

土中爆破鼓包运动过程 的 X 光摄影研究

许连坡 金辉 章培德

(1983年6月16日收到)

本文叙述了用X光透视法同时观察鼓包和空腔运动的方法,并给出了同样药量不同埋深下土中爆破的测试结果。土中爆破鼓包运动过程可分成两个阶段:第一阶段是由应力波在自由面反射造成的运动;第二阶段是由爆炸产物和空腔附近介质的固有运动造成的运动,这时可出现二次加速现象。第二阶段的出现,是由反射裂缝和由空腔发出的外行裂缝联通造成的。

一、前言

鼓包运动是抛掷爆破中抛掷体运动的重要阶段。从六十年代初,国外就开始利用高速摄影研究鼓包运动。同时,我们也结合工程爆破,野外爆破试验和实验室试验进行了大量的高速摄影观测工作,得到了许多重要的资料。近年,鼓包运动的野外观测工作又开始使用立体高速摄影技术,它可跟踪鼓包表面的许多质点,得到它们的运动轨迹。

无论平面高速摄影还是立体高速摄影都只能得到鼓包表面运动的情况;X光摄影则可以得到鼓包内外介质运动情况,因而可以更全面地了解抛掷体运动的规律。

二、实验方法

实验布置如图1, X光摄影技术如文献[1]。但有两点特殊要求,一是X光轴线要和模型表面相切。否则,斜射X光在模型表面附近造成图像边界有感光模糊区,影响图像质量和测试精度;二是在模型表面以上加挡板,因鼓包刚开始运动时隆起的介质质量很少,在强X光下,其图像被掩盖,加

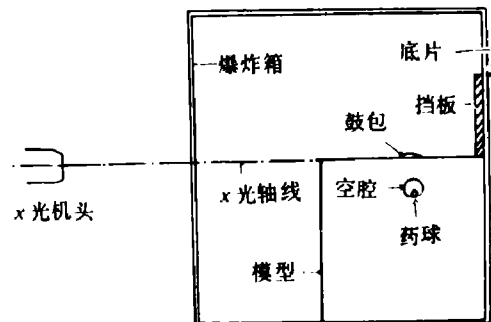


图1 实验布置图

挡板后, X光被挡板吸收减弱, 从而鼓包图像可在底片的感光灵敏范围内现出。挡板的厚度是随模型尺寸而变的。由于模型尺寸随摄影时间和药球埋深的不同而改变, 故挡板厚度也应相应地随之改变。

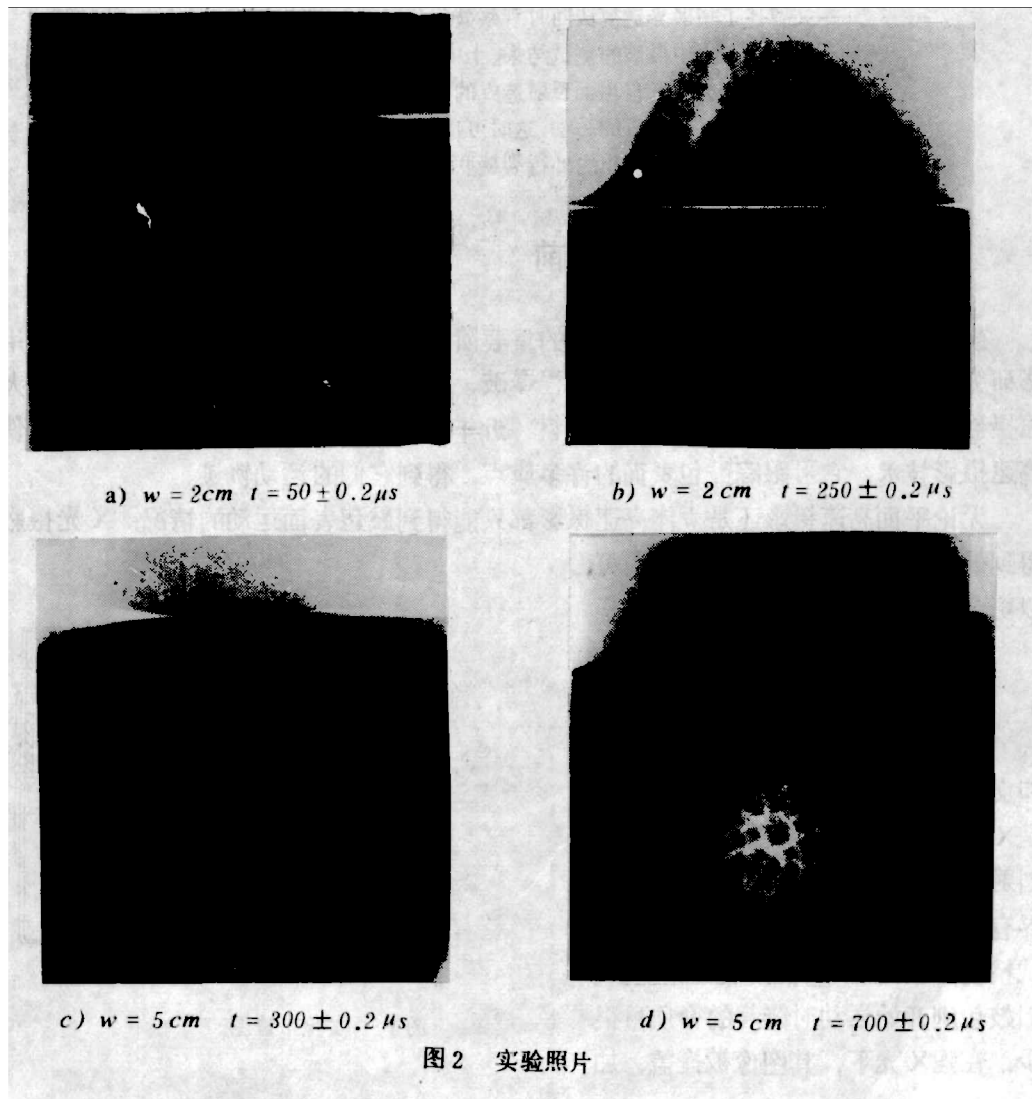
实验中使用普通地表土, 经过筛、配水后, 在模具中压制成模型。制模压力为 2 kg/cm^2 。土的含水量为 $14-17\%$, 容重 1.8 g/cm^3 。其他力学指标如文献[1]。

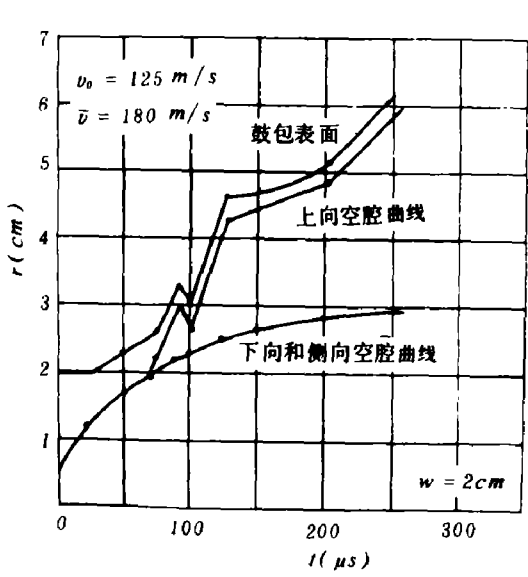
药球为压装的泰安炸药, 装药密度为 1.6 g/cm^3 , 药量为 0.72 g , 装药半径 0.477 cm 。在压制模型时, 按规定位置将药球压入土中。

三、实验结果和分析

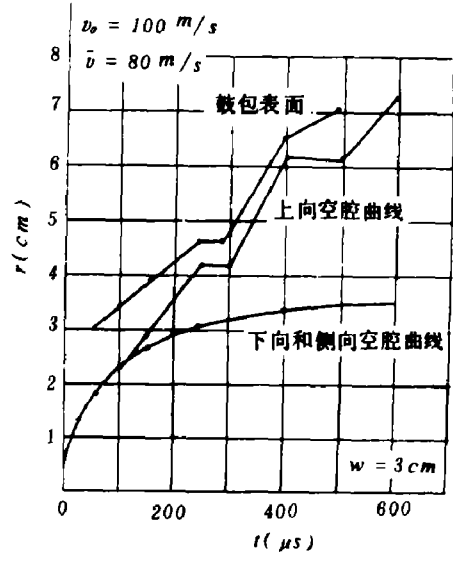
实验中药球不变, 改变埋深 (w): w 值分别为 2 cm 、 3 cm 、 5 cm 、 6 cm 和 7.5 cm , w/r_0 分别为: 4.2 、 6.3 、 11 、 13 和 16 , 这里 r_0 为装药半径。这一组爆破参数相当于加强抛掷爆破。

所得照片见图2。不同 w 值下的鼓包顶点和空腔运动曲线如图3—4。由此可分析鼓包运动过程和特征。



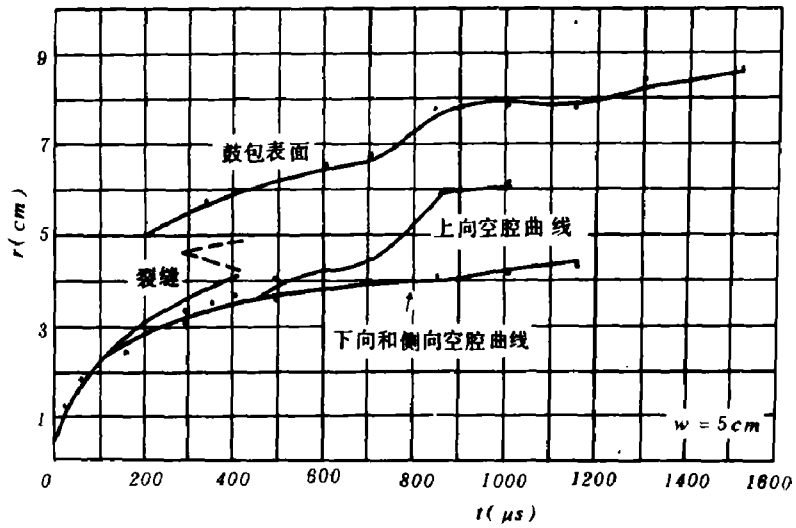


3 (a)

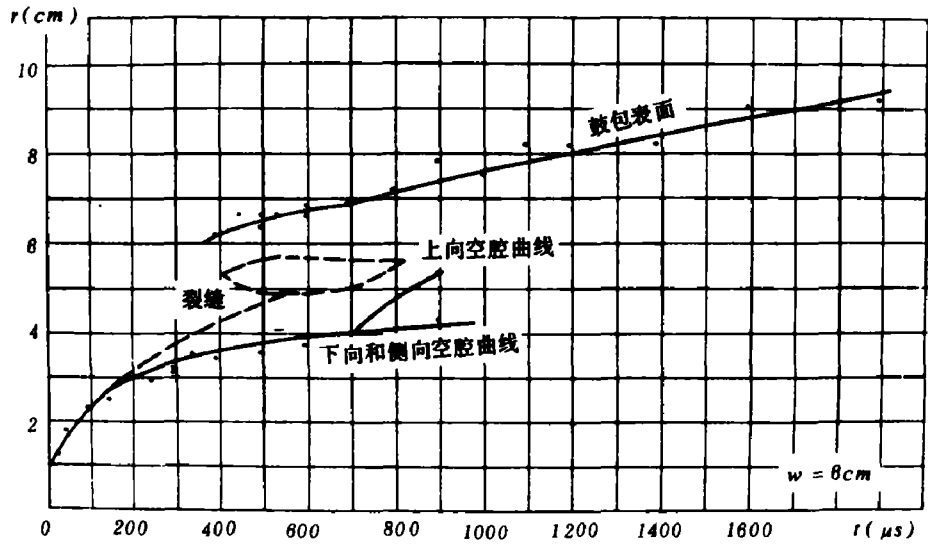


3 (b)

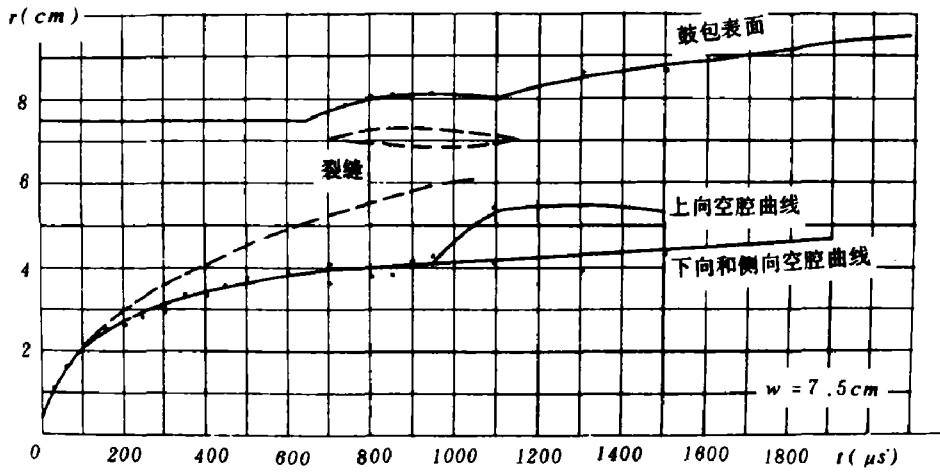
图3 鼓包——空腔曲线



4 (a)



4 (b)



4 (c)

图4 鼓包——空腔曲线

1. 鼓包开始的时间

在图 5 上给出了鼓包开始的时间和 w 的关系。为了便于分析问题, 图上同时给出了压密层走时曲线、空腔曲线和空腔开始定向膨胀的时间。可以看到: 当 $w < 5 \text{ cm}$ 时, 鼓包开始的时间和压密层走时差别不大, 即在本实验的精度下二者是一致的, 而且它也和速度峰值走时相一致。这说明, 鼓包运动的开始是由应力波到达地表引起的, 这时应力波接近于激波。

当 $w > 5 \text{ cm}$ 时, 压密层已看不清楚; 鼓包开始的时间和速度峰值走时已不重合, 前者比后者慢, 即尽管地表质点速度已达到最大值, 但鼓包运动并没有开始。这可能有二个原因, 一是鼓包运动联系着破坏, 故有滞后效应; 二是实验中鼓包开始的时间判断较难, 故误差较大。

综上所述, 鼓包开始的时间可分成两段。当 w 小于 5 cm 时, 它和压密层走时重合, 而后者已在文献 [2] 中给出。当 $w > 5 \text{ cm}$ 时, 鼓包开始的时间 t_H 可用下式表示:

$$t_H = 200 \left(\frac{w}{10r_0} \right)^3$$

空腔曲线的经验关系如文献 [1]。

2. 鼓包—空腔发展曲线的两个阶段

第一阶段中, 鼓包曲线光滑; 空腔膨胀规律与无限介质中相同。这一阶段的时间随 w 的增加而增加。鼓包顶点升起的净高度和相对高度如图 6。可以看到, 第一阶段中, 当 $w < 5 \text{ cm}$ 时, 鼓包顶点升起的净高度随 w 增加而增加, 而 $w > 5 \text{ cm}$ 时, 则随 w 增加而减小。但高度变化范围不大, 即当 w 由 2 cm 增加到 7.5 cm 时, 净高 h_1 的变化由 0.5 cm 增到 1.0 cm , 即相当于 $1.0r_0$ 到 $2.0r_0$; 相应地, 鼓包升起的相对高度则随 w 的增加而减少。这一阶段中, 鼓包中心的厚度随时间变化不大, 而它和 w 的关系如图 7, 即鼓包中心的厚度大致与 w 成正比, 且约为 w 的 $0.3 \sim 0.5$ 倍。

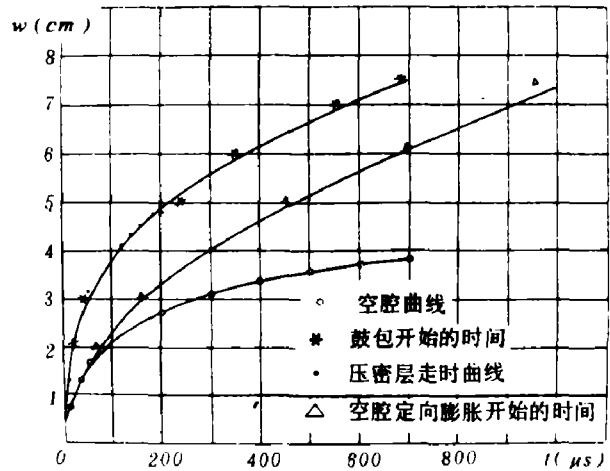


图 5 鼓包开始的时间和埋深 w 的关系

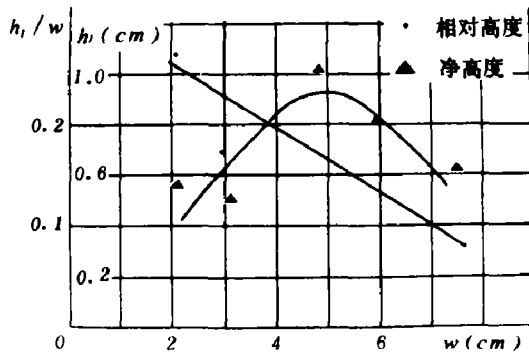


图 6 鼓包升起高度和 w 关系

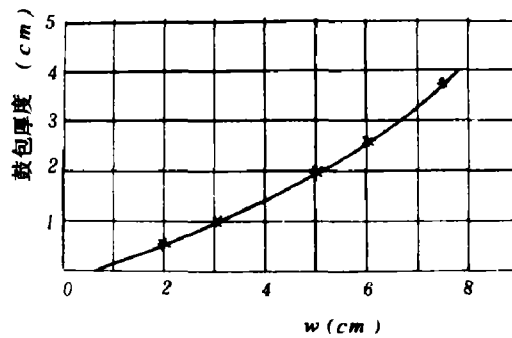


图 7 鼓包厚度和 w 的关系

鼓包发展的第二阶段中,鼓包—空腔曲线产生波动,且出现二次加速现象;空腔沿抛掷方向伸长,自由面已对空腔运动产生影响,但影响只出现在抛掷方向上;空腔的侧向和后向的运动规律仍和无限介质中相同。

3. 应力波反射的特征

由于鼓包发展过程分成两个阶段,故其表面运动速度也有两个值,即初速度 v_0 和后期平均速度 \bar{v} 。它们和 w 的关系如图 8。为了分析问题,图中还给出了无限介质中位置等于 w 值处的质点速度峰值^[2]。我们看到,当 w 较小时, v_0 和无限介质中速度相同,即应力波在自由面反射时,速度值并不立即予以响应,而要经过一段时间才能达到 \bar{v} , \bar{v} 约为 $2v_0$, 而滞后时间大约为 $50\mu s$ 。当 w 较大时,由于应力波有明显的上升时间,变形响应的滞后被掩盖,故便表现变形有立即相应的现象,即当 w 较大时, v_0 相当于无限介质中速度的二倍,而 \bar{v} 则和无限介质中速度相同。由此可见,对于土中爆破,应力波反射时变形响应有滞后现象,而其响应的效果是速度加倍。

当 v_0 超过无限介质中相应点的质点速度时,表面速度便可能超过内部介质的运动速度。这样,介质便会被拉开形成裂缝,即出现应力波反射所造成的剥离现象(如图 4)。裂缝大致平行于原地表面,略向爆心弯曲,其长度基本和鼓包范围相同(见图 9)。其位置随时间向爆心移动,移动速度和鼓包表面速度同量级,其空间速度则很小(如图 4b-4c)。当 w 足够大时,这一裂缝可在爆后看到。

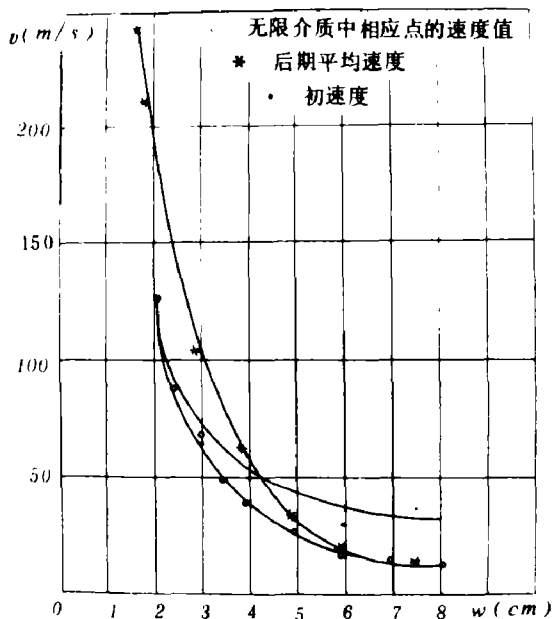


图 8 鼓包运动速度和 w 的关系

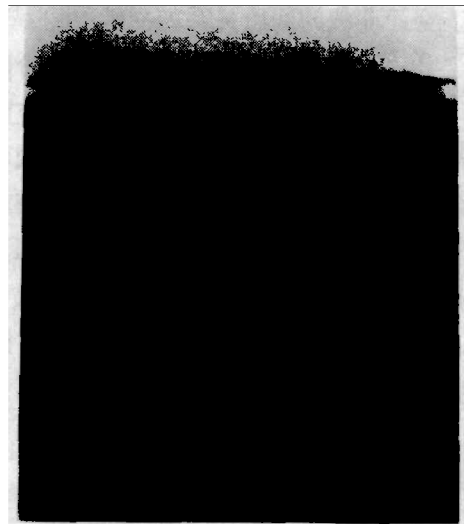


图 9 裂缝照片

4. 鼓包运动机理

这是一个已经讨论了 20 年的老问题,即波的作用和气的的作用问题。如前述,在鼓包发展的第一阶段中,空腔膨胀和无限介质中相同,出现应力波反射时的剥离现象。因为决定气体作用的空腔是对称的,显然,它是波的作用。反射裂缝相对于介质向爆心移动的同时,还有

一组由空腔向外发展的径向裂缝, 其发展规律大致如图4。当二者相遇时, 鼓包已经破坏, 这时, 即开始了鼓包运动的第二阶段。这个阶段产生空腔定向膨胀; 裂缝联通后内层径向裂缝扩大, 产生气体渗流; 由于内层介质赶上了外层介质, 导致反射裂缝闭合, 发生介质碰撞。内外介质的动量交换和气体渗流作用, 出现了二次加速现象。显然, 这就是气的作用。反射裂缝的闭合是由中心逐步向外发展的。

综上, 我们便得出土中爆破作用机理如图10所示。炸药爆炸后, 自 O 点发出应力波; 空腔曲线也自 O 点发出, 到 P 点则外行径向裂缝发出。当应力波到达自由面后, 自 A 点反射回传传播; 并形成介质的剥离现象。地表自 A 点开始运动, 如 AC , 这就是鼓包表面运动曲线。当反射裂缝和外行径裂缝相遇, 鼓包破坏, 由于气体和介质动量交换的作用, 鼓包开始二次加速, 空腔定向膨胀, 可见土中爆破的基本机理和一般的应力波反射问题是一致的, 其特殊的问题是裂缝的形成和发展及其和应力波的相互作用。

当 $w = 2 - 5 \text{ cm}$ 时, 随着反射波回传, 产生反射剥离现象; 当 $w = 7.5 \text{ cm}$ 时, 剥离现象只在表面附近发生, 剥离层并不和无限介质中外行径裂缝联通。第二阶段开始后, 径向裂缝才达到剥离层, 因此剥离层的位置并不是反射波前沿。应力波波形上升时间较长, 因此, 当反射波弱到已不能造成剥离后, 它仍可能在介质中引起径向裂缝, 使之和反射裂缝联通, 从而造成鼓包破坏, 即第二阶段开始。因此, 图10中的 AB 线, 一般说, 并不是反射波走时曲线。

由于在大 w 情况下, 剥离层的厚度相对变小, 且其运动速度迅速衰减(如图4c), 故它的作用变小。即在大 w 之下, 波的作用变小, 鼓包后期平均速度便和无限介质中相应点的速度相同, 这就是图8的结果。这时气体的作用是主要的。

综上, 我们基本上说清楚了土中单个集中药包爆破的作用机理, 给出其运动的物理图形, 但还不是定量的结果。

参加本项实验工作的还有黄良佐、边小兵、周燕军、杨业敏和杜建科等同志。

参 考 文 献

- [1] 许连坡、金 辉、章培德, 力学学报, 第五期(1982)。
- [2] 白善襄等, “用电磁法测量土壤中质点速度”, 第二届全国爆炸力学学术会议论文集, 扬州(1981)。

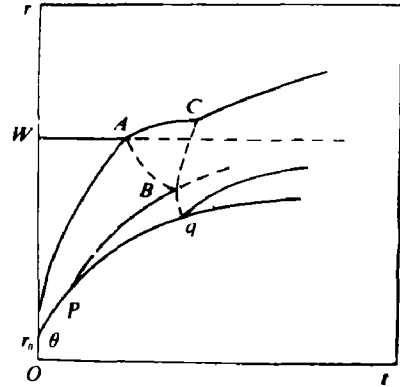


图10 爆破作用机理图

**X-RAY RADIOGRAPHIC RESEARCH ON THE
PROCESS OF MOUND DEVELOPMENT
IN SOIL BY BLASTING**

Xu Lianpo Jin Huei Zhang Peide

Abstract

A X-ray radiographic method for observing the movement of mound and cavity simultaneously is described and the measurement results of the blastings with same charge at different burial depths are also given. The process of mound movement in blasting can be divided into two stages. In the first stage the mound movement is caused by the stress wave and the wave reflected from free surface; while in the second stage it is caused by the inherent movement of explosive products and the media near the cavity. The secondary acceleration of mound may occur in the second stage. The second stage is initiated by the connection of reflection cracks and outgoing cracks from cavity.