

岩石动力学特性



与爆破理论

戴俊 编著

冶金工业出版社

岩石动力学特性与爆破理论

戴俊 编著

北 京

冶金工业出版社

2002

**DYNAMIC BEHAVIORS AND
BLASTING THEORY OF ROCK**

Dai jun

Beijing

Metallurgical Industry Press

2002

内 容 提 要

本书介绍岩石中的应力波及传播理论,动态载荷作用下岩石的本构关系、断裂破坏机理和强度理论以及岩石爆破理论的最新进展,包括作者近年的研究成果。

全书分6章,第1章介绍岩石力学性质的基本概念,包括本构关系和强度理论;第2章介绍固体的应力波基本理论;第3章介绍岩石中应力波传播的基本特征;第4章介绍动载荷作用下,岩石的本构关系与破坏准则;第5章介绍岩石爆破的模型与进展;第6章介绍岩石周边爆破的新理论与应用技术。

本书可作为高等院校岩土工程、结构工程专业(爆破工程与动力学研究方向)研究生的教学参考书,也可供从事爆破工程、地震与防护工程、采矿工程、国防工程、铁路工程、水利水电工程等的高校教师、研究人员、研究生及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

岩石动力学特性与爆破理论/戴俊编著. —北京:冶金工业出版社,2002.5

ISBN 7-5024-2994-8

I. 岩… II. 戴… III. ①岩石力学性质②爆破—理论研究 IV. ①TU452②TB41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 019961 号

出版人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑 章秀珍 美术编辑 李 心 责任校对 王永欣 责任印制 李玉山

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2002 年 5 月第 1 版,2002 年 5 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32;7.875 印张;208 千字;225 页;1-1500 册

20.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

ABSTRACT

In this literature, the theory on stress wave and its propagation is introduced, as well as the constitutive relation of rock under dynamic loading, its mechanism on fracture and fragmentation, and the recent advance in the theory on rock blasting including author's research achievements gained in recent years.

The literature consists of six chapters. In the chapter one are the essential concepts of the mechanic properties of rock, including constitutive relation and the strength theory, and in the chapter two the basic theory on stress wave in solid. In the chapter three are the primary characteristics of propagation of stress wave in rock, and in the chapter four the constitutive relation and fragmentation criterion under dynamic loading. In the chapter five is the blasting models of rock and its development, and in the chapter six the latest theory on perimeter blasting and its application technology.

The literature is suitable for graduate students majoring in geotechnic engineering, structural engineering and blasting engineering to read. It can else be used as reference material by the teachers in college, the researchers, the graduate students, and technicians majoring in blasting engineering, earthquake and its defense engineering, mining engineering, national defense engineering, railroad engineering, water conservancy and hydra-electric engineering etc.

前 言

爆破是目前岩石开挖的主要方法。工程中,实施岩石爆破时,一方面使开挖部分的岩石达到合理有效的破碎;另一方面尽可能减少爆破对开挖边界以外的岩石损伤或破坏,有效保护爆后保留岩石的稳定性,这是广大爆破专业技术人员追求的目标。然而,由于岩石性质和岩石爆破过程的复杂性,目前仍有许多问题亟待解决,急需介绍岩石爆破理论与技术的基础理论、学科前沿与最新研究成果的著作。

岩石爆破是一个复杂的动力学过程。对这一过程进行研究需要用到岩石力学和固体中的应力波理论等多学科知识。目前,尚缺少介绍这两方面知识及其在岩石爆破理论与技术研究中应用的专著,不便于年轻研究人员及研究生尽快熟悉掌握必备知识,掌握学科的前沿与发展方向。本书正是作者根据多年从事研究生教学的经验,在有关研究成果的基础上,为了解决这个问题而完成的。

近年来,在国内外学者的共同努力下,岩石爆破理论的研究取得了许多重要的研究成果,大大促进了岩石爆破新技术的广泛应用。本书首先介绍了研究岩石爆破理论所必须的静载下岩石的变形与强度特性与固体中的应力波理论等知识,而后介绍了岩石中应力波传播特征与岩石动力学性能实验方法及近年来在这方面已有的研究成果,并重点介绍了岩石爆破作用理论及其计算模型的研究进展及最新的研究成果,最后介绍了作者近几年在岩石周边控制爆破理论研究领域中所取得的研究成果。

本书全面总结了目前较成熟的岩石爆破理论知识与最新研究成果。有助于研究生及相关研究人员把握学科前沿与发展动态。

因此,本书不仅适合于岩石爆破工程领域的研究生、高校教师及相关研究人员阅读,而且也适合于岩土工程、结构工程专业的研究生、高校教师及相关研究人员阅读,还可供从事地震与防护、采矿、国防、道路、水利水电等工程的相关教师、研究生及工程技术人员参考。

我的两位导师,王树仁教授和杨永琦教授对本书的写作完成始终给予了大力支持和热情帮助,在此表示衷心感谢。此外,在本书的写作过程中,参考了国内外同行公开发表的众多研究成果,在此一并对他们表示感谢。

由于作者水平所限,加之时间仓促,不当之处在所难免,敬请各位读者批评指正,并予赐教。

作 者

2002年1月10日于西安

FOREWORD

Nowadays, blasting is the main rock-excavating method. In engineering, it is required that blasting, on the one hand, make the rock to be excavated be fragmented suitably and effectively, on the other hand, minimize the damage or fracture from blasting in the rock beyond excavation to keep the national stability of the remaining rock. Both of them are the goal the blasting technicians make great efforts for. But, there exist many problems to be resolved because of the complexity in rock property and blasting process of rock. As a result, one literature is needed that discusses the essential theory and technology on rock blasting, and its development trends and newest research achievements.

Blasting rock is a complicated dynamic process. To research it, many subjects of knowledge, such as rock mechanics and theory of stress wave in solid etc will be used. But there exists no book containing such knowledge and its application in the research of the blasting and technology of rock. As a result, it is not convenient for young researchers and graduate students to learn and know well the essential information and the development front line and direction of these subjects. It is for all of these that the literature is written based on the experience in author's teaching graduate students for many years and correlative achievements.

In recent years, many important achievements in theory on rock blasting have been obtained because of the efforts made by domestic and oversea scholars, and the achievements obtained accelerate the broad application of new blasting technique. First of all, the literature

discusses the information needed for researching the theory of rock blasting, such as formation and strength characteristic feature of rock under static load and theory of stress wave in solid. Next, introduce the research results obtained in recent years in such aspects as propagation characteristic of stress wave in rock and test methods for dynamic property of rock. And then, introduce especially blasting action principle and its calculation model and the newest research achievement and the latest advancement in them. Lastly, introduce the author's achievement obtained in recent years in the research of theory on controlled perimeter blasting of rock.

The book sums up comprehensively the existing blasting theory of rock and its newest achievement from research. It is helpful for graduate students and correlative persons to know well the front line development trend of the subject. So the book is befitting not only for graduate students, teachers in college, and correlative researchers majoring in the subject, but also for those majoring in geotechnic engineering and structural engineering to read. The book can else be used as reference material by graduate students, teachers in college, and engineering technicians in the fields, such as earthquake and its defense, mining, national defense, highway, water conservation and hydra-electric engineering.

Here, I will give my devout thanks to Professor Wang Shu-ren and Professor Yang Yong-qi, my doctor tutors, for their passional supporting and great help from beginning to end. Furthermore, I will thank domestic and oversea craft brothers for some of their publications being consulted during author's writing.

Maybe, there are some mistakes in this book because author's limit knowledge and hurried time. So the pointing out the mistakes and criticizing and grant instruction are warmly welcome.

Author
In Xi'an, 2002.1.10

目 录

1 静载下岩石的变形与强度	1
1.1 岩石中的应力	1
1.1.1 应力的定义	1
1.1.2 主应力及其主方向	2
1.1.3 应力不变量与应力偏量	4
1.1.4 应力分量应满足的平衡方程与相容方程	6
1.2 岩石中的位移与应变	7
1.2.1 位移与应变的关系	7
1.2.2 岩石中任一点的应变状态与主应变	7
1.2.3 主应变与应变不变量	9
1.2.4 应变偏量及其不变量	9
1.3 岩石的本构关系	10
1.3.1 单轴应力条件下岩石的应力应变关系及其特点	10
1.3.2 岩石变形的表示指标	12
1.3.3 三轴应力下岩石的变形特征	14
1.3.4 岩石的本构模型	15
1.4 弹性应力下岩石本构方程的一般理论	17
1.5 岩石的强度与强度准则	20
1.5.1 岩石的强度	20
1.5.2 加载条件对岩石强度的影响	21
1.5.3 强度准则	24
1.6 岩石力学中的损伤理论与分形方法	29
1.6.1 损伤及其表示	30
1.6.2 损伤的演化方程及损伤材料的本构方程	31

1.6.3	岩石中损伤的测量方法	32
1.6.4	岩石力学中的分形几何方法	34
2	固体中的应力波理论	38
2.1	应力波的基本概念	38
2.1.1	应力波的产生	38
2.1.2	应力波分类	39
2.1.3	应力波方程的求解方法	40
2.1.4	应力波理论的应用	42
2.2	无限介质中的弹性应力波方程	42
2.3	一维长杆中的应力波	44
2.3.1	描述运动的坐标系	44
2.3.2	一维应力波的基本假定	46
2.3.3	一维杆中纵波的控制方程	46
2.4	一维杆中应力波方程的特征线求解	48
2.4.1	特征线及特征线上的相容关系	48
2.4.2	半无限长杆中一维弹性应力波的特征线解	50
2.4.3	线弹性应力波	51
2.4.4	一维半无限长杆中弹性应力波的作图法求解	53
2.4.5	弹塑性应力波	54
2.5	一维弹性应力波的反射与透射	55
2.5.1	两弹性波的相互作用	55
2.5.2	弹性波在固定端和自由端的反射	57
2.5.3	不同介质界面上弹性波的反射与透射	58
2.6	弹性波斜入射时的反射与透射	62
2.6.1	弹性纵波在自由面上斜入射时的反射	62
2.6.2	弹性纵波在介质分界面斜入射时的反射与透射	64
2.7	应力波反射引起的破坏	65
3	岩石中的爆炸应力波	70
3.1	炸药爆炸传入岩石中的载荷	70
3.1.1	耦合装药时传入岩石中的爆炸载荷	70

3.1.2 不耦合装药时传入岩石中的爆炸载荷	73
3.2 岩石中的应力波速度	74
3.2.1 应力波速度与岩石力学性质参数的关系	74
3.2.2 影响应力波速度的岩石性质参数	76
3.3 岩石中爆炸应力波的传播特征与衰减规律	80
3.3.1 冲击载荷作用下岩石变形规律与特征	81
3.3.2 岩石中爆炸应力波的衰减	82
3.3.3 岩石中平面应力波的衰减	84
3.4 应力波通过结构面的传播	85
3.4.1 应力波向结构面斜入射时的一般解	86
3.4.2 结构面两侧为相同岩石的应力波反、透射	88
3.4.3 结构面两侧岩石可自由滑动时的应力波透、反射	90
3.5 层状岩石中应力波的传播	90
3.5.1 等效波阻抗法	90
3.5.2 单频应力波通过岩石夹层的透射	93
3.5.3 三角形应力波通过夹层的透射	94
3.5.4 不同应力波形通过夹层的透射应力特征	96
3.6 顺岩石表面传播的应力波	97
3.6.1 瑞利表面波	97
3.6.2 勒夫表面波	100
3.6.3 纵波(膨胀波)沿边界的传播	101
3.6.4 平板中波的传播	102
 4 岩石动力学实验技术	 105
4.1 霍布金森压杆技术原理	105
4.2 霍布金森压杆测试系统	109
4.2.1 动力源	109
4.2.2 弹性压力杆	111
4.2.3 支撑架	111
4.2.4 测试分析仪表	111
4.3 霍布金森压杆技术在岩石动力学研究中的应用	115
4.3.1 花岗岩、大理岩的动态本构关系	115

4.3.2	大理岩、砂岩的动态本构关系	118
4.3.3	不同围压下砂岩的动态本构关系	119
4.3.4	岩石的动态断裂强度与应变率的关系	123
4.4	霍布金森压杆技术的改进	126
4.4.1	直锥变截面霍布金森压杆	126
4.4.2	分离式霍布金森压杆(SHPB)中的预留间隙法	127
4.4.3	不同撞击杆形状的 SHPB 测试系统	129
4.4.4	用于研究硬脆材料的 SHPB	129
4.4.5	用于软材料的 SHPB	131
4.5	霍布金森拉、扭杆及三轴霍布金森压杆	134
4.5.1	霍布金森拉杆	134
4.5.2	霍布金森扭杆	136
4.5.3	三轴应力霍布金森压杆	137
4.5.4	一种用于软材料动力学性质测量的三轴霍布金森 压杆系统	138
4.6	泰勒圆柱测试技术与膨胀环测试技术	143
4.6.1	泰勒圆柱测试技术	143
4.6.2	膨胀环测试技术	145
5	岩石爆破理论及其数值计算模型	147
5.1	无限岩石中炸药的爆炸作用	147
5.1.1	岩石中柱状药包爆破产生的爆炸载荷	148
5.1.2	爆炸载荷作用下岩石的破坏准则	149
5.1.3	压碎圈与裂隙圈半径计算	150
5.2	临近自由面条件下炸药的爆炸作用	153
5.2.1	爆破漏斗的几何参数	154
5.2.2	形成标准抛掷爆破漏斗的条件	156
5.2.3	Livingston C. W. 的爆破漏斗理论	157
5.3	岩石爆破的弹性理论模型	159
5.3.1	G. Harries 模型	160
5.3.2	R. R. Favreau 模型	162
5.3.3	台阶爆破的三维模型	163

5.4 岩石爆破的断裂理论模型	166
5.4.1 BCM 模型	166
5.4.2 NAG-FRAG 模型	168
5.5 岩石爆破的损伤理论模型	171
5.5.1 K-G 损伤模型	171
5.5.2 KUS 损伤模型	173
5.5.3 YANG 等人的模型	176
5.6 岩石爆破的分形损伤模型	178
5.6.1 损伤因子的分形表示	178
5.6.2 岩石爆破中裂纹分形的演化规律	179
5.6.3 岩石的动态本构关系表示	179
6 岩石周边控制爆破新方法	181
6.1 影响井巷周边爆破效果的因素与控制	181
6.1.1 影响井巷周边爆破效果的因素及分析	181
6.1.2 减少井巷超挖、提高爆破效果的措施	183
6.2 周边爆破参数设计的断裂力学方法	186
6.2.1 周边炮孔间贯通裂纹的形成机理	186
6.2.2 爆破参数的计算	189
6.2.3 周边孔最小抵抗线的计算	191
6.2.4 工程应用	192
6.2.5 技术要点	192
6.3 软弱岩石中的周边爆破理论	193
6.3.1 崩落孔爆破对光爆层岩石的损伤	194
6.3.2 损伤岩石的光爆参数及分析	196
6.3.3 定向断裂爆破技术	198
6.3.4 技术要点	199
6.4 岩石定向断裂控制爆破的参数设计	200
6.4.1 切缝药包岩石定向断裂爆破炮孔间贯通裂纹的形 成机理	201
6.4.2 切缝药包岩石定向断裂爆破参数的计算	203
6.4.3 与光面(预裂)爆破的对比、分析和讨论	206

6.4.4	基本结论	207
6.5	周边控制爆破引起围岩的损伤	207
6.5.1	光面(预裂)爆破在围岩中造成的损伤场	208
6.5.2	岩石定向断裂爆破技术在降低围岩损伤方面的作用	210
6.5.3	周边爆破的技术设计	213
6.6	岩石周边爆破理论的分形分析	213
6.6.1	爆破形成的围岩壁面分形及其分形维	214
6.6.2	周边眼之间爆破裂纹的形成特征	215
6.6.3	周边控制爆破在围岩中引起的损伤	217
6.6.4	周边定向断裂控制爆破技术在保护围岩方面的分 形分析	217
6.6.5	本节小结	219
参考文献		221

CONTENTS

1	Deformation and strength of rock under static load	1
1.1	Stress in rock	1
1.1.1	Definition of stress	1
1.1.2	Principal stress components and their orientations	2
1.1.3	Stress invariants and stress deviators	4
1.1.4	The equilibrium equation and the consistent equation satisfied by stress components	6
1.2	Displacement and strain in rock	7
1.2.1	Correlation between displacement and strain	7
1.2.2	Strain situation and principal strains at one point in rock	7
1.2.3	principal strains and strain invariants	9
1.2.4	Strain deviators and deviatoric strain invariants	9
1.3	Constitutive relation of rock	10
1.3.1	Stress-strain relation of rock and its characteristic under uniaxial loading	10
1.3.2	Indexes denoting rock deformation	12
1.3.3	Deformation characteristic of rock under triaxial loading	14
1.3.4	Constitutive model of rock	15
1.4	General theory of constitutive equation of rock	

under elastic stress	17
1.5 Strength of rock and strength criterion	20
1.5.1 Strength of rock	20
1.5.2 Affect of loading condition on rock strength ...	21
1.5.3 Strength criterion	24
1.6 Damage theory and fractal method in rock	
mechanics	29
1.6.1 Damage and its denotation	30
1.6.2 evolving equation of damage and constitutive	
equation of damage material	31
1.6.3 measurement method of damage in rock	32
1.6.4 Fractal geometric method in rock mechanics ...	34
2 Theory of stress wave in solid	38
2.1 Basic concept of stress wave	38
2.1.1 production of stress wave	38
2.1.2 Classification of stress wave	39
2.1.3 Solution method of stress-wave equation	40
2.1.4 Application of stress-wave theory	42
2.2 Elastic equation of stress wave in infinite	
medium	42
2.3 Stress wave in one-dimensional long bar	44
2.3.1 coordinate for describing movement	44
2.3.2 Basic hypothesis to one-dimensional	
stress wave	46
2.3.3 Dominating equation of longitudinal wave in	
one-dimensional bar	46
2.4 Solution of equation of stress wave in one-dimensional	
bar with characteristic line method	48
2.4.1 Characteristic lines and consistent relation on	
them	48