

在海淤中爆破的一些现象和问题*

许连坡 顾道良 李世海

(中国科学院力学研究所)

摘要 本文研究了连云港海淤在爆炸作用下的性质;给出了模型实验中爆破坑和鼓包运动的测试结果及其分析。

关键词 淤泥中爆破 幕律流体 爆破坑 鼓包运动 最小抵抗线

一、前言

实践表明,利用炸药爆炸来破坏坚硬的岩石,砼,甚至钢铁是合理的,有效的。但是利用炸药去炸“强度”很小的海底淤泥,是否仍具有其合理性和有效性,则须另做研究。

在海底淤泥中爆破,基本上是个新课题。尽管国内外都有些资料,但未见系统深入的研究成果。为此,我们进行了海淤爆破的室内模型实验。

二、实验布置和方法

实验布置如图1所示。捞取海底淤泥放在爆炸箱中,抹平。爆炸箱为高1.6米,长和宽各

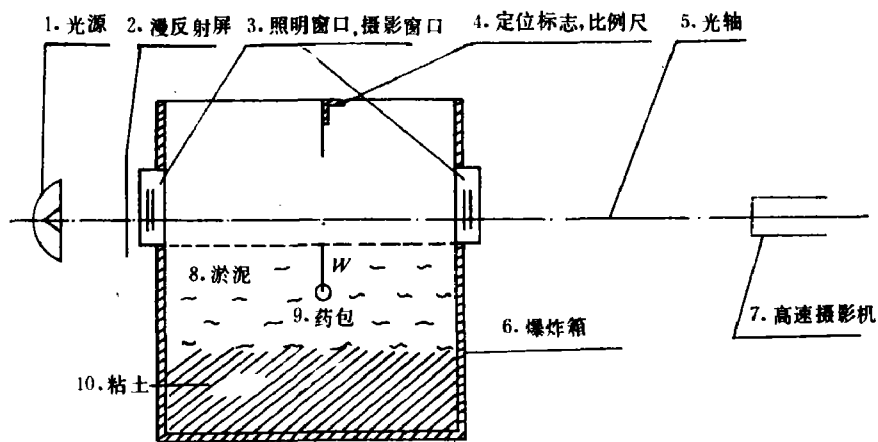


图1 实验布置图

Fig.1 Arrangement of experiment

1. Light source; 2. Diffuse screen; 3. Illuminative window, photographic window; 4. Locator, scale; 5. Light axis; 6. Blast box; 7. High speed camera; 8. Seaooze; 9. Charge; 10. Clay

* 本文是连云港建港指挥部,力学所,三航设计院和锦屏磷矿四方合作项目“爆炸法处理海淤软基”研究的课题之一

1988年11月21日收到原稿,1989年3月20日收到修改稿。

1.5米的铁箱。其上装有照明窗口和摄影窗口，窗口镶嵌4厘米厚的无色透明有机玻璃。箱中泥面高度基本和窗口底边平，以利于高速摄影。

爆破的最小抵抗线 W 为10—25 cm，即 W 不超过爆炸箱边长的1/6，以消除边界影响。药包用10—15克粉状TNT制作，圆柱形，高径比为1:1；纸壳，石蜡处理。装药密度为 1.2g/cm^3 。用工业电雷管起爆，雷管的(1/2)~(2/3)插入药包，其当量按1.5克TNT计算。故装药量 $Q=11.5-16.5$ 克。多数情况下， $Q=11.5$ 克。

实验中用ZL-1型高速摄影机测鼓包运动过程，用爆后直接测量断面来确定爆坑的形状和尺寸。

下面给出实验结果及分析。

三、淤泥中爆破发展过程的基本特征

1. 连云港海淤是粘性流体

测试表明，对连云港海底淤泥，其切应力和速度梯度的关系可用下式表示

$$T = \eta \left(\frac{\partial u}{\partial n} \right)^\alpha, \quad 10^{-2} \frac{1}{\text{s}} < \frac{\partial u}{\partial n} < 10^3 \frac{1}{\text{s}} \quad (1)$$

其中 T 为切应力， u 是介质流动速度， $\partial u / \partial n$ 为其法向微商。 $\alpha=0.11$ ，为无量纲指数； $\eta=2810\text{Pa}\cdot\text{s}^\alpha$ 。(1)式表示该介质为幂律流体。

因 α 值很小，故 T 对 $\partial u / \partial n$ 的变化不敏感。当 $\partial u / \partial n$ 很大时， T 仍很小。如对 $W=10\text{cm}$ ， $u=10^2(\text{m/s})$ ，则 $\partial u / \partial n=10^3(1/\text{s})$ ，这时 T 为 $5.88 \times 10^3(\text{Pa})$ 。相反，若自(1)中解出 $\partial u / \partial n$ ，则有

$$\frac{\partial u}{\partial n} = \left(\frac{T}{\eta} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (2)$$

这时 $1/\alpha$ 很大。当外力 T 值(Pa)大于 $\eta(\text{Pa}\cdot\text{s}^\alpha)$ 值时， $\partial u / \partial n$ 即可很大；如 $T/\eta=2(1/\text{s}^\alpha)$ 时， $\partial u / \partial n=5 \times 10^3(1/\text{s})$ ，而当 $T/\eta=0.5(1/\text{s}^\alpha)$ 时，则 $\partial u / \partial n=2 \times 10^{-3}(1/\text{s})$ 。即 $\partial u / \partial n$ 很敏感地依赖于 T/η 。当外力 T 与 η 之比 $T/\eta > 1 \times 1/\text{s}^\alpha$ 时，即可产生较大的速度梯度，介质可产生较快的流动。而当 $T/\eta < 1 \times 1/\text{s}^\alpha$ 时，则速度梯度很小，介质流动很慢，以致有时象固体。显然， η 是一个重要的特征量。

2. 淤泥中爆破发展过程的基本特征

淤泥的前述性质决定了其爆破发展过程的特征。在爆炸的高压下，淤泥的强度和粘滞力可忽略不计；同时，在鼓包的主要部分中，惯性力很大，因而这时的粘滞力也失去意义，介质表现出理想流体的性质。因此，爆炸空腔中不产生空腔裂缝，鼓包中的介质是连续的。这是它和上及岩体中爆破的重要差别之一。

当自由面影响出现时，鼓包运动即开始，如图2。鼓包发展到一定程度时，在鼓包顶点的四周产生破坏，鼓包中被破坏的介质连同爆炸产物一起飞散，如图3。在破坏区外，介质不能脱离母体。便在运动阻力和重力的作用下减速和回落，形成可见爆坑，如图4。

当比药量 Q/W^3 较大时，鼓包运动速度大，其中的破坏区也大，抛出的介质的相对量增加，其致鼓包中大部分介质被抛出，如图5。当 Q/W^3 小时，鼓包中被破坏的部分减少，抛出的介质质量也相对减少，甚至不能抛出介质，只在鼓包中产生一个小洞，放出爆炸产物。

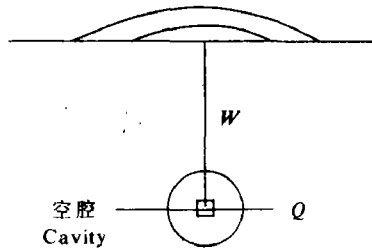


图2 鼓包刚开始时的情况

Fig.2 Initial condition of bulging movement

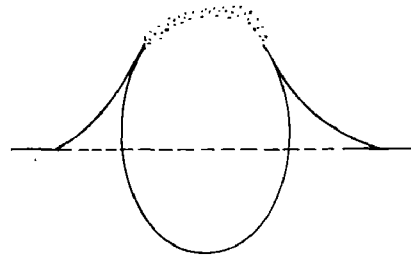


图3 鼓包已经破坏

Fig.3 Ruptured bulging

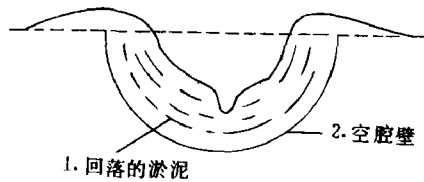


图4 形成可见爆坑

Fig.4 Form of blasting crater

1. Dropped ooze; 2. Cavity wall

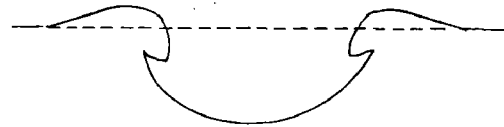


图5 强爆炸的爆坑情况

Fig.5 Blasting crater of intense blast

这时不仅不能形成爆坑,反而在泥面上形成隆起,如图6。

可见影响淤泥中爆破效果的关键因素之一是它的破坏条件。淤泥一旦破坏,便失去连续性,即可抛出。由于破坏时鼓包的厚度远大于淤泥中固体颗粒的尺寸,因而它是连续介质的宏观破坏。

四、爆坑分析

1. 参数分析

爆破坑是爆破形成的最后结果。因此,它受全部爆破过程的影响。在本问题中,可变独立无量纲参数有三个:一是比药量 Q/qW^3 , 这里的 q 可理解为装药密度。二是粘滞力与惯性力之比 $\eta(\partial u/\partial n)^a/\rho n^2 = \eta(c/W)^a/\rho c^2$, 其中 c 是介质的声速, ρ 是其密度。由于 a 很小,在我们的实验中, W 从0.1 m变到0.25 m, W^{-a} 改变10%。三是重力和粘滞力之比 $\eta/\rho g W (W/g)^{a/2}$ 。据前边的分析,重力是外力,若重力较大,介质将产生流动,爆坑不能保持其原有形状和大小。计算表明,当爆坑深度小于12 cm时,介质的流动可以忽略不计。但实际上,实验中可以看见深40 cm的爆坑,这可能是边界条件和坑中有水引起的。在我们的实验中,可见深度均不超过20 cm,因而它基本是爆破直接形成的。这时重力的作用可忽略。因而,本问题中有意义的独立可变无量纲参数只有一个 Q/qW^3 。

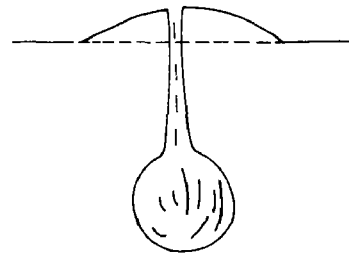


图6 不出爆坑的情况

Fig.6 Condition of blasting no crater emerged

2. 爆坑的形成

只有当 Q/W^3 大于 1.0 kg/m^3 时才出现可见爆坑，其理想化断面如图4。它是由爆炸空腔和回落的淤泥叠加而成的。空腔和可见爆坑之间为回落的淤泥，有时其间尚存有空隙。当 $Q/W^3 \geq 2.0 \text{ kg/m}^3$ 时，回落已很少，情况已如图5。

由于介质是扰动过的淤泥，扰动分为两种：一是局部随机分布的切口，它相当于岩块间的缝隙；其二是变形扰动，即淤泥受到了较大的变形，但未破坏，仍是连续的泥块。它相当于岩块。由于泥块之间的切口被水充填，失去粘滞力，且泥块的尺寸和爆破规模相当。介质的这一不均匀性对爆坑形状的影响较大。

3. 爆坑尺寸

实验所得结果如图7的曲线1。它可用关系

$$2n = 2 \left(\frac{Q}{W^3} - 0.75 \right)^{0.5} \quad (3)$$

近似。由此可得药量计算公式为

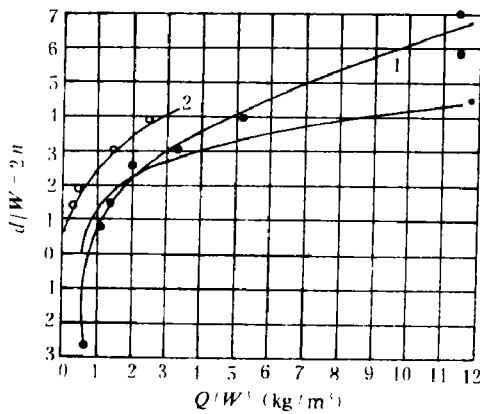


图7 d/W 和 Q/W^3 的关系

- 1 — 模型实验的结果；
- 2 — 现场实验的结果；
- — 包氏公式

Fig.7 Relation of d/W with Q/W^3

- 1 — Result of model experiment;
- 2 — Result of field experiment;
- — Formula of Bao

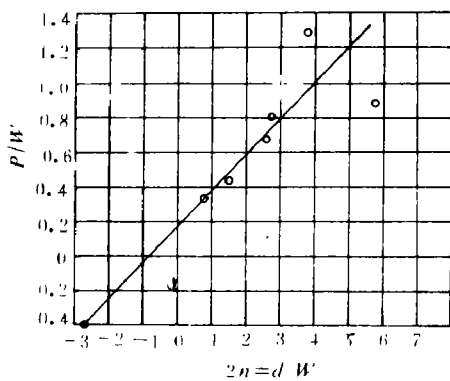


图8 P/W 和 $2n$ 的关系

Fig.8 Relation of P/W with $2n$

$$Q = 1.75(0.43 + 0.57n^2)W^3 \quad (4)$$

图中曲线2为现场实验的结果，相应的药量公式为

$$Q = 0.67(0.05 + 0.95n^2)W^3 \quad (5)$$

由于两种情况的介质，粘滞力和重力影响不同，导致系数相差较大。现场爆破时，淤泥表面有50~60cm厚的含泥饱和砂，爆后这一砂层被抛出。因而现场中爆坑的直径是这一砂层的爆坑直径。现场中的 W 值为1.5m到2.0m，这时 W^3 比模型中小40%，相差较大。此外，重力影响也已出现，但它对现场爆坑直径影响不大。

关系式(4)和(5)给出，要形成 $n=1$

的爆坑，模型中的药量为现场药量的2.5倍。

关系式(4)和(5)还表示，模型中和现场中的药量计算公式的基本形式是相同的，只是系数有差别。为了比较，图中还给出了包氏公式，即曲线*。上述结果表明，包氏公式对连云港海淤爆破是不适用的。其原因是淤泥中爆破和土岩中爆破的发展过程不同，前者是连续鼓包，流体介质，后者是非连续鼓包，两相流运动。

图8是可见爆坑深度 P/W 和 $2n$ 的关系，可以看到，二者线性关系如下

$$\frac{P}{W} = 0.2(2n+1) \quad (6)$$

与一般的土岩爆破中关系 $P/W = (1/3)(2n-1)$ 也有较大的差别，然而公式形式却类似。淤泥中爆坑要深些。

4. 爆坑的意义

图7和图8曲线是不能按几何相似的原则放大。粘滞力的影响已经在图7反应出来了，模型中的和现场中的曲线是不同的。对于重力影响，如前述，当重力较小时，爆坑形状和大小是能够保持足够长的时间的。但对于关系式(1)所表征的幂律流体，考虑到边界条件的影响，其爆坑可见深度最多只能维持40~50 cm。当爆破规模增大时，可见深度不能成比例地增加，即淤泥在重力下要回流到坑底，而这又影响爆坑直径。在这里几何相似律是不成立的。

尽管如此，图7和图8的曲线对于进行抛掷方量的估算，基本是可用的。因这时淤泥还来不及回流。故它们有实际意义。

五、鼓包运动

1. 鼓包表面质点的运动方向

图9是典型的鼓包各瞬时的轮廓线图，其上的凸起物为爆前预置的小木块。可以看到，木块的运动方向基本垂直于原泥面。实验表明：在淤泥中爆破，当泥面上无水时，泥面质点的运动方向，在较大范围内（大于 $W/2$ ），大致垂直于原泥面。这一点与土岩中爆破也不同。

在淤泥中爆破，当药包起爆后，首先出现的是由冲击波引起的泥面“起毛”现象，然后鼓包开始升起。当 $W = 10\text{cm}$ 和 $W = 13\text{cm}$ 时，似可出现由冲击波反射拉出泥片的现象。当 W 再增加时，这一现象消失，鼓包由泥的流动造成。由于鼓包运动，粘滞力影响很小，介质呈理想流体状态，同时其可压缩性也可忽略不计，因而其表面质点的初速度方向垂直于原泥面。

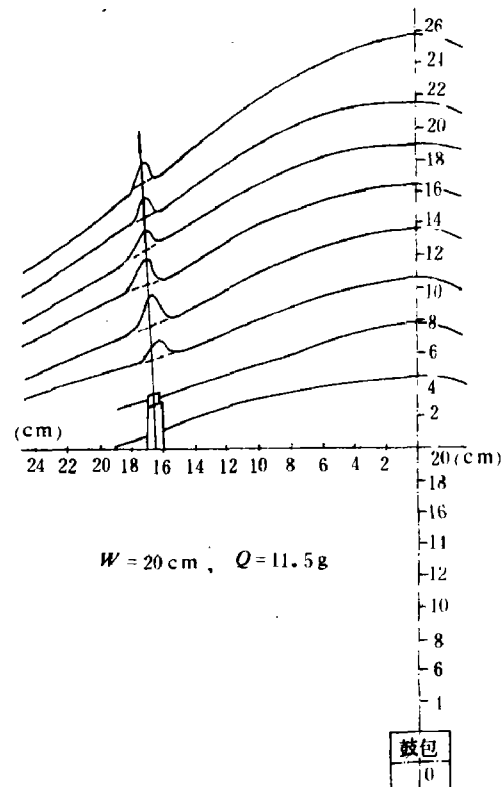


图9 鼓包表面质点运动方向

Fig.9 Moving direction of particles on the surface of the bulging

2. 鼓包的升高-时间曲线

沿垂直原泥面的方向求得鼓包顶点升起高度 h 和时间 t 的关系, 得图10, 对于距震中 $W/2$ 处的 $h-t$ 关系, 则得图11。可以看到, 当 W 较小时, 曲线只有加速段, 鼓包就破坏了。当

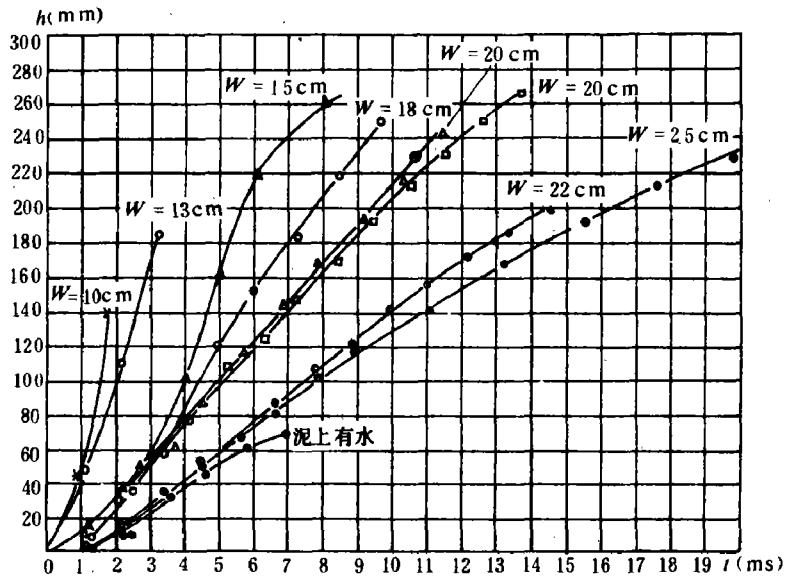


图10 鼓包顶点的 $h-t$ 关系, $Q = 11.5\text{g}$

Fig.10 Relation of $h-t$ on the pinnacle of the bulging

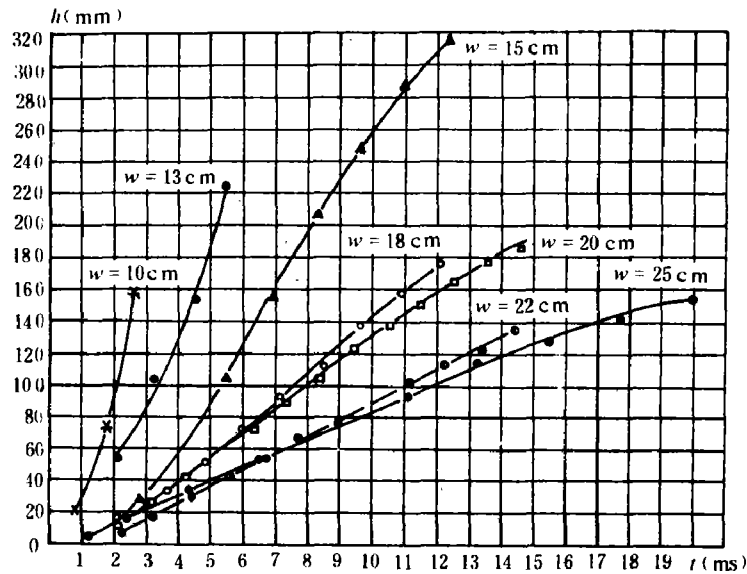


图11 距震中 $W/2$ 处的 $h-t$ 关系, $Q = 11.5\text{g}$

Fig.11 $h-t$ relation at a site of $W/2$ from epicentre

W 增加时, $h-t$ 曲线出现减速段。因装药和介质不均匀性的影响,带“*”的曲线是不正常的,应予去掉,故我们可以看到, $h-t$ 曲线有加速过程和减速过程。同时分析表明,它们还是等加速和等减速过程。对于同样规模的粘土中爆破是看不到这些过程的。

由于淤泥的可压缩性小,鼓包开始的时间早,空腔中爆炸产物的剩余能量大,且是连续鼓包,因而爆炸产物后期加速过程显著。粘土爆破则正好相反。因而在小规模爆破时看不到鼓包加速过程。

至于减速过程,对于淤泥中爆破,则主要是由大气压力引起的。而在粘土中爆破,因鼓包破坏很早,空腔中产生负压时已不影响介质运动了。

由于淤泥的可压缩性很小,故泥面上鼓包的体积应大体等于爆炸产物所占体积。据此可算得爆炸产物的压力 p_b 和鼓包升起高度 h 的关系。再令 p_b 等于大气压力 p_0 ,即可求出减速开始时鼓包的高度 h_* 。它和 W 的关系如图12。由于鼓包中心受堵塞影响较大,故我们的 h_* 值是对应图11的。可以看到,二者符合得较好。计算结果也表明,对 $W = 10\text{cm}$ 和 $W = 13\text{cm}$ 的爆破,在图10和图11上是不能出现减速过程的。

在低压段爆炸产物的压力 p_b 和其占有体积 V 的关系为 $p_b \propto V^{-1/3}$, 而 $V \propto h^3$, 故大致有 $p_b \propto h^{-4}$ 。当减速开始后不久,和 p_0 相比, p_b 即可略去,而 p_0 是常值,同时减速过程又是等减速的。减速度值可求出。据此即可算出鼓包中泥层的厚度 H^*/W (考虑到介质运动是上向的), 它和 W 的关系如图13所示,大致为线性关系。当 $W \leq 13\text{cm}$ 时, $H^*/W - W$ 关系预示,减速前鼓包即已破裂。这是符合实际情况的。当 W 较大时,临空面的影响变小,对称性

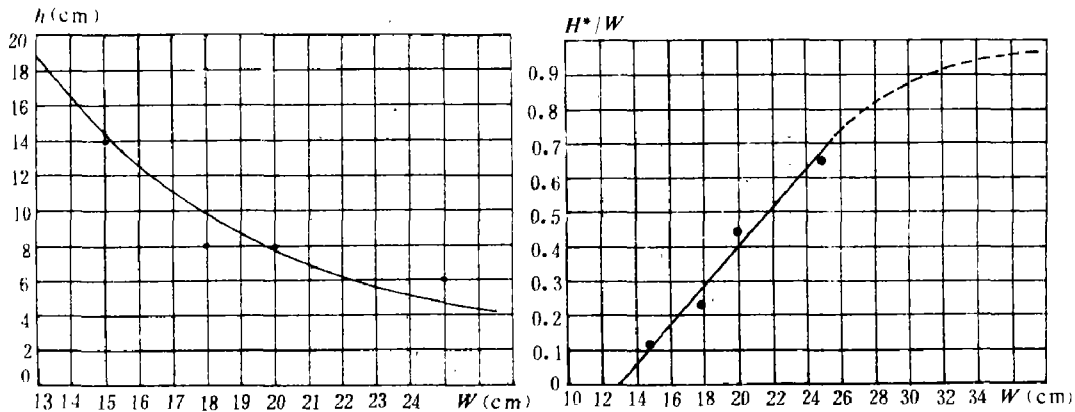


图12 h_* 和 W 的关系

Fig.12 Relation of h_* with W

图13 H^*/W 和 W 的关系

Fig.13 Relation of H^*/W with W

增加,故 H^*/W 的渐近值应为1。这一结果也和粘土中爆破不同,后者 H^*/W 值大致为常数,主要是由空腔膨胀,介质压缩引起的。鼓包开始后,其厚度变化不大。对淤泥,可压缩性很小,鼓包开始前介质的压缩量也很小。故其鼓包厚度的变化主要是鼓包开始后产生的。考虑到鼓包表面的质点是上向运动,周向伸长并不大,因此要产生鼓包厚度的迅速减少,只有其内层介质迅速“回流”。这一现象是否存在及其产生的原因尚待研究。

3. 鼓包升起的最大速度 v_m

在这里,由于惯性力很大,粘滞力和重力都可忽略,因而 v_m 只和比药量 Q/W^3 有关。利用

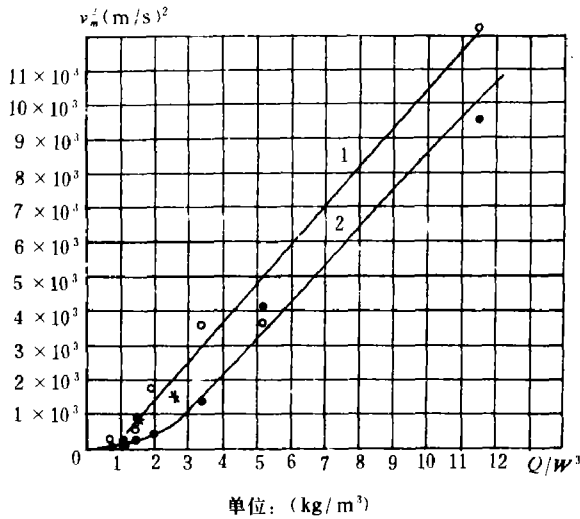


图14 v_m^2 和 Q/W^3 的关系

Fig.14 Relation of v_m^2 with Q/W^3

- 1 - Values of bulging pinnacle ;
- 2 - Values at a site of $W/2$ from the epicentre ;
- * - Values of field blasting

力之比为 $10^2 \sim 10^3$ ，对应的 v_m^2 值为 $300 \sim 500 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。它接近于淤泥流动由层流向湍流转变的雷诺数值^[2]。因此，当 $v_m^2 > 300 \sim 500 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 时，鼓包顶点附近的介质，是否已出现湍流运动，则是一个有待进一步研究的问题。自然，鼓包四周的边缘部分则是层流运动。

4. 抛掷问题

连续鼓包和动能效率高是对抛掷有利的。它可提高堆积体的集中性和节省药量。我们把关系式(4)和(5)改写成下式

$$n = \frac{\lambda}{2} \left(\frac{Q}{W^3} - q_0 \right)^{0.5} \quad (8)$$

对于模型爆破， $\lambda = 2$ ， $q_0 = 0.75$ ；对于现场爆破， $\lambda = 2.5$ ， $q_0 = 0.033$ 。假定爆坑中介质均被抛出，其爆坑形状为圆锥体，则爆坑体积为

$$V_b = \frac{\pi}{3} n^2 W^3 \quad (9)$$

当比药量 Q/W^3 不太大时，求得抛方耗药量为

$$\frac{Q}{V_b} = \frac{12}{\pi \lambda^2} \frac{Q}{\frac{Q}{W^3} - q_0} \quad (10)$$

利用图14，取抛距为100米，抛射角为 45° ，则由上式可估算得抛方耗药量不超过 1 kg/m^3 。和土岩爆破相比，这个指标是可以接受的。故在淤泥中用爆破抛方经济上是可能的。但由于

升高 h 和时间 t 的关系，就得到 $v_m - (Q/W^3)$ 关系，如图14。曲线1是鼓包顶点的，曲线2是距震中 $W/2$ 处的，*是现场爆破的值。二者均是直线关系。对曲线1，可用关系

$$v_m^2 = 1120 \left(\frac{Q}{W^3} - 0.75 \right) \quad (7)$$

近似。这里 v_m 的量纲是 m/s 。 v_m^2 的数值表明，淤泥中爆破，其动能效率可能比粘土中高一倍。

关系式(7)表示，当 $Q/W^3 \leq 0.75$ 时， $v_m = 0$ ，当 $Q = 11.5 \text{ 克}$ ， $W \geq 25 \text{ cm}$ 时，这一条件被满足。但 $W = 25 \text{ cm}$ 的爆破是有鼓包运动的。这表明，关系式(7)不能代表小比药量的情况。图14的曲线2也表明了这一点，当 Q/W^3 较小时， $v_m^2 - Q/W^3$ 曲线的斜率变小。曲线特征的改变意味着运动性质的改变。计算表明，当 $v_m^2 - Q/W^3$ 曲线斜率改变时，其惯性力与粘滞

重力的作用，在淤泥中却无法形成有工程意义的爆坑，这已为实践所证实。

六、结论和问题

1. 关于实验的可信程度

影响实验精度的初始量为介质的均一性，炸药的均一性，最小低抗线 W 和装药量 Q 的误差。测试量为爆坑尺寸和鼓包运动。炸药为一次粉碎一次过筛，可保证其均匀度， Q 的误差小于1%。爆坑尺寸的误差小于1cm。鼓包速度的误差约为1m/s。本实验的主要误差来自介质的不均匀性和 W 不准；数据的分散主要是由这两个因素引起的。但对这两个因素我们还很难控制。因此，本实验不能反应介质性质所引起不太敏感的现象及有关问题，同时，实验中有关参数对比药量 Q/W^3 的依赖关系的误差较大。

2. 几个结论

(1) 介质性质 在高压载荷或高速变形时，淤泥的粘滞力可以忽略不计，它呈现理想流体的性质。在鼓包运动中还可以看成理想不可压缩流体。另一方面，在低压下，它又表现出某些固体的类似性质，即具有某种保持其原有形状的能力。

(2) 爆坑 淤泥中爆破，爆坑直径不能用包氏公式计算。又由于影响爆坑的参数除比药量 Q/W^3 外，还有粘滞力和重力。故这里几何相似律不能成立。但实验所得关系却可用来估算抛掷方量。

(3) 鼓包 当规模不是非常大时，在鼓包运动中，几何相似律大体成立，如图14中的*点。鼓包中可能存在湍流区和层流区以及内层介质的“回流”现象，故鼓包中介质的运动状态可能是很复杂的。

(4) 抛掷爆破 在淤泥中进行抛掷爆破，经济上可能是合理的，但无论是抛掷爆破还是挤压爆破，都不能形成有工程效用的稳定的爆坑。重力影响将使形成的瞬时爆坑基本消失。

3. 鼓包破坏问题

破坏的淤泥是成块的。一般情况下，鼓包破坏时，其空腔压力已很小，故对鼓包破坏起主要作用的可能是运动参量。对强爆破($Q/W^3 \geq 5\text{kg/m}^3$)，鼓包的破坏可能是由激波反射拉出泥片引起的。当 $W = 25\text{cm}$ 时，可见爆坑是负的，这时基本上不产生破坏，空腔中的爆炸产物是通过装药孔或淤泥的扰动界面放出的。

淤泥在爆炸作用下的破坏是非常重要的问题，也是值得进一步研究的问题。

参加本实验的还有章培德，和喜莲，倪祖平，吴正友和相如遥等同志。

参 考 文 献

- [1] 许连城，土中爆破鼓包运动过程的X光摄影研究，爆炸与冲击，4(2)(1984)，31.
- [2] Шищенко, Р. И., 著(袁恩熙, 陈家琅译), 泥浆水力学, 石油工业出版社, 北京, (1957).

PHENOMENA AND PROBLEMS OF BLASTING IN SEA Ooze

Xu Lianpo, Gu Daoliang, Li Shihai

(*Institute of Mechanics, Academia Sinica*)

ABSTRACT In order to study the possibility of the blasting method that may be used to treat the soft ground on the seabottom and find its technique problems, we made some model experiments in our laboratory. The experimental device is presented in fig.1. The disturbed ooze gotten from the seabottom has the character of power-law fluid which is shown in the relation (1). Because both η and α are smaller, the solidifying strength and viscous force may be neglected under blasting loading. In bulge developing, the inertia is larger than the viscous force, medium may be considered as an ideal fluid. So, the crack is not observed in the cavity and the medium in the bulge is continuous.

The viscous force is important for crater forming, but its variation is not large in the experiment. When the minimum burden W becomes larger, the gravity will make the ooze flow and changes the size of the crater; but, in our experiments W is not large, and the gravity has no effect to the measure of blasting crater. Therefore, the diameter of the blasting crater only relates to Q/W^3 . The results are shown in fig.7. The experimental results explain that the Boleskov's formula $Q = k(0.4 + 0.6n^3)W^3$ is not suitable to the blasting in the ooze.

In the bulge developing, one of the characters is that the moving direction of the particle on the bulge surface is vertical to the original (fig.9). The curves of the relation between bulging height and time are given in the fig.10 and fig.11. There exist both accelerative and decelerative periods in bulge developing. In the centre of the bulge, the particle velocity only relates with Q/W^3 by formula (7) which is obtained by experiments. In fig. 14, the data with the mark "*" are the results in field blasting. The geometric similarity law is satisfied in principle.

KEY WORDS blasting in sea ooze, power-law fluid, blasting crater, bulge moving, minimum burden.