \sim 3.2$ 米。按照这个范围在图上反复试摆药包后，得出以布置两排双向抛掷药包较合适，以最小抵抗线 $W = 3.0$ 米比较适中。

2. 爆破作用指数 n

岩面坡度陡于 45° ，取 $n = 1.4$ ，约相当于地面坡度小于 30° 时的 $n = 2.2$ 。估计抛掷率可达

$$E = \frac{n-1}{1.5} = \frac{2.2-1}{1.5} = 80\%$$

将有 20% 爆碴就地堆存。沿礁石长度方向平均每米堆存方量为

$$\frac{(3.5+9) \times 4 \times 1.5}{2} \times 20\% = 7.5 (\text{米}^3)$$

式中 1.5 为爆碴松散系数。

最大堆高为 h ，按三角形断面，可得出

$$7.5 = \frac{1}{2} \times 9h$$

得 $h = 1.7$ 米, 此时堆碴边坡小于水下爆碴自然稳定边坡。爆破后, 礁石上面的最小水深为 $1.5 + 4 - 1.7 = 3.8$ 米, 满足要求。

3. 装药量

药包 1: 已知 $W_1 = 3$ 米, $H_1 = 3.9$ 米, $n = 1.4$ 。由 $H_1/W_1 = 1.3$, 利用表 2 求得 $\mu_1 = 0.23$ 。采用胶质炸药, $e = 0.78$ 。对 VI 级砂岩, 由公式 (6) 求得: $K = 1.43$, $f(n) = 2.05$, $W_p = 3.9$ 米。则 $Q_1 = 135$ 公斤。

药包 2: $H_2 = 3.8$ 米, 由公式 (6) 求得 $Q_2 = 125$ 公斤。

4. 爆破漏斗

用下破裂半径公式 $R = W\sqrt{1 + 0.8n^2}$ 计算, 得 $R = 4.8$ 米。以药室为圆心, R 为半径, 作弧与岩面相交, 连接圆心和交点, 即得爆破漏斗线, 表明满足设计要求。

5. 药包间距

由公式 (10) 求得: $a = \frac{3}{2}(1.4 + 1) = 3.6$ (米)。

6. 定向抛掷距离计算

药包 1: 胶质炸药 $E_b = 6 \times 10^6$ 公斤·米/公斤, $K_r = 0.13$, $Q_1 = 135$ 公斤, $\text{tg}\phi_1 = \text{tg}19^\circ = 0.344$, $\sin 2\theta_1 = \sin 2 \times 30^\circ = 0.866$, $\cos^2 \theta_1 = \cos^2 30^\circ = 0.75$ 。

两个药包爆破岩石方量为 $\frac{(3.5 + 9.0) \times 4}{2} \times 3.6 = 90$ (米³), 则每个药包爆破岩石重

量为 $G_1 = \frac{90}{2} \times 2650 = 119250$ (公斤)。由表 3 查得 $F_w = 0.6$, 由公式 (12) 求得 $x_1 = 0.61$

$\times 17.9 = 11$ (米)。 $x_{1max} = 0.92 \times 17.9 = 16.5$ (米)。

药包 2: $E_b = 6 \times 10^6$ 公斤·米/公斤, $K_r = 0.13$, $Q_2 = 125$ 公斤, $\text{tg}\phi_2 = \text{tg}20^\circ = 0.36$, $\sin 2\theta_2 = \sin 2 \times 40^\circ = 0.98$, $\cos^2 \theta_2 = \cos^2 40^\circ = 0.587$, 由表 3 查得 $F_w = 0.62$, 由公式 (12) 求得 $x_2 = 0.62 \times 18.09 = 11.2$ (米)。 $x_{2max} = 0.94 \times 18.09 = 17.0$ (米)。

实际爆破结果: 大部分爆碴飞越航道, 抛距 10 ~ 20 米, 与计算结果接近。爆破后实际岩面高程达到设计要求, 不需清碴。

五、结 论

1. 水下定向爆破技术并不比一般水下爆破复杂, 却可提高爆破质量、减少水下清碴量, 或堆积成一定形状, 从而能降低工程造价、缩短工期。在有条件的地方应尽量采用。

2. 在水下爆破工程中, 可以通过减少抛掷方向的介质密度(用空气代替水体, 或用水体代替岩体)、形成定向坑(天然的, 或利用辅助药包造成)及定向聚能药包、延期爆破方法, 达到水下定向爆破目的。

3. 水下定向爆破的抛掷距离受水深影响比较大。浅水区效果比较好; 但在深水区抛掷距离短, 效果不理想。

4. 影响水下定向爆破效果的因素错综复杂, 目前还只能凭有关经验公式与试验数据估

算。本文所提计算方法,可以满足一般工程设计要求,重要爆破工程仍须通过爆破试验验证有关参数。

5. 水下定向爆破是一门在发展中的爆破技术,有待于结合爆破试验、系统总结实践经验、从地质力学、水动力学及爆炸力学方面进行深入探讨,提高预测精度。

参 考 文 献

1. P. 库尔 (罗耀杰等译), 水下爆炸, 国防工业出版社 (1960)。
2. Перехвальский, В. В. (韩祥瑞译), 炸礁工程中的定向爆破, 港工航道快报, No. 16 (1965)。
3. 南京水利水运科学研究所, 徐州筑港工程局, 京杭运河徐州段水下定向抛掷爆破第一阶段试验报告 (1970)。
4. 冯叔瑜, 马乃耀, 爆破工程 (上册), 中国铁道出版社 (1980)。
3. 陈中良, 川江水下钻孔爆破, 水下爆破文集, 人民交通出版社 (1980)。
6. А. А. 切尔尼高夫斯基 (史家育译), 定向抛掷爆破, 中国建筑工业出版社 (1983)。
7. Новиков, В. Д., Луговой, П. З., Подводные и прибрежные Взрывы, Издательство «Наукова Думка», (1982)。

ON THE METHOD OF UNDERWATER DIRECTIONAL BLASTING AND CALCULATION

Yang Guangxu

Abstract

Underwater directional blasting can be achieved through the methods of reduced density of medium in thrown direction, formed directional pit, directional cumulative blasting, delayed blasting etc.

This paper presents various applied methods of underwater directional blasting and calculation.