

第七章 岩土中爆炸

7.1 概述

- **定义：** 所谓岩土是指岩石和土壤的总称，它由多种矿物颗粒组成，颗粒与颗粒之间有的相互联系，有的互不联系。岩土的孔隙中还含有水和空气。
- **分类：**
 - （1）坚硬岩石和半坚硬岩石；
 - （2）粘性土；
 - （3）非粘性（松散）土。

7.2 岩土中爆炸的基本现象

7.2.1 装药在无限均匀岩土介质中的爆炸

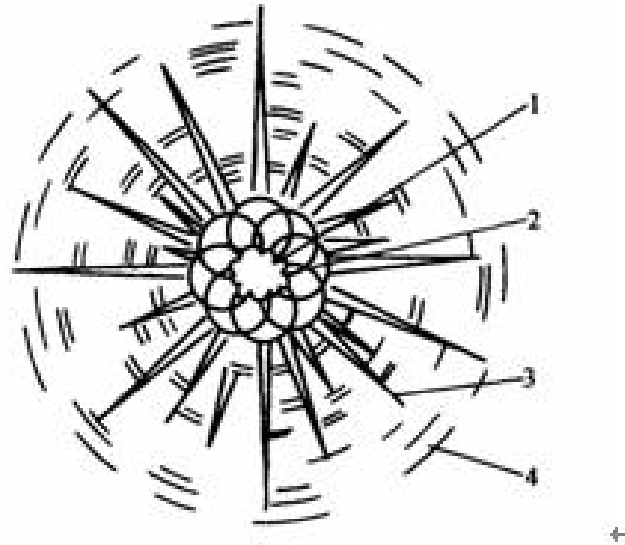


图 7-2-1 装药在无限均匀岩土中的爆炸
1—排出区；2—强烈压碎区；3—破裂区；4—震动区。

7.2 岩土中爆炸的基本现象

- 7.2.2 装药在有限岩土介质中的爆炸

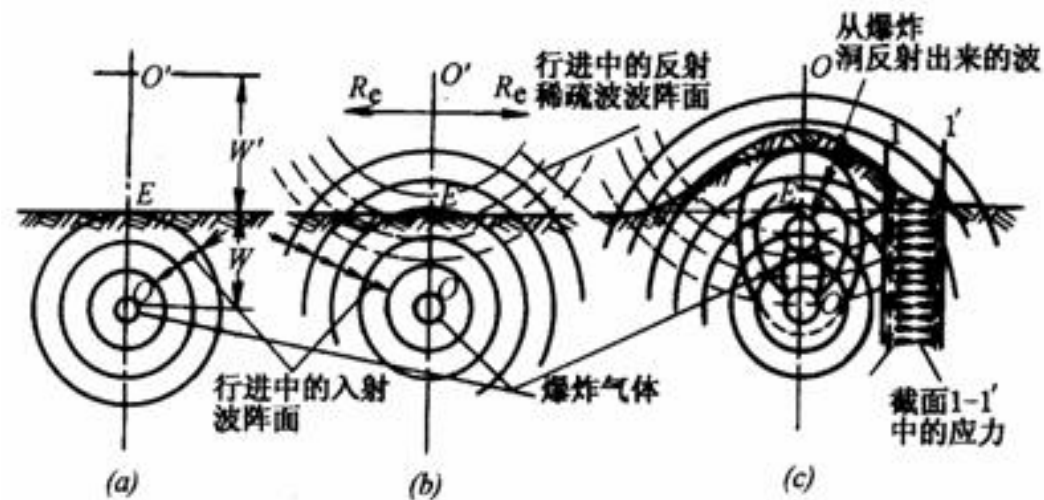


图 7-2-2 装药在有限均匀岩土中的爆炸

(a) 压力波的传播; (b) 反射稀疏波的形成; (c) 岩土的鼓起。

7.2 岩土中爆炸的基本现象

分类：松动爆破现象

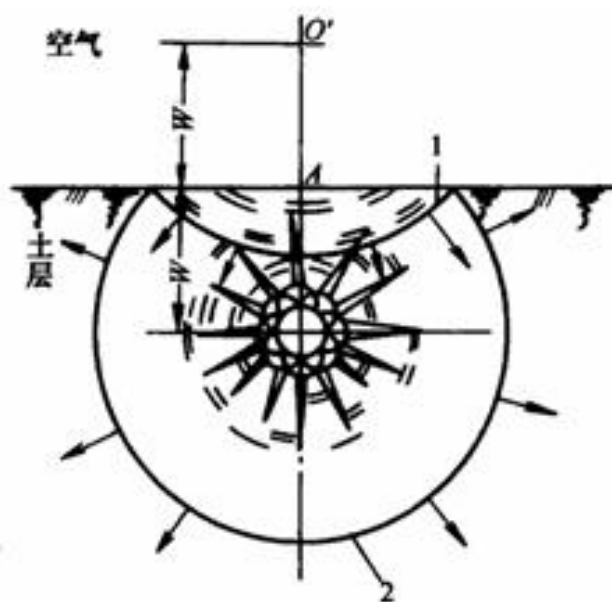


图 7-2-3 松动爆破时波的传播
1—反射波阵面；2—爆炸波阵面。

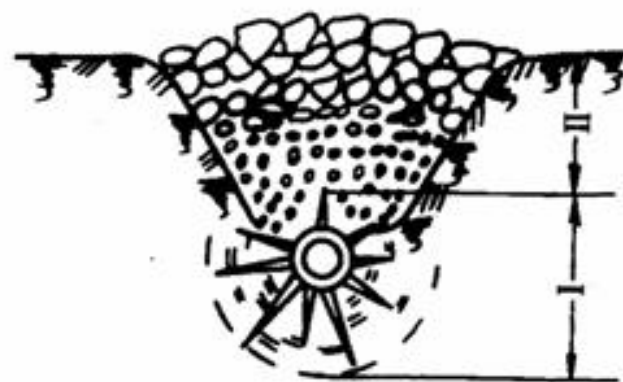


图 7-2-4 松动爆破时岩土破坏情况
1—内松动破碎区；2—外松动破碎区。

7.2 岩土中爆炸的基本现象

抛掷爆破现象

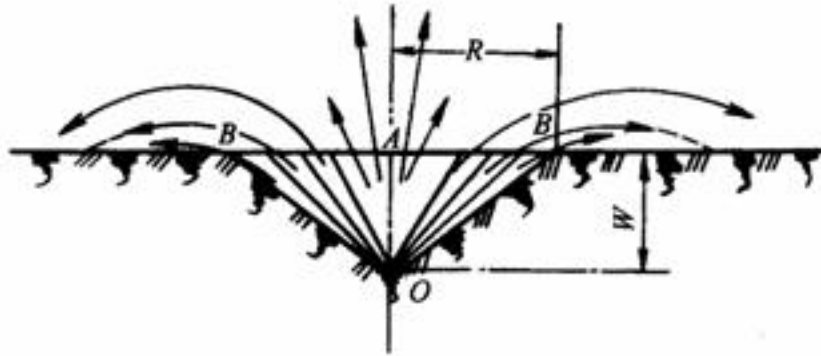


图 7-2-5 抛掷漏斗坑

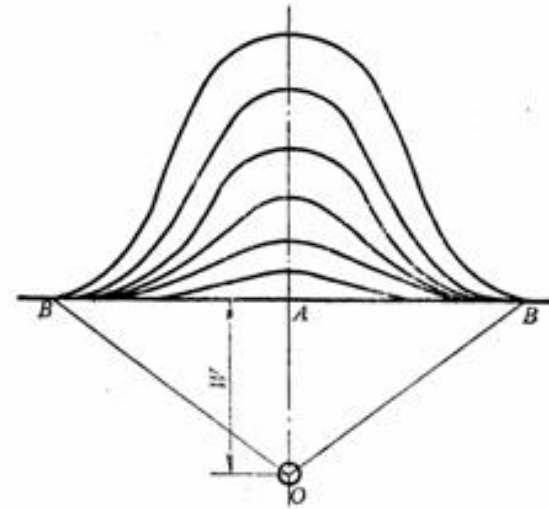


图 7-2-6 抛掷爆破时鼓包运动阶段的情况

7.2 岩土中爆炸的基本现象

抛掷爆破可根据抛掷指数的大小分成以下几种情况：

- (1) $n > 1$ 为加强抛掷爆破，这时漏斗坑顶角大于 90° ($n = \frac{R}{W}$)；
- (2) $n = 1$ 为标准抛掷^W爆破，这时漏斗坑顶角等于 90° ；
- (3) $0.75n < 1$ 为减弱抛掷爆破，这时漏斗坑顶角小于 90° ；
- (4) $n < 0.75$ 属于松动爆破，这时漏斗坑顶角大于 90° 。这是没有岩土抛掷现象，如果战斗部在这种情况下发生爆炸，则称之为隐炸现象。

7.3 岩土中的爆炸波及其传播规律

7.3.1 岩土中爆炸波的基本关系式:

质量守恒: $r_f (D_f - u_f) = r_0 (D_f - u_0)$

动量守恒: $P_f - P_0 = r_0 (D_f - u_0)(u_f - u_0)$

能量守恒: $E_f - E_0 = \frac{1}{2} (P_f + P_0) \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_f} \right)$

7.3 岩土中的爆炸波及其传播规律

7.3.2 岩土介质的状态方程（本构关系）和爆炸波参数

密度：
$$r_0 = a_{01} r_{01} + a_{02} r_{02} + a_{03} r_{03}$$

状态方程

固体颗粒

$$P_f = P_0 + \frac{r_{01} C_{01}^2}{K_1} \left[\left(\frac{r_1}{r_{01}} \right)^{K_1} - 1 \right]$$

水

$$P_f = P_0 + \frac{r_{02} C_{02}^2}{K_2} \left[\left(\frac{r_2}{r_{02}} \right)^{K_2} - 1 \right]$$

空气

$$P_f = P_0 \left(\frac{r_3}{r_{03}} \right)^{K_3}$$

7.3 岩土中的爆炸波及其传播规律

整体状态方程：

$$r = r_0 \left\{ a_{01} \left[\frac{(P_f - P_0)K_1}{r_{01}C_{01}^2} + 1 \right]^{-1/K_1} + a_{02} \left[\frac{(P_f - P_0)K_2}{r_{02}C_{02}^2} + 1 \right]^{-1/K_2} + a_{03} \left(\frac{P_f}{P_0} \right)^{-1/K_3} \right\}^{-1}$$

$$D_f = \sqrt{\frac{r_f (P_f - P_0)}{r_0 (r_f - r_0)}} \quad u_f = \sqrt{\frac{1}{r_0 r_f} (P_f - P_0) (r_f - r_0)}$$

$$D^2 = \frac{(P_f - P_0)}{r_0} \left\{ 1 - a_{01} \left[\frac{K_1(P_f - P_0)}{r_{01}C_{01}^2} + 1 \right]^{-1/K_1} - a_{02} \left[\frac{K_2(P_f - P_0)}{r_{02}C_{02}^2} + 1 \right]^{-1/K_2} - a_{03} \left(\frac{P_f}{P_0} \right)^{-1/K_3} \right\}^{-1}$$

$$u_f^2 = \frac{(P_f - P_0)}{r_0} \left\{ 1 - a_{01} \left[\frac{K_1(P_f - P_0)}{r_{01}C_{01}^2} + 1 \right]^{-1/K_1} - a_{02} \left[\frac{K_2(P_f - P_0)}{r_{02}C_{02}^2} + 1 \right]^{-1/K_2} - a_{03} \left(\frac{P_f}{P_0} \right)^{-1/K_3} \right\}^{-1}$$

7.3 岩土中的爆炸波及其传播规律

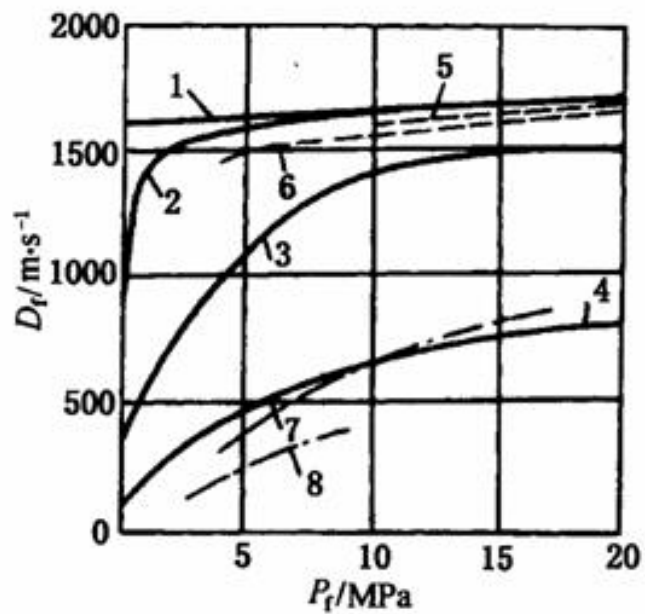


图 7-3-1 冲击波阵面速度与峰值压力的关系

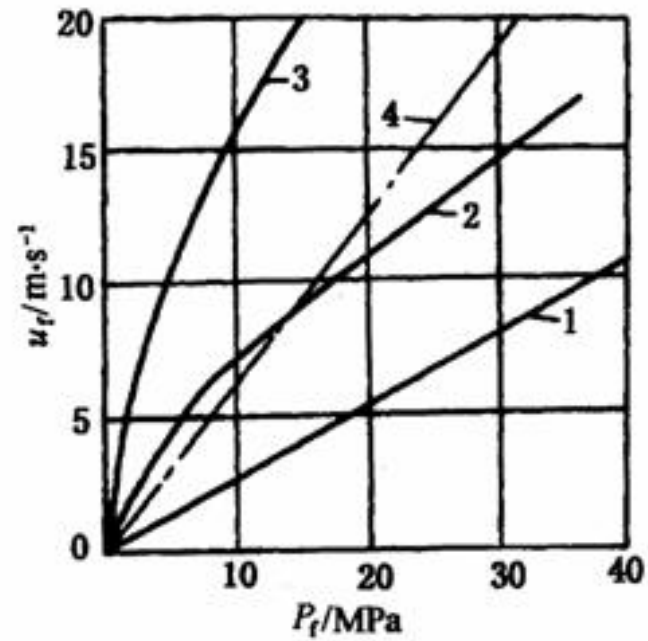


图 7-3-2 质点速度与峰值压力的关系

7.4 岩土中的爆炸相似律

7.4.1 岩土中爆炸相似律的基本内容

岩土中爆炸相似律描述如下：在介质中任意装药的爆炸，假定介质对变形速率是不敏感的；进一步假定，在介质中应力和变形的不稳定场是受爆炸能量的影响（不考虑重力和其他力的影响）；因此可以认为两个尺寸不同（能量大小不同）、但装药相同（更确切地说是密度和爆速相同）的两个药包在任意形状介质（介质甚至可以包含不连续性和各种形状的被隔离的块体）的相同点上爆炸时，它们两者的应力场和变形场在几何上、时间上和强度上都是相似的。

7.4 岩土中的爆炸相似律

由爆炸相似律，对于球形装药存在：

$$\frac{r_2}{\sqrt[3]{W_2}} = \frac{r_1}{\sqrt[3]{W_1}}$$

$$\Delta P_m = \sum_{i=1}^n A_i \left(\frac{1}{r} \right) a_i$$

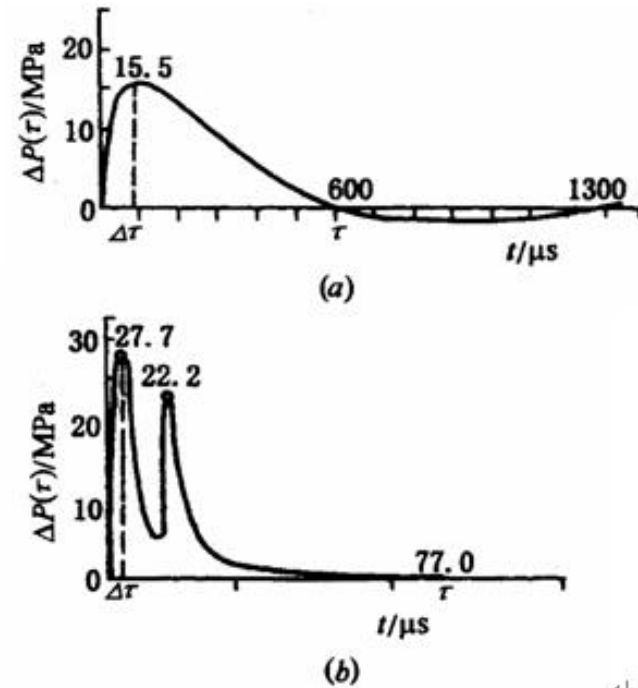


图 7-4-1 波阵面压力与时间的关系

- (a) 75g 6# 硝酸炸药在花岗岩中爆炸时距爆源为 0.5m 处的纵波；
 (b) 75g TNT 在花岗岩中爆炸时距爆源为 0.77m 处的纵波和横波。

7.4 岩土中的爆炸相似律

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{t_{m2}}{t_{m1}} = \frac{t_2}{t_1} = \frac{\bar{t}_2}{\bar{t}_1} = \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} = \frac{i_{m2}}{i_{m1}} = \frac{s_{m2}}{s_{m1}} = \sqrt[3]{\frac{W_2}{W_1}} \\
 \left. \begin{aligned}
 u_m = u_m(\bar{r}) \\
 r_m = r_m(\bar{r}) \\
 C_m = C_m(\bar{r}) \\
 D_m = D_m(\bar{r}) \\
 T_m = T_m(\bar{r})
 \end{aligned} \right\} \\
 \left. \begin{aligned}
 t_m = \sqrt[3]{Wt}(\bar{r}) \\
 \bar{t} = \sqrt[3]{W\bar{t}}(\bar{r}) \\
 \Delta t = \sqrt[3]{W\Delta t}(\bar{r}) \\
 t_m = \sqrt[3]{Wt}(\bar{r}) \\
 i_m = \sqrt[3]{Wi}(\bar{r}) \\
 s_m = \sqrt[3]{Ws}(\bar{r})
 \end{aligned} \right\} \\
 \left. \begin{aligned}
 t_m(\bar{r}) = \sum_{i=1}^n A_i^0 \left(\frac{1}{r}\right)^{a_i^0} \\
 \bar{t}(\bar{r}) = \sum_{i=1}^n A_i^1 \left(\frac{1}{r}\right)^{a_i^1} \\
 \bar{t}(\bar{r}) = \sum_{i=1}^n A_i^2 \left(\frac{1}{r}\right)^{a_i^2} \\
 \Delta t(\bar{r}) = \sum_{i=1}^n A_i^3 \left(\frac{1}{r}\right)^{a_i^3} \\
 i_m(\bar{r}) = \sum_{i=1}^n A_i^4 \left(\frac{1}{r}\right)^{a_i^4} \\
 s_m(\bar{r}) = \sum_{i=1}^n A_i^5 \left(\frac{1}{r}\right)^{a_i^5}
 \end{aligned} \right\}
 \end{aligned}$$

7.4 岩土中的爆炸相似律

考虑到介质的状态

当考虑爆炸的地震效应时

$$\left. \begin{aligned}
 \Delta P_m &= P_0 \Delta P_m(\bar{r}_0) \\
 r_m &= r_0 r_m(\bar{r}_0) \\
 u_m &= C_0 u_m(\bar{r}_0) \\
 C_m &= C_0 C_m(\bar{r}_0) \\
 D_m &= C_0 D_m(\bar{r}_0) \\
 T_m &= T_0 T_m(\bar{r}_0)
 \end{aligned} \right\}
 \left. \begin{aligned}
 t_m &= \frac{\sqrt[3]{W/P_0}}{C_0} t_m(\bar{r}_0) \\
 t &= \frac{\sqrt[3]{W/P_0}}{C_0} t(\bar{r}_0) \\
 \bar{t} &= \frac{\sqrt[3]{W/P_0}}{C_0} \bar{t}(\bar{r}_0) \\
 \Delta t &= \frac{\sqrt[3]{W/P_0}}{C_0} \Delta t(\bar{r}_0) \\
 i_m &= \frac{\sqrt[3]{W/P_0}}{C_0} i_m(\bar{r}_0) \\
 s_m &= \frac{\sqrt[3]{W/P_0}}{C_0} s_m(\bar{r}_0)
 \end{aligned} \right\}
 \left. \begin{aligned}
 A_x &= \sqrt[3]{W/P_0} A_x(\bar{r}_0) \\
 A_y &= \sqrt[3]{W/P_0} A_y(\bar{r}_0) \\
 A_z &= \sqrt[3]{W/P_0} A_z(\bar{r}_0) \\
 T &= \frac{\sqrt[3]{W/P_0}}{C_0} T(\bar{r}_0)
 \end{aligned} \right\}
 \Delta P_m = \frac{0.074}{\bar{r}} \left(\frac{K}{8} \right)^{2/3} + \frac{0.221}{\bar{r}^{-2}} \left(\frac{K}{8} \right)^{1/3} + \frac{0.637}{\bar{r}^{-3}}$$

$$\bar{r}_0 = \frac{r}{\sqrt[3]{W/P_0}} = \bar{r} \sqrt[3]{P_0}$$

7.4 岩土中的爆炸相似律

7.4.2 岩土中爆炸相似律的应用

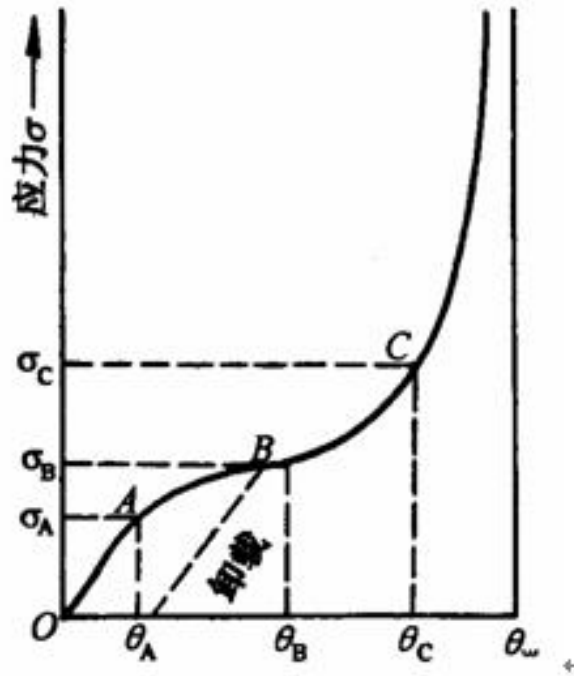


图 7-4-2 岩土的应力—应变关系

爆炸应力波峰值超压

$$\Delta P_m = A_1 \left(\frac{1}{r} \right) a_1$$

表 7-4-1 A_1 和 a_1 值

| 岩土的种类 | A_1 | a_1 |
|--|-------|-------|
| 饱和砂 $a_1=0$ | 58.8 | 1.05 |
| 饱和砂 $a_1=5 \times 10^{-1}$ | 44.1 | 1.50 |
| 饱和砂 $a_1=10^{-2}$ | 24.5 | 2.00 |
| 饱和砂 $a_1=4 \times 10^{-2}$ | 4.41 | 2.50 |
| 非饱和砂 $a_1 = (1.6 \sim 1.7) \text{ g/cm}^3$ | 1.47 | 2.80 |
| 非饱和砂 $a_1 = (1.52 \sim 1.60) \text{ g/cm}^3$ | 0.74 | 3.00 |
| 非饱和砂 $a_1 = (1.45 \sim 1.50) \text{ g/cm}^3$ | 0.25 | 3.50 |

7.4 岩土中的爆炸相似律

爆炸应力的冲量计算公式

$$i_m = A_2 \sqrt[3]{W} \left(\frac{1}{r} \right)^{\alpha_2}$$

表 7-4-2 A_2 和 α_2 值

| 岩土的种类 | A_2 | α_2 |
|---|-------|------------|
| 饱和砂 $\alpha_1=0$ | 7840 | 1.05 |
| 饱和砂 $\alpha_1=5 \times 10^{-1}$ | 7350 | 1.10 |
| 饱和砂 $\alpha_1=10^{-2}$ | 4410 | 1.25 |
| 饱和砂 $\alpha_1=4 \times 10^{-2}$ | 3430 | 1.40 |
| 非饱和砂 $\alpha_1 = (1.6 \sim 1.7) \text{ g/cm}^3$ | 2940 | 1.50 |

7.4 岩土中的爆炸相似律

圆柱形装药的爆炸

爆炸波的最大径向、轴向和切向应力

$$\left. \begin{aligned} S_{rm} = \Delta P_m &= 0.863 \bar{r}^{-1.44} && (\text{GPa}) \\ S_{zm} &= 0.145 \bar{r}^{-1.2} && (\text{GPa}) \\ S_{qm} &= 0.497 \bar{r}^{-1.6} && (\text{m/s}) \end{aligned} \right\}$$

对于波阵面和最大应力到达时间和的计算公式

$$\left. \begin{aligned} t_f &= (0.0335 \bar{r} + 0.061) \sqrt{w_C} && (s) \\ t_m &= 0.0074 (\bar{r} - 1)^{1.51} \sqrt{w_C} && (s) \end{aligned} \right\} \Delta t = t_m - t_f$$

7.5 岩土中的爆炸效应

7.5.1 爆腔

定义：装药在足够深的岩土中爆炸，高温高压爆炸产物，使得在岩土中瞬间形成的一个空腔。

爆腔的开头取决于装药的形状，而爆腔的尺寸取决于土壤的性质和炸药的种类。在岩土的性质中，道德取决于它的抗压强度、密度、颗粒组成和空隙容量等。

一、经验公式

球形装药

$$\left. \begin{aligned} R_v &= k_v r_0 \\ R_v &= k_v^* \sqrt[3]{W} \end{aligned} \right\}$$

圆柱形装药

$$\left. \begin{aligned} \bar{R}_v &= \bar{k}_v r_0 \\ \bar{R}_v &= \bar{k}_v^* \sqrt[3]{W_C} \end{aligned} \right\}$$

7.5 岩土中的爆炸效应

二、准表态理论

压力 $P_0 = P_a + s_s + r_s W$

爆炸产物绝热膨胀的状态方程

$$\left. \begin{aligned} \frac{P}{\bar{P}_H} &= \left(\frac{\bar{v}_H}{v} \right)^g & P \geq P_K \\ \frac{P}{\bar{P}_K} &= \left(\frac{v_K}{v} \right)^K & P < P_K \end{aligned} \right\}$$

球形装药

$$P / \bar{P}_H = (\bar{v}_H / v)^3 = (r_0 / R_V)^9$$

$$R_{VK} = r_0 \left[\frac{r_0 D^2}{8 P_K} \right]^{1/9}$$

$$R_{Vm} = 0.794 r_0 \frac{(r_0 D^2 P_K^{5/4})^{1/9}}{(P_a + s_s + r_s W)^{1/4}}$$

7.5 岩土中的爆炸效应

圆柱形装药

$$\bar{R}_{VK} = r_0 \left(\frac{r_0 D^2}{8P_K} \right)^{1/6}$$

$$\bar{R}_{Vm} = 0.707 r_0 \frac{\left(r_0 D^2 P_K^{5/4} \right)^{1/6}}{\left(P_a + S_s + r_s W \right)^{3/8}}$$

无限大平板装药

$$\hat{R}_{VK} = \hat{r}_0 \left(\frac{r_0 D^2}{8P_K} \right)^{1/3}$$

$$\hat{R}_{Vm} = 0.5 \hat{r}_0 \frac{\left(r_0 D^2 P_K^{5/4} \right)^{1/3}}{\left(P_a + S_s + r_s W \right)^{3/4}}$$

7.5 岩土中的爆炸效应

7.5.2 爆破漏斗

爆破漏斗的形成

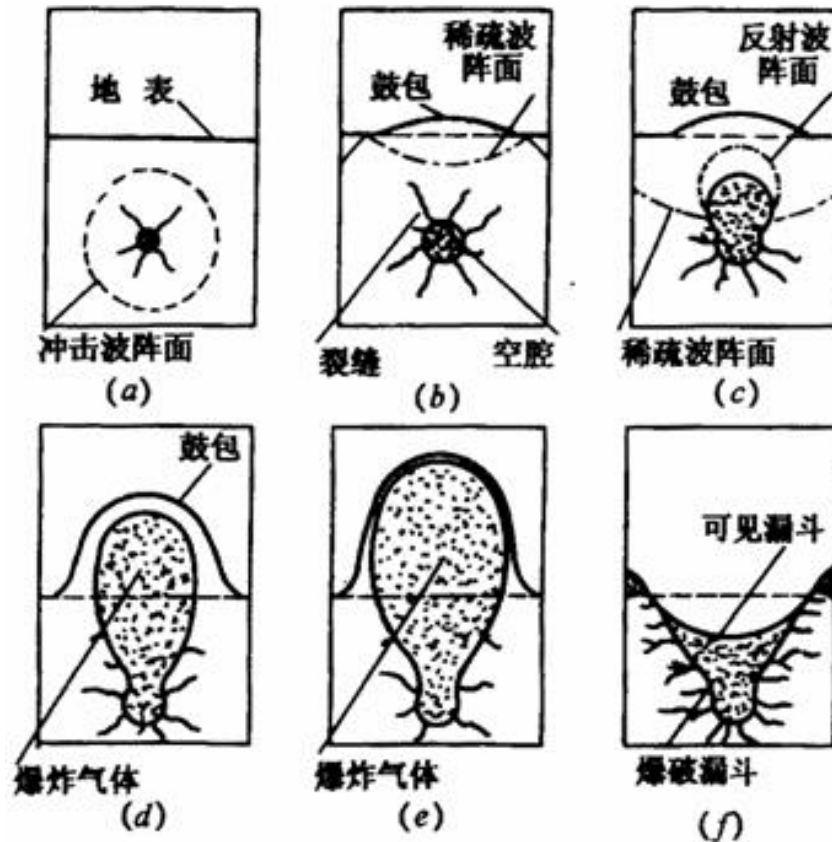


图 7-5-3 形成爆破漏斗的各个阶段

7.5 岩土中的爆炸效应

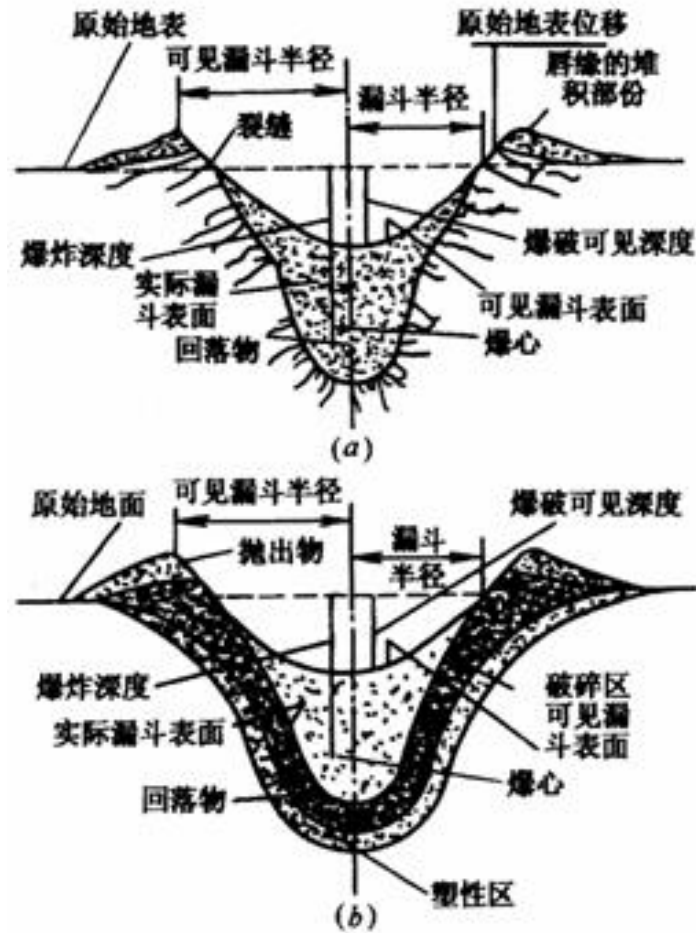


图 7-5-4 爆破漏斗

(a) 在硬岩中; (b) 在土壤中。

7.5 岩土中的爆炸效应

爆破漏斗计算的经验公式

对装药量的计算

$$Q = k_3 W^3$$

$$Q = k_2 W^2 + k_3 W^3$$

$$Q = k_2 W^2 + k_3 W^3 + k_4 W^4$$

$$Q = k_3 W^3 + k_4 W^4$$

$$Q = k_3 (0.4 + 0.6n^3) W^3$$

$$Q = k_3 (0.4 + 0.6n^3) W^3 \sqrt{\frac{W}{20}}$$

$$Q = k_3 (0.4 + 0.6n^3) W^3 \sqrt{W}$$

$$Q = k_3 W^3 \left[\frac{1+n^2}{2} \right]^{9/4}$$

$$Q = k_3 W^3 \left[\frac{2(4+3n^2)^2}{97+n} \right]$$

7.6 战斗部在岩土中的爆炸

实验表明，形成最大弹坑（即最大漏斗体积）的最佳侵彻深度为：

$$L_{ur} = (0.85 \sim 0.95) \sqrt[3]{w}$$

7.6.1 侵彻深度

1. 别列赞公式

$$L_K = 1 K_K \frac{q_K}{d^2} v_c \sin q_c$$

2. 彼德尔公式

$$L_K = \frac{q_K}{d^2} K'_K f(v_c) \sin q_c$$

7.6 战斗部在岩土中的爆炸

7.6.2 引信作用时间

$$S = v_c t - \frac{a}{2} t^2 \quad a = \frac{v_c^2}{2S}$$

$$S_{ur} = \frac{L_{ur}}{\sin q_c} \quad t_{ur} = \frac{2S}{v_c} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{L_{ur}}{S \sin q_c}} \right]$$

思考与习题

- 1、1963年式130mm火箭弹发射药燃烧完的重量 27.021kg，落速为266.8m/s， q_c 为 $54^{\circ}56'$ ，求对密实粘土的侵彻深度。
- 2、130mm火箭弹内装TNT炸药3.06kg，求上题的侵彻时间和引信的延期时间。