

高等教育用书

爆破理论与 爆破优化

高金石 张 奇 著编

西安地图出版社

(陕)新登字 013 号 责任编辑: 卢惠民

爆破理论与爆破优化

高金石 张奇 编著

西安地图出版社出版发行

(西安友谊东路124号 邮政编码710054)

新华书店经销 电影公司印刷厂印刷

787 × 1092毫米16开本 21印张51万字

1993年7月第1版 1993年7月第1次印刷

印数 1 - 3000

ISBN7-80545-237 7/K.229

定价: 11.70 元

内 容 简 介

本书论述了岩体、土、水压及钢筋混凝土中的爆破理论；对含节理裂隙岩体、掏槽、光面、预裂、露天台阶、水压及筒形、框架建筑物等爆破的爆破理论与爆破优化分别进行论述与分析。爆破理论与爆破优化的论述，将推动理论与实践相结合，促进爆破科学技术的发展。

本书可作为高等院校爆破硕士研究生和本科生加选课教材，亦可供从事爆破生产、科研、设计的技术人员参考。

前 言

爆破技术在国内外应用相当广泛，发展十分迅速。

爆破不仅是一种技术，而且是一门比较复杂的边缘科学。

爆破对象的各向异性和地质构造的复杂性，爆炸载荷的高温、高压、高速及瞬时的特殊性，再加之爆破条件各异、爆破目的要求差别甚大，这就决定了爆破是一个复杂的系统工程。只凭经验，满足于装药爆了，介质破了就算大功告成，那是四十年代的水平。当今，应有理论指导，应能够控制爆轰与爆破过程，应能对爆破效果进行预测，使爆破效果优化。

随着测试技术的进步，大批青年学者的涌现，相关科学的发展与引入，爆破工程实践的增多及对爆破效果要求日益严格，这为爆破理论与爆破优化得以长足进展提供了条件。著者正是在此条件下提出了一些理论与方法。我们不奢求要有一个包罗万象的完整的爆破理论，随爆破性质、目的及条件不同，应当有其不尽相同的爆破理论与不同的优化目标和优化模式。我们也不强求某个理论天衣无缝，因为任何事物都在不断前进、不断发展和完善的。著者基于上述认识，应许多爆破工作者的要求而写此书。

本书第一、二、三、四、八、九章由张奇执笔；第五、六、七、十、十一、十二章由高金石执笔。全书由高金石统稿。

期望本书对爆破理论与爆破优化的深入研究、对爆破实践起到一定的作用。由于我们水平有限，不足和错误在所难免。

高金石 张 奇

1992年7月于西安

目 录

第一章 爆炸对岩体的作用	(1)
§ 1 爆炸空腔的数值模拟	(1)
1 球形装药爆破空腔的数值模拟.....	(1)
2 柱形装药爆破空腔的数值模拟.....	(4)
§ 2 爆炸应力波在岩体内的衰减	(7)
1 球形装药爆炸冲击波在岩体内的衰减.....	(8)
2 柱形装药爆炸力波在岩体内的衰减	(18)
§ 3 炸药与岩石的能量关系	(22)
1 球形装药爆破能量分析	(23)
2 柱形装药爆破能量分析	(24)
§ 4 岩石爆破的粉碎区	(27)
1 柱形装药的粉碎区半径	(27)
2 球形装药的粉碎区半径	(29)
3 粉碎区内的压缩性	(30)
4 冲击波半径	(31)
§ 5 不偶合装药的爆炸作用	(32)
1 孔壁变形力学模型的建立	(32)
2 计算与结果	(33)
3 不偶合的缓冲作用	(38)
§ 6 线性无罩聚能装药的破岩作用	(38)
1 线性无罩聚能装药的破岩机理	(38)
2 线性无罩聚能装药相应的炮孔间距及破岩效果	(39)

§ 7	矩形装药的爆炸作用	(42)
1	矩形装药孔壁作用的初步分析	(42)
2	矩形装药的破岩机理	(45)
§ 8	爆炸载荷下的岩石特性	(51)
1	岩石强度	(51)
2	本构关系	(51)
第二章	层状岩体的爆破理论与爆破优化	(56)
§ 1	应力波在节理内的传递	(56)
1	应力波在节理内的反射	(56)
2	节理对应力波传播的影响	(57)
§ 2	提高节理岩体爆破效果的途径	(61)
1	爆炸应力波通过结构面的衰减	(61)
2	几点讨论	(63)
§ 3	球形药包在层状岩体中爆炸的能量分布	(68)
1	能量分布	(68)
2	正交异性岩体的可爆性	(71)
§ 4	层状岩体的光面爆破理论与效果	(72)
1	结构面方位的影响	(72)
2	层状岩体光面爆破断裂面的形成	(75)
3	层状岩体光面爆破断裂过程的进一步探讨	(77)
§ 5	弱面(节理)变形与强度特征	(82)
1	弱面的变形性质	(82)
2	节理岩体的弹性模型	(85)
3	弱面强度	(95)

第三章 定向成缝爆破理论与参数优化	(96)
§ 1 光爆普通装药结构及参数优化	(97)
1 空气间隔装药结构的参数计算	(98)
2 空气间隔装药结构设计中的几个问题	(100)
3 几点结论	(100)
§ 2 光面爆破中的炮孔堵塞	(101)
1 光面爆破最优堵塞长度	(101)
2 堵塞物的宏观运动规律	(104)
3 几点结论	(106)
§ 3 预裂和光面爆破炮孔间距的比较	(106)
1 预裂炮孔间距的计算	(106)
2 光面爆破的炮孔间距	(108)
3 预裂和光面爆破炮孔间距的比较	(110)
4 几点结论	(111)
§ 4 预裂和光面爆破的装药量	(111)
§ 5 井巷光爆微差时间的确定	(113)
1 井巷爆破微差时间的确定	(113)
2 几点讨论	(115)
3 几点结论	(116)
§ 6 从光爆机理看光爆炸药的发展方向	(117)
1 不偶合系数与装药品种的关系	(117)
2 孔径与孔间距的关系	(118)
3 发展光爆炸药的设想	(119)
4 几点结论	(120)

§ 7	管道效应各影响因素的综合分析	(120)
1	管道效应的实质	(121)
2	管道效应的衡量指标	(121)
3	管道效应的预防措施	(124)
§ 8	劈裂成缝机理	(125)
1	定向成缝方向的控制	(125)
2	劈裂成缝机理	(127)
3	劈裂工艺	(130)
第四章	掏槽爆破理论与参数优化	(131)
§ 1	概述	(131)
§ 2	带空孔直眼掏槽爆破机理与药量计算	(131)
1	直眼掏槽爆破机理	(131)
2	直眼掏槽的药量计算	(132)
3	讨论	(133)
4	几点结论	(134)
§ 3	空孔与装药孔的间距	(134)
§ 4	几种平巷直眼掏槽的比较	(137)
1	菱形掏槽	(137)
2	三角柱掏槽	(138)
3	螺旋掏槽	(139)
4	几点结语	(140)
§ 5	螺旋掏槽	(140)
1	螺旋掏槽布孔原则	(141)
2	最优抵抗与自由面宽度的关系	(142)

3 炸药单耗与自由面宽度的关系	(142)
4 螺旋掏槽参数的经验数值	(143)
§ 6 立井深孔掏槽方式与炮孔利用率	(144)
1 立井深孔掏槽方式	(144)
2 炮孔利用率	(146)
第五章 定向抛掷爆破理论与参数优化	(147)
§ 1 单元抛体堆积力学模型	(147)
1 单元抛体的概念	(148)
2 单元抛体堆积力学模型	(148)
3 单元抛体的抛向	(149)
4 单元抛体的抛角	(150)
§ 2 单元抛体抛速场	(151)
1 抛掷初速度的数值模拟	(151)
2 单元抛体的质心抛速	(156)
3 单元抛体的前沿抛速	(157)
§ 3 单元抛体宏观堆积方程组	(159)
1 堆积计算起始点	(159)
2 质心、前沿抛距计算式	(159)
3 堆积起始点与最高点计算式	(160)
4 堆积高度计算式	(160)
5 抛掷率计算式	(161)
§ 4 多面临空药室爆破理论	(162)
1 等效子药包及能量分配力学模型	(162)
2 等效子药包药量计算式	(163)

3 多向群药包单元抛体抛向控制	(164)
4 多高群药包单元抛体的划分	(166)
5 布药结构分析	(167)
§ 5 药室控制爆破设计要点与实例	(167)
1 药室控制爆破分类及技术要求	(167)
2 布药参量及其原则	(168)
3 群药包布设原则	(169)
4 爆破参数的确定	(170)
5 实例	(172)
§ 6 药室控制爆破设计计算绘图软件包	(177)
第六章 台阶爆破理论与爆破优化	(179)
§ 1 Favreau R.F 爆破数学模型	(179)
§ 2 BMMC 爆破数学模型	(180)
1 基本前提	(181)
2 应力波能量三维分布数学模型	(181)
3 爆破块度分布计算	(185)
4 由各种弱面形成的天然块度的概率分布的求算方法	(188)
5 电算程序	(189)
6 计算结果与实践比较	(190)
§ 3 其它爆破数模简介	(191)
1 哈里斯数学模型	(191)
2 台阶爆破岩体移动计算模型	(193)
3 KVZ-RAM 爆破数模及其修正	(197)
§ 4 大区微差深孔爆破	(201)

1	露天台阶爆破参数优化数学模型	(201)
2	小抵抗线—宽孔距爆破机理	(203)
3	微差间隔时间的计算模型	(205)
4	爆破参数的确定程序	(207)
§ 5	灰关联分析及其应用	(208)
1	灰关联分析的原理	(208)
2	应用	(210)
3	结论	(213)
第七章	土中爆破理论及应用	(214)
§ 1	土中爆炸应力场及其参数	(214)
1	内部爆炸应力场及其参数	(214)
2	地面爆炸应力场	(218)
§ 2	爆破压扩理论	(220)
1	爆炸应力波压扩理论	(220)
2	巴乌姆动力压扩理论	(220)
3	爆扩井巷桩孔实例	(226)
§ 3	爆炸压实理论及应用	(230)
1	土体爆炸压实机理	(230)
2	非接触爆炸压实理论及应用	(231)
3	表面爆炸压实理论	(233)
4	内部爆炸压实理论及应用	(233)
§ 4	水下爆炸压实	(237)
1	土层的压实	(238)
2	抛石层的水下爆炸压实	(239)

3 爆炸排淤填石	(237)
第八章 钢筋混凝土爆破理论	(243)
§ 1 概述	(243)
§ 2 钢筋混凝土拆除爆破机理及参数计算	(243)
1 钢筋混凝土爆破机理	(243)
2 钢筋破坏的力学模型	(244)
3 算例	(246)
§ 3 配筋网格的影响	(247)
第九章 楼房框架拆除爆破理论及爆破优化	(249)
§ 1 概述	(249)
§ 2 楼房爆破拆除切口高度	(249)
1 两墙承载楼房爆破切口确定	(250)
2 多墙承载楼房爆破切口范围的确定	(253)
§ 3 单向倒塌切口宽度	(256)
1 楼房倒塌条件	(256)
2 方程简化及数值计算	(258)
3 实例分析	(260)
第十章 筒体建筑物的定向、定位倒塌爆破	(261)
§ 1 定向倒塌原理及其参量分析	(261)
§ 2 切口尺寸及其力学分析	(264)
1 切口长度	(265)
2 切口高度	(266)
§ 3 筒体倾倒时上部折断的力学分析	(269)
1 爆破动载使上部开裂的分析	(269)

2 筒体倾倒过程中上部断裂分析	(271)
§ 4 筒体后座及其力学分析	(273)
1 爆破切口形成瞬间的后座	(273)
2 倾倒过程中的后座	(274)
§ 5 筒体倾倒过程的计算机模拟——定位倒塌	(275)
1 筒体倾倒运动方程	(275)
2 计算机模拟	(276)
§ 6 实例	(277)
第十一章 水压爆破	(283)
§ 1 水中冲击波及其与固壁的作用	(283)
1 水中冲击波及其作用	(283)
2 爆生气体的脉动作用	(285)
§ 2 水压爆破药量计算模型	(285)
§ 3 水压爆破布药原理	(286)
1 爆炸载荷与固壁的作用	(286)
2 相邻近距离两药包的相互作用	(289)
3 爆炸气体产物的运动	(290)
4 布药参数与布药原则	(291)
§ 4 水压爆破震动、飞石计算	(292)
1 飞石飞散距离	(292)
2 爆破震动	(294)
§ 5 实例	(295)
第十二章 爆破块度预报与控制理论	(300)
§ 1 爆破块度、天然块度	(300)

1	爆破块度	(300)
2	天然块度	(301)
§ 2	经验爆破块度计算模型	(302)
1	KVZ-RAM 模型	(302)
2	GAMA 模型	(302)
3	别兹马特雷赫模型	(303)
4	钟汉荣模型	(303)
5	其它块度分布函数式	(304)
§ 3	台阶多排孔爆破块度组成计算数模	(305)
1	相邻药柱的破坏作用	(305)
2	装药长度的影响	(305)
3	任一点处质点的切向应变计算	(306)
4	多排孔爆破块度组成计算	(308)
§ 4	药室爆破块度计算数模	(309)
1	爆破块度分布模型	(309)
2	爆破块度分布计算	(310)
3	群药包爆破块度分布	(312)
§ 5	分形几何及其应用	(313)
1	分形几何简介	(314)
2	爆破块度分布的分形研究	(315)
3	岩石破碎的分形研究	(317)
§ 6	摄影法测定爆堆块度的“小化”与修正	(318)

第一章 爆炸对岩体的作用

装药在矿岩介质中爆炸以后,介质内通常可以分为三个区域:粉碎区、破裂区和振动区。其中前两个区域是有效破坏区。关于爆炸三个区域的定量划分以及爆炸作用下孔壁变形过程和参数的研究有着重要意义,它是爆炸能量分析和工程爆破参数计算的依据。随着爆破工程参数优化设计的不断发展,根据岩石性质和炸药特性进行爆炸能量分析和爆破工程参数设计的要求越来越迫切。

§1 爆炸空腔的数值模拟

1 球形装药爆破空腔的数值模拟

在工程爆破机理研究中,孔壁(或洞壁)爆破作用是一个重要的问题。工程上常用的有两种装药形式:一种是球形装药;另一种是柱形装药。首先考虑偶合球形装药,中心起爆情况下爆炸空腔的发展过程。通过力学模型和数值计算,找出爆炸空腔、洞壁压力等有关物理参量。

1.1 力学模型

1.1.1 洞壁爆炸作用初始参数的确定

因一般工业炸药的冲击阻抗往往小于岩石介质的冲击阻抗,因此装药爆炸后在介质中形成冲击波,同时在洞壁处反射回爆炸产物中的也是冲击波。此时洞壁处冲击波的初始压力 P_x 大于爆轰波的 C-J 压力 P_H 。反射波传过后,爆炸产物的质点速度 u_H 降低为分界面的运动速度 u_x 。根据爆轰波的基本关系,有:

$$u_x = \frac{D}{(\gamma + 1)} \left[1 - \frac{(\pi - 1)\sqrt{2}}{\sqrt{(\gamma + 1)\pi + (\gamma - 1)}} \right] \quad (1-1)$$

式中 $\pi = P_x / P_H$; D 是炸药爆速; γ 是爆生气体的等嫡指数。对于岩石中的冲击波,有

$$u_x = \sqrt{P_x (\rho_{ro}^{-1} - \rho_{rx}^{-1})} \quad (1-2)$$

式中 ρ_{ro} 、 ρ_{rx} 分别是岩石的初始密度和波阵面上的密度。

岩石在爆炸载荷作用下的状态方程目前研究的很不完善,有些文献介绍如下形式:

$$P_x = B(\rho_{rx}^4 - 1) \quad (1-3)$$

式中 $B = \frac{1}{4} C_0^2 \rho_{ro}$, C_0 是岩石介质中的纵波波速; $\bar{\rho}_{rx}$ 是压缩比, $\bar{\rho}_{rx} = \rho_{rx} / \rho_{ro}$. 由上述三式联立可求出 P_x 、 u_x 和 ρ_{rx} . 再由岩石介质中的质量守恒

$$C_p \rho_{ro} = (C_p - u_x) \rho_{rx} \quad (1-4)$$

(C_p 是岩石中冲击波波速)进而可以求出岩石中的冲击波速. 由(1-3)得

$$\rho_{rx} = \rho_{ro} (p_x / B + 1)^{1/4}$$

上式代入(1-2)有

$$u_x = \sqrt{\frac{p_x}{\rho_{ro}} [1 - (p_x / B + 1)^{-0.25}]} \quad (1-5)$$

将(1-1)、(1-5)联立求出 p_x , 然后由(1-5)得到 u_x , 由(1-3)得到 ρ_{rx} , 由(1-4)得到 C_p .

1.1.2 洞壁膨胀过程中参数的确定

洞壁获是爆炸初始参数以后开始运动膨胀, 由于洞壁变形, 有稀疏波传入爆轰产物. 由于爆生气体膨胀, 洞壁变形, 洞壁爆破作用参数将随时间而发生变化. 在洞壁变形过程中, 设某一时刻爆生气体压力 $p_1(t)$, 由爆生气体的等熵方程

$$p = A \rho^\gamma \quad (1-6)$$

(式中 A 为常数), 可知

$$p_1(t) = p_x(t - \Delta t) \left[\frac{R((t - \Delta t))}{R(t)} \right]^\gamma \quad (1-7)$$

式中 t 是时间; Δt 是时间增量; $R(t - \Delta t)$ 是 $(t - \Delta t)$ 时刻的洞壁空腔半径; $R(t)$ 是 t 时刻洞壁空腔半径. 如果 Δt 选的足够小, 则 t 时刻气体膨胀速度 $u_1(t)$ 可视为 $t - \Delta t$ 时刻的洞壁变形速度 $u_x(t - \Delta t)$. 在 t 时刻, 由于洞壁变形, 有一稀疏波流入爆生气体, 使爆生气体的膨胀速度 $u_1(t)$ 迅速增大到洞壁变形速度 $u_x(t)$, 而爆生气体的压力也相应由 $p_1(t)$ 变为 $p_x(t)$. 因此在洞壁变形过程中, 对于爆生气体有

$$u_x(t) = u_1(t) + \int_{p_x(t)}^{p_1(t)} \frac{dP}{\rho C} \quad (1-8)$$

根据爆生气体内声速 C 的基本关系

$$C = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}}$$

和爆炸生气体等熵方程可得

$$\frac{c}{c_1} = \left(\frac{\rho}{\rho_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{2}}$$

$$\frac{\rho}{\rho_1} = \left(\frac{p}{p_1}\right)^{1/\gamma} \quad C_1^2 = \gamma \cdot \frac{p_1}{\rho_1}$$

将上述三式代入(1-8)可得

$$u_x(t) = u_1(t) + \frac{2C_1(t)}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{p_x(t)}{p_1(t)}\right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}}\right] \quad (1-9)$$

由声速公式和爆生气体的等熵方程还可得

$$C_1(t) = C_1(t-\Delta t) \cdot \left[\frac{p_x(t-\Delta t)}{p_1(t)}\right]^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}}$$

式中 $C_1(t)$ 是 t 时刻爆生气体的声速; $C_1(t-\Delta t)$ 是 $t-\Delta t$ 时刻爆生气体的声速。

由洞壁岩体内的动量守恒:

$$P_x(t) = \rho_{ro} C_p \cdot u_x(t)$$

质量守恒

$$C_p \rho_{ro} = (C_p - u_x(t)) \rho_{rx}$$

状态方程

$$p_x = B(\rho_{rx}^2 - 1)$$

可以得到

$$u_x^2(t) = \frac{p_x(t)}{\rho_{ro}} \left[1 - \left(\frac{p_x(t)}{B} + 1\right)^{-0.25}\right] \quad (1-10)$$

由(1-9)和(1-10)联立可求出 t 时刻的洞壁压力、洞壁变形速度以及洞壁处的冲击波波速和洞壁内的压缩比等参量随时间的变化规律。

1.2 数值方法与算例

1.2.1 数值方法

爆生气体等熵指数 γ 是压力 $p_1(t)$ 的函数, 计算中按下列取值