

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2013.06.004

# 水下爆炸气泡脉动的数值研究<sup>\*</sup>

黄兴中<sup>①②</sup> 王志军<sup>①</sup>

① 中北大学机电工程学院(山西太原,030051)  
② 解放军 76153 部队(广西桂林,541000)

[摘 要] 利用 AUTODYN 软件模拟 PETN 药柱和 TNT 球形装药水下爆炸气泡脉动的过程,分析了脉动周期与最大半径随装药量、爆炸深度的变化规律。结果表明:当炸药所处的爆炸深度一定时,气泡膨胀最大半径与初始半径的比值、气泡脉动周期与初始半径的比值均为一个定值;一定质量的 TNT 装药水下爆炸时,气泡最大半径随爆炸深度呈指数形式变化且该变化规律与装药量无关;在不考虑重力的影响下,装药的爆炸深度一定时,当装药的初始半径成倍增加时,气泡脉动最大半径亦成相同倍数增加。

[关键词] 水下爆炸 气泡脉动 最大半径 脉动周期 数值模拟

[分类号] O389 TQ560.7

## 引言

水下爆炸主要由装药爆轰、冲击波的产生与传播、气泡脉动 3 个阶段组成,其特有的气泡脉动现象是当前国内外研究的热点。在水中兵器设计方面,水下爆炸是毁伤舰船、潜艇、鱼雷等水下目标的一条重要途径,研究水下爆炸气泡脉动对舰船、潜艇结构的抗爆设计具有重要意义。

在工程爆破方面,爆炸法处理淤泥软基广泛用于防浪堤、护岸、沿海养殖围堤等水下工程中,从爆破排淤机理来看,爆破振动能量是次要的,而气泡第一次脉动是排淤的重要能量,约占总能量的 30% 左右<sup>[1]</sup>。

由于水下爆炸试验费用昂贵、工作量大、测试过程复杂、影响因素多,随着计算机数值模拟技术的发展,各种大型有限元软件如 LS-DYNA、ABAQUS、DYTRAN 和 AUTODYN 在水下爆炸领域得到广泛运用。辛春亮等<sup>[2]</sup>对 4 种数值计算软件在水下爆炸仿真中的运用进行了比较: AUTODYN 在水下爆炸仿真方面的功能最为全面,计算稳定性比较好,优势也较明显。

本文利用 AUTODYN 软件模拟研究水下爆炸气泡脉动的过程,分析爆炸深度及装药量对气泡膨胀最大半径和脉动周期的影响。

## 1 气泡脉动过程的数值模拟

### 1.1 状态方程及材料参数

本模型涉及的物质为水和 PETN 炸药。水的状态方程有多项式和 SHOCK 状态方程,由于 SHOCK 状态方程无法通过设置比内能来改变水的静水压力,因此选用多项式状态方程。

当水压缩时( $\mu > 0$ ),其状态方程为:

$$p = A_1\mu + A_2\mu^2 + A_3\mu^3 + (B_0 + B_1\mu)\rho_0 e; \quad (1)$$

当水膨胀时( $\mu < 0$ ),其状态方程为:

$$p = T_1\mu + T_2\mu^2 + B_0\rho_0 e; \quad (2)$$

当水既不压缩也不膨胀时( $\mu = 0$ ),可以简化为:

$$p = B_0\rho_0 e。 \quad (3)$$

式(1)、(2)、(3)中: $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $B_0$ 、 $B_1$ 、 $T_1$ 、 $T_2$  为常数; $\mu$  为水的压缩比, $\mu = \rho/\rho_0 - 1$ ; $\rho$  为水压缩或膨胀后的密度; $p$  为水中的压力; $e$  为水的单位质量内能; $\rho_0$  为水的密度。

静水压力的计算公式为  $p = p_0 + \rho_0 gh$ ,  $p_0$  为水面处的大气压,取  $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。根据式(3)得出单位质量水的内能  $e = \frac{(p_0 + \rho_0 gh)}{B_0\rho_0}$ 。对于一般的深水爆炸来说,可以忽略水的密度在深度方向的变化,即可以认为各个深度上水的密度都等于  $1.0 \text{ g/cm}^3$ 。水的状态方程的参数如表 1。

PETN 炸药爆轰产物的压力用 JWL 状态方程来描述:

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2013-05-27  
作者简介: 黄兴中(1987~),男,硕士研究生,主要从事高效毁伤技术研究。E-mail:friendshipxz@126.com  
通信作者: 王志军(1963~),男,教授,博导,主要从事弹箭毁伤控制技术、计算机仿真与实验研究。E-mail:443780928@qq.com

表 1 水的状态方程参数

Tab. 1 State equation parameters of water

$A_1/\text{GPa}$	$A_2/\text{GPa}$	$A_3/\text{GPa}$	$B_0$
2.2	9.54	14.57	0.28
$B_1$	$T_1/\text{GPa}$	$T_2/\text{GPa}$	$\rho_0/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
0.28	1.717	0	1.0

$$p = A(1 - \frac{\omega}{R_1 V})e^{-R_1 V} + B(1 - \frac{\omega}{R_2 V})e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V}。$$

(4)

式中: $p$  为压力; $V$  为相对体积; $E$  为内能; $A$  和  $B$  为材料参数; $R_1$ 、 $R_2$  和  $\omega$  为常数<sup>[3-6]</sup>。具体参数的取值见表 2。

表 2 PETN 炸药 JWL 状态方程参数

Tab. 2 JWL state equation parameters of PETN

$A/\text{GPa}$	$B/\text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$\omega$
617.05	16.929	4.4	1.2	0.25
$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$D/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$E/(\text{kJ} \cdot \text{cm}^{-3})$	$p_{\text{CJ}}/\text{GPa}$	
1.77	8300	10.1	33.5	

注: $\rho$  为炸药密度, $D$  为炸药爆速, $p_{\text{CJ}}$  为炸药的 C-J 压力。

1.2 数值模型

计算模型采用二维轴对称模型,采用较大的水域以减小边界条件的影响,采用网格过渡的方法减小网格总数,PETN 药柱质量 1.5 g,长径比 1.05,设置 flow-out 边界条件,建立 1/2 有限元模型如图 1,采用 Euler-2D 求解器。

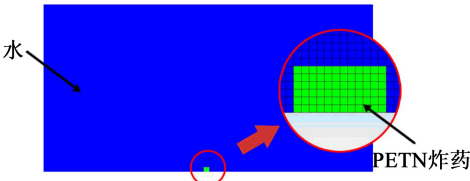


图 1 数值计算模型

Fig.1 Numerical calculation model

1.3 计算结果与实验对比

研究气泡脉动的实验都采用小当量装药,在有限水域(如水箱或水池)中进行,汪斌等<sup>[7]</sup>进行的水下爆炸实验装置如图 2。

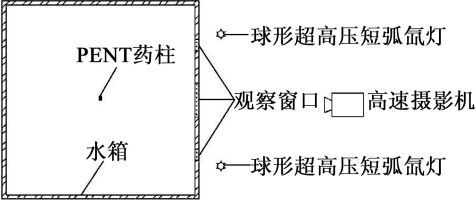


图 2 气泡脉动的实验装置

Fig.2 Experimental apparatus of bubble pulse

水箱尺寸为 2 m×2 m×2 m,PETN 炸药长径比

为 1.05,质量为 1.5 g。采用高速摄影机通过观察窗口拍摄气泡脉动的过程,球形超高压短弧氙灯通过光源窗口照射水箱内部,为高速摄影机提供照明。为降低水箱壁反射冲击波对气泡脉动过程的影响,在水箱内壁贴吸能材料。

图 3 显示的照片是汪斌等<sup>[7]</sup>采用高速摄影拍摄到的 1.5 g PETN 药柱水箱中爆炸后,首次气泡脉动过程图片与用 AUTODYN 数值模拟图像的对比图。

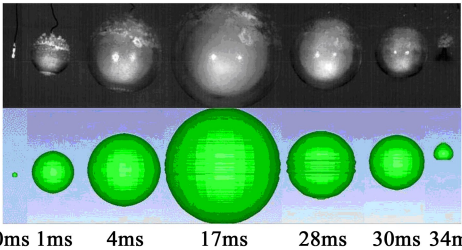


图 3 水箱爆炸实验照片(上图)及数值模拟照片(下图)

Fig.3 Pictures of water tank explosion test (above) and numerical simulation(below)

从图 3 可以看出,PETN 药柱爆炸后,爆轰产物以气泡的形式迅速向外膨胀,当气泡膨胀到一定大小后,气泡内的压力与静水压力相等,此时由于惯性作用,气泡继续向外膨胀,在  $t = 17 \text{ ms}$  时膨胀至最大体积,由于此时周围静水压力大于气泡内压力,气泡开始被压缩,收缩速度逐渐增大,此时内部压力逐渐增大,由于惯性的作用,当气泡内压力等于静水压力时仍继续收缩。当  $t = 34 \text{ ms}$  时,气泡收缩至最小体积,第一次气泡脉动结束。

1.4 与其他介质中爆炸的对比

炸药在空气中、水中和土壤中爆炸时,无论是爆炸现象还是冲击波的传播都有很大差别。研究爆轰产物的脉动过程可以发现:

炸药在空气中爆炸时,空气的初始压力较低,由于惯性效应,爆炸产物存在过度膨胀和过度压缩现象,形成脉动过程。但是由于爆轰产物与空气的界面比较模糊,且脉动使界面周围产生湍流作用,使界面越来越模糊,最后和空气介质混合到一起。因此,研究空气中爆轰产物的脉动意义不大。

炸药在土壤中爆炸时,由于径向稀疏波的作用,介质颗粒在达到最大位移后,反向朝药包运动,压缩爆炸产物,爆炸产物压力增大并重新膨胀,由爆炸产物和土壤组成的系统发生震荡(脉动),产生新的波。由于阻尼效应和永久性变形所造成的能量损失,这个过程衰减很快,以至于从爆源传出的第二个波与第一个波相比,已经可以忽略了。

炸药在水中爆炸时,由于水是液态介质,类似于

气体的爆轰产物与介质之间存在较清晰的界面,因此,水中爆轰产物能够以气泡的独特形式存在。气泡脉动时,水中将形成稀疏波和压缩波,两者的产生分别对应于气泡半径最大和最小时。通常气泡第一次脉动时所形成的二次压力波峰值小,但是作用时间比较长(约 1 s),并且具有周期性,其破坏作用不容忽视,因此,研究水中爆炸爆轰产物的脉动具有重要意义<sup>[8-9]</sup>。

## 2 气泡脉动规律研究

### 2.1 数值计算模型

当前国内外研究水下爆炸气泡脉动都以 Cole 的经验公式为依据,该公式以 TNT 球形装药水下爆炸为条件,为与经验公式对比同时减小计算量,炸药采用 TNT 装药一维楔形计算模型。

TNT 炸药爆轰也用 JWL 状态方程来描述,具体参数的取值见表 3。

表 3 TNT 炸药 JWL 状态方程参数

Tab.3 JWL state equation parameters of TNT

$A/\text{GPa}$	$B/\text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$\omega$
371.2	3.231	4.15	0.95	0.30
$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$D/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$E/(\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-3})$	$p_{\text{CJ}}/\text{GPa}$	
1.63	6930	6.9927	21	

计算模型采用一维楔形网格计算模型,采用网格渐变的方法减小网格总数。根据公式计算水的比内能,分别取 2111.8 J/kg、2461.8 J/kg、2811.8 J/kg、3161.8 J/kg、3511.8 J/kg 来模拟 50 m、60 m、70 m、80 m、90 m 不同水深的情况,与此同时,分别取 5 g、10 g、15 g、20 g、25 g TNT,研究不同水深下的气泡最大半径和脉动周期。设置 flow-out 边界条件,建立有限元模型如图 4,采用 Euler-2D 求解器。

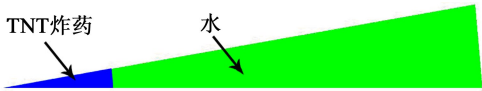


图 4 数值计算模型  
Fig.4 Numerical calculation model

### 2.2 Cole 经验公式

Cole 在《水下爆炸》一书中,给出了 TNT 球形装药水下爆炸气泡膨胀最大半径和脉动周期的经验公式,Zamyshlyayev(1973)在 Cole 研究成果的基础上进一步发展,总结经验公式如下<sup>[10-11]</sup>:

$$T=K_T\frac{W^{1/3}}{(1+0.1h)^{5/6}};$$

(5)

$$r_{\max}=\frac{K_R}{(1+0.1h)^{1/3}}r_0。$$

(6)

式中: $T$  为气泡脉动的周期,ms; $r_{\max}$  为气泡膨胀最大半径,mm; $K_R$  的数值由实验确定,对于 TNT 炸药  $K_R=30$ ,对应的  $K_T=0.295$ ; $h$  为炸药位于水下的深度,m; $W$  为装药质量,kg; $r_0$  为药包初始半径,m。

### 2.3 计算结果分析

利用 AUTODYN 软件计算出 5 ~ 25 g 的 TNT 球形装药在 50 ~ 90 m 爆炸深度的 25 组气泡脉动周期与最大半径值,计算结果见表 4 与表 5。从表中可以看出:当装药量一定时,随着爆炸深度的增加,气泡脉动的周期和最大半径均减小;当爆炸深度一定时,随着装药量的增加,气泡脉动的周期和最大半径均增大。

表 4 气泡最大半径的模拟结果  
Tab.4 Simulation results of the bubble maximum radius

爆炸深度 /m	装药质量/g				
	5	10	15	20	25
50	145.5	181.8	207.0	227.6	244.9
60	138.1	172.4	196.3	215.6	232.4
70	131.9	164.7	187.4	206.3	221.8
80	126.6	158.2	180.0	198.1	213.1
90	122.1	152.7	173.8	191.0	205.6

表 5 气泡脉动周期的模拟结果  
Tab.5 Simulation results of the bubble pulse period

爆炸深度 /m	装药质量/g				
	5	10	15	20	25
50	11.40	14.39	16.39	18.01	19.41
60	10.05	12.68	14.44	15.85	17.06
70	9.00	11.35	12.93	14.21	15.28
80	8.17	10.30	11.73	12.88	13.86
90	7.49	9.44	10.75	11.80	12.70

表 6 为 5 g TNT 装药在 50 ~ 90 m 深度爆炸时气泡脉动的周期、最大半径与经验公式的对比值。

表 6 模拟值与经验值对比  
Tab.6 Comparison of simulated and experience values

爆炸深度 /m	最大半径			脉动周期		
	模拟值/ mm	经验值/ mm	误差/ %	模拟值/ mm	经验值/ mm	误差/ %
50	145.5	148.5	2.0	11.40	11.33	-0.6
60	138.1	141.1	2.1	10.05	9.97	-0.8
70	131.9	135.0	2.3	9.00	8.92	-0.9
80	126.6	129.8	2.5	8.17	8.08	-1.2
90	122.1	125.3	3.3	7.49	7.40	-1.2

从表 6 中可以看出,模拟结果与经验公式计算值比较接近,误差均在 5% 以内,表明了 AUTODYN 在模拟水下爆炸气泡脉动方面的准确性和可靠性。

图 5 为不同爆炸深度时,气泡最大半径随装药质量的变化规律, $R_0$  表示球形装药初始半径,从图中可以得出:在相同爆炸深度下,气泡膨胀最大半径( $R_{\max}$ )与初始半径( $R_0$ )的比值  $\lambda$  ( $\lambda = R_{\max}/R_0$ ) 为一个定值,且  $\lambda$  的值随深度的增加而减小。

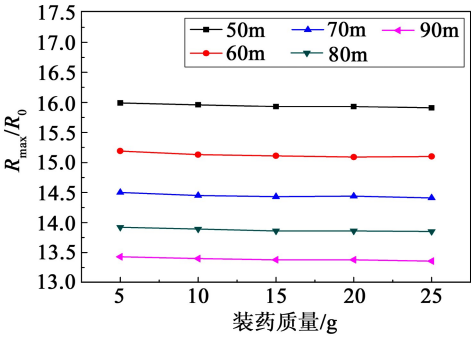


图 5 气泡最大半径与装药半径的比值随装药质量的变化规律

Fig. 5 Rules of bubble maximum radius and charge radius ratio changing with charge mass

图 6 为不同装药质量时,气泡最大半径随爆炸深度变化规律的拟合曲线。当装药量一定时,气泡最大半径随爆炸深度呈指数形式变化。

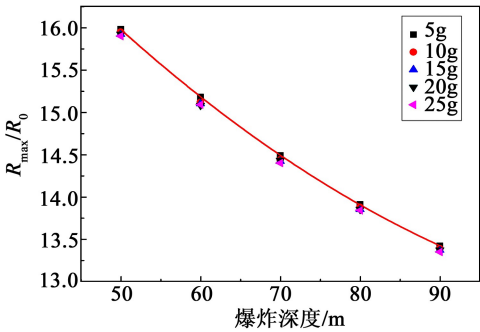


图 6 气泡最大半径与装药半径的比值随爆炸深度的变化规律

Fig. 6 Rules of bubble maximum radius and charge radius ratio changing with different explosion depth

图 7 是不同爆炸深度下装药量成倍增加时,气泡最大半径的比值关系,图中  $R_{\max-10g}$  代表装药量 10 g 时气泡的最大半径(其他类推)。从图中可以看出, $R_{\max-20g} / R_{\max-10g} = R_{\max-15g} / R_{\max-10g} = 1.25$ ,而计算得到装药初始半径的比值  $R_{0-20g} / R_{0-10g} = R_{0-10g} / R_{0-5g} = 1.25$ ,即当装药初始半径比值为  $\delta$  时,气泡最大半径的比值亦为一个定值  $\delta$ ,且该值与装药所处的爆炸深度无关,仅与炸药的初始半径有关。

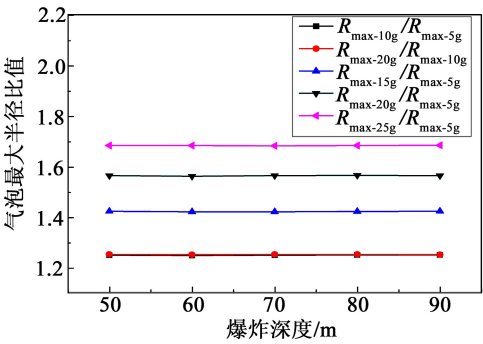


图 7 装药量成倍增加时气泡最大半径的比值随爆炸深度的变化规律

Fig. 7 Rules of bubble maximum radius ratio changing with charge mass when the charge quantity increased multiplied

由此得出结论:在不考虑重力的影响下,无论装药所处的爆炸深度如何,当装药的初始半径增加  $\delta$  倍时,气泡脉动最大半径亦增大  $\delta$  倍。

图 8 为不同爆炸深度,气泡脉动周期与初始半径的比值随装药质量的变化规律。当装药爆炸深度一定时,气泡脉动的周期与装药初始半径的比值接近为一个定值。

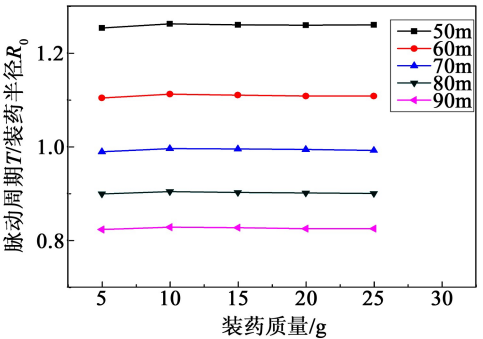


图 8 不同爆炸深度时气泡脉动周期与初始半径的比值随装药质量的变化规律

Fig. 8 Rules of bubble pulse period change with different charge mass at different explosion depth

3 结论

本文利用 AUTODYN 软件模拟不同药量的 TNT 球形装药在不同深度爆炸时,气泡脉动的周期与最大半径的变化规律,可以得出以下结论:

1) AUTODYN 在模拟水下爆炸方面具有很好的精度和可靠性,气泡脉动过程的模拟结果与实验结果能较好地符合,气泡脉动周期、最大半径的模拟结果与经验公式计算值能较好地符合。

2) 当炸药所处的爆炸深度一定时,气泡膨胀最大半径( $R_{\max}$ )与初始半径( $R_0$ )的比值为一个定值,该值随深度的增加而减小,气泡脉动周期( $T$ )与初始半径( $R_0$ )的比值也为一个定值。

3)一定质量的 TNT 装药水下爆炸时,气泡最大半径( $R_{\max}$ )随爆炸深度呈指数形式变化,该变化规律与装药量无关,仅与爆炸深度有关。

4)在不考虑重力的影响下,装药的爆炸深度一定时,当装药的初始半径( $R_0$ )增加  $\delta$  倍时,气泡脉动最大半径( $R_{\max}$ )亦增大  $\delta$  倍。

参 考 文 献

[1] 张建勋.空腔爆炸排淤填石法[C]//工程爆破文集全国工程爆破学术会议论文选(六).深圳:海天出版社,1997.

[2] 辛春亮,秦健,徐更光,等.数值模拟软件在水下爆炸模拟中的应用研究[C]//第四届全国爆炸力学实验技术学术会议.福建武夷山,2006:232-236.

[3] 胡毅亭,贾宪振,饶国宁,等.水下爆炸冲击波和气泡脉动的数值模拟研究[J].舰船科学技术,2009,31(2):134-140.

Hu Yiting, Jia Xianzhen, Rao Guoning, et al. Numerical study of underwater explosion shock wave and bubble pulse[J]. Ship Science and Technology, 2009, 31(2): 134-140.

[4] 徐豫新,王树山,李园.水下爆炸数值仿真研究[J].弹箭制导学报,2009,29(6):95-97.

Xu Yuxin, Wang Shushan, Li Yuan. Study on numerical simulation of the underwater explosive [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2009, 29(6):95-97.

[5] 刘科种,徐更光,辛春亮,等. AUTODYN 水下爆炸数值

模拟研究[J].爆破,2009,26(3):18-20.

Liu Kezhong, Xu Gengguang, Xin Chunliang, et al. Research on numerical simulation in underwater explosion by AUTODYN[J]. Blasting, 2009, 26(3):18-21.

[6] Lu J P, Clarke T. Studies of underwater explosions[C]//Proceedings of the 21st International Symposium on Ballistics, Adelaide, Australia, 2007:955-962.

[7] 汪斌,张远平,王彦平.水中爆炸气泡脉动现象的实验研究[J].爆炸与冲击,2008,28(6):572-576.

Wang Bin, Zhang Yuanping, Wang Yanping. Experimental study on bubble oscillation formed during underwater explosions[J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(6): 572-576.

[8] 恽寿榕,赵衡阳.爆炸力学[M].北京:国防工业出版社,2005.

Yun Shourong, Zhao Hengyang. Explosion Mechanics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2005.

[9] 库尔 P. 水下爆炸[M].罗耀杰,韩润泽,官信,等,译.北京:国防工业出版社,1960.

[10] 松佐夫 H H. 水下及空中爆炸理论基础[M].王华,译.北京:国防工业出版社,1965.

[11] 王振雄,顾文彬,秦入平,等.水下深孔爆破间隔装药起爆时差影响的数值模拟[J].爆破器材,2012,41(3):8-11,15.

Wang Zhenxiong, Gu Wenbin, Qin Ruping, et al. Numerical simulation of the effect of initiation time difference on underwater deep-hole compartment blasting [J]. Explosive Materials, 2012, 41(3):8-11, 15.

Numerical Study of Underwater Explosion Bubble Pulse

HUANG Xingzhong<sup>①②</sup>, WANG Zhijun<sup>①</sup>

①North University of China (Shanxi Taiyuan, 030051)

②Unit 76153 of PLA (Guangxi Guilin, 541000)

[ABSTRACT] The bubble pulse process of PETN grain and TNT spherical charge was simulated by AUTODYN. The rules of pulsation period and maximum radius which change with the mass and depth of the charge were analyzed. The results show that when the charge at a certain depth, the ratio of maximum radius and initial radius is a fixed value. It is the same for the ratio of pulsation period and initial radius. When a certain quality of TNT blasted underwater, the bubble maximum radius change exponentially with the depth of the charge and the change rules have nothing to do with the charge quality. Without considering the effect of gravity, when the charge blasts at a certain depth, with the initial radius of charge increasing multiplied, the bubble maximum radius becomes the same multiple increase.

[KEY WORDS] underwater explosion, bubble pulse, maximum radius, pulsation period, numerical simulation