

杨 军 金乾坤 黄风雷 著

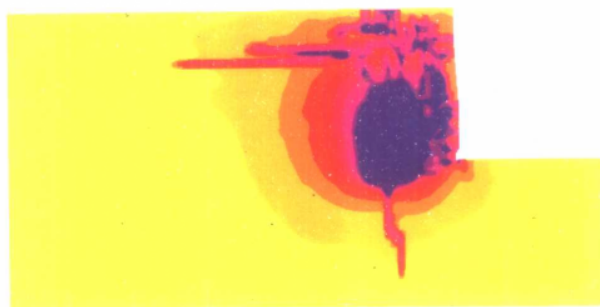
岩石爆破理论模型及数值计算

BENCH BLASTING

Time = 0.005
Contours of effective plastic strain
min=0.00679171, at elem# 3361
max=1, at elem# 4961

Fringe Levels

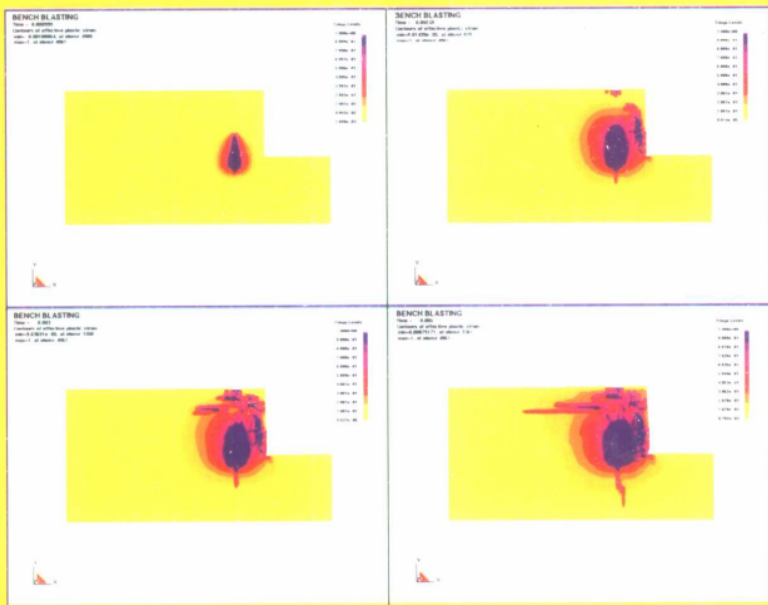
1.000e+00
9.009e-01
8.018e-01
7.026e-01
6.035e-01
5.044e-01
4.053e-01
3.062e-01
2.070e-01
1.079e-01
0.782e-01



科学出版社

(TB-0182.1101)

责任编辑：杨家福



ISBN 7-03-007367-3



9 787030 073679 >

ISBN 7-03-007367-3/TB·182

定价：10.00 元

岩石爆破理论模型及数值计算

杨 军 金乾坤 黄风雷 著

科 学 出 版 社

1999

内 容 简 介

本书在总结岩石爆破理论模型的发展历史的基础上,着重阐述了岩石爆破损伤模型的理论依据、本构关系、数值计算方法和实际应用等。书中涉及岩石爆破损伤模型的损伤参量的确定和损伤演化规律表述方法,利用损伤模型进行数值计算的有关技术及其实用性,以及为验证岩石爆破损伤模型和获取此模型所需参数而进行的爆破漏斗试验、轻气炮实验和高速摄影实验。书中的现场试验和工程实例说明,这种基于新模型的计算方法可以满足实际需要。

本书共七章,包括概述、岩石爆破弹性模型和断裂模型、岩石爆破损伤模型、数值计算方法和实用程序、计算实例以及爆破理论研究的实验工作等内容。

本书可供从事爆破理论及其工程应用研究的科研人员、研究生,以及高等院校相应专业的师生参考,也可供冶金、煤炭、铁路、交通、兵器和水利水电等部门从事爆破工程的技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

岩石爆破理论模型及数值计算/杨军等著. -北京:科学出版社, 1999.4

ISBN 7-03-007367-3

I. 岩… I. 杨… II. ①岩石爆破-数学模型-理论
②岩石爆破-数值计算-计算方法 N. TD235.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 06172 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

中国科学院印刷厂 印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1999 年 4 月 第 一 版 开本: 850 × 1165 1/32

1999 年 4 月第一次印刷 印张: 4%

印数: 1—3 000

字数: 118 000

定价: 10.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

前 言

岩石爆破技术在国民经济建设的很多领域得到了广泛应用。随着爆破技术的发展,依靠传统经验进行设计的方式已不能满足工程实际需要,而爆破领域的计算机应用迫切需要一个能用于数值计算的岩石爆破理论模型。岩石爆破损伤模型及其数值计算研究是国内外工程爆破学术领域的热点研究课题。但岩石材料的损伤特性和爆破载荷的起动态特性使得这方面的研究进展较慢,与工程和生产实际需要相脱节。本书从爆破理论模型的发展历程、爆破损伤模型建立和完善、数值计算方法和计算实例以及相关的实验工作等方面,系统地总结和表述了这一研究领域的理论体系和最新研究成果,并辅以一定的计算实例和实验结果。此书归纳了作者近年来从事爆破理论模型研究的科研成果,它不仅包含了岩石爆破损伤模型的探索成果(即分形损伤模型和脆性损伤模型),而且还针对爆破工程数值计算中的实际问题提出了有效的解决方法,这些对于推进岩石爆破数值计算的实用化将会产生一定的影响。

本书既可作为高等院校和研究单位从事爆破理论及工程技术研究的教师、研究生和科研人员学习爆破理论的教科书,也可作为应用计算机技术解决工程爆破实际问题的参考书。

北京理工大学恽寿榕教授在百忙中认真地审阅了全书,高文学博士参加了第3章和第5章的实验和撰写工作;中国矿业大学的王树仁教授对本书的理论部分给予很多指导;本书还得到了日本友人胜山邦久等同行的热情帮助,特在此对他们表示衷心的感谢和诚挚的敬意!

由于作者水平有限,书中的错误和不妥在所难免,恳请读者批评指正。

ABSTRACT

Based on summarizing theoretical models of rock blasting, this book expounds the theoretical foundation of damage models for rock blasting, constitutive relation, numerical calculation methods and practical application problems. It also concerns with damage parameter and its evolution law, the numerical calculation and its usefulness and experiments including blasting crater, light-gas gun and high-speed photography for verifying damage models of rock blasting and obtaining material parameters. Site tests and engineering examples indicate that the calculation method based on new models can satisfy the need of engineering practice.

目 录

1 概述	1
1.1 引言	1
1.2 爆破理论模型发展历程	2
1.2.1 弹性理论阶段	2
1.2.2 断裂理论阶段	3
1.2.3 损伤理论阶段	4
1.3 爆破损伤模型的研究现状	5
1.3.1 裂纹密度	5
1.3.2 分形维数	6
1.3.3 声波速度	7
1.3.4 其它损伤模型	8
1.4 存在的问题及发展趋势	9
2 岩石爆破弹性模型和断裂模型.....	12
2.1 岩石爆破机理	12
2.2 弹性理论模型	15
2.2.1 G. Harries 模型	15
2.2.2 R. F. Favreau 模型	16
2.2.3 露天矿台阶爆破三维数学模型	17
2.3 断裂理论模型	20
2.3.1 NAG-FRAG 模型	21
2.3.2 BCM 模型	22
3 岩石爆破损伤模型.....	26
3.1 连续介质损伤力学	26
3.2 岩石爆破损伤模型	28
3.3 损伤模型存在的问题分析	30
3.3.1 关于岩石损伤的描述	30
3.3.2 关于爆破过程的损伤演化	31

3.4	脆性岩石冲击损伤模型	32
3.4.1	损伤判据的建立	35
3.4.2	损伤演化方程的建立	35
3.4.3	动态本构关系	36
3.4.4	模型的实验验证	37
4	岩石爆破分形损伤模型	39
4.1	分形几何及其在岩石力学研究中的应用	39
4.1.1	分形几何	39
4.1.2	分形维数	40
4.1.3	分形几何在岩石力学和地球物理研究中的应用	41
4.2	岩石中裂纹及其发展的分形研究	42
4.2.1	裂纹的分形	42
4.2.2	加载条件下裂纹分形演化规律	43
4.2.3	分形维数与能量耗散率的关系	46
4.3	岩石爆破块度分形研究	47
4.3.1	岩块的分形	47
4.3.2	爆破块度分布的分布特征	48
4.3.3	块度分形维与裂纹分形维的关系	50
4.4	岩石爆破分形损伤模型	51
4.4.1	岩石爆破分形损伤模型的主要观点和假设	51
4.4.2	岩石爆破分形损伤模型	54
5	岩石爆破损伤实验研究	58
5.1	爆破过程裂纹发展的高速摄影试验研究	58
5.1.1	实验材料及装置	58
5.1.2	爆破过程裂纹发展的高速摄影试验及结果分析	58
5.2	损伤材料爆破过程的光弹性试验研究	65
5.2.1	损伤材料光弹性实验原理	66
5.2.2	损伤材料爆破过程的光弹性实验研究	67
5.2.3	Hopkinson 杆动态裂纹发展分形研究	71
5.3	岩石冲击损伤实验	74
5.3.1	冲击损伤实验	75
5.3.2	超声波测试	78
5.4	冲击 Hugoniot 参数计算	83

6 数值计算方法和实用程序	86
6.1 LS-DYNA 程序	87
6.1.1 程序功能简介	87
6.1.2 控制方程和空间有限元离散化	88
6.1.3 沙漏粘性与人工体积粘性控制	92
6.1.4 应力计算	94
6.1.5 时间积分和时步长控制	95
6.1.6 接触-碰撞功能	97
6.2 数值计算分析	98
6.3 SHALE 程序及数值分析	103
6.3.1 二维非定常有限差分计算方法简介	103
6.3.2 岩石爆破过程数值模拟程序	106
6.3.3 数值计算分析	108
6.4 爆破效果预测	113
6.4.1 爆破漏斗范围确定	113
6.4.2 爆破块度分布预报	114
7 数值计算的工程应用	116
7.1 爆破漏斗问题数值模拟	116
7.1.1 现场试验条件及岩石参数	116
7.1.2 试验结果分析	118
7.1.3 数值模拟结果及对比分析	120
7.2 深孔扩壶爆破的数值模拟	124
7.2.1 工程简介	124
7.2.2 深孔爆破数值模拟	125
7.2.3 扩壶爆破数值模拟	127
7.3 深孔爆破空隙装药数值模拟	129
7.3.1 深孔底部空隙装药爆破过程数值模拟	130
7.3.2 计算结果分析	131
7.4 岩石冲击损伤模型的工程应用	132
参考文献	135

CATALOGUE

1	OUTLINE	1
1.1	Introduction	1
1.2	Development of blasting theoretical models	2
1.2.1	Elastic theory stage	2
1.2.2	Fracture theory stage	3
1.2.3	Damage theory stage	4
1.3	Current study situation of blasting damage models	5
1.3.1	Crack density	5
1.3.2	Fractal dimension	6
1.3.3	Sound wave velocity	7
1.3.4	Other damage models	8
1.4	Existent problems and developmental trends	9
2	ELASTIC AND FRACTURE MODELS OF ROCK	
	BLASTING	12
2.1	Mechanisms of rock blasting	12
2.2	Elastic theoretical models	15
2.2.1	Harries model	15
2.2.2	Favreau model	16
2.2.3	3D mathematic model of bench blasting in open-pit mine	17
2.3	Fracture theoretical models	20
2.3.1	NAG-FRAG model	21
2.3.2	BCM model	22
3	DAMAGE MODELS OF ROCK BLASTING	26
3.1	Continuum damage mechanics	26

3.2	Damage models of rock blasting	28
3.3	Analyses of existent problems of damage models	30
3.3.1	Description on rock damage	30
3.3.2	Damage evolution with regard to blasting	31
3.4	Damage model for brittle rocks under shock loading	32
3.4.1	Establishment of damage criterion	35
3.4.2	Establishment of damage evolution equation	35
3.4.3	Dynamic constitutive relations	36
3.4.4	Experimental evidences of the model	37
4	FRactal DAMAGE MODEL FOR ROCK BLASTING...	
		39
4.1	Fractal geometry and its application on rock mechanics	39
4.1.1	Fractal geometry	39
4.1.2	Fractal dimension	40
4.1.3	Application of <i>fractal geometry</i> on rock mechanics and geophysics	41
4.2	Fractal study on cracks and their evolution in rocks	42
4.2.1	Fractal dimension of cracks	42
4.2.2	Fractal evolution law of cracks under loading	43
4.2.3	Relation between fractal dimension and energy dissipative rate	46
4.3	Fractal study on fragment size of rock by blasting	47
4.3.1	Fractal dimension of rock mass	47
4.3.2	Distributed characteristic of fragment size of rock by blasting	48
4.3.3	Relation between fractal dimension of rock mass and cracks	50
4.4	Fractal damage model for rock blasting	51
4.4.1	Main viewpoints and assumptions of FDM for rock blasting	51

4. 4. 2	Fractal damage model for rock blasting	54
5	EXPERIMENTAL STUDY OF DAMAGE IN ROCK BY BLASTING	58
5. 1	Experimental study on high-speed photography for crack development during blasting	58
5. 1. 1	Experimental material and installation	58
5. 1. 2	High-speed photographic experiment and result analyses	58
5. 2	Photo-elastic experimental study of damaged materials during blasting	65
5. 2. 1	Photo-elastic experimental principle of damaged materials	66
5. 2. 2	Photo-elastic experimental study of damaged materials during blasting	67
5. 2. 3	Fractal study of dynamic crack evolution in Hopkinson bar	71
5. 3	Experiment of shock-induced damage in rocks	74
5. 3. 1	Experiment of damage by shock	75
5. 3. 2	Ultrasonic wave measurement	78
5. 4	Calculation of shock Hugoniot parameters	83
6	NUMERICAL CALCULATION METHODS AND USEFUL PROGRAMS	86
6. 1	LS-DYNA program	87
6. 1. 1	Brief introduction to the function of the program	87
6. 1. 2	Control equation	88
6. 1. 3	Control for hourglass viscosity and artificial volume viscosity	92
6. 1. 4	Stress calculation	94
6. 1. 5	Time integral and time step control	95
6. 1. 6	Contact-impact function	97

6.2	Numerical calculation analyses	98
6.3	SHALE program	103
6.3.1	Brief introduction to 2D finite differential method ...	103
6.3.2	Numerical simulation program for rock blasting	106
6.3.3	Numerical calculation analyses	108
6.4	Blasting effect prediction	113
6.4.1	Determination of blasting crater	113
6.4.2	Fragment size distribution	114
7	APPLICATION OF NUMERICAL CALCULATIONS ON	
	ENGINEERING PROBLEMS	116
7.1	Numerical simulation of blasting crater	116
7.1.1	Site test conditions and rock parameters	116
7.1.2	Analyses of test results	118
7.1.3	Numerical simulation results and comparative analyses	120
7.2	Numerical simulation for chambering blasting	124
7.2.1	Brief introduction to the engineering	124
7.2.2	Numerical simulation for deep-hole blasting	125
7.2.3	Numerical simulation for chambering blasting	127
7.3	Numerical simulation for deep-hole blasting with bottom gap	129
7.3.1	Numerical simulations	130
7.3.2	Analyses of numerical calculating results	131
7.4	Engineering application of dynamic damage model for rock	132
	References	135

1 概 述

1.1 引 言

长期以来,岩石爆破的理论模型研究一直是岩石动力学和岩石爆破研究领域的一个热点课题,并且日益受到工程爆破学术界和工程应用部门的关注。随着国民经济建设的发展,岩石爆破技术在水利水电、矿山、交通等的各个领域获得了广泛应用,并且带来了巨大的经济效益和社会效益;尤其是像在三峡工程等巨型国家建设项目的实施,对于提高爆破质量和有效地保护周围岩体安全稳定等提出了更高的要求,这就使得积极开展这门学科的理论研究具有重要的现实意义。爆破技术的迅速发展和计算机应用技术的广泛普及,对爆破理论模型研究也创造更为有利的条件。

损伤力学的发展及其在岩石力学领域的应用,使我们可以用连续介质力学的方法,唯象地确定岩石材料含损伤演化的动态本构关系^[1]。国内外有关研究证明,岩石爆破损伤模型是新近发展起来的较能客观反映岩石爆破物理过程的一种理论模型。在建立岩石爆破损伤模型时,大都引入内变量来描述岩石爆破过程细观结构的变化,根据其细观结构的裂纹演化得出宏观破坏的力学准则。细观力学中“从材料微观结构和损伤断裂过程所反映的复杂现象中寻找出某些特征参量,并建立起与之相应的宏观力学现象间的联系”^[2]的研究方法,以及用分形维数作为损伤参量^[3]研究损伤演化的方法,对爆破损伤模型的发展提供了新途径。近年来关于冲击载荷作用下岩石损伤过程的波速衰减规律研究^[44,47],将细观破坏特征的测量分析与岩石损伤演化过程联系起来^[6],也为爆破模型研究提供了新的研究思路。

1.2 爆破理论模型发展历程

岩石爆破计算模型包括两类模型,即经验模型和理论模型。前者是建立在经验公式基础上,适用于处理一定范围内的具体工程设计和参数优化问题;后者是建立在爆破机理基础上的普遍适用于各种爆破计算和分析的模型。回顾岩石爆破理论模型及数值计算研究的发展历程,可将其分为弹性阶段、断裂阶段和损伤阶段三部分。

1.2.1 弹性理论阶段

关于岩石爆破理论的研究可以追溯到 60 年代。具有代表性的 Harries 模型和 Favreau 模型都是将岩石视为均质弹性体处理的,这两个模型至今还在澳大利亚和加拿大等国广泛地使用。Harries 模型^[7](1973)是建立在弹性应变波基础上的高度简化的准静态模型。该模型认为作用于孔壁的爆生气体压力产生的切向拉应变是形成裂缝的主要原因,并以应变值大小决定径向裂纹个数,用 Monte Carlo 法确定爆破裂缝分割的破碎块度。Harries 模型首次解决了以往爆破物理模型的使用局限性及难以定量的问题,开辟了计算机应用于爆破理论研究的新方向。Favreau 模型^[8]已有 20 余年的发展历史,以此为基础的 BLASPA 数值模拟程序在加拿大国内外 50 余个矿山得到了广泛应用。Favreau 模型是建立在爆炸应力波理论基础上的三维弹性模型。该模型充分考虑了压缩应力波及其在各个自由面的反射拉伸波和爆生气体膨胀压力的联合作用效果,最终以岩石动态抗拉强度作为破坏判据。该模型具有模拟炸药参数、孔网参数及岩石炸药匹配关系等爆破因素的综合能力,并可预报爆破块度。1983 年我国马鞍山矿山研究院推出的 BMMC^[9](露天矿台阶爆破三维数学模型),就是在此基础上开发的利用单位表面能理论作为破坏判据的改进模型,它是我国第一个完整的爆破数值计算模型。

1.2.2 断裂理论阶段

随着断裂力学的发展和岩石断裂理论研究的深入,岩石中裂纹扩展及断裂破坏问题也渗入了爆破理论研究领域。在这方面有代表性的爆破模型主要有 BCM 模型和 NAG-FRAG 模型。

NAG-FRAG 模型^[33](Stuar Mchugh, 1983)以应力波使岩石中原有裂纹激活而形成裂缝为主,同时也考虑了爆生气体压力引起的裂缝进一步扩展。该模型认为爆炸作用下岩石破坏范围及破坏程度取决于受应力波作用激活的裂纹数量和裂纹的扩展速度。使用裂纹扩展临界力 σ_{k0} 作为开裂判据

$$\sigma_{k0} = K_{IC} \sqrt{\pi/4R^*}$$

R^* 为临界半径, K_{IC} 为断裂韧性。该模型还涉及到裂纹相互作用引起的应力降低和层裂作用形成的破碎块度估算等内容。该模型使用一维爆炸波传播程序 PUFF 实现爆破过程模拟。BCM 模型^[11]也称层状裂缝岩石爆破模型,是美国能源部组织研究的用于二维有限差分应力波计算程序 SHALE 中的岩石爆破模型。该模型是在 Griffith 裂缝传播理论基础上建立的,认为岩石中存在的微缺陷可看作是均匀分布的扁平状裂隙。这些裂隙的稳定性可用能量平衡理论判断:当受法向拉应力作用时,如果释放的应变能超过建立新表面所需的能量,则裂纹扩展。当 σ_{zz} 为压应力时,裂缝闭合但两裂缝面的摩擦也需要消耗能量,并开始用有效弹性模量表示岩石中大量存在的裂缝对应力波传播的影响。澳大利亚的 R. Danell 等人对 BCM 模型进行了如下修改:把断裂韧性 K_{IC} 引入冲击波拉剪作用下的裂纹尺寸公式,采用 Grady^[12]的研究成果近似地预报块度。该模型在 DYNA2D 有限元程序上实现了爆破参数优化和块度预报功能,但爆破漏斗轮廓与实际出入较大。NAG-FRAG 模型用一维载荷作用下的裂缝发展情况来解决三维应力场作用下的爆破过程过于简单,而 BCM 模型中裂纹均呈水平状发育仅适用于有层理或沉积类岩石,具有局限性,这是用断裂力学理论构造爆破模型存在的弱点。要全面顾及岩石中存在的大量的随机分布的

微裂纹及其对爆破作用的影响,损伤力学理论显示出更大的优越性。

1.2.3 损伤理论阶段

美国 Sandia 国家实验室从 80 年代初就开展了岩石爆破损伤模型的研究。研究工作包括两个部分:其一为用动载程序 PRONTO 计算应力波传播和构造岩石动载作用下破坏的损伤模型;其二研究爆生气体作用下的破碎块度运动问题。Kipp 和 Grady^[40] (1980)最初提出的损伤模型认为原岩中含有大量随机分布的原生裂纹,在爆破荷载作用下激活的裂纹数目服从指数分布,并引入损伤参量 D 表示这些裂纹开裂引起的岩石强度降低。由于该模型所依赖的一些岩石参数不容易测定使其应用受到限制。Grady 的贡献还在于利用能量平衡理论推导出了脆性断裂条件下的平均破碎块度直径表达式^[12]。1985 年,Chen 和 Taylor^[13]将 O'Connell 关于损伤材料的裂纹密度与有效体积模量、有效泊松比关系的研究结果引入损伤模型,明确了损伤参量 D 与以上各参量的关系,从而改进了 Kipp 和 Grady 提出的模型,扩大了其适用性。在以上研究基础上,J. S. Kuszmaul 在 1987 年提出了新的岩石爆破损伤本构模型(以下简称 TCK 模型)^[14]。TCK 模型认为岩石的抗压强度远高于其抗拉强度,所以岩石动载破坏本构模型可分为两部分:当岩石处于体积压缩状态时,属于弹塑性材料,而处于体积拉伸状态时发生脆性断裂,且断裂裂纹形态与应变率有关。TCK 模型在裂纹激活率和裂纹平均尺寸等方面保持了 Kipp 和 Grady 的公式,而在损伤参量 D 与裂纹密度 C_d 及有效泊松比等参数的关系处理上采取了 Taylor 和 Chen 的公式,最后以 D 形式出现在岩石拉伸应力作用的应力-应变关系(包括体积应力与体积应变,应力偏量与应变偏量)式中。模型中出现的材料常数是通过高值稳定应变率加载条件下岩石拉伸破坏试验确定的。因为 TCK 模型集中了前述两个模型的优点,所以在模拟岩石性质方面更加合理且接近实际。但是,就爆破漏斗而言在自由面附近与实际破碎范围符合,而在漏斗