

# 关于水下爆破人身安全距离的探讨

王 中 黔

本文根据施工实践和试验资料的分析,建议水下爆破时,以水中冲击波超压 $\Delta P \leq 0.3$ 公斤/厘米<sup>2</sup>作为人体安全的判据,人在水下作业的最小安全距离可按公式: $R = 731k_1k_2\sqrt{Q}$ (米)计算。并以此为依据,对国内某些爆破工程安全规则提出了具体的修改意见。

目前,在国内外一些爆破安全规则中,关于水下爆破人身安全距离的规定存在着两个主要问题。一是过于笼统,没有考虑到爆破方法、药包数量、水深和河流弯道等因素对安全距离的影响。二是偏于安全,这就会导致水下爆破作业与其它水下作业(如潜水作业)之间发生干扰,甚至有可能使某一方的作业陷于停顿或延长施工周期。

例如,铁道部1975年公布的“铁路工程爆破安全规则”(下文简称“规则”)第118条规定:

凡进行水下爆破时,距水底爆破地点在下列距离内不得游泳和进行潜水作业:

- 1.一次爆破总药量在3公斤以下时,不少于2公里;
- 2.一次爆破总药量不超过50公斤时,不少于6公里;
- 3.一次爆破总药量为50~250公斤时,不少于10公里。

事实上,近年来在一些水下爆破工点,施工单位已超越了上述规定在进行水下作业。因此有必要对这些规则的类似条文进行修订,以利于水下爆破技术的发展。

本文提出的论点旨在抛砖引玉,以期引起讨论并订出合理的规则。

## 一、人体受伤标准

水下爆破时,爆破飞石和水中冲击波是威胁人体安全的两个因素。

关于飞石:

文献〔1〕指出,水下裸露爆破时,人体的安全距离可按以下三种情况考虑:

- 1.当水深 $H$ 小于1.0米,而且 $H < 0.5Q^{\frac{1}{3}}$ 时( $Q$ 为单个药包装药量),其最小安全距离为350~400米。
- 2.当水深1.0~1.5米,而且 $H > 0.5Q^{\frac{1}{3}}$ 时,可按地形、地质条件,药包重量和水深大小,在120~130米范围内选取。
- 3.当水深大于2.5米,而且 $H > 0.5Q^{\frac{1}{3}}$ 时,其最小安全距离为70~150米。

本文收到日期:1981年2月24日

对于水下钻孔爆破,有以下三种情况:

1.水深 $H \leq 2.0$ 米,一个自由面时,飞石安全距离一般取180~200米,两个以上自由面的台阶爆破,考虑钻孔位置的可能偏差,可取200~300米。

2.水深 $H = 2.0 \sim 4.0$ 米,一般为100~200米。

3.水深 $H \geq 4.0$ 米时,碎石很少飞出水面,安全距离可取50~90米。

实践表明,当水深在6米以上,无论是何种爆破方式,炸药量 $Q \leq 250$ 公斤时,飞石是很难出水的。

由此可知,在通常情况下,人体距爆源500米以外基本是安全的。因此,飞石不是击伤人体的主要因素。

关于水中冲击波:

人体能承受的冲击波是有一定限度的。这与人对冲击波的相对方位(站、坐、卧,面向、侧向或背向波阵面)以及冲击波阵面的特征参数(峰值压力、峰值上升时间和压力持续时间)有关。文献〔2〕根据大量统计资料和近年来的多次试验,给出了瞬时(3~4毫秒)速升空气冲击波压力对人体作用的鉴定标准(表1)。

表 1

鉴定器官及受伤标准	冲击波入射超压 $\Delta P^*$ (公斤/厘米 <sup>2</sup> )
鼓膜破裂: 开始	0.35
50 %	1.05
肺部损伤: 开始	2.11~2.81
严重	$\geq 5.62$
致命的或然率: 开始	7.03~8.44
50 %	9.14~12.65
100 %	14.06~17.58

\* $\Delta P = P - P_0$ ,  $P$ —冲击波阵面压力

$P_0$ —自然状态下介质的初始压力

文献〔3〕给出了不同距离不同炸药量的水中爆炸冲击波作用于人体的资料(表2)。

鉴于在一般压力下,水的不可压缩性和水的密度远远大于空气介质的密度,水中冲击波无论是压力峰值的上升时间和正压作用时间都要比空气冲击波小得多。因此,在其它条件相同的情况下,人在水中可承受的冲击波超压的容限要大一些。比较表1和表2,便可以说明这一点。其次,这一容限还与炸药量的大小有关,炸药量越小人体可承受的超压也愈高。综合分析已有的各种资料,并给了一定的安全系数,笔者认为可以取 $\Delta P \leq 0.3$ 公斤/厘米<sup>2</sup>作为水下爆炸冲击波作用于人体,而不至于受伤的安全标准。

研究表明,悬挂在无限水域中的集中药包爆破时,产生的冲击波最强。假定这一条件

表 2

水中爆炸装药量Q (公斤)		1	3	5	50	250	500
引起微弱脑震荡, 而 胸腔内脏不受损伤:	距离R (米)	20~100	50~300	100~350	/	/	/
	$\Delta P^*$ (公斤/厘米 <sup>2</sup> )	18.05~2.93	9.70~1.28	5.37~1.30	/	/	/
引起轻度脑震荡, 同 时使胃壁肠壁损伤:	距离R (米)	8~20	10~50	25~100	75~150	100~200	250~035
	$\Delta P^*$ (公斤/厘米 <sup>2</sup> )	50.84~18.05	59.76~9.70	25.72~5.37	17.70~8.09	23.44~10.71	10.81~7.39
开始致人死命的最小 距离与超压:	距离R (米)	8	10	25	75	100	250
	$\Delta P^*$ (公斤/厘米 <sup>2</sup> )	50.84	59.76	25.72	17.70	23.44	10.81

\* $\Delta P$ 按下文公式(2)计算而得。

以水面看不到有关水中爆炸的任何现象为依据,那么爆炸的最小深度为:

$$H \geq 9.0 \sqrt[3]{Q} \quad (\text{米}) \quad (1)$$

此时,密度为1.6的梯恩梯球形药包,在水中形成的冲击波超压 $\Delta P$ ,可按库尔(R.H.Cole)经验公式计算:

$$\Delta P = 533 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.13} \quad (\text{公斤/厘米}^2) \quad (2)$$

这与Kirkwood—Beth冲击波传播近似理论的计算结果基本一致。根据能量相似准则,换算成工程中通常利用的2号岩石炸药后,上述公式可改写成:

$$\Delta P = 516 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.13} \quad (\text{公斤/厘米}^2) \quad (3)$$

根据“规则”第118条,分别按公式(3)和 $\Delta P = 0.3$ 公斤/厘米<sup>2</sup>的标准作计算,其结果列于表3。

表 3

炸 药 量 (公斤)		3	50	50~250
在相应距离下的超压	R (米)	2000	6000	10000
	$\Delta P$ (公斤/厘米 <sup>2</sup> )	0.145	0.121	0.068~0.124
$\Delta P = 0.3$ 公斤/厘米 <sup>2</sup> 时的距离 R (米)		1053	2684	2684~4589

因此,从表3可知,即使在炸药包悬挂在水中这种最不利的情况下进行水下爆炸,冲击波对于人体的安全距离已可缩小一半多。何况于在爆破工程中,这类作业极为少见。

## 二、水下工程爆破的冲击波超压

与水中爆破相比,水下工程爆破的特点是①药包或置于岩石表面或置于孔中。如置于孔中,则爆炸能量除部分形成水中击波外,大部分用于破碎、移动岩石和逸出水面形成空气冲击波。②药包分散,且彼此间有可能相差数毫秒起爆,冲击波的持续时间约为数毫秒,所以水中击波压力,不一定是多个冲击波压力的叠加。因此,在相同炸药量同一距离上,水下工程爆破的冲击波压力要远远小于水中爆破〔1〕〔4~6〕。

我们曾对工程中,经常采用的三种爆破方式和爆破参数,进行了多次水中冲击波压力的测试〔4〕〔5〕:

1.单药包裸露爆破 单个集中药包的炸药量在8~66公斤之间。水流平缓、水深在10米左右。砂岩,河床平坦。

2.群药包裸露爆破 一次起爆8~16个药包,单个药包重量为12公斤,总药量在96~192公斤之间。药包间距1.0米,排距2.0米,水深在5.0米以内。

3. 钻孔爆破 钻孔直径100毫米左右, 孔深3~4.5米, 装药长度为孔深的2/3。每次爆破28~32孔, 孔距1.5~2.0米, 排距2.6~3.2米, 爆破总药量242~493公斤。水深在5米以内。

冲击波信号用压电晶体压力传感器接收, 经由阻抗变换器放大后用电子示波器记录。

测试数据, 按公式(3)的形式经回归分析后, 整理成表4和图1。

如果我们以95.4%概率的±2S剩余标准差, 作为试验结果可能出现的误差范围(图1中虚线之间范围), 并以其误差的上限和水中爆炸的冲击波压力值(图1中的曲线①)进行比较, 计算各类水下工程爆破冲击波超压衰减的百分比(见表4), 作为超压修正系数K<sub>1</sub>,

表 4 .

编号	爆破方式	冲击波压力经验公式	试验次数	相关指数R	剩余标准差S	考虑+2s的试验结果与水中爆破压力比
①	水中爆炸	$\Delta P = 516 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.13}$				100%
②	单药包裸露爆破	$\Delta P = 203 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.21}$	11	0.96	0.082	40~45%
③	群药包裸露爆破	$\Delta P = 38 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.06}$	20	0.78	0.109	18~15%
④	水下钻孔爆破	$\Delta P = 31 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.45}$	6	0.94	0.093	3~6%

那末可得公式:

$$\Delta P = 516K_1 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.13} \quad (4)$$

式中: K<sub>1</sub>——超压修正系数, 水中爆炸K<sub>1</sub> = 1; 单药包裸露爆破K<sub>1</sub> = 0.4~0.45; 群药包裸露爆破K<sub>1</sub> = 0.15~0.18; 钻孔爆破K<sub>1</sub> = 0.03~0.06。

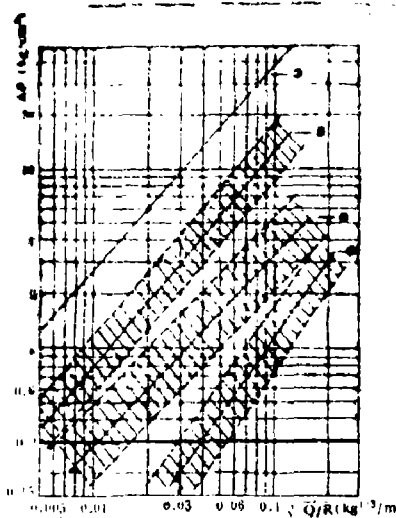


图1 各种水下爆破冲击波压力的衰减规律和±2S误差范围

- ①水中爆炸
- ②单药包裸露爆破
- ③群药包裸露爆破
- ④水下钻孔爆破

河流拐弯时,水中冲击波的传播受到影响,波阵面经过弯道后的超压将降低。根据文献〔7〕提供的试验资料,可近似假定河流弯道角度 $\alpha \geq 135^\circ$ 时,冲击波不受影响,超压的修正系数 $K_2 = 1$ ;  $\alpha \geq 90^\circ$ 时,  $K_2 = 0.87$ ;  $\alpha \geq 45^\circ$ 时,  $K_2 = 0.77$ ; 当 $\alpha < 45^\circ$ 时,  $K_2 = 0.59$ 。

把修正系数 $K_2$ 代入公式(4),经换算后,可得水下工程爆破冲击波安全距离的计算公式:

$$R = 252K_1^{0.885}K_2^{0.885}\Delta P^{-0.885}\sqrt[3]{Q} \quad (5)$$

令:  $\Delta P = 0.3$ 公斤/厘米<sup>2</sup>,  $k_1 = K_1^{0.885}$ ,  $k_2 = K_2^{0.885}$

则:  $R = 731k_1k_2\sqrt[3]{Q}$  (米) (6)

式中:水中爆破 $k_1 = 1.0$ ;单药包裸露爆破 $k_1 = 0.44 \sim 0.5$ ;群药包裸露爆破 $k_1 = 0.17 \sim 0.22$ ;水下钻孔爆破 $k_1 = 0.045 \sim 0.083$ 。

冲击波传播途中,每经过一河弯,当弯道角度 $\alpha \geq 135^\circ$ ,  $k_2 = 1.0$ ;  $\alpha \geq 90^\circ$ ,  $k_2 = 0.88$ ;  $\alpha \geq 45^\circ$ ,  $k_2 = 0.79$ ;  $\alpha < 45^\circ$ ,  $k_2 = 0.63$ 。

### 三、削弱冲击波超压的措施

在水下爆破与其它水下作业之间发生干扰,而不能缩小爆破规模的情况下,可采取下述三个措施降低水中冲击波的超压值。

1. 采用微差爆破 实验表明,水中冲击波在某一距离处的持续作用时间只有数毫秒。国产毫秒电雷管的段差在25毫秒以上。因此,分段爆破的击波不会叠加,冲击波超压与各段的炸药量有关,而与一次爆破的总药量无直接关系。

2. 采用柔性遮蔽物 在爆源和被防护物之间设置柴排、泡沫塑料等柔性遮蔽物,阻挡或削弱冲击波的传播。这类材料约可降低50%的冲击波压力。

3. 设置气泡帷幕 这是国内外经常采用的一种削弱冲击波的有效方法。设计良好的气泡帷幕可降低90%左右的冲击波超压〔5〕〔6〕。

但是,后两种措施应靠近被保护物设置,而且其宽度要大于被保护物宽度的4倍多,以避免冲击波的绕射作用。

### 四、结 论

文献〔8〕1972年制定的安全技术操作规程,第364条第一款:水中冲击波对人身的安全距离:当用药量在50公斤以上时,在1公里以内,不准有人游泳;在3公里以内,不准进行潜水作业。当用药量在50公斤以下时,在500米以内,不准有人游泳;在1.5公里以内,不准进行潜水作业。这比铁道部第118条规定的安全距离要小。但是,在人体表面和水之间有空气层,如穿上潜水服后,实际上水中爆破对人体的损伤将大大减小。因此,这一条文仍不完善。

建议各类爆破安全规则中,有关水下爆破对人身的安全距离修订如下:

水下爆破时,人体容许承受的冲击波超压不得大于0.3公斤/厘米<sup>2</sup>,其最小安全距离可按下式计算,

$$R \geq 731k_1k_2\sqrt{Q} \text{ (米)}$$

式中：Q——一次爆破或分段爆破的炸药量（公斤）；

$k_1$ ——爆破方法修正系数；水中爆破 $k_1 = 1$ ，单药包裸露爆破 $k_1 = 0.5$ ；群药包裸露爆破 $k_1 = 0.22$ ；钻孔爆破 $k_1 = 0.083$ 。

$k_2$ ——河流弯通修正系数，当 $\alpha \geq 135^\circ$ ， $k_2 = 1$ ； $\alpha \geq 90^\circ$ ， $k_2 = 0.88$ ； $\alpha \geq 45^\circ$ ， $k_2 = 0.79$ ； $\alpha < 45^\circ$ ， $k_2 = 0.63$ 。

如取表格形式，则为：

水下爆破时，人在水下作业的最小安全距离可按下表选用：

最小安全距离(米)	炸药量(公斤)	炸药量			备 注
		$\leq 3$	$\leq 50$	$\leq 250$	
水下爆破方式					
水 中 爆 炸		1050	2700	4600	河流有弯道时，当弯道角度 $\alpha \geq 135^\circ$ ，安全距离不变； $\alpha \geq 90^\circ$ ，缩小0.88倍； $\alpha \geq 45^\circ$ ，缩小0.79倍； $\alpha < 45^\circ$ ，缩小0.63倍。
单 药 包 裸 露 爆 破		530	1350	2300	
群 药 包 裸 露 爆 破		230	600	1010	
钻 孔 爆 破		90	230	380	

### 参 考 文 献

- 〔1〕刘书伦：《水下爆破对周围环境的影响》1980年“水下爆破文集”第69~74页，人民交通出版社。
- 〔2〕《抗偶然性爆炸效应结构》（美国陆海空三军设计手册）1969年 中国人民解放军80813部队译
- 〔3〕北京工业学院八系：《爆炸及其作用》（下册）1979年 国防工业出版社
- 〔4〕王中黔：《水下爆破冲击波》1980年“水下爆破文集”第38~49页 人民交通出版社
- 〔5〕马乃耀、王中黔：《黄埔水下爆破设计施工与安全防护技术》1980年，“土岩爆破文集”第104~118页 冶金工业出版社
- 〔6〕黄涛、刘汉丞：《水下岩塞爆破的震动与冲击效应》1980年，“土岩爆破文集”第88~103页，冶金工业出版社
- 〔7〕C、K、萨文科等：《井下空气冲击波》1979年龙维祺、于亚伦译 冶金工业出版社
- 〔8〕长江航道局六六一工程指挥部编：《航道工程爆破安全技术操作规程》（讨论稿）1972年

ON THE SAFETY DISTANCE FOR THE PROTECTION OF THE HUMAN  
BODY DURING THE OPERATION OF UNDERWATER BLAST

Wang Zhong-gian

In accordance with the practice on construction and analysis of experimental data, the over-pressure of water shock wave  $\Delta p = 0.3 \text{ kg/cm}^2$  may be considered as a criterion for the protection of the underwater blast. The minimum safety distance for the protection of human bodies situated in the operation of underwater blast may be calculated according to the following formula,

$$R = 731 k_1 k_2 \sqrt[3]{Q} \quad (\text{m}) .$$

On the basis of experimental data, some detailed proposals for the revision of the rules for the safety operations in the blasting engineering are proposed in this paper.