

dixia gongcheng baopo lilun ji yingyong

地下工程爆破 理论及应用

徐 颖 宗 琦 著

中国矿业大学出版社

dixia gongcheng baopo lilun ji yingyong

地下工程爆破理论及应用

徐颖 宗琦 著



中国矿业大学出版社

内 容 简 介

本书运用爆轰波理论和应力波理论系统地介绍了炸药爆轰过程中爆轰参数、岩石中冲击波和应力波参数的计算,详细阐述了应力波和爆轰气体的爆破破岩机理以及能量传递过程。根据地下工程爆破中的各种特殊条件,利用各自不同的控制爆破原理,结合施工实例分别介绍了超深孔爆破、高压气体爆破、水耦合爆破、切槽爆破、微差爆破、切割爆破、光面爆破、立井冻土爆破、爆破射孔注浆以及井巷掘进 CAD 辅助设计系统,内容全面,资料翔实。本书可供岩土工程、地下工程、采矿工程、隧道工程等专业的教师、研究生、大学生和科研人员阅读,也可供煤炭、冶金、水利、交通、建材等方面的工程技术人员参考。

责任编辑 褚建萍

图书在版编目(CIP)数据

地下工程爆破理论及应用/徐颖,宗琦著. —徐州:中国矿业大学出版社,2001.12

ISBN 7-81070-459-1

I. 地... II. ①徐...②宗... III. 地下工程—爆破—理论研究 IV. TD235

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 095222 号

中国矿业大学出版社出版发行

(江苏徐州 邮政编码 221008)

出版人 解京选

徐州新华印刷厂印刷 新华书店经销

开本 787×1092 1/16 印张 14.5 字数 360 千字

2001 年 12 月第 1 版 2001 年 12 月第 1 次印刷

印数 1~1000 册 定价: 35.00 元

前 言

本书是在参加国家攻关项目和主持省部级科研项目中所取得的研究成果的基础上撰写而成的。其主要特点是理论联系实际,比较系统地介绍了近年来地下工程爆破领域的研究成果,提供了较多的实例及分析计算方法,以帮助读者对近年来地下工程爆破的发展有一个比较全面的了解。

本书共分 15 章,其中第 1、2、12、14、15 章由宗琦撰写,其余由徐颖撰写。第 1、2 章主要介绍了各种不同装药结构炸药的爆轰压力的计算、应力波和爆轰气体的爆破破岩机理以及能量传递过程、不耦合装药条件下爆破裂纹传播规律。第 3 章介绍了地下炮孔深度超过 5 m 以上的特殊条件下超深孔控制爆破机理及应用。第 4 章为高压气体爆破技术,论述了高压气体爆破的机理及试验室模型试验研究,利用极限分析原理对高压气体破煤压力进行了较深入的理论分析。第 5 章利用损伤理论对炸药爆炸作用下断层破碎带内爆炸裂隙区范围及裂纹扩展长度的计算方法进行了分析。第 6 章对刻槽控制爆破的成缝理论作了较全面的论述,对动载作用下岩石的启裂、扩展、分岔和止裂进行了深入的理论分析,并利用自编的程序对刻槽爆破的有关参数进行计算。第 7 章详细介绍了聚能条件下射孔及高能气体压裂成缝机理、井筒冻结管爆炸注浆、地面浆孔射孔压裂注浆等治理突水事故的实例。第 8、9、10 章主要介绍了地下工程爆破中大孔距、微差爆破、光面爆破机理及施工技术工艺。第 11 章为井巷掘进爆破设计 CAD 辅助系统,利用 Windows 平台下的 Microsoft VBA 软件对井巷掘进的爆破图表及有关施工技术措施进行优化设计。第 12 章讨论了水耦合装药爆破的破岩特征。第 13 章介绍了地下切割控制爆破技术。第 14、15 章分别介绍了立井冻结段和基岩段爆破技术。

本书的写作和出版得到了淮南工业学院土木工程系领导、老师的大力支持,尤其得到了刘积铭教授、傅菊根教授的有力帮助,在此表示衷心感谢。书中参考引用了其他作者的资料,在此一并致谢。

由于作者水平有限,书中错误之处在所难免,诚望读者批评指正。

作者

2001. 8. 25

目 录

第 1 章 爆破破岩机理的力学基础.....	1
1.1 炸药爆轰理论概要	1
1.2 孔壁初始冲击压力	3
1.3 爆炸冲击波的破岩特征	5
1.4 应力波的破岩作用.....	12
1.5 半无限岩体应变能随最小抵抗线变化规律.....	15
1.6 爆生气体的破岩特征.....	17
1.7 爆炸能量的传递.....	23
1.8 自由面的爆破效应.....	27
参考文献	28
第 2 章 装药不耦合系数对爆破裂纹的控制	30
2.1 爆轰压力与炮孔装药不耦合系数的关系.....	30
2.2 空气冲击波对孔壁作用时间及孔壁切向应力与不耦合系数的关系.....	33
2.3 模型试验研究.....	35
2.4 爆破切割大理石试验.....	36
参考文献	37
第 3 章 地下超深孔特殊控制爆破	38
3.1 石门揭开有突出煤层时震动性放炮.....	38
3.2 煤巷掘进工作面深孔松动控制卸压爆破.....	44
3.3 坚硬或厚煤层综放面超前深孔爆破.....	46
3.4 煤仓全断面掘进深孔爆破.....	50
3.5 巷道松裂爆破卸压技术.....	55
参考文献	59
第 4 章 高压气体爆破破煤机理	60
4.1 高压气体爆破技术的应用.....	60
4.2 高压气体爆破采煤的优点.....	62
4.3 气体爆破破煤压力的模型试验研究.....	62
4.4 气体爆破膨胀做功的弹性力学模型.....	64
4.5 气体爆破的准爆条件分析.....	65
4.6 气体爆破参数的模型试验研究.....	67

4.7 气体爆破疏通煤仓堵塞技术·····	69
参考文献·····	70
第5章 断层带爆炸裂隙区范围及裂纹扩展长度的分析 ·····	71
5.1 断层破碎带爆炸应力波破裂区的计算·····	72
5.2 应变波作用下的岩体损伤累积·····	73
5.3 应力波损伤作用下的爆炸裂纹传播·····	75
参考文献·····	76
第6章 刻槽炮孔在爆炸载荷作用下的扩展规律 ·····	78
6.1 脆性断裂力学模型及其基本概念·····	78
6.2 岩石的动态断裂韧度·····	79
6.3 岩石动态断裂韧度的测定·····	81
6.4 裂纹开度·····	81
6.5 自由面和临近炮眼的应力波及其对裂纹扩展的影响·····	83
6.6 刻槽炮孔临界压力和爆生气体压力·····	85
6.7 刻槽炮孔中爆炸压力作用下的应力强度因子·····	86
6.8 裂纹扩展、分岔与止裂·····	87
6.9 切槽爆破参数的计算·····	94
6.10 工程应用实例·····	98
参考文献·····	98
第7章 地下工程中的射孔爆破及压裂技术 ·····	100
7.1 聚能装药穿孔爆破作用机理·····	100
7.2 射孔弹及高能气体压裂技术·····	102
7.3 爆炸成形弹丸(EFP)及其射孔机理·····	104
7.4 工程应用实例·····	106
参考文献·····	109
第8章 井巷掘进大断面硐室大孔距崩落爆破技术 ·····	110
8.1 大孔距崩落爆破破岩理论·····	110
8.2 大孔距崩落爆破 m 值理论确定·····	111
8.3 合理 m 值模型试验研究·····	115
8.4 工程应用实例·····	118
参考文献·····	122
第9章 井巷掘进微差爆破 ·····	123
9.1 微差爆破原理·····	123
9.2 露天矿微差爆破间隔时间的确定·····	124

9.3	井巷掘进微差爆破间隔时间	127
9.4	模型试验研究	128
9.5	工程应用实例	132
	参考文献	133
第 10 章	井巷掘进光面爆破的理论基础及施工技术	134
10.1	光面爆破基本原理	134
10.2	周边眼间距	136
10.3	最小抵抗线	137
10.4	炮眼密集系数	138
10.5	光面爆破炮眼数目的确定	141
10.6	光面爆破软垫层装药结构的理论分析	142
10.7	光面爆破应用施工技术	146
10.8	工程应用实例	147
	参考文献	149
第 11 章	井巷掘进爆破设计 CAD 辅助系统	150
11.1	VBA 程序简介及运行环境	150
11.2	影响岩巷爆破设计的因素分析及爆破设计依据	152
11.3	岩巷掘进爆破程序设计的实现	154
11.4	工程应用实例	159
	参考文献	160
第 12 章	水耦合装药爆破的破岩特征分析	161
12.1	水耦合爆破时的爆炸冲击波	161
12.2	岩石中的粉碎区和裂隙区	166
12.3	水楔效应	168
12.4	爆破破岩能量	169
12.5	工程应用实例	169
	参考文献	171
第 13 章	地下工程切割控制爆破	172
13.1	切割控制爆破原理	172
13.2	井肩切割外井壁控制爆破	173
13.3	井壁卸压槽切割控制爆破	178
13.4	混凝土基础墙挖角爆破	180
13.5	爆破切割钻杆	182
	参考文献	183

第 14 章 立井深孔爆破技术	184
14.1 掏槽爆破.....	184
14.2 掏槽爆破模型试验.....	189
14.3 周边光面爆破.....	195
14.4 其他技术问题.....	196
14.5 工程应用实例.....	198
参考文献.....	201
第 15 章 立井冻结段掘进爆破技术	202
15.1 冻土的物理力学特性.....	202
15.2 爆炸载荷作用下冻土的力学特性.....	204
15.3 立井冻土爆破参数设计.....	205
15.4 冻土爆破模型试验.....	208
15.5 冻结基岩段全断面一次爆破.....	211
15.6 冻结段爆破中的其他技术问题.....	213
15.7 冻结段掘进爆破工程实例.....	214
15.8 冻结段爆破冻结管强度准则.....	220
参考文献.....	223

第 1 章 爆破破岩机理的力学基础

在炸药爆炸载荷作用下岩石的破碎是一个相当复杂的动力学过程。由于炸药爆轰过程中的高温、高压和高速度,以及爆破对象——岩石的非均质性、非连续性和各向异性等,使得人们对岩石爆破破坏机理了解得还很不够,至今仍然没有形成比较系统和完整的理论。在炸药爆炸作用下岩石的破坏,虽然可以看做是一种力学现象,但它决不是一般的力学过程,既不能用静力学,也不能用一般动力学来解释。目前较为公认的观点是,岩石的爆破破坏主要是由炸药爆轰后在岩石中激起的爆炸冲击波、应力波和爆生气体产物膨胀做功两个方面综合作用的结果。同时爆破过程也是炸药能量释放、传递、分配和做功的过程。

1.1 炸药爆轰理论概要

炸药爆轰是以流体动力学为理论基础的。炸药的爆轰可以当做是在炸药化学反应产生的能量支持下的冲击波的传播,这个波被称为爆轰波,它使前面的炸药体受到压缩,产生高达 $1000\sim 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温,促进炸药发生分解与反应。释放出的爆炸气体产物运动的方向与爆轰波传播的方向相同,气体的温度达 $3000\sim 5000\text{ }^{\circ}\text{C}$,压力达 $4000\sim 30000\text{ MPa}$ 。

1.1.1 爆轰波参数

爆轰波参数是指爆轰波波阵面(C—J 面)上的爆轰产物的状态参数,主要有爆轰波波阵面压力即爆轰压力 p_H 、爆轰波波速 D 、爆轰气体产物密度 ρ 和质点移动速度 u 、爆轰气体产物中的音速 c 。其值可根据质量守恒、动量守恒及能量守恒,再加上一个状态方程,并通过实测爆轰波波速来求解。

已证明理想气体状态方程不适用于高温、高压的爆生气体。H. Jones 在 20 世纪 40 年代末提出了如下状态方程:

$$p_H = Ae^{-\beta} - B + fRT \quad (1-1)$$

式中 p_H ——爆轰气体产物的压力;

T ——爆轰气体产物的温度;

R ——气体状态常数。

β 、 A 、 B 和 f 是按照氮的 Bridgemen $68\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线所定的常数。这个方程可以合理地推广应用至密度很高的气体混合物。

(1) 爆轰压力

炸药爆炸时,由动量守恒定理可以导出爆轰波波阵面上的压力为:

$$p_H = \rho_0 u D \quad (1-2)$$

式中 ρ_0 ——炸药密度。

炸药爆炸过程中,爆轰波波速 D 、爆轰气体产物质点移动速度 u 与爆轰气体产物中的音速 c 之间有如下关系:

$$D = u + c \quad (1-3)$$

而声速 c 又可以表示成:

$$c = ku \quad (1-4)$$

式中 k ——等熵指数($k=1.9+0.6\rho_0$),因此有:

$$u = \frac{D}{k+1} \quad (1-5)$$

将式(1-5)代入式(1-2)即得:

$$p_H = \frac{\rho_0 D^2}{k+1} \quad (1-6)$$

传统的由流体动力学理论求得的爆轰压力为:

$$p_H = \frac{\rho_0 D^2}{k_D + 1} \quad (1-7)$$

式中 k_D ——绝热指数,其值为^[1]:

$$k_D = \frac{(1+\beta) + [2(1+\beta) - 1] \frac{1.33\rho_0}{G}}{1 + \frac{1.33\rho_0}{G}} \quad (1-8)$$

式中 G ——爆生气体的部分爆热。

实质上绝热指数 k_D 是在爆轰状态下当熵值为常数时的压力—体积曲线的斜率。当炸药密度 ρ_0 很小时, $k_D \rightarrow (1+\beta)$, 这就是在理想状态下爆生气体的比热的比值;这种理想状态就是通常的绝热指数。而大多数炸药绝热指数近似取值为 $k_D=3$ 。炸药爆炸释放出的能量仅有部分在爆破时做有用功,式中 G 就是这部分能量。

(2) 爆轰产物状态参数

凝聚体炸药稳定爆轰时的其他爆轰产物的状态参数为:

$$u = \frac{1}{k_D + 1} D \quad (1-9)$$

$$\rho = \frac{k_D + 1}{k_D} \rho_0 \quad (1-10)$$

$$c = \frac{k_D}{k_D + 1} D \quad (1-11)$$

$$D^2 = 2[(1+\beta)^2 - 1]GQ_v \left(1 + \frac{1.33\rho_0}{G}\right) \quad (1-12)$$

式中 Q_v ——炸药爆热。

1.1.2 爆压

爆压即平均爆轰压力。以上讨论的是靠近爆轰波前的现象,而实际要处理的多是长径比很大的柱状装药。在爆轰状态下,爆生气体与爆轰波同向流动与传播,这种流动受到气体膨胀的阻滞,除非起爆点在真空中。若气体是装在一个坚固的容器中,则最后的压力就是爆压,并且是当炸药爆炸反应时产生的爆生气体产物在原有体积状态下发生的压力。气体的膨胀发生在爆轰波后面传播的稀释波中,结果为作用在柱形炮孔壁上的压力就是持续的爆压,而装药的端头的压力就是爆轰压力。爆压约为爆轰压力的一半,即:

$$p_c = \frac{1}{2} p_H = \frac{\rho_0 D^2}{2(k_D + 1)} \quad (1-13)$$

1.1.3 爆轰产物的临界压力

爆轰产物的临界压力,即爆生气体膨胀过程中冷压强开始占优势时的临界压力。其值为^[2]:

$$p_K = 0.154 \rho_0 \sqrt{(E - \frac{p_c}{2\rho_0})^3 \frac{\rho_0}{p_c}} \quad (1-14)$$

式中 p_c ——爆压;

E ——单位质量炸药所具有的能量。

近似计算时,对 TNT, $p_K = 280$ MPa;对一般炸药,通常取 $p_K = 200$ MPa。

1.2 孔壁初始冲击压力

1.2.1 初始冲击压力

爆轰产物碰撞炮孔孔壁时的压力,即为初始冲击压力。对初始冲击压力的计算,目前大约有下列几种观点。

(1) 初始冲击压力为爆轰波的压力

据美国学者 J. 亨利奇和日本学者熊尾日野的研究^[3],延长药包或柱状装药初始冲击压力为爆轰波的压力,即:

$$p_d = p_H = \frac{\rho_0 D^2}{1 + \kappa} \quad (1-15)$$

式中 p_d ——初始冲击压力;

κ ——常数,当 $\rho_0 > 1.2$ g/cm³ 时, $\kappa = 3$;当 $\rho_0 < 1.2$ g/cm³ 时, $\kappa = 2.1$ 。

同时给出了岩石中最大冲击超压的计算公式:

$$\Delta p = \frac{\rho_0 D^2}{1 + \kappa} \left(\frac{r_c}{R} \right)^\alpha \quad (1-16)$$

式中 r_c ——药包半径;

R ——距药包轴线的距离;

α ——与岩石性质和炸药性能有关的衰减指数, $\alpha = 1 \sim 2$,对大多数岩石近似取值为 $\alpha = 1.5$ 。

(2) 初始冲击压力取岩石与炸药界面压力

前苏联学者 A. H. 哈努卡耶夫取岩石与炸药界面处的压力为初始冲击压力,并给出岩石弹性区内应力波峰值压力随距离的衰减关系为:

$$p_m = p_d \left(\frac{r_c}{R} \right)^\alpha \quad (1-17)$$

式中 p_m ——岩体中某一点爆炸应力波峰值压力;

α ——应力衰减指数, $\alpha = 2 - \frac{\mu}{1 - \mu}$,其中 μ 为岩石的泊松比。

(3) 以 3~5 倍药包半径处的压力为初始冲击压力

中国学者陆遐龄^[4]通过试验得到 $3r_c$ 及 r_c 处的冲击波与初始能量相比,在大理石中耗损为 20%,在油页岩中耗损约为 35%,所以选取平均爆轰压力或界面压力为初始冲击压力是不够恰当的。因此,在岩石弹性区内,可选取 3~5 倍 r_c 处的压力为初始冲击压进行压力估算。即按式(1-7)计算炸药爆轰压力值,再按不同的爆炸条件及岩石条件,从表 1-1 中选择适当的衰减指数作为计算初始冲击压($3r_c \sim 5r_c$ 处)及弹性区岩石内各点应力值的衰减指数(对球形装药可取 $3r_c \sim 4r_c$ 处)的初始冲击压力,由此可建立岩石中的爆炸应力波的关系式:

$$p_m = p_i \left(\frac{r_c}{R} \right)^{\alpha} \tag{1-18}$$

式中 p_i ——压力计算时的初始冲击压力;
其他符号意义同前。
由此求得初始冲击压力为:

$$p_i = p_m \left(\frac{r_c}{R} \right)^{-\alpha} \tag{1-19}$$

该式适用于工程爆破中柱状或球形装药,且装药直径小于 0.5 m, R/r_c 在 10~20 之间。

表 1-1 不同爆破条件下岩体弹性区内应力衰减指数

岩石波速 /m · s ⁻¹		1000~300	3000~5000	4500~6000
岩石类型		灰岩、砾岩、片麻岩等	砂岩、石英岩、白云岩等	花岗岩、大理岩、闪长岩
α 值	堵塞爆破	1.7~2.1	1.6~2.0	1.4~1.8
	硇室爆破	1.8~2.4	1.8~2.3	1.7~2.1
	表面爆破	2.4~3.0	2.2~2.8	2.0~2.6

(4) 耦合装药条件下孔壁的初始冲击压力

文献[5]通过假定在岩石与炸药界面处爆轰波和岩石发生弹性碰撞求解出耦合装药条件下孔壁的初始冲击压力(或称初始径向应力峰值)为:

$$p_d = p_H \frac{2\rho_m D_0}{\rho_0 D + \rho_m D_0} \tag{1-20}$$

式中 D_0 ——孔壁处岩石中冲击波波速;
 ρ_m ——岩石介质的密度。

其他符号的物理意义同前。

岩石中激起的冲击波衰减很快,作用范围也很小,求算 p_d 时可忽略不计,近似认为爆轰波与岩石的碰撞是弹性的,直接在岩石中产生应力波,并按弹性波理论(或声学近似理论)计算爆轰波作用在岩石界面上的初始冲击压力。即有:

$$p_d = \frac{\rho_0 D^2}{k + 1} \times \frac{2\rho_m c_p}{\rho_0 D + \rho_m c_p} \tag{1-21}$$

式中 c_p ——岩石弹性纵波波速。

(5) 不耦合装药条件下孔壁的初始冲击压力

根据前苏联学者 K. K. 安德列耶夫和 A. Φ. 别辽耶夫的研究,爆轰气体产物膨胀撞击孔壁时压力增大。由此给出不耦合装药条件下孔壁的初始冲击压力为:

$$p_d = \frac{\rho_0 D^2}{2(k+1)} \left(\frac{d_c}{d_b} \right)^{2k} \cdot n \quad (1-22)$$

式中 d_c ——装药直径;

d_b ——炮孔直径;

n ——压力增大倍数, $n=8\sim 10$ 。

1.2.2 炮孔准静压力

(1) 耦合装药条件下炮孔壁上的准静压力

爆炸动态应力场在炮孔近区产生径向裂隙,随后爆生气体渗入裂隙中去,建立了新的准静态应力场。若忽略裂隙的体积,在耦合装药时,炮孔内爆生气体的准静态压力可按下式计算^[6]:

$$p_0 = \frac{1}{2} p_e \quad (1-23)$$

式中 p_e ——柱状装药时,应力波作用在孔壁上的压力。

(2) 不耦合装药条件下炮孔壁上的准静压力

爆生气体在炮孔中发生等熵绝热膨胀,充满整个炮孔时的气体压力,即为作用在孔壁上的准静压力。其值为:

$$p_0 = \left(\frac{p_c}{p_K} \right)^{\gamma/k} \left(\frac{d_c}{d_b} \right)^{2\gamma} p_K \quad (1-24)$$

式中 γ ——理想气体等熵指数, $\gamma=1.3$;

k ——爆生气体的绝热指数, $k=3$;

其他符号的物理意义同前。

1.3 爆炸冲击波的破岩特征

岩石中装药爆炸瞬间,爆轰波和高温高压的爆生气体产物撞击孔壁在炮孔周围岩石中激起径向传播的爆炸冲击波。在冲击波作用下,岩石介质冲击超压 p 、介质密度 ρ 、介质质点移动速度 u 、冲击波波速 D 和介质的其他状态参数在冲击波波阵面上发生突跃变化。冲击波波阵面的厚度接近分子的自由程($10^{-5}\sim 10^{-6}$ cm),因此,可把波阵面视为数学断裂面,波阵面后各参数逐渐衰减,其压力、密度比未扰动的岩石介质还要小。冲击波的冲量为:

$$I = \int_0^{\tau} p(t) dt \quad (1-25)$$

式中 $p(t)$ ——岩石中冲击超压;

t ——冲击波瞬时压缩作用时间;

τ ——冲击波压缩作用终了时间。

因冲击波具有相当强的冲量和相当高的能量,且峰值压力远高于岩石的动态抗压强度,故受其冲击压缩作用,炮孔周围岩石极度粉碎而形成粉碎区,同时孔壁岩石质点发生径向外移,爆腔扩大。文献[8]较系统地讨论了炮孔柱状装药爆破时冲击波作用下岩石粉碎区及其形成时间、爆腔半径及其膨胀规律。

1.3.1 岩石的状态方程

高温、高压下岩石的压力 p 、温度 T 、密度 ρ 之间的相互关系称为岩石的状态方程,即:

$$p = p(\rho, T) \tag{1-26}$$

对于坚硬材料(如有机玻璃、金属、石英、坚硬岩石等),爆炸压力可用下式计算^[7]:

$$p = B(\bar{\rho}^n - 1) \tag{1-27}$$

式中 p ——岩石介质中的爆炸冲击波压力;

$\bar{\rho}$ ——压缩比, $\bar{\rho} = \rho/\rho_m$, ρ 为已扰动岩石介质的密度, ρ_m 为未扰动岩石介质的密度;

n ——定压比热与定容比热之比,对于岩石一般取 $n = 3 \sim 4$;

B ——在一般条件下是一个取决于熵的变量,是熵的函数, $B = \rho_m c_p^2/n$ 。

Φ. A. 鲍姆把爆炸冲击波作用下的爆源近区岩石视做“不可压缩流体”,其变形由密度变化而引起,该处不可能出现剪应力,由此确定此处冲击波作用下岩石介质的状态方程为:

$$p = B(\bar{\rho}^4 - 1) \tag{1-28}$$

式中, B 是熵的函数,当冲击波速度达到每秒数千米时,忽略熵的增加,则 B 为定值, $B = \rho_m c_p^2/4$ 。上式可改写为:

$$\bar{\rho} = \frac{\rho}{\rho_m} = \left(\frac{p}{B} + 1 \right)^{1/4} \tag{1-29}$$

1.3.2 粉碎区半径

炮孔装药爆炸后,在炮孔周围近区的岩石中激起冲击波,波阵面上的岩石介质状态参数(主要指冲击波压力峰值 p 、冲击波的传播速度 D 、岩石的密度 ρ 、岩石质点运动速度 u 、单位质量岩石的内能增量 ΔE)满足质量守恒、动量守恒和能量守恒,即:

$$\rho_m D = \rho(D - u) \tag{1-30}$$

$$p = \rho_m D u \tag{1-31}$$

$$\Delta E = \frac{p}{2} \left(\frac{1}{\rho_m} - \frac{1}{\rho} \right) \tag{1-32}$$

岩石中冲击波波速和由其引起的岩石质点运动速度间存在如下关系:

$$D = a + bu \tag{1-33}$$

式中 a, b ——由实验确定的常数,表 1-2 为部分岩石的 a, b 值。

表 1-2 某些岩石的 a, b 值

岩石名称	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$a/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	b	岩石名称	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$a/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	b
花岗岩 1	2.63	2100	1.63	石灰岩 1	2.60	3500	1.43
花岗岩 2	2.67	3600	1.00	石灰岩 2	2.50	3400	1.27
玄武岩	2.67	2600	1.60	泥质细砂岩		520	1.78
辉长岩	2.98	3500	1.32	页 岩	2.00	3600	1.34
大理岩	2.70	4000	1.32	盐 岩	2.16	3500	1.33

考虑到在冲击波的强烈冲击压缩作用下,粉碎区内的岩石被极度破碎,故以流体为介质模型。因此对于炮孔柱状装药,冲击波波阵面后的岩石介质连续方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial r} + \frac{\rho u}{r} = 0 \quad (1-34)$$

式中 r ——冲击波传播距离(自炮孔中心的径向距离);

t ——与 r 对应的冲击波传播时间。

冲击波传播过程中,其波阵面后岩石介质密度变化很小,变化量一般不超过 7.7%。因此可将冲击波波阵面后岩石介质按不可压缩考虑,即认为 $\rho = \text{常数}$,这样上式变成:

$$\frac{du}{dr} + \frac{u}{r} = 0 \quad (1-35)$$

解此微分方程得

$$ur = C \quad (1-36)$$

式中 C ——待定常数,在孔壁处边界条件为 $u_0 r_b = C$, u_0, r_b 分别为孔壁岩石质点的初始运动速度和炮孔半径,将其代入上式得:

$$r = \frac{u_0}{u} r_b \quad (1-37)$$

当冲击波传播到粉碎区边缘时衰变成岩石中的应力波,速度衰变为应力波速 c_p 。由式(1-33)知此时岩石质点的运动速度为:

$$u_k = \frac{c_p - a}{b} \quad (1-38)$$

代入式(1-37)即可求得粉碎区半径为:

$$r_k = \frac{bu_0}{c_p - a} r_b \quad (1-39)$$

在孔壁处,冲击波波速及波阵面后岩石状态参数满足下式:

$$p_d = \rho_m D_0 u_0 \quad (1-40)$$

$$D_0 = a + bu_0 \quad (1-41)$$

式中 D_0 ——岩石中冲击波初始速度;

u_0 ——岩石质点运动初始速度;

p_d ——孔壁初始径向冲击压力。

炮孔耦合装药时孔壁初始冲击压力 p_d 为:

$$p_d = \frac{\rho_m D_0 \rho_0 D^2}{2(\rho_m D_0 + \rho_0 D)} \quad (1-42)$$

联立式(1-40)、式(1-42),并将式(1-41)代入可求得:

$$2b\rho_m u_0^2 + 2(\rho_0 D + \rho_m a)u_0 - \rho_0 D^2 = 0 \quad (1-43)$$

以常数 $M = 2b\rho_m$, $N = 2(\rho_0 D + \rho_m a)$ 代入,解此关于 u_0 的一元二次方程即可求出孔壁岩石质点运动的初始速度:

$$u_0 = \frac{1}{2M} (\sqrt{N^2 + 4M\rho_0 D^2} - N) \quad (1-44)$$

因此将 u_0 代入式(1-39)中便可求得爆炸冲击波作用下岩石的粉碎区半径:

$$r_k = \frac{br_b}{2M(c_p - a)} (\sqrt{N^2 + 4M\rho_0 D^2} - N) \quad (1-45)$$

除此以外,关于粉碎区半径的计算方法还有以下几种:

(1) 王文龙提出的计算公式^[2]

文献[2]把炮孔周围岩石中冲击波峰值压力 p 随距离 r 的变化近似为:

$$p = p_d \left(\frac{r_b}{r} \right)^\alpha \tag{1-46}$$

式中 α ——衰减指数, $\alpha = 2 \pm \frac{\mu}{1-\mu}$, 冲击波作用区取“+”, 应力波作用区取“-”;
 r_b ——炮孔半径。

在粉碎区边缘处冲击波衰减为应力波时同样满足动量守恒, 即:

$$p_{r_c} = \rho_m c_p u_{r_c} \tag{1-47}$$

式中 p_{r_c} ——粉碎区边缘处的压力峰值;
 u_{r_c} ——粉碎区边缘处的质点径向移动速度。

据此推导出粉碎区半径的计算公式为:

$$r_k = \left[\frac{\lambda p_d}{\rho_m c_p (c_p - a)} \right]^{1/\alpha} r_b \tag{1-48}$$

式中各符号的物理意义同前。

(2) 张奇提出的计算公式^[9]

文献[9]认为炸药的爆轰是瞬间完成的, 爆轰波与孔壁岩面发生弹性碰撞, 并假定冲击波波阵面后的岩石介质为不可压缩流体, 即 $\rho = \text{常数}$ 。据此推导出粉碎区半径的计算公式为:

$$r_k = \left(\frac{u_0 \rho_m c_p}{K_D S_c} \right) r_b \tag{1-49}$$

式中 S_c ——岩石静态单轴抗压强度;
 K_D ——爆炸冲击载荷作用下岩石强度提高系数, $K_D = 10 \sim 15$;
 u_0 ——孔壁岩石质点初始移动的速度, 其值为:

$$u_0 = 0.5(\sqrt{A^2 + 4B} - A) \tag{1-50}$$

其中, A, B 均为常数, $A = \frac{\rho_0 D + \rho_m a}{\rho_m b}$, $B = \frac{\rho_0 D_0}{4 \rho_m b}$ 。

表 1-3 为 2 号岩石铵梯炸药在炮孔柱状装药爆破时由上式计算的粉碎区半径。

表 1-3 柱状装药的粉碎区半径

岩石名称	$u_0/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\rho_m/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_p(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})/S_c(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	r_k/r_b
花岗岩	234	2670	29.8×10^{-6}	1.90
玄武岩	276	2670	24.9×10^{-6}	1.85
辉长岩	218	2980	23.2×10^{-6}	1.78
大理岩	214	2700	28.6×10^{-6}	1.65
页岩	280	2000	54.6×10^{-6}	3.05

同样, 文献[9]也据此推导出球状装药粉碎区半径的计算公式为:

$$r_k = \left(\frac{u_0 \rho_m c_p}{K_D S_c} \right)^{1/2} r_b \tag{1-51}$$

式中各符号的物理意义及取值均同前。表 1-4 为球状装药爆破时的粉碎区半径。

表 1-4 球状装药的粉碎区半径

岩石名称	$u_0/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\rho_m/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_p(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})/S_c(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	r_k/r_b
花岗岩	234	2670	29.8×10^{-6}	1.40
玄武岩	276	2670	24.9×10^{-6}	1.40
辉长岩	218	2980	23.2×10^{-6}	1.33
大理岩	214	2700	28.6×10^{-6}	1.28
页 岩	280	2000	54.5×10^{-6}	1.75

(3) 祝方才、陈寿如提出的计算公式^[10]

文献[10]认为爆炸载荷作用下在岩石中产生的最大剪应力是引起岩石介质流动破坏的主要因素。根据最大剪应力理论,在复杂应力情况下,当最大剪应力 $\tau_{\max}$ 达到材料的极限剪应力时就发生流动破坏。由此推导出耦耦合柱状装药粉碎区半径的计算公式为:

$$r_k = \left(\frac{p_c}{\tau_0} \right)^{1/\alpha} r_b \quad (1-52)$$

式中 p_c ——平均爆轰压力, $p_c = \frac{1}{8} \rho_0 D^2$;

τ_0 ——岩石抗剪强度;

其他符号的物理意义及取值均同前。

1.3.3 冲击压缩时间

冲击波的冲击压缩时间是指从爆轰波激起岩石中的爆炸冲击波到粉碎区边缘冲击波衰减为应力波的时间,亦即是冲击波在粉碎区内的传播时间或粉碎区的形成时间。

由于在粉碎区岩石介质近似为流体模型,根据谢多夫. Д. И. 强爆炸问题的量纲分析有^[11]:

$$r = \left(\frac{A}{\rho_m} \right)^{1/4} t^{1/2} \quad (1-53)$$

式中 r ——柱状冲击波的作用半径;

t ——与 r 相对应的时间参数;

A ——常数。

上式对时间 t 求导可得冲击波的传播速度为:

$$D_r = \frac{dr}{dt} = \frac{1}{2} \left(\frac{A}{\rho_m} \right)^{1/4} t^{-1/2} \quad (1-54)$$

在初始时刻 $t=t_0$,孔壁处压缩开始时的波速为:

$$D_0 = \frac{1}{2} \left(\frac{A}{\rho_m} \right)^{1/4} t_0^{-1/2} \quad (1-55)$$

联立式(1-41)和式(1-55)以上两式可求得初始压缩时间 t_0 为:

$$t_0 = \frac{1}{4(a + bu_0)^2} \left(\frac{A}{\rho_m} \right)^{1/2} \quad (1-56)$$

在 $t=t_k$ 结束时刻,即粉碎区边缘处压缩结束时的波速为: