

岩石爆破机理

——庆贺钮强教授80华诞学术论文集

杨 军 熊代余 主编



冶金工业出版社
<http://www.cnmp.com.cn>

岩石爆破机理

——庆贺钮强教授80华诞学术论文集

杨 军 熊代余 主编



北京
冶金工业出版社
2004

内 容 简 介

本书汇编了钮强教授及其研究生对岩石爆破机理的探索所取得的成果,以及工程爆破实践总结和技术的新进展,主要包括岩石可爆性分级、岩石爆破理论与数值模拟、爆破模拟试验研究、爆破工程技术、起爆与装药新技术和爆破安全技术等内容。

本书可供从事爆破专业的工程技术人员及高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

岩石爆破机理:纪念钮强教授 80 华诞学术论文集/
杨军,熊代余主编. —北京:冶金工业出版社,2004. 8
ISBN 7-5024-3590-5

I. 岩… II. ①杨… ②熊… III. 凿岩爆破—
学术会议—文集 IV. TD235-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 078201 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 王雪涛 张 卫(联系电话:13621018796;E-mail:bull 2820@ sina. com)

美术编辑 王耀忠 责任校对 侯 瑀 李文彦 责任印制 牛晓波

北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2004 年 8 月第 1 版,2004 年 8 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 17.5 印张; 2 插页; 426 千字; 261 页; 1-1800 册

50.00 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)

谨以此书

敬贺钮强教授八十华诞

暨从事爆破教育事业

五十一周年



钮强教授简介

钮强教授生于1925年8月，广西南宁市人，东北大学教授。1948年毕业于广西大学矿冶系，同年9月分配到安徽淮南煤矿工作。1952年哈尔滨工业大学研究生班毕业，师从前苏联专家阿良姆斯基，同年在北京外语学院学习。1953年在东北工学院（现东北大学）任教，协助组建我国第一个钻眼送道教研室，是我国知名的爆破专家、学者，为我国培养出大批爆破英才。历任爆破教研室主任和实验室主任、中国金属学会岩石破碎学术委员会委员、辽宁省爆破学会名誉理事长、中国工程爆破协会《工程爆破》杂志编委、冶金工业部爆破考核专家组专家。

五十多年来，钮强教授专心致力于爆破专业本科生、研究生的教学与科学研究工作。期间着重研究、讲授“凿岩爆破开井送道”、“井巷工程”、“凿岩爆破”、“爆破工程”、“岩石破碎机理”等课程，在国内外发表论文数十篇，主编教材《凿岩爆破》，专著《岩石爆破机理》，合编著作有《钻眼爆破》、《岩石分级的理论与实践》、《采矿手册》、《建筑工程手册》、《中国冶金百科全书·采矿》、《爆破计算手册》、《控制爆破技巧》，参编、研讨审订《爆破安全规程》、《大爆破安全工程》、《拆除爆破安全规程》、《爆破作业人员安全技术考核标准》等。同时，他还注重科学实验，1958年他主持完成的沈阳冶炼厂高温爆破、沈阳通用机械厂烟囱爆破，为我国城市拆除爆破开创了先例。他主持、参加的科学研究项目“岩石爆破性分级”，于1985年获冶金工业部科学技术进步奖二等奖；“岩石综合分级”于1992年获冶金工业部科学技术进步奖二等奖，1993年获国家科学技术进步奖三等奖；“爆破安全规程”于1991年获劳动人事部科技进步奖二等奖。

钮强教授几十年来，工作勤恳，治学严谨，为人师表，为我国爆破事业的开拓、发展和技术进步做出了巨大贡献。



钮强教授和他的部分研究生（2001年，沈阳）



桃李满天下——钮强教授与参加中国爆破协会成立大会的东北大学校友在一起（1995年，北京）



中国爆破协会理事合影
(1995年，北京)



钮强教授与参加岩石爆破会议的东北大学校友在一起 (1986年，鞍山)



钮强教授在沈阳冶炼厂3个烟囱(从左至右 120m, 123m, 100m)爆破拆除前留影 (2002 年)



钮强教授指导研究生进行爆破测试工作 (1984 年)



钮强教授与研究生出席岩石爆破学术会议后留影 (1986 年)

研究岩石爆破机理 提高爆破技术水平

(代 序)

我国最早发明了火药。此后,爆破技术在国内外得到广泛的应用,发展亦十分迅速。长期以来,岩石爆破仅被认为是利用炸药爆炸能量来破碎岩石的一种技术,很少有人深入研究其原理和理论问题。直至20世纪50年代人们才逐渐地了解到它不仅是一种技术,而且是一门比较复杂的边缘科学。

采矿、基建、交通、水电等工程,面对岩体的坚固与庞大,不采用爆破技术难以解决工程问题。为达到安全与高效的预期目的,不能光凭经验,应有岩石爆破理论的指导。炸药爆炸的热化学与爆轰波理论、热流体动力学与冲击波理论等构成了爆炸力学的新课题。岩石的各向异性、非均质性和地质构造的复杂性,在爆炸作用下的弹塑性动力学、固体中的应力波、岩石断裂力学等组成了爆炸岩石力学的新内容。

随着先进测试技术的应用,在生产实践中人们已逐步掌握了岩石爆破破坏的基本规律。例如,最初提出了克服岩石重力和摩擦力的破坏假说,以后又相继提出了自由面与最小抵抗线原理,爆破流体力学理论,最大压应力、剪应力、拉应力强度理论,冲击波、应力波作用,反射波拉伸作用,爆生气体膨胀推力作用,爆生气体准静楔压作用,应力波与爆生气体共同作用,能量强度理论,功能平衡理论,爆破漏斗理论和爆破断裂力学等等理论。这些理论观点各异,有些互相矛盾,有些互相渗透。

研究岩石爆破机理的目的在于充分利用炸药爆炸能量,以改善和提高爆破效果。

根据工程爆破不同的要求,爆破效果主要表现为:

- (1) 爆破量的多少;
- (2) 爆破块度的大小、均匀程度、粒级匹配;
- (3) 爆堆形状和方向,抛掷距离和集中程度;
- (4) 爆破周边轮廓的平整;
- (5) 对矿柱、巷道、顶板、边坡等稳定性的影响;
- (6) 消除残孔和根底,提高炮孔利用率;
- (7) 减免爆破地震波、空气冲击波、飞石、噪声、炮烟(有毒气体)等危害。
- (8) 爆破优化、降低成本等等。

总之,爆破效果应该集中表现在爆破生产率高、爆破效果好和爆破成本低,并且保证爆破的准确和安全。

影响爆破效果的因素很多,主要有三方面:第一,岩石爆破特性;第二,炸药爆炸特性;第三,爆破参数和工艺。下面分别叙述。

岩石爆破特性:岩石动态物理力学性质、地形、地质构造、节理、裂隙、薄弱面等;

炸药爆炸特性:爆轰压力,爆炸压力,爆轰速度,爆炸威力(重量威力、体积威力),炸药密度,爆热,爆温,爆炸气体成分和体积,炸药与岩石特征阻抗的匹配等;

爆破参数和工艺:自由面,最小抵抗线,药包形状(集中、长条、平板)、数量、距离和埋深,炸药量和炸药单耗,堵塞材料长度和质量,装药密度,连续装药和间隔装药,耦合装药和不耦合装药,起爆药包位置和数量,起爆顺序和延迟时间等。

综合考虑上述因素,只有认真设计计算、保证炸药和起爆器材的质量、严格组织爆破施工,才能取得良好的爆破效果。

炸药爆破岩石是一个非常复杂的过程,一方面是炸药爆炸瞬间的高温、高压、高速和高能量的复杂加载作用;另一方面是岩石本身的各向异性,非连续性的复杂应力-应变变化过程;还有爆破施工工艺人为因素的影响,更加剧了岩石爆破的复杂性。为此,必须运用现代科学的测量技术对爆炸化学、爆炸物理、爆炸力学和爆破机理进行深入的研究。目前常用的测量方法有:

炸药爆炸性能的测量——如水箱法测爆压,电测法、导爆索法或高速摄影法测爆速,绝热法测爆热,铅柱法测爆力和猛度,化学分析法测爆炸气体等;

炮孔和药室中(空间自由场)爆温的测量——如热电偶传感器直接测爆温,红外分谱辐射仪间接测爆温等;

起爆器材性能的测量——如电测法测雷管参数,光电法测导爆管爆速,铅板法或电测法测导爆索爆速等;

爆炸冲击波压力和固体应力-应变测量——如机械式或压电式、电阻式、压阻式、电容式、电磁式等各种压力传感器的电测法等;

岩体破碎程度和范围的测量——如声波法、渗水法或钻孔电视法等;

爆破地震波形和参数的测量——如机械式、电动式或压电式、应变式传感器的电测法等;

空气冲击波压力测量——如传感器电测法,压力自记仪的机械式测量法等;

爆破噪声的测量——用话筒、声级计,输出讯号至示波器,以测量噪声的声压、频率和持续时间;

爆破过程的高速摄影测量——用中、低速(每秒几十至几百幅)摄影机测量爆破鼓包运动、岩石移动规律;用每秒几十万至几百万幅的高速摄影机测量爆破岩石应力场和裂隙发展速度及破碎全过程;可以配备X射线、 β 射线或 γ 射线仪测量,或者配备动光弹仪、云纹仪在环氧树脂等相似材料的模拟爆破中测量。光导纤维和扫描摄影、高速立体摄影等方法提高了测量精度;

爆破块度的测量——如岩块边长的直接度量、爆堆平面摄影的估算,摄影图像分析仪的应用等。

这些测量讯号通过电压、电荷或动态应变仪的放大,示波器、瞬态波形存储器、磁带记录仪的记录,电子计算机对数据的分析处理和频谱分析计算,最终打印出结果,迅速而准确。这里,关键是第一环节——捕捉讯息的真实性,所以传感器的选择和放置是非常重要的。

上述测量方法可以在实验室模拟爆破试验,现场小规模(小比例尺)的模拟爆破试

验,或直接在生产现场的正规爆破中使用。

爆破量测结果,可作为爆破理论分析的依据,并用其进一步研究爆破能量的产生及其分布规律。岩石爆破的能量主要是爆破冲击波、应力波的动态波能和爆生气体作用的准静态起爆能(它是指炮孔或药包中爆生气体的势能,因为是在水下爆炸压力试验所测得引起气泡尺寸最大时的排水势能,故称之为起爆能)。

强度理论和能量准则是岩石爆破破坏的基本准则。爆破漏斗是岩石爆破破坏的基本形式。动态波能将岩石压缩、破坏、产生裂隙;起爆能以爆生气体楔入裂隙的尖劈效应促使裂隙的扩展,然后是岩石的破碎、位移和抛掷。冲击波、应力波、地震波和爆生气体的不同作用形成爆破近区、中区(自由面区)和远区的不同爆破破坏效应。

爆破作用的大小、破坏程度的强弱,取决于爆破功能的分配。图1是爆破能量的模型;图2表示爆炸功分布示意图;图3表示爆破能量分布与时间的函数关系。要彻底弄清楚爆破机理,必须对爆破能量的分配规律和计算获得定性和定量的解。

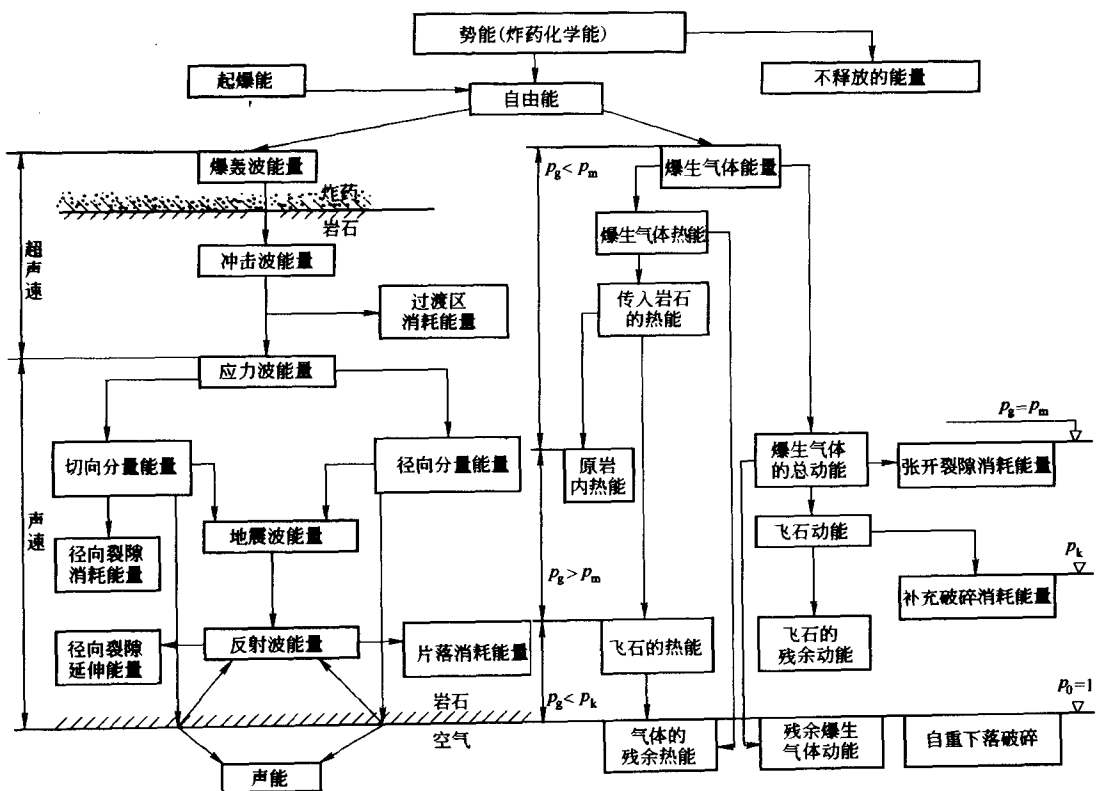


图1 爆破能量模型

p_g —孔壁爆生气体压力; p_k —爆生气体最终压力; p_m —孔壁静力系强度

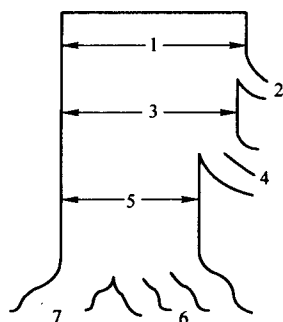


图2 爆炸功分布示意图

1—炸药全部热能；2—化学能损失；3—爆炸实际热能；
4—热损失；5—爆炸全功；6—有用功；7—无用功

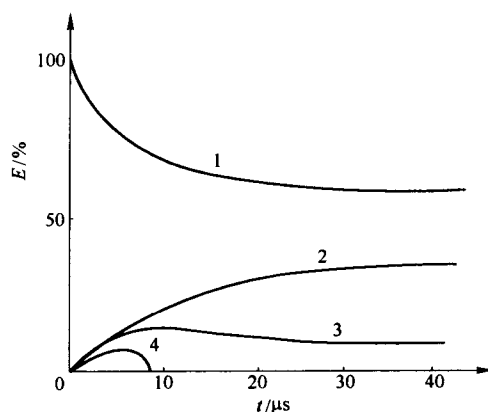


图3 爆炸能量 E 分布与时间 t 的关系曲线

1—爆炸气体内能；2—岩石中的内能(热能、塑性变形能)；
3—岩石中的动能(冲击波传播的能量)；4—爆炸气体动能

综上所述,从理论上尚需对波动物理学、爆炸力学(包括热化学与爆轰波理论、热流体动力学与冲击波理论等)、弹塑性动力学与固体中的应力波理论、岩石断裂力学、分形几何与损伤力学、数学模型与电算方法以及超动态量测技术等方面进行深入的研究和充实,才能进一步完善岩石爆破机理。

钮 强

前 言

本文集收录了钮强教授和他的研究生们在爆破研究领域具有代表性的部分论文,基本反映了他们爆破学术思想的成长历程、主要学术研究和爆破新技术开发成果。

文集上的主要论文作者在不同时期都曾师从我国著名爆破专家、东北大学教授钮强先生,有的是由他引领着走进爆破领域,有的是在他的亲自指导下取得了硕士、博士学位,有的则是在他的指导、关怀下完成了访问学者的学习而使自己事业有成。尽管我们在校期间并不都相互认识,然而,无论是在校学习期间,还是在走上工作岗位后,钮老师总能及时地将每个学生的近况,尤其是所取得的研究进展和工作业绩在我们之间予以通报,以激励我们为爆破事业做出更多、更大的贡献。正是钮老师这种特殊的关爱方式,使我们这些弟子相识结交,团结友爱,在工作中相互帮助和支持,而且促使我们更加勤奋和上进。正因为我们时刻牢记导师谆谆教诲的“老老实实做人,勤勤恳恳做学问”这个行为准则,今天我们才能成为爆破工程领域的专家、教授、博士生导师。为庆贺钮强教授八十华诞暨从事爆破教育事业 51 周年,特编辑出版本文集,表达我们对钮强教授的崇高敬意。

尽管离开学校已经 10~20 年了,但我们始终难以忘怀的是钮老师孜孜不倦的求知欲望、严谨务实的治学态度和朴实诚恳的做人作风。他总是仔细阅读杂志上新近发表的爆破文章,并详细批注;对送审文稿也是逐段、逐句推敲审定,将其作为一个学习机会。他认为,无论是已发表的论文,还是待评审的文稿,都能够从中学到许多东西,起到补充知识、拓宽视野的作用。他的这种求知方法和治学态度时刻影响着我們,使我们能及时了解学术发展的方向,把握住学科发展的前沿。

在我们的求学过程中,钮老师总是坚持在爆破教学科研第一线工作。不论是室内实验,还是现场试验,他都全身心投入到工作中,指导我们制定切实可行的研究方案,亲手教会我们各种试验操作方法。甚至在他年逾花甲之后,仍然不顾寒暑带领我们深入爆破施工现场,从工程实践中教会我们发现问题、分析问题和解决问题的方法。他这种言传身教、身体力行的教学方法和做人作风,是我们做人做事的榜样,并已成为我们工作和生活的准则,同时也潜移默化地影响着我们的学生。

作为一位有着 50 多年教龄的优秀教育工作者和著名的爆破专家,钮强教授培养出的学生数以千计。他敏锐的学术思想、严谨的治学风格和诚实的做人态度影响了几代爆破工作者。这些学生中,有的是国内知名的爆破专家、学者、教授,有的是企事业单位的领导,还有的是成功的民营企业家。我们八位论文集的作者是近年来在爆破学术界较为活跃的钮老师的学生的代表,只是由于受到钮老师指导的时间长一些或联系的机会多一些,才聚在一起共同编辑了本论文集。对于反映钮强教授对爆破人才培养的突出贡献和对爆破事业发展的广泛影响,这些论文只能算冰山一角。

受学术水平所限,加之时间仓促,文集上的不足之处,恳请读者指正。

全体作者
2004 年 7 月

目 录

1 岩石可爆性分级

我国岩石爆破性分级的试验研究.....	3
我国岩石爆破性分级新方法——稳健模糊动态分级	12
矿岩综合分级定额标准初探	17
岩体节理间距分布的分形模型研究	23

2 岩石爆破理论与数值模拟

岩石爆破裂隙的形成与发展	33
岩石爆破损伤断裂的细观机理	40
岩石爆破分形损伤模型研究	46
基于应力波衰减规律的岩石爆破损伤模型	52
单孔柱状药包爆炸条件下爆破漏斗形成过程模拟	58
岩体爆破过程中碎块形成规律的分形研究	63
水孔预裂爆破机理研究	69
预裂爆破数值模拟及其应用研究	76
台阶爆破设计智能专家系统及其在兰尖铁矿的应用	82
并敷爆炸材料传爆状态	90

3 爆破模拟试验研究

露天台阶留碴爆破模拟试验研究	97
相似理论在岩石爆破模拟实验研究中的应用.....	103
岩石爆破性模拟实验研究.....	112
炸药岩石波阻抗匹配的试验研究.....	118
炸药岩石阻抗匹配与爆炸应力、块度的试验研究	124
不耦合装药爆炸作用机理及试验研究.....	131
爆炸膨化玉米芯、杨木片的比表面积和孔径分布测定	137

4 爆破工程技术

用灰关联分析方法确定影响岩体爆破质量的主要因素·····	145
测定爆堆块度组成的新方法——体视概率计算法·····	152
本钢南芬露天铁矿非电起爆网路系统可靠性研究·····	160
狮子山铜矿多排同段爆破的实质及其破岩机理·····	167
采用散装乳化炸药提高金堆城露天矿爆破、生产效率·····	174
鞍钢 120m 钢筋混凝土烟囱定向爆破控制技术·····	179
易燃易爆厂区建筑物控制爆破技术·····	184
高耸建筑物爆破拆除中后坐力的数值模拟·····	191
武汉饭店大楼拆除爆破·····	195
拆除挤压爆破的研究与实践·····	200

5 起爆与装药新技术

露天常用非电起爆元件及传爆结点可靠性检测、分析与评价·····	207
导爆管反射四通闭合起爆网路的可靠性试验及评价·····	213
毫秒雷管跳段概率的理论分析与计算·····	220
BCJ 系列乳化炸药现场混装车的研制与应用·····	225

6 爆破安全技术

爆破对围岩力学性质和稳定性的影响·····	233
开挖爆破对围岩损伤作用的几个问题探讨·····	239
基于模糊神经网络进行爆破振动峰值预报的研究·····	246
某微型起爆器引起的一起误爆事故分析·····	252
十八层危楼抢险爆破安全设计·····	256
钮强教授培养的研究生简介·····	261

CONTENTS

1 The Classification of Rock Blast Ability

Experiment Research on the Classification of Rock Blast Ability in China	3
A New Classification Method of Rock Blastability in China—the Robust Fussy Dynamic Classification	12
Discussion on Comprehensive Classification Norm of Ore-rock	17
Study on Fractal Model of Joint Spacing Distribution for Rock Mass	23

2 Rock Fragmentation by Blasting and Its Simulation

Formulation and Evolution of Rock Blasting Cracks	33
Meso-Mechanism of Damage and Fracture on Rock Blasting	40
Study on Fractal Damage Model of Rock Fragmentation by Blasting	46
A New Damage Model for Rock Fragmentation by Blasting Based on Stress Wave Attenuation and its Application	52
Simulation of Blasting Funnel Formulation Process under Single Hole Column Charge Detonation	58
Fractal Study on Forming Low of Fragmentation in Process of Rock-mass Blasting	63
Study on Pre-splitting Blasting with Water Mechanism	69
An Application Study of Numerical Simulation in Presplitting Blasting	76
An Intelligence-expert System for Bench Blasting Design and Its Application at Lanjian Iron Mine	82
Detonation Propagation Characteristics of Superposition Explosive Materials	90

3 Simulating Test and research of Blasting

Study on Simulating Test of Bench Blasting with Rock Cushion in Open-pit Mine	97
The Application of the Similarity Theories in the Study of Simulating Test of Rock Blasting Engineering	103
The Study on Simulation Test of Rock Blasting	112



A Study of Acoustic Impedance Match between Explosives and Rocks	118
Study of Blasting Stress, Size and Matched Impedance between Explosive and Rock	124
Mechanism of the Explosive Action of the Decoupled Charge	131
Measurement of Specific Surface Area and Pore Size Distribution on Corn-core and Poplar Samples Treated by Explosion	137

4 Engineering Blasting Techniques

Determination of Principal of Factors Affecting the Quality of Rock Blasting with Grey Correlation Analysis	145
A New Method to Measure Fragment-size Composition of a Muckpile —Stereoscopic Probability Calculation Method	152
Researches on Reliability of the Non-electrical Detonating System Applied in Nanfen Open-pit Mine	160
The Essence and Rock Breaking Mechanism of Multirow Same-segment Blasting in Shizishan Copper Mine	167
Use of Bulk Emulsion Explosive to Improve Blast and Production Performance at Jinduicheng Open Pit	174
Directional Blasting and Controlling Technical of a 120m Reinforced Concrete Chimney of Anshan Iron and Steel Company	179
The Technology of Controlling Blast in Flammability and Explosive Region	184
The Numerical Simulation of Recoil Brought by Blasting Backout of High Buildings	191
Demolition Blasting of Wuhan Hotel Buildings	195
Research and Application of Press Blasting in Demolition	200

5 The New Technology of Detonating and Charging

Measuring Analysing and Appraising of the Reliability of Nonel Detonating Elements and Blasting-Transmission Points Usually Used on Open Pit	207
Reliability Test and Evaluation of a Blasting Network System of Nobel Tube with Four-Path Reflecting Unit as a Connector	213
Theoretical Analysis and Calculation of the Probability of Skipping Delay Interval for Millisecond Detonators	220
Development and Application of BCJ Series Loading Machines for Site Sensitized Emulsion Explosive (SSE)	225