

文章编号: 1001-1455(2002)03-0221-08

浅层水中爆炸冲击波切断现象浅探

张鹏翔, 顾文彬, 叶序双

(解放军理工大学 工程兵工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要: 探讨了浅层水中冲击波的切断现象。主要分析了切断现象的特性、产生的机理以及对冲击波参数的影响。实验并分析了水面切断现象起始、终止时间及切断线的斜率等表征切断现象特性的参量。统计分析了水面切断现象对正压作用时间、比冲量等冲击波参数的影响。结合理论和实验数据, 分析了有两类切断现象的波形, 对其性质进行了判断。探讨了冲击波在水底反射产生稀疏波的机理, 简析了水底稀疏波对波形的影响。研究表明: 装药浅层水中爆炸, 界面对激波的削弱影响中, 水面反射切断现象作用较强, 水底反射切断现象的作用较弱。

关键词: 切断现象; 浅层水; 水面反射; 水底反射

* 中图分类号: O382.1 文献标识码: A

1 引 言

B. V. Zamyshlyayev 等^[1]研究了深水爆炸情况下水面、水底两种界面对冲击波的影响。钱胜国等对近自由面爆炸水中冲击波的特性进行了分析^[2]。这些都为浅层水中爆炸理论研究打下了很好的基础。

但浅层水不同于无限水、深水条件。装药在浅层水中爆炸, 水面、水底是水中冲击波参数的重要因素。在两种界面存在的情况下, 波系会发生复杂的反射; 不同物理性质的波的数量按照几何级数递增^[1]。这些波系之间的非线性作用给研究造成相当大的困难。

装药在浅层水域中爆炸, 切断现象是水面、水底对爆炸效应的重大影响之一。稀疏波到达之后, 测点的压力迅速下降, 不能按照此前的规律继续衰减; 表现在压力时程曲线上, 波形似被稀疏波切断, 称为切断现象。它使测点处的压力受到削弱, 因而减弱了冲击波对外做功的能力。

我们旨在通过实验研究切断现象的特性, 分析有此现象的波形的压力随时间变化的规律, 探讨切断现象的特征参数随装药、测点的设置参数变化的规律, 探明切断现象对冲击波压力峰值、测点处比冲量的影响, 为研究确定冲击波荷载提供依据。

装药置于浅层水中爆炸, 水面对冲击波的比冲量等参数主要是削弱影响; 水底对冲击波压力峰值、比冲量等参数的影响包括增强影响和削弱影响。我们仅考虑两种界面对激波参数的削弱影响。

2 试验概况

试验在海滩上人工修筑的 $100 \times 100 \text{m}^2$ 的水池中进行。水质为海水, 基本静止。试验水深取 $47 \text{cm} \sim 67 \text{cm}$, 按照 0.223 的几何相似比模拟 $2.1 \sim 3.0 \text{m}$ 的水深。水池底部地势平缓, 坡度变化较小, 距岸边同一水平距离上的水深相差不大。水池底部为比较复杂的层状液固界面结构: 与海水接触的为淤泥, 淤泥之下为软泥, 软泥之下为夹沙软泥, 密度逐渐增大, 各层之间的过渡不是十分明显。

采用的测试系统如图 1 所示。试验装药按照同样的相似比采用 400g 压装 TNT 药球, 模拟 30kg 的球形装药, 试验装药密度为 $1.6 \text{g}/\text{cm}^3$ 。测压传感器、电荷放大器、测试总机等仪器的性能以及测点(传感

* 收稿日期: 2001-02-19; 修回日期: 2001-10-15

基金项目: 总装备部科研项目

作者简介: 张鹏翔(1974—), 男, 博士研究生。

器)、装药的布置情况、测试系统的标定与调试在文献[3-4]中已有介绍。

下面对有切断现象的实测波形进行分析。

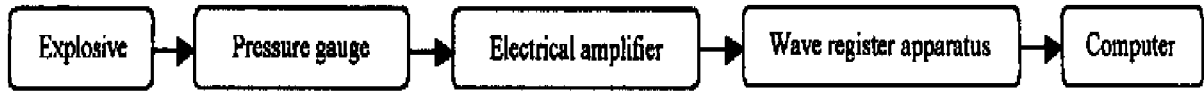


图 1 水中爆炸测试系统框图

Fig.1 Test system of explosion in water

3 水面切断现象

在近自由表面的流场中,激波通常由直达波和表面反射的稀疏波合成。冲击波在自由水面的反射分为两种情况。一种是规则反射,从水面反射回来的稀疏波没有影响到直达波的峰压。另一种是非规则反射,稀疏波整个地卷入激波,以致波阵面发生了急剧的变化,峰压大为降低^[5]。运用文献[5]中理论进行计算的结果表明,在本文试验设置条件下,入射冲击波在水面处的反射为规则反射^[3]。

3.1 水面切断现象的典型波形

文献[5~6]等对水面反射切断现象的形成原因作了较详细的论述。在此不再赘述。

图 2 为几种典型的有切断现象的波形。其中图 2(a)所示为反射冲击波的水面切断现象(如图中 AB 段所示)。图 2(b)、(c)、(d)所示为反射稀疏波切断直达波的情况(其水面切断现象分别表现在图中的 CD、EF、GH 段)。本文主要分析此类情况。

3.2 切断线的特征参数

波形被稀疏波切断的压力时程曲线为切断线。图 2 的(a)、(b)、(c)、(d)四小图中,切断现象所对应的线段 AB、CD、EF、GH 为切断线。切断线所对应的起始时刻、终止时刻以及切断线的斜率等,表征了引起切断现象的稀疏波的某些特性。当所研究的问题必须考虑“切断”过程时,需要分析切断开始时间、终止时间、切断线的斜率等切断现象的特征参数。

3.2.1 切断开始时间

能否应用声学理论^[2]计算浅层水中爆炸条件下水面稀疏波到达测点的时间,需要试验数据验证。

若把冲击波到达测点的时间定为初始时刻,根据声学理论^[2],由图 3 不难得到稀疏波到达测点的时间 t_{ak} 为

$$t_{ak} = \frac{2(d-H)(d-h)}{a_0 \sqrt{(H-h)^2 + L^2}} \quad (1)$$

图 4 实线所示为根据式(1)计算的值。图标“□”、“○”、“△”所示实验数据对应的 h 均为 0.52,它们所对应的 H 分别为 0.05、0.12、0.26;“▽”、“◇”、“+”所示点是在 $h=0.64$ 时测到的试验数据,它们所对应的 H 分别为 0.05、0.12、0.26。图 4 中所有实验数据均在 $d=0.81$ 的条件下测得。试验数据表明:装药在浅层水中爆炸,水面反射稀疏波到达测点的时间用声学近似处理已足够精确。

3.2.2 切断线的斜率

如图 2 所示,切断线“AB、CD、EF、GH”均近似为直线,下面分析切断线斜率 k_c 的影响因素。

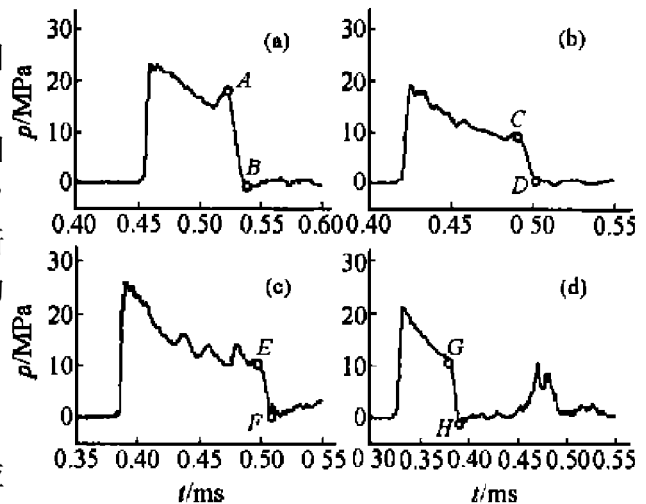


图 2 有水面切断现象的典型波形

Fig.2 Typical curves with cutoff

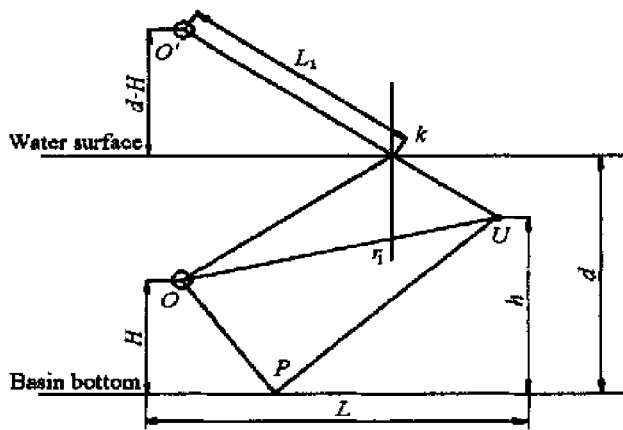


图 3 装药与测点的位置示意图

Fig.3 Schematic of charge and measurement points' position

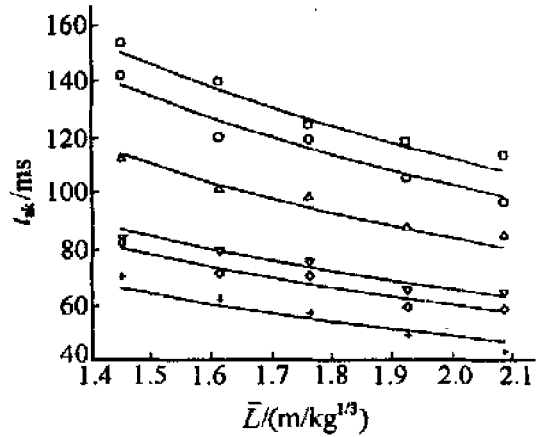


图 4 正压作用时间随设置参数的变化

Fig.4 Positive time vs. setup parameters

质量为 C 的球形装药在浅层水中爆炸，水面切断现象切断线斜率 k_c 的大小与下列因素有关：与装药有关的量有密度、装药半径等，总体影响体现为装药的总能量 E ；与水介质有关的量有：静压 p_0 和密度 ρ_0 ；与水底有关的量有水底介质的初始密度 ρ_1 、抗压强度 σ 、塑性加载时的体积模数 K 、内聚力 K_0 ；与设置参数有关的量有：装药距水底的距离 H 、测点距水底的距离 h 、水深 d 、测点到装药的垂直距离 L 等。当水底为同一种介质时， ρ_1 、 σ 、 K 、 K_0 等可视为不变量。则 k_c 的大小决定于 E 、 H 、 h 、 d 、 L 、 p_0 及 ρ_0 等，写成函数表达式则为： $k_c = f(H, h, d, L, E, p_0, \rho_0)$ 。

如果选择 E 、 p_0 、 ρ_0 为独立变量，并把上式写成 π 的指数方程式，则有

$$\pi = k_c^\alpha H^\beta h^\gamma d^\delta L^\epsilon E^\zeta p_0^\eta \rho_0^\theta$$

根据量纲分析法^[5]可以得出各个 π 项为

$$\pi_1 = \frac{k_c E^{1/3} \rho_0^{1/2}}{p_0^{7/6}}, \pi_2 = \frac{H p_0^{1/3}}{E^{1/3}}, \pi_3 = \frac{h p_0^{1/3}}{E^{1/3}}, \pi_4 = \frac{d p_0^{1/3}}{E^{1/3}}, \pi_5 = \frac{L p_0^{1/3}}{E^{1/3}}$$

按照 π 定理^[3,5]，函数式 $k_c = f(H, h, d, L, E, p_0, \rho_0)$ 可以写成无量纲函数关系式

$$F\left(\frac{k_c E^{1/3} \rho_0^{1/2}}{p_0^{7/6}}, \frac{H p_0^{1/3}}{E^{1/3}}, \frac{h p_0^{1/3}}{E^{1/3}}, \frac{d p_0^{1/3}}{E^{1/3}}, \frac{L p_0^{1/3}}{E^{1/3}}\right) = 0$$

由于 $E = C Q_v$ (C 为装药质量， Q_v 为爆热)，故上式可以写成

$$k_c = \frac{p_0^{7/6}}{\sqrt[3]{C} \sqrt[3]{Q_v} \rho_0^{1/2}} F_1 \left[\left(\frac{p_0}{Q_v}\right)^{1/3} \frac{H}{\sqrt[3]{C}}, \left(\frac{p_0}{Q_v}\right)^{1/3} \frac{h}{\sqrt[3]{C}}, \left(\frac{p_0}{Q_v}\right)^{1/3} \frac{d}{\sqrt[3]{C}}, \left(\frac{p_0}{Q_v}\right)^{1/3} \frac{L}{\sqrt[3]{C}} \right]$$

在 Q_v 、 p_0 一定的条件下 $k_c = \frac{1}{\sqrt[3]{C}} F_2\left(\frac{H}{\sqrt[3]{C}}, \frac{h}{\sqrt[3]{C}}, \frac{d}{\sqrt[3]{C}}, \frac{L}{\sqrt[3]{C}}\right)$

令 $H = \frac{H}{\sqrt[3]{C}}$ 、 $\bar{h} = \frac{h}{\sqrt[3]{C}}$ 、 $\bar{d} = \frac{d}{\sqrt[3]{C}}$ 、 $L = \frac{L}{\sqrt[3]{C}}$ ，则 $k_c = \frac{1}{\sqrt[3]{C}} F_2(H, \bar{h}, \bar{d}, L)$

函数 F_2 的形式通过分析实验数据得出。当假定其形式为 H, \bar{h}, \bar{d}, L 的指数和的形式时，公式计算的数据与实验数据相差较大。当假定函数 F_2 的形式为 H, \bar{h}, \bar{d}, L 指数积的形式时，公式计算的数据与实验数据较吻合^[4]，故确定函数 F_2 的形式如下所示

$$F_2(H, \bar{h}, \bar{d}, L) = A H^{b_1} \bar{h}^{b_2} \bar{d}^{b_3} L^{b_4}$$

从而有

$$k_c = A \frac{1}{\sqrt[3]{C}} H^{b_1} \bar{h}^{b_2} \bar{d}^{b_3} L^{b_4} \tag{2}$$

系数 A 及指数 b_1, b_2, b_3, b_4 由实验确定。运用最小二乘法对实验数据进行回归，最终得：当 $0.053 \leq H \leq 0.265, 0.007 \leq \bar{h} \leq 0.661, 0.814 \leq \bar{d} \leq 0.964, 1.45 \leq L \leq 2.10$ 时， A, b_1, b_2, b_3, b_4 的取值范围分别

为 $(-5217.2, -5144.2)$ 、 $(0.459, 0.861)$ 、 $(0.015, 0.165)$ 、 $(0.095, 0.629)$ 、 $(-0.992, -0.510)$ 。当系数 A 及指数 b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 按以上范围取值时,由式(2)所计算的 k_c 的单位为:MPa/ms。

图5(a)是设置条件为 $H=0.05$ 、 $h=0.65$ 、 $d=0.81$ 、 $L=2.10$ 时的 $p \sim t$ 曲线。图(b)是图(a)中切断现象局部放大后的效果。图(b)中虚线是切断线的模拟曲线,其斜率根据(2)式计算,实线是实测曲线。可以看出模拟曲线与实测曲线较相近,说明了(2)式的正确性和合理性。

由于在切断过程中压力随时间递减,所以 k_c 为负,其值表征了压力下降的快慢和稀疏波作用的强弱:斜率的绝对值越大,说明稀疏波的作用越强,反之越弱。

分析以上回归的结果可知:(1)指数 b_1 、 b_2 、 b_3 的值为正, b_4 的值为负。说明比例炸高 H 、比例测高 h 、比例水深 d 越大, k_c 的绝对值越大,切断过程中压力随时间变化越快,稀疏波的切断作用愈强;比例水平距离 L 越大, k_c 的绝对值越小,切断过程中压力随时间变化越慢,稀疏波的切断作用越弱。(2) b_1 、 b_4 的绝对值较大而 b_2 、 b_3 的绝对值较小。由此可知,对 k_c 的影响因素中,比例炸高和比例水平距离的影响较大,比例测高和比例水深的影响较小。

比例炸高 H 是对 k_c 绝对值大小的一个重要影响因素。在实验条件下,装药在浅层水中爆炸,由于400g球形装药的半径 $r_0=3.9\text{cm}$,实验设置装药最小沉深 $H_1=41\text{cm}$, $H_1 > 7r_0$,所以,入射冲击波与自由水面相作用,不会向空气中透射冲击波^[5]。因此,实验条件下,能量的损耗主要是由于水底爆炸成坑引起的。最大炸高 $H_m=26 < 33.5\text{cm} = d/2$,则入射波波阵面先到达水底,后到达水面。入射波到达水底后与水底作用形成爆坑,消耗能量,直达波压力峰值因此下降。此后,入射波到达水面,在水面反射形成稀疏波。实验观测表明: H 越大,形成的爆坑体积越小,反之越大^[4]。说明 H 越大,冲击波用于形成爆坑的能量越少,携带的能量越多,其在水面反射所形成的稀疏波也越强。故 k_c 的绝对值应随着 H 的增大而增大。 k_c 的绝对值随 h 、 d 增大,随 L 减小的物理意义,还需进一步研究探讨。

3.2.3 切断终止时间

对于直达波的水面切断现象,切断终止时间为激波持续时间,也为正压作用时间 t_+ (其含义如图6所示),其值可以用下式计算

$$t_+ = t_{ak} - p_{ak}/k_c \quad (3)$$

式中: p_{ak} 为图6中 W 点的压力,即切断开始时刻激波的压力。

实验数据表明:切断现象压力下降时间($t_+ - t_{ak}$)不超过激波持续时间 t_+ 的20%, $|k_c| \gg p_{ak}$ 。此条件下,由(3)式可得出: $t_+ \approx t_{ak}$, t_+ 随比例炸高、测高等变化的规律与 t_{ak} 一致。当所研究的问题不需要考虑稀疏波切断的过程时,且由于切断现象从开始到结束比较短暂,故切断终止时间 t_+ 可近似为 t_{ak} 。

根据以上观点,分析图4的实验数据,可得到以下认识:(i)实验条件下装药浅层水中爆炸,式(1)可用于近似计算激波的持续时间,其计算值与试验数据比较相近。(ii)在比例水深为一定值的条件下,当比例炸高和比例测高一定时,激波持续时间随比例水平距离的增加而减少;当比例水平距离和比例测高一定时,比例炸高越大激波持续时间越短;当比例水平距离和比例炸高一定时,比例测高越大激波持续时间越短。这些变化规律都是由于波在自由水面反射影响的结果。

3.3 对冲击波参数的影响

试验设置条件下,装药浅层水中爆炸,水中冲击波对水底做功形成爆坑等,消耗了能量,导致实测直达波比冲量、压力峰值比无限场或半无限场中相应值有所下降。在此基础上考虑水面切断现象对冲击波参数的影响。

3.3.1 对压力峰值的影响

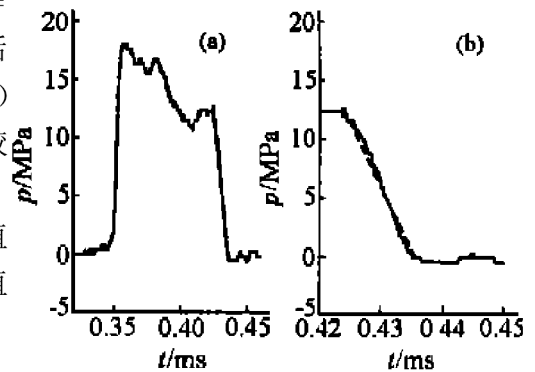


图5 水面切断现象模拟曲线

Fig.5 Simulating curves of the cutoff and that of measurement

在本文所研究的试验条件下，水面反射切断现象对冲击波压力峰值没有影响。经计算验证^[3]，试验条件下，冲击波在水面处发生的反射是规则反射——水面反射稀疏波滞后直达波到达。直达波压力衰减到一定值后，水面反射稀疏波在此压力值处将波形切断(如图 6 所示)。因而稀疏波不会削弱冲击波的压力峰值。

3.3.2 对正压作用时间的影响

图 6 中实线是 $H=0.26, \bar{h}=0.52, \bar{d}=0.81, L=2.10$ 时实测压力曲线，其所对应的正压作用时间为 t_+ 。为了查明切断现象对正压作用时间、测点处比冲量的影响，按切断开始时刻之前实线的衰减规律绘出模拟曲线，如图中虚线所示，它所对应的正压作用时间为 t_z ，其值取为切断开始时刻之前实线所对应时间衰减常数的五至七倍(时间衰减常数的计算方法参见文献[1])。 t_+, t_z 的单位均为 μs 。实测数据表明：当 $0.05 \leq H \leq 0.26, 0.14 \leq \bar{h} \leq 0.65, 0.81 \leq \bar{d} \leq 0.84, 1.45 \leq L \leq 2.1$ 时， t_+/t_z 的取值范围为：40%~53%，即：切断现象“削掉”了正压作用时间的 47%~60%^[3]。

3.3.3 对比冲量的影响

表 1 水面切断现象波形的比冲量统计

Table 1 Some data of integrates of waves with cutoff by water surface

H / $(m/kg^{1/3})$	\bar{h} / $(m/kg^{1/3})$	\bar{d} / $(m/kg^{1/3})$	L / $(m/kg^{1/3})$	\bar{r} / $(m/kg^{1/3})$	I_c / $(N \cdot s/m^2)$	I_m / $(N \cdot s/m^2)$	I_∞ / $(N \cdot s/m^2)$	I_c/I_m	I_c/I_∞
0.05	0.52	0.81	2.1	2.15	1105.3	1601.9	2255.8	0.69	0.49
0.05	0.65	0.81	1.62	1.72	1394.4	2178.7	2734.1	0.64	0.51
0.14	0.65	0.81	1.78	1.85	1413.3	1909.9	2569.7	0.74	0.55
0.14	0.52	0.81	1.94	1.98	1359.6	1942.2	2427.8	0.70	0.56
0.26	0.14	0.81	1.94	1.94	1551.8	1915.8	2463.2	0.81	0.63
0.26	0.26	0.81	2.10	2.10	1427.4	1740.7	2302.2	0.82	0.62

在水面切断现象的影响下，直达波波形被“切断”，波的持续时间缩短，比冲量也因此被削减。表 1 为试验所测几组有代表性的数据。其中比冲量 I_c, I_m, I_∞ 的单位为： $N \cdot s/m^2$ 。表中， I_∞ 为相同 \bar{r} 处无限水介质中测点处的比冲量，根据文献[5]中的理论计算。 I_c 为图 6 中 t_+ 时间区间内实线所对应的比冲量，为直达波受到稀疏波切断作用后激波的比冲量； I_m 为图 4 中整个时间区间内虚线所对应的比冲量，表征了直达波不受稀疏波切断作用时激波的比冲量。 I_c, I_m 之值根据曲线的积分所得。

冲击波比冲量的大小标志着其做功能力。因此，切断现象削弱了冲击波做功的能力。实测数据表明：当 $0.05 \leq H \leq 0.26, 0.14 \leq \bar{h} \leq 0.65, 0.81 \leq \bar{d} \leq 0.84, 1.45 \leq L \leq 2.1$ 时， I_c/I_m 的取值范围为：64%~82%； I_c/I_∞ 的取值范围为：49%~63%^[3]。分析实测数据可知：(1)切断现象“削掉”了比冲量的 28%~36%；浅层水中直达波比冲量与无限场相比减少 37%~51%。表明冲击波对外做功的能力也减小了相应的数值。(2)由表 1 可看出：随着 H 的增大， $I_c/I_m, I_c/I_\infty$ 在其取值范围内均增大，即：比例炸高 H 越大，冲击波做功的能力越强。

4 两类切断现象的探讨

4.1 有两类切断现象的典型波形

在试验中，测到了有两类切断现象的波形，如图 7 所示。第一类、第二类切断现象分别如图中 $t_1 \sim$

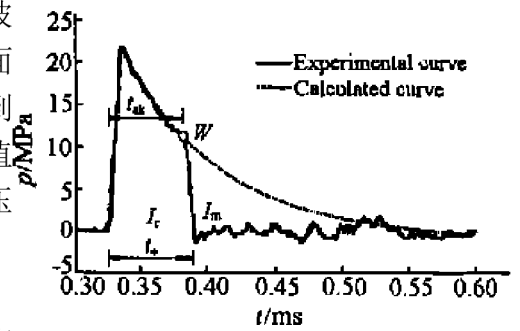


图 6 有切断现象的 t/ms 曲线

Fig.6 $p-t$ curve with cutoff and its simulation

t_3 段、 $t_2 \sim t_4$ 段所示。其中 t_1 、 t_2 为切断作用起始时间, t_3 、 t_4 为切断作用终止时间, t_0 为冲击波到达测点的时刻。根据已有的理论^[1,5]可知:这两类切断现象均为稀疏波所造成。称引起两类切断现象的稀疏波分别为第一、二种稀疏波。

通过对比可以看出,两类切断现象有明显不同:第一类切断现象持续时间较短,未将激波压力削减到零值;第二类切断现象在第一类切断现象之后发生,持续时间较长,将冲击波的压力削减至零值,说明第一种稀疏波的幅值较小,作用较弱;第二种稀疏波的幅值较大,作用较强。因此,造成两类切断现象的稀疏波的性质可能不同。

4.2 两类切断现象性质的推断

下面对这两类切断现象的性质进行分析判断。

部分波形的两类切断现象的切断起始、终止时间列于表 2~表 3。以 t_0 为初始时刻,则表 3 中 t_j 为根据线性理论^[1,5]计算的水面稀疏波到达测点的时间; $t_1 - t_0$ 、 $t_2 - t_0$ 为两种稀疏波到达测点所用时间, $t_3 - t_1$ 、 $t_4 - t_2$ 为两类切断现象的持续时间,表 2 与表 3 中时间单位均为 μs ,表 2、表 3 两表中,编号 1、2、3、4 所对应的数据,与图 3 中的曲线(a)、(b)、(c)、(d)分别相对应。

表 2 切断作用时间表(1)

Table 2 Cutoff time table (1)

编号	H /(m/kg ^{1/3})	\bar{h} /(m/kg ^{1/3})	\bar{d} /(m/kg ^{1/3})	L /(m/kg ^{1/3})	t_0 / μs	t_1 / μs	t_3 / μs	t_2 / μs	t_4 / μs
1	0.14	0.65	0.96	2.10	514.6	570	576.4	678.2	690.4
2	0.26	0.52	0.81	1.78	405.0	478.0	482.4	515.6	531.8
3	0.26	0.65	0.96	2.10	477.6	522.8	530.2	573.0	584.8
4	0.26	0.01	0.81	2.10	418.2	457.6	462.0	568.8	581.8
5	0.14	0.65	0.96	1.78	423.2	462.4	466.8	510.2	521.0
6	0.14	0.14	0.81	1.62	400.2	453.4	463.6	650.5	664.6
7	0.14	0.01	0.96	1.94	378.8	436.2	445.4	751.7	767.0

表 3 切断作用时间表(2)

Table 3 Cutoff time table (2)

编号	H /(m/kg ^{1/3})	\bar{h} /(m/kg ^{1/3})	\bar{d} /(m/kg ^{1/3})	L /(m/kg ^{1/3})	$t_1 - t_0$ / μs	$t_2 - t_0$ / μs	t_j μs	$(t_3 - t_1)$ / μs	$(t_4 - t_2)$ / μs
1	0.14	0.65	0.96	2.10	55.4	163.6	120.4	6.4	12.2
2	0.26	0.52	0.81	1.78	73.0	110.6	93.3	4.4	16.2
3	0.26	0.65	0.96	2.10	45.2	95.4	103.9	7.4	11.8
4	0.26	0.01	0.81	2.10	39.4	150.6	214.1	4.4	13.0
5	0.14	0.65	0.96	1.78	39.2	137.0	140.9	4.4	10.8
6	0.14	0.14	0.81	1.62	53.2	250.3	287.8	6.2	141.1
7	0.14	0.01	0.96	1.94	57.4	372.9	411.1	9.2	15.3

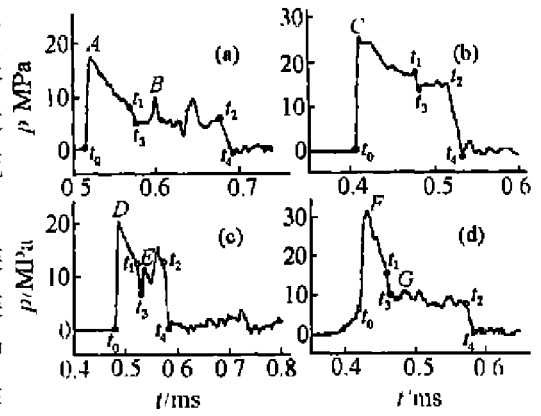


图 7 有两类切断现象的几个典型波形
Fig.7 Typical curves with two kinds of cutoff

分析表中的统计数据可知: $t_2 - t_0$ 数据接近于 t_j , $t_1 - t_2$ 数据与 t_j 相差较远。说明第二种稀疏波到达测点的时间与线性理论计算得出的水面稀疏波到达测点的时间较相近;而第一种则相差较远。再者,

根据已有的理论可知：一般情况下，水面切断现象将测点处的压力削减到零。第二类切断现象符合这一点。由以上分析可以判断： t_2 应为水面稀疏波切断作用开始时刻，第二类切断现象为水面稀疏波所引起，为水面切断现象。根据线性理论计算的 t_j 为第一次水面稀疏波切断作用的时间^[1,5]，因此第二类切断现象为冲击波在自由水面的第一次反射所引起。由于第一类切断现象发生在第二类之前，因此其并非水面切断现象。

4.3 第一类切断现象产生机理的探讨

4.3.1 水底稀疏波

文献[1]对水底稀疏波现象作了简要分析。前苏联科学家 Zamyshlysaev 等人认为该波是“水中冲击波在水池底部反射所引起的非线性效应之一”。与水面反射稀疏波的不同之处在于“水底反射膨胀波的幅值较小，持续时间较短，不能完全削减直达波的压力”。对于水底稀疏波产生的条件，Zamyshlysaev 认为“水底稀疏波只是在距装药中心一定距离处才会产生，此距离与直达波的入射角有关。”^[1]。

当 $c > b > a_0$ (c 为水底面径向波的传播速率， b 为横向波的传播速率， c 、 b 的值与水底介质的弹性模量、泊松比、密度等有关，具体确定方法见文献[1]， a_0 为当地声速)时，有水面和水底影响的水域可划分为五个区^[1]。各区出现的波形形状绘于图 8 中。在 I 区和 II 区有可能出现水底反射波所造成的切断现象，见 I 区和 II 区下方波形的 MN 、 RS 段^[1]。与图 7 中的波形相比较，可看到图 7 中的实测波形与 I 区下方的波形相似。

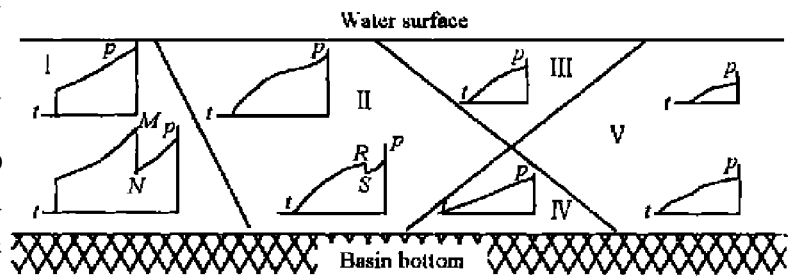


图 8 水面和水底非线性影响的不同区域

Fig. 8 Zones of nonlinear influence of free surface and basin bottom

结合第一种切断现象的特性，通过以上分析可以推断：第一类切断现象为水底稀疏波所引起。

4.3.2 水底稀疏波产生的机理

装药在水底或近水底爆炸后，冲击波在水中传播，到达水底时发生反射。水底介质在冲击波超压的猛烈作用下发生弹性变形，迅速向下运动。冲击波在水底反射，最初表现出刚性反射的压缩性质，而后表现为稀疏性质^[7]。这是由于一方面入射波剧烈衰减，另一方面，水底介质的运动速度超过其后水质点向下运动的速度^[1]，在水底附近水域中某处开始呈现拉伸状态，水不能承受张力，从而产生了一个近似真空的空化区域(简称空泡)^[1,7]，因空化效应而被拉断的水(空化水)利用已获得的动能，在重力作用下向下运动，不断补充能量使其继续运动^[7](如图 9 所示)。在此过程中，空化区不断在水中扩张。由于空泡的声阻抗小于水介质的声阻抗，于是从空泡与水介质的接触面向水介质中传播稀疏波。此稀疏波传播到测点处便引起波形的切断现象，即水底反射切断现象，如图 7 中 $t_1 \sim t_3$ 段所示。

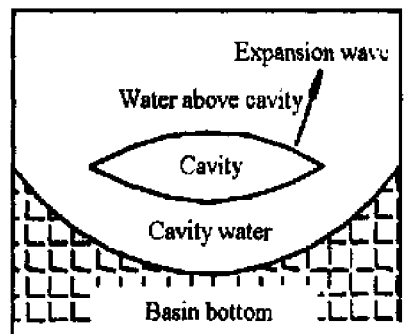


图 9 水底稀疏波形成示意图

Fig. 9 Schematic of generation of expansion from basin bottom

4.3.3 水底撞击压缩波产生的机理

此后，水底介质由于被逐渐压密，紧随水底介质的空化水运动速度降低；空泡上水质点向下运动的过程中，前方为空泡，基本上不受阻滞，若某一时刻，空泡上水在高温高压气体推动下加速向下运动，空泡被压碎，空泡上水就赶上空化水，并与之相撞^[1]。伴随撞击，产生了沿撞击面向上、向下传播的压缩波，称为水底撞击压缩波。此压缩波传播到测点处，便会测到如图 7 中 B 、 E 、 G 点所示的压力波峰。Zamyshlysaev 等人的研究表明：撞击压缩波的压力峰值大约为直达波压力峰值的一半。图 7 中波形的有关数据基本符合这一点。实测水底撞击压缩波波形进一步说明了水底稀疏波的存在和以上对水底稀疏波

解释的合理性。从图 7 和表 2、表 3 可以看出:水底稀疏波对测点处正压作用时间和比冲量的影响不大。

5 结 论

装药在浅层水中爆炸,受界面影响,实测压力波形除了出现水面切断现象外,还可能产生水底切断现象。这两种切断现象均体现了界面对冲击波的削弱影响。本文的研究表明:(1)自由水面对激波的削弱影响较强:在规则反射范围内,水面切断现象削减了直达波正压作用时间的 47%~60%,比冲量的 28%~36%。通过分析本文所获得的切断线斜率的计算公式可知:试验条件下,比例炸高、比例测高、比例水深越大,水面反射稀疏波的切断作用愈强;比例水平距离越大,水面切断作用越弱。其中比例炸高和比例水平距离对水面反射稀疏波的强弱特性影响较大,比例测高和比例水深对其影响较小。对于有水面切断现象的波形,可用声学理论近似计算直达波的持续时间;研究表明该时间值随比例炸高、比例测高和比例水平距离的增加均减小。(2)水底对激波的削弱影响较弱。冲击波在水底反射,由于空化效应,可能产生水底稀疏波。水底稀疏波幅值不大,其所造成的切断现象持续时间较短,不能将直达波压力削减至零值。

参考文献:

- [1] Zamyshlysaev B V. Dynamic Loads in Underwater Explosion[R]. AD-757183. 1972. 86-120.
- [2] 钱胜国,张伟林,徐光耀. 近自由水面下爆炸时水中激波特性[J]. 爆炸与冲击, 1983, 3(4): 53-63.
- [3] 张鹏翔. 单个球形装药浅层水中爆炸实验研究[D]. 南京:工程兵工程学院图书馆, 1997. 42-45.
- [4] 顾文彬. 装药浅层水中爆炸冲击波特性试验与数值模拟研究[R]. 南京:解放军理工大学工程兵工程学院, 2000.
- [5] 叶序双. 爆炸作用理论基础[M]. 南京:工程兵工程学院, 1996. 360-398.
- [6] 库尔 P. 水下爆炸[M]. 罗耀杰,等译,北京:国防工业出版社, 1960.
- [7] 王林. 水中冲击波传播规律及在水压爆破中的应用[J]. 爆破, 1994, 4: 45-48.

Discussions of Blasting Shock Waves Cutoff in Shallow-layer Water

ZHANG Peng-xiang, GU Wen-bin, YE Xu-shuang

(*Engineering Institute of Engineering Corps, PLA University of Science and Technology,
Nanjing 210007, Jiangsu, China*)

Abstract: In order to verifying the influences of cutoff on shock waves, Some experimental researches and analyses have been done. It mainly discusses the phenomena' characteristics, mechanism, and its influences on parameters of shock waves. The parameters such as the starting and ending time and the slope of cutoff curves are researched and analyzed by experimental methods. Some analyses are made by static methods on the influences of the cutoff on positive time, impulsion and so on. Combining with theories and measurement data, Curves analyzes has been done with two kinds of cutoff, and their properites are judged. The mechanism of expansion waves reflected from basin bottom is discussed, and its influences on shock waves are analyzed. The researches indicates that the weaken effects of the interface in shallow-layer water represented as cutoff by water surface and basin bottom. The effects of the former were strong and the latter are weak.

Key words: cutoff; shallow-layer water; reflected by water surface; reflected by basin bottom