

Y

ANTI BAOPO LEIJI SUNSHANG XIAOYING YU
DONGLI SHIWEN JIZHI YANJIU

岩体爆破累积损伤效应与 动力失稳机制研究

闫长斌 王贵军 王泉伟 徐国元 著



黄河水利出版社

岩体爆破累积损伤效应与 动力失稳机制研究

闫长斌 王贵军 王泉伟 徐国元 著

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书在调研国内外相关文献资料的基础上,采用现场试验、理论分析与数值模拟相结合的方法,从细观和宏观两个层面出发,对爆破作用下岩体累积损伤效应及其稳定性问题进行了深入系统的应用基础研究。结合工程实践,对厂坝铅锌矿复杂群采空区动力失稳机制进行了探索。本书不仅为研究爆破动载荷作用诱发的岩体累积损伤及其稳定性分析等应用理论问题开辟了新的途径,而且为预防爆破引起的岩体损伤与失稳破坏提供了科学指导。

本书可供水利、土木、矿山、铁道、人防、国防等系统的广大科技工作者、工程技术人员以及该专业领域高等院校的教师、高年级本科生和研究生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

岩体爆破累积损伤效应与动力失稳机制研究/闫长斌
等著. —郑州:黄河水利出版社, 2011.2
ISBN 978-7-80734-921-1

I. ①岩… II. ①闫… III. ①凿岩爆破—研究
IV. ①TD 235.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 201773 号

组稿编辑:王路平 电话:0371-66022212 E-mail: hhsllwlp@126.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层

邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail: hhsllcbs@126.com

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:11

字数:250 千字

印数:1—1 000

版次:2011 年 2 月第 1 版

印次:2011 年 2 月第 1 次印刷

定价:28.00 元

序

岩体爆破损伤与动力稳定性问题，一直是爆破工程和岩石力学界关心的中心问题之一。爆破动载荷导致岩体损伤乃至宏观失效的过程，并不是某一次爆破作业造成的，而是多次爆破共同作用的结果。作者敏锐地抓住了这一研究方向，认识到岩体爆破累积损伤效应所指的“累积效应”不同于“累计总和”，并非简单的几何或算术累加。在这一认识的基础上，本书在以下几个方面取得了可喜的研究成绩：①在巷道围岩中设计并实施了 10 次小药量模拟爆破，利用声波测试技术系统研究了多次爆破作用下岩体损伤累积增长规律。基于实测数据，获得了爆破作用下岩体损伤、岩体声波速度与爆破作用次数之间存在的统计规律。②运用傅里叶变换与小波(包)分析方法，找出了岩体爆破累积损伤程度与声波测试信号波形、主频、能量等频谱参数变化规律之间的内在联系，从另一个侧面揭示了岩体爆破损伤累积增长规律及其失稳破坏机制。③基于爆破作业对岩体质量的损伤弱化效应，对 Hoek-Brown 经验公式做了进一步改进和完善，并运用改进方法研究得到了厂坝铅锌矿岩体力学参数。④系统分析了多次爆破作用诱发地下工程岩体失稳破坏的临界微扰机制，建立了爆破扰动作用下岩体失稳的突变模型，分析了其失稳过程的非线性演化规律，讨论了顶板临界安全厚度及矩形矿柱动力失稳的主要影响因素。⑤同时考虑开挖(采)过程和爆破震动作用对采空区稳定性的影响，利用 FLAC^{3D} 对复杂地下采空区稳定性问题进行了系统的三维数值模拟研究。通过对比开挖过程、单次爆破震动作用和两次爆破震动联合作用三种情况对采空区稳定性的影响程度，揭示了复杂地下采空区失稳破坏机制以及爆破累积损伤效应对采空区稳定性的影响特征。

作者在参阅大量国内外相关文献资料和汲取前人最新研究成果的基础上，以爆炸动力学、岩体力学、损伤力学、断裂力学、非线性动力学等理论为依据，采用先进的现场声波测试、数学与力学理论分析以及 FLAC^{3D} 数值模拟相结合的方法，结合工程问题，对岩体爆破累积损伤效应与动力失稳机制问题进行了深入、系统的研究。本书内容丰富、逻辑性强、重点突出，具有较高的学术价值和实用性。该书的付梓问世，我相信一定会引起同行们的广泛兴趣，并有力推动岩体动力学领域的学术进步。我期待着该书早日出版，并乐意为之作序！

中国工程院院士



2010 年 9 月

前 言

随着国家经济建设的迅猛发展,各类大型地下岩体工程日渐增多。例如,已经建成的长江三峡工程、黄河小浪底水利枢纽、雅砻江二滩水电站、秦岭铁路与公路隧道等。我国岩石力学与工程的科研与实践,取得了举世瞩目的伟大成就,同时也面临着空前的机遇和挑战。对于岩体工程开挖,无论采用何种爆破方式,都不可避免地预留岩体造成一定程度的损伤和破坏,从而威胁工程稳定性。爆破引起的围岩损伤问题,一直是爆破工程和岩石力学界关心的中心问题之一。爆破动载荷作用引起的各类岩体工程损伤、动力失稳破坏现象屡见不鲜,主要表现在:①爆破震动作用诱发的岩土边坡滑动。②邻近爆破对地下工程(隧道、厂房和采空区等)围岩、矿柱造成的损伤与失稳破坏。③爆破作业造成的地下工程围岩与支护结构大变形、塌陷等破坏。④爆破应力波作用造成的岩基损伤以及岩体完整性、稳定性的削弱。⑤爆破动载荷作用诱发的岩爆、突水以及瓦斯突出等灾害事故。

纵观岩体爆破损伤与动力失稳研究不难发现:绝大多数研究成果是建立在单次爆破前提之下的。多次爆破作用下,岩体损伤累积特性及其失稳破坏规律研究明显不足。事实上,爆破动载荷导致地下工程岩体宏观失效的过程并不是某一次爆破作业造成的,而是多次爆破共同作用的结果。例如,隧道开挖掘进循环爆破作业和矿山生产频繁重复爆破作业等。也就是说,岩体爆破累积损伤效应是客观存在的。所谓累积损伤,是相对首超破坏而言的。累积损伤概念通常用在材料疲劳断裂破坏方面,是指损伤随载荷作用次数递增的过程。因此,岩体爆破累积损伤效应是多次爆破作用下损伤状态的动态叠加过程,同时关联其他指标(岩体物理力学参数、岩体完整程度、岩体稳定状态等)的互动变化,是岩体爆破动力响应的动态体现。因此,岩体爆破累积损伤效应所指的“累积效应”不同于“累计总和”,并非简单的几何或算术累加。爆破作用下岩体累积损伤效应直接关系着岩体的稳定程度。开展爆破作用下岩体累积损伤效应研究,对于揭示岩体动力失稳机制,具有重要的理论意义和工程价值。目前,爆破作用下岩体累积损伤效应与动力失稳机制缺乏系统研究,在理论与试验方面均有待进一步探索。现有的岩体力学参数取值方法没有充分考虑开挖爆破造成的损伤弱化作用,存在明显不足。针对上述问题,本书综合运用爆炸动力学、岩体力学、非线性动力学等理论,以爆破损伤弱化岩体力学参数确定方法研究为纽带,将岩体爆破累积损伤效应与岩体稳定性分析有机统一起来,对岩体爆破累积损伤效应与动力失稳机制进行深入、系统、全面的研究,并将有关研究成果应用于具体工程实践中,为预防地下工程岩体动力失稳灾害提供科学指导。

本书第1章绪论部分主要指出了上述研究对象的重要意义和国内外研究现状。第2章主要介绍了岩体爆破累积损伤效应的现场模拟试验与声波测试技术。第3章利用快速傅里叶变换(FFT)和小波(包)分析方法,探寻了声波信号主频、能量及其频带分布随爆破次数增加的变化规律。第4章基于现场声波测试数据,建立了岩体爆破疲劳损伤非线性累

积预测模型和岩体爆破累积损伤扩展模型。第 5 章对 Hoek-Brown 公式进行了修正和完善,提出一种新的爆破扰动与弱化作用下岩体力学参数研究方法——BDRMP(Blasting Damaged Rock Mechanical Parameters)法。在验证 BDRMP 法正确性与合理性的基础上,运用 BDRMP 法研究得到了厂坝铅锌矿岩体力学参数。第 6 章探寻了频繁爆破作用诱发地下工程岩体失稳破坏的临界微扰机制,建立了爆破扰动作用下地下硐室顶板、矩形矿柱失稳的双尖点突变模型,分析了其失稳过程的非线性演化规律。第 7 章则综合考虑开挖过程和爆破震动作用对采空区稳定性的双重影响,利用 FLAC^{3D} 对厂坝铅锌矿复杂地下采空区稳定问题进行了系统的数值模拟研究。通过对比开挖过程、单次爆破震动作用和两次爆破震动联合作用三种情况对采空区稳定性的影响程度,揭示了爆破动载荷作用下采空区失稳破坏机制以及爆破累积损伤效应对采空区稳定性的影响特征。第 8 章对研究成果进行了系统的总结,并提出了进一步研究展望。

本书的研究内容是在国家“十五”科技攻关项目(No. 2003BA612A-10-2)、国家自然科学基金项目(No. 50490272、50490274、50874020)、黄河勘测规划设计有限公司自主研发项目(No. 2009-ky01)以及中南大学博士学位论文创新工程项目(No. 040109)的联合资助下完成并出版的,特表示衷心的感谢!

试验期间,中南大学唐礼忠教授、史秀志副教授提供了仪器便利;白银有色集团公司厂坝铅锌矿袁积余矿长、陈黎明副矿长、王晓鹏科长、技术组全体人员给予了大力支持和帮助,在此表示深深的感谢。此外,研究过程中还得到了古德生院士、李夕兵教授、黄仁东教授、刘敦文教授、周科平教授、马建军教授、左宇军博士等的帮助,特此一并致谢!

承蒙作者十分敬重的岩土工程与地下工程专家、中国工程院院士、中国人民解放军后勤工程学院博士生导师郑颖人教授在百忙之中为本书作序,在此表示由衷的感谢!

由于本书的部分内容属于开创性研究,有些观点和结论尚不成熟,但愿能起到抛砖引玉的作用。由于水平有限,书中不妥之处,恳请读者批评指正!

作 者

2010 年 9 月

目 录

序

郑颖人

前 言

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 引 言	(1)
1.2 研究课题来源与意义	(3)
1.3 国内外研究现状与述评	(3)
1.4 本书主要研究内容与技术路线	(13)
第 2 章 多次爆破作用下岩体声波速度与累积损伤效应	(15)
2.1 引 言	(15)
2.2 岩体声波传播与岩体损伤	(16)
2.3 多次爆破作用下岩体声波传播现场试验	(18)
2.4 试验结果与数据分析	(23)
2.5 小 结	(43)
第 3 章 多次爆破作用下岩体声波频谱与累积损伤效应	(45)
3.1 引 言	(45)
3.2 声波在爆破损伤岩体中的衰减特性	(46)
3.3 多次爆破作用下声波波形变化特征与岩体累积损伤效应	(49)
3.4 多次爆破作用下声波频谱变化特征与岩体累积损伤效应	(53)
3.5 小 结	(73)
第 4 章 多次爆破作用下中远区岩体疲劳损伤断裂机制	(74)
4.1 引 言	(74)
4.2 多次爆破作用下中远区岩体损伤断裂作用机制	(75)
4.3 多次爆破作用下岩体疲劳累积损伤特性分析	(82)
4.4 基于声速变化的岩体爆破累积损伤扩展模型	(88)
4.5 小 结	(89)
第 5 章 爆破损伤作用下岩体力学参数研究与工程应用	(91)
5.1 引 言	(91)
5.2 考虑爆破损伤作用时参数 m_b 、 s 的取值方法——BDRMP 法	(91)
5.3 BDRMP 法的验证分析	(99)
5.4 BDRMP 法在厂坝铅锌矿岩体力学参数研究中的应用	(101)
5.5 小 结	(104)
第 6 章 爆破作用诱发地下工程岩体失稳的突变理论分析	(106)
6.1 引 言	(106)

6.2 尖点突变理论·····	(106)
6.3 多次爆破作用诱发地下工程岩体失稳的非线性机理分析·····	(108)
6.4 露天爆破对地下硐室顶板稳定性影响的突变理论分析·····	(110)
6.5 邻近爆破对矩形矿柱稳定性影响的突变理论分析·····	(119)
6.6 小 结·····	(124)
第7章 爆破作用下复杂采空区稳定性的FLAC ^{3D} 分析·····	(126)
7.1 引 言·····	(126)
7.2 FLAC ^{3D} 动力计算特性·····	(126)
7.3 厂坝铅锌矿采空区特点与计算区域选取·····	(130)
7.4 FLAC ^{3D} 数值计算模型·····	(131)
7.5 模拟结果分析与讨论·····	(135)
7.6 小 结·····	(146)
第8章 结论与展望·····	(148)
8.1 全书结论·····	(148)
8.2 进一步研究展望·····	(150)
参考文献·····	(152)

第1章 绪论

1.1 引言

近几十年来,随着国家经济建设的迅猛发展,各类大型地下岩体工程日渐增多。例如,已经建成的黄河小浪底水利枢纽、雅砻江二滩水电站、长江三峡工程等大型水利水电工程,大瑶山、秦岭铁路与公路隧道、青藏铁路等。我国岩石力学的科学研究与工程实践,取得了举世瞩目的伟大成就,同时也面临着空前的机遇和挑战^[1]。在矿山开采、隧道开挖、铁路与公路路堑成形、水利水电设施建设等各类岩体工程中,钻孔爆破技术得到广泛应用,同时带来了巨大的经济效益和社会效益^[2]。可以预见,在未来几十年内,工程爆破技术仍将在地下岩体工程施工方法中发挥优势,并占据主导地位^[3]。

爆破是利用炸药爆炸时所释放的能量来破坏某种介质或使介质变形从而达到一定工程或工艺目的的技术。药包在岩体中爆炸时,一部分能量用来破坏介质,达到工程岩体开挖等目的,而大部分能量却以热能、振动波、空气冲击波形式传递给周围岩体,造成周围岩体或结构的振动和损伤,甚至严重破坏^[4-5]。对于岩体工程开挖,无论采用何种爆破方式,都不可避免地会对预留岩体造成一定程度的损伤和破坏,从而威胁工程稳定性^[6]。爆破引起的围岩损伤问题,一直是爆破工程和岩石力学界关心的中心问题之一^[7]。爆破动载荷作用引起的各类岩体工程损伤、失稳破坏现象屡见不鲜,主要表现在:①爆破动载荷作用诱发的边坡崩塌、滑移等工程灾害^[8-9]。②邻近爆破对地下岩体工程(隧道、厂房、采空区等)围岩、矿柱造成的损伤与失稳破坏^[10-12]。③爆破作业造成的地下巷道与支护结构大变形、塌陷等破坏^[13-14]。④爆破施工过程中,应力波作用造成的坝基与岩基损伤以及岩体完整性、稳定性的削弱^[15-17]。⑤爆破动载荷作用诱发的岩爆、突水以及瓦斯突出等事故^[18-20]。因此,探索爆破作用下岩体产生的损伤机制,分析岩体动力失稳破坏机制,对促进我国经济建设和国防事业发展具有重要的理论和现实意义,对岩石动力学理论与爆破安全控制具有推动与完善作用,已成为爆破工程和岩石力学界亟待解决的重要研究课题之一。

迄今为止,国内外学者在爆破动载荷作用下岩体损伤及其稳定性方面开展了大量的研究,取得了一系列的丰硕成果。主要体现在以下两个方面:

其一,在爆破理论模型研究方面,岩石爆破损伤模型代表了爆破理论模型的最新研究水平和发展方向^[21],并在逐步完善中。

其二,在爆破地震效应研究方面,测试技术、信号分析、危害机制以及安全判据等研究均取得了长足进展^[22-25]。例如,爆破地震安全判据中已经考虑频率和振动持续时间的影响。

然而,由于岩体爆破损伤及其失稳破坏受到多种因素的影响,例如地质因素(岩体结构、地下水、地应力等)、工程因素(结构类型、布置形式、尺寸规模、埋深程度以及

用途等)、生产因素(爆破开挖方式、炸药类型、药量、爆心距、爆破作业次数等)和时间因素等。这些因素错综复杂,互相交织,使得岩体爆破损伤及其失稳破坏具有复杂性、随机性和不确定性,造成理论和试验研究明显落后于生产实际需要的局面,其研究工作依然任重道远。

纵观岩体爆破损伤与失稳研究成果不难发现,其主要结论基本上是在单次爆破前提条件下建立的。多次爆破作用下,岩体损伤累积特性及其失稳破坏规律研究明显不足。事实上,爆破动载荷导致地下工程岩体宏观失效的过程并不是某一次爆破作业造成的,而是多次爆破共同作用的结果。例如,隧道开挖掘进循环爆破作业和矿山生产频繁重复爆破作业等。也就是说,岩体爆破损伤效应是客观存在的。Фрейберг Э А^[26]在研究地下工程允许质点振速时,提出了考虑多次爆破作用产生的变形累积值,并指出介质在各段爆破作用下产生的残余变形累积可能危及结构安全。Otuonye F O^[27]在研究爆破作用下地下硐室顶板锚杆动力响应时,考虑了重复爆破作用。Napier^[28]在研究多极膨胀技术时,提出了地震循环效应(Seismic recurrence effects)的概念。加拿大 Karami A^[29]等研究了爆破振动反复加载下岩体的疲劳寿命问题,为预报围岩稳定性、选择适当支护方法提供了帮助。阳生权^[30]结合爆破地震效应现场测试,初步研究了爆破地震累积效应。马建军^[31]研究了软岩巷道在周边爆破反复作用下的疲劳损伤破坏,探讨了围岩松动圈扩展量和损伤累积计算方法。鉴于岩体爆破累积损伤效应的复杂性,前人的研究工作只是对爆破累积损伤效应进行了前提性的初步探讨,并没有建立合理的理论模型,也没有提出切实可行的试验方法。

所谓累积损伤,是相对首超破坏而言的。累积损伤概念通常用在材料疲劳断裂破坏方面,是指损伤随载荷作用次数递增的过程^[32]。因此,岩体爆破累积损伤效应是多次爆破作用下损伤状态的动态叠加过程,同时关联其他性质与状态指标(岩体物理力学参数、岩体完整性、岩体稳定状态等)的互动变化,是岩体爆破动力响应的动态体现。由此可见,岩体爆破累积损伤效应所指的“累积效应”不同于“累计总和”,并非简单的几何或算术累加。爆破作用下,岩体累积损伤效应直接关系到岩体的稳定程度。开展爆破作用下岩体累积损伤效应研究,对于揭示岩体动力失稳机制,具有重要的理论意义和工程价值。

多次爆破动载荷作用下,岩体累积损伤扩展规律及其失稳过程研究是岩石动力学领域的难点之一。国内外学者已经开展了一些前期研究工作,认识到了岩体爆破损伤累积效应的存在以及爆破动载荷对岩体工程稳定性的影响,在岩体爆破理论模型、地震效应测试与分析等方面取得了可喜的进步,积累了丰富的实践经验。然而,随着爆破技术与地下工程的迅速发展以及研究工作的不断深入,人们发现多次爆破动载荷作用下岩体累积损伤效应及其失稳破坏是一个相当复杂的过程,其内在机制与演化规律异常复杂,许多问题尚有待深入探索和进一步研究。例如,如何定量描述爆破动载荷作用下岩体累积损伤扩展规律?如何建立反映岩体爆破损伤累积效应内在机制的理论扩展模型?如何建立岩体爆破累积损伤过程、损伤状态与岩体失稳破坏之间的关系?如何反映爆破损伤对岩体力学参数的弱化效应?如何解释多次爆破动载荷作用诱发的地下工程岩体失稳破坏现象?因此,爆破作用下岩体累积损伤效应及其稳定性问题迫切需要综合运用数学、物理、力学、地学等学科的最新理论、最新成果协同攻关。根据所研究问题的特点,从多因素、多角度、多层面开展研究,系统地揭示爆破作用下岩体损伤累积扩展过程与发

展规律,寻求有效的、合理的指标以建立爆破累积损伤、岩体力学参数弱化与岩体失稳破坏之间的内在联系,以先进的理论和方法研究爆破作用下地下工程岩体稳定性与失稳破坏机理,为地下岩体工程建设和动力失稳灾害防治提供理论支持与技术参考。

为此,本书在查阅大量国内外相关文献资料和汲取前人最新研究成果的基础上,以爆炸动力学、岩体力学、损伤力学、断裂力学、非线性动力学等理论为依据,采用现场试验、理论推导与数值模拟相结合的方法,从细观和宏观两个层面出发,以爆破损伤弱化岩体力学参数确定方法研究为纽带,将岩体爆破累积损伤效应与岩体稳定性分析有机统一起来,对爆破作用下岩体累积损伤效应及其稳定性问题进行深入、系统、全面的研究,并将有关研究成果应用于具体工程实践中,为预防地下工程岩体动力失稳灾害提供科学指导。

1.2 研究课题来源与意义

本选题瞄准科技前沿,紧密结合工程实践,力争在取得理论创新的同时,为灾害防治提供技术支持与参考。研究课题来源于以下两个研究项目:

(1)国家“十五”重点科技攻关项目的专题“复杂多空区下强制与诱导耦合大规模落矿采矿综合技术研究”(编号:2003BA612A-10-2);

(2)中南大学博士学位论文创新工程项目“复杂关联空区动力失稳机制及预测预报模型研究”(编号:040109)。

以上两个研究课题的总体目标是:以白银有色集团公司厂坝铅锌矿下部复杂多空区下受破坏矿体的开采为研究对象,研究强制与诱导耦合大规模崩矿的采矿技术工艺,开发预防复杂关联空区动力失稳、有压充水空区涌水危害及开采地压预测预报等技术;建立安全生产的作业保障体系,避免出现重大灾害事故。本书结合上述研究项目,围绕爆破动载荷作用下复杂地下采空区动力失稳机制及灾害预防这一中心任务,根据现场频繁爆破作业对地下采空区顶板、矿柱等岩体的累积损伤削弱、扰动失稳破坏作用,开展爆破作用下岩体累积损伤效应及其稳定性研究,为圆满完成国家科技攻关课题的研究任务,以及预防试验矿山发生灾害性的井下事故,提供科学指导与技术支持。本研究课题的应用范围涉及矿山工程、隧道工程、水利水电工程、土木工程和环境保护等多个领域,可为频繁爆破作业条件下矿山采场与巷道动力失稳灾害预防、隧道掘进爆破对围岩造成的损伤及其对邻近隧道围岩稳定性影响的评价、大型地下硐室群等在爆破开挖施工过程中的稳定性和失稳机制分析等提供技术参考。因此,本研究课题具有重要的理论意义和工程实用价值。

1.3 国内外研究现状与述评

1.3.1 岩体爆破损伤理论与评价方法研究现状

1.3.1.1 岩体爆破损伤理论模型研究现状与进展

岩体爆破损伤(Blasting Induced Damage, BID)历来是国内外学者关注的热点和难点问题之一。对于地下岩体工程而言,岩体爆破损伤直接或间接影响工程安全性、支护与

加固成本的高低等。在过去的几十年间,经过各国学者的不懈努力,岩体爆破损伤在理论模型、评价技术等方面取得了很大进展。

岩石爆破理论模型是岩石爆破理论与技术发展的关键问题。有关岩石爆破理论的研究可以追溯到 20 世纪 60 年代,回顾岩石爆破理论模型研究的发展历程,可将其分为弹性阶段、断裂阶段和损伤阶段三个部分^[2]。损伤理论的引入为岩石爆破理论研究提供了新的思维方法,岩石爆破损伤模型代表了爆破理论模型的最新研究水平和发展方向。美国 Sandia 国家实验室从 20 世纪 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:①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;②研究爆生气体作用下的破碎块度运动问题^[21]。最早将动力损伤机制引入爆破破岩过程的是 Grady 和 Kipp^[33],他们提出了岩石爆破各向同性损伤模型,即 GK 模型。由于该模型依赖于某些岩石参数,例如裂纹分布等,其发展和应用受到一定限制。Taylor、Chen 和 Kuszmaul^[34]引入 O'connell、Budiansky^[35]推导的有效体积模量、泊松比与裂纹密度的关系表达式及 Grady 给出的碎块尺寸表达式,建立了损伤变量与裂纹密度之间的关系式,提出了著名的 TCK 模型。该模型克服了 GK 模型的不足,可以预报岩石在体积拉伸载荷下的动态响应。Kuszmaul^[36]在以上两模型的基础上提出了 KUS 模型,该模型考虑了高密度微裂纹的荫屏效应,在模拟岩石性质方面更加接近实际。然而,TCK 模型的模拟结果中药包附近岩体的粉碎区以及由药包附近起裂的径向裂纹并不存在,因此仍然存在不足之处。为此,Thorne^[37]、卢文波^[38]等又对 TCK 模型进行了进一步修正和改进。Yang^[39]、Liu^[40]等对以上模型在损伤变量定义等方面进行了修正。Song^[41]等基于牛顿第二定律建立了动态离散元模型,将地质材料的非均质性嵌入数值模拟中。杨军^[42]等根据 KUS 模型和 Thorne 等的研究,提出了分形损伤模型。

尽管岩体爆破损伤理论模型研究取得了一系列成果,并被认为是代表了爆破理论模型的最新研究水平和发展方向,但仍存在以下几个问题:①没有考虑爆生气体对岩石的损伤和破坏作用;②忽视了岩体初始损伤在损伤演化过程中的作用;③对岩体各向异性的考虑不足;④如何以损伤系数 D 值来评价岩石爆破损伤和破坏的程度,缺乏统一标准和实验依据;⑤缺乏对岩体爆破损伤累积效应的描述;⑥现有理论模型需要有效的实验来验证和发展。

1.3.1.2 岩体爆破损伤评价方法研究现状与进展

对于保证地下工程安全、降低支护成本而言,岩体爆破损伤评价是十分必要的。岩体爆破损伤评价具有改善施工人员的人身安全,提高顶板、矿柱与围岩的稳定性,提高开挖速度,减少超挖比例,通过地面震动观测预防结构物破坏,降低建设与维护费用等诸多优点。McKown^[43]、Ricketts^[44]、Forsyth^[45]、Persson 等^[46]学者曾经详细论述了岩体爆破损伤评价的必要性和重要意义。迄今为止,国内外已发展了大约 20 种评价方法^[47]。一般地,可将岩体爆破损伤评价方法分为如下 5 类:①直观检测、超挖测量与激光检测;②爆破前后裂纹密度评价;③传统损伤指标分析,例如半孔率等;④地震与声波速度测量;⑤振动分析。图 1-1 概括了不同种类岩体爆破损伤评价方法。图 1-1 中有关符号说明,参见本书参考文献[48]。

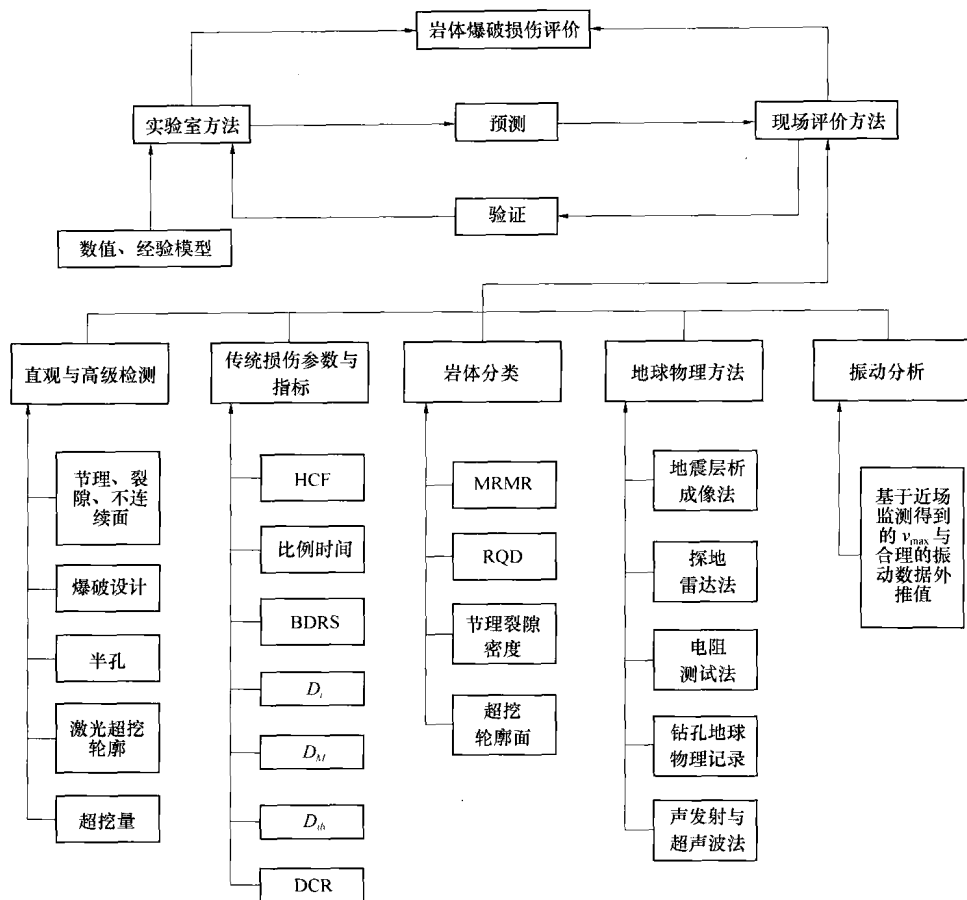


图 1-1 岩体爆破损伤评价方法概念图

在实验室模型评价方法中,杨小林等^[49]在大理岩中进行了模拟爆破试验,得到了不同爆心距和爆破条件下,爆破对岩石损伤破坏作用的一些规律。杨军等^[2]通过岩石冲击损伤实验并对回收样品进行超声波测试,得出应力波衰减系数与损伤变量以及冲击损伤耗散能具有线性关系的规律,在此基础上构造以应力波衰减系数为主要参量的岩石损伤模型。赫建明等^[50]采用预制水泥砂浆试块模型爆炸加载的方式进行试验,取芯后对爆破损伤岩体进行了抗压强度检测以及超声波检测,研究了爆炸冲击载荷对预留岩体的不同位置造成的损伤程度。在震动观测与分析方面,Singh等^[51]在印度7个煤矿中进行监测,得到了顶板和矿柱对邻近露天爆破振动的响应,并指出顶板比同等爆破条件下矿柱的响应要大。Anders Ansell^[52]对Kiirunavra地下铁矿中新浇混凝土在爆破振动下的损伤进行了现场观测,得到了抗压强度、黏聚力和质点振动速度、加速度等指标值,认为新浇混凝土具有较高的抗爆能力。国内在岩体爆破损伤评价与振动分析方面,也进行了大量的现场观测,取得了许多重要的研究成果,例如三峡工程基岩爆破^[16]、小浪底隧洞爆破开挖^[53]等。在地球物理检测方法中,应用最多的是声发射与超声波法^[54-56]、地震层析成像法^[57]等。

各国学者提出了多种岩体爆破损伤评价方法,在理论研究和工程实践方面取得了重大进展。例如,修正后的爆破损伤指标 D_{ib} ^[58, 59]与现场实测结果比较吻合。然而,由于岩体爆破损伤的影响因素较多,其分布规律具有明显的随机性和不确定性,因此评价方法中的理论研究进展缓慢,而现场实测方法得到快速发展,应用广泛。特别是对于爆破作用下岩体爆破累积损伤效应,国内外均少有研究,如何评价岩体爆破累积损伤扩展规律值得深入研究。

1.3.2 岩体声波测试及其频谱分析研究现状

1.3.2.1 岩体声波测试技术及其在爆破损伤评价中的应用

岩体声波测试技术包括声速测量、衰减测量和声发射测量,介于地球物理勘探和工程振动测试技术之间。目前,岩体声波测试技术已发展成为应用声学的一个独立分支。研究岩石或岩体中声波的产生、传播、接收及其各种效应,已形成一门新的学科——岩石声学^[60],它是声学技术和岩石力学与工程相互渗透的结果。20 世纪 50 年代初,国外开发了声波法;60 年代,美、日、欧等国家和地区已经广泛应用。60 年代末 70 年代初,我国开始研究应用声波探测技术^[61]。经过几十年的努力,声波探测技术无论是硬件还是软件都取得了长足发展,其应用范围也进一步拓宽,已广泛应用于岩体力学与工程的许多领域^[62, 63]。岩体声波测试技术以其具备的优势和特点,在以下几个方面得到成功和广泛应用:①地下硐室开挖松动圈范围测定^[64];②围岩与矿柱稳定性测定^[65];③声波测井^[66];④岩体物理力学参数测定^[67, 68];⑤桩基检测^[69];⑥工程岩体分级^[70];⑦地下溶洞与采空区等层位探测^[71];⑧注浆加固效果评定^[72];⑨工程地质勘察^[73]。另外,在裂纹扩展和岩体损伤方面,Meglis^[74]等基于超声速度和振幅对裂纹的敏感性,应用超声层析成像现场测试方法研究了加拿大原子能地下实验室隧道开挖诱发的围岩损伤问题,得到了围岩损伤程度和损伤分布规律。Sayers^[75]等研究了脆性岩石压缩微裂纹与弹性波速之间的关系,指出微裂纹扩展、张开会导致弹性波速降低,可利用弹性波速监测岩体损伤发展。同时,由于微裂纹分布的随机性将导致弹性波传播的各向异性, Otto Schulze^[76]应用超声波监测技术研究了某地下储库岩盐变形过程中损伤的发展演化规律。

随着爆破技术在岩体工程中的广泛应用,岩体爆破开挖效应(边坡、围岩以及基岩爆破损伤程度、影响深度范围等)、邻近爆破产生的扰动破坏效应(顶板、矿柱以及地下硐室群、相邻隧道的失稳破坏等)已经成为岩体爆破研究领域的关键问题之一,引起了国内外学者的极大关注^[77]。特别是核废料地下永久储存仓库的钻爆开挖过程中,爆破对围岩造成的损伤破坏程度更是关乎工程成败的重要指标之一,直接影响工程能否达到设计和使用目标。对于岩体爆破损伤程度和范围的确定,目前理论研究远远落后于工程实践的需要,一般采取事后测试或过程监测的方法,例如声波测试技术、声波折射剖面法以及层析 X 射线成像技术^[78]。理论和实践证明,应用声波测试技术进行岩体爆破损伤评价是简单、有效的实用方法之一^[79]。目前,岩体声波测试技术已经广泛应用于爆破开挖效应和扰动破坏效应的许多方面。例如,程爱宝^[80]等应用 RSM-SY5 智能声波测试系统,在现场完成了爆破震动对铜绿山矿 6301 采场顶板稳定状况影响的探测研究,探讨了爆破振动质点峰值速度、平均速度与持续时间对岩体声波速度的影响。卢文波^[38]、Raina 等^[47]、

Rubin 等^[81]、Krautkammer 等^[82]应用岩体声波测试技术研究了爆破开挖引起的围岩松动破碎范围或爆破损伤影响深度。He^[83]在室内应用声波测试方法研究得到了冲击损伤岩石的微裂纹特征。张志呈等^[84]通过爆破前后声波对比检测试验研究了3种不同装药爆破对边坡保留岩体的损伤作用,结果表明:护壁光面爆破对边坡保留岩体的损伤作用最小。朱传云等^[79]依据弹性波理论,在假定爆破前后岩体密度、泊松比近似相等的条件下,建立了声波降低率(η)、岩体完整性系数(K)以及岩体损伤度(D)三者之间的关系,探讨了岩体爆破损伤的判别标准。胡建敏等^[85]基于岩体声波测试技术,研究了大孔径梯段爆破开挖对底部基岩的扰动影响,根据检测资料的分析结果给出了大孔径开挖底部基岩预留保护层厚度。曹孝君等^[86]以顺层岩质路堑开挖爆破为背景,在6次层裂爆破试验基础上,测量得到了边坡不同位置处的质点振速和爆破前后的岩体声波速度,并对振速测量结果和声速测量结果进行了耦合分析,结果表明:爆破作用下边坡岩体产生层裂后,声波速度显著降低,岩体波速降低率随着质点振速的增大而增大。李建军等^[87]利用超声波探测法对节理裂隙岩体进行了声波测试,通过对节理裂隙岩体进行爆破漏斗试验,分析了节理裂隙对岩体中爆炸应力波传播、岩石破碎及爆破漏斗形成的影响,得出了一些有益的结论。

综上所述,岩体声波测试技术日趋成熟,在岩体工程领域的应用范围也在不断拓宽,并取得了一系列的研究成果。由于岩体爆破损伤评价方面的迫切需要,以及声学参数对爆破损伤具有较好的敏感性,岩体声波测试技术在爆破开挖效应评价中具有其他方法无法相比的优势,其应用正日渐增多。然而,岩体爆破损伤声波测试方法也存在一些缺陷和需要完善的地方。例如:①声波测试方法属于事后评价法,需要针对具体的爆破设计参数确定其相应的爆破损伤范围,现场爆破试验的工程量很大。②没有考虑到爆破损伤及岩体开挖卸荷损伤之间的耦合效应,因此不能完全客观地反映爆破损伤的真实情况^[88]。③没有充分考虑裂隙岩体冲水状况对岩体声波速度的影响^[38]。④关于爆破作用下岩体累积损伤扩展与岩体声速降低之间的关系报道较少,有待进一步深入研究。

1.3.2.2 岩体声波衰减测量与频谱分析方法研究现状

人们对岩体声学特性的研究和应用,总的来说可以分为两个方面:①岩体声波速度研究;②岩体声波衰减理论研究。这两个课题的研究后来就形成了两种声波测试技术,即波速测量法和衰减测量法^[62]。根据上述分析可知,岩体声速测试研究与应用取得了丰硕的成果,积累了丰富的实践经验。岩体声波衰减测量法是通过测定声波在岩体中传播时的能量耗散来反映岩体的内部结构和损伤特性的。由于对衰减理论研究不足,以及测量仪器的限制,岩体声波衰减测量技术进展缓慢,其研究成果远不如波速测量法丰硕。尽管如此,国内外学者与专家对岩体声波衰减理论与测试方法仍然孜孜以求,付出了艰辛的劳动,在理论研究、仪器改进和实践方面取得了一些可喜的成绩。李锡润^[89]对岩体声波衰减测量方法进行了研究,利用采样系统和能量法原理,得到了岩体声波衰减指标;Hovem^[90]研究了声波在层状介质中传播时,声波频率与声波散射衰减之间的关系。Couvreur^[91]研究了多孔石灰石试样在多级循环加、卸载应力条件下,超声波速度、最大振幅和能量的衰减规律,研究发现:利用超声衰减指标描述循环载荷实验中的裂纹扩展是一种有效的新方法。由于声波沿加载方向传播,声速变化不明显,而声波能

量衰减特性却很好地揭示了试样的变形行为。秦四清^[92]建立了一种岩石声波衰减的复合 Q 模型,并探讨了 Q 值与声波频率、含水量及压力之间的关系,合理解释了一些实验现象。Butt^[93]以声波衰减作为跟踪指标,监测了加拿大 Brunswick 矿山掘进巷道的顶板稳定性。结果显示,采掘活动引起的波形变化情况可以反映巷道顶板稳定状态。

鉴于波形、频率、能量等声学参数对岩体结构与损伤特性的敏感性,随着信号处理技术的发展,20 世纪 80 年代以来,学者们开始密切关注岩体声波测试信号的频谱特性,并进行了大量的理论与应用研究^[94]。陈达力^[95]利用自行研制的声波测试系统对岩石声谱特性进行了研究,认为声谱技术在岩石力学与工程领域具有广阔的应用前景。Valdeon^[96]运用超声脉冲技术,对石灰石和砂岩两种岩石质量进行了声速和声谱分析,并指出声波主频变化分析优于单纯的声波速度分析,风化过程中岩石声波主频变化规律有待深入研究。傅里叶变换方法较早地应用于岩石声波测试信号的频谱分析,其研究成果颇为丰富^[2,97,98]。20 世纪 90 年代以来,鉴于小波变换独特的时频局部化功能和高分辨率等特点、声波信号的非平稳随机性以及傅里叶变换方法的局限性,岩体声波测试信号频谱特性分析开始引入小波分析方法,并取得了一些研究成果^[99-101]。

综上所述,岩体声波衰减理论与测量方法、岩体声波测试信号频谱特性分析方法均取得了很大进展。然而,与岩体波速测试分析相比,岩体声波衰减测量与频谱特性分析在岩体爆破损伤评价方面的应用较少。尤其是,多次爆破作用下岩体爆破累积损伤扩展过程与声波测试信号频谱变化特性之间的内在联系,更是无人问津。因此,在现场声波测试的基础上,开展岩体爆破累积损伤效应声波频谱特性分析,是一个值得研究的、具有重要价值的有益课题。

1.3.3 岩体力学参数取值方法研究现状

随着岩体力学与工程问题计算仿真技术的发展,岩体力学参数取值愈加显得重要。如何获取有效的宏观岩体力学参数,已成为岩石力学与工程研究领域最基本、最困难的课题之一^[102]。为了获得可靠的岩体力学参数,满足工程设计与数值分析的需要,国内外学者开展了大量的研究工作,提出了许多岩体力学参数取值方法,归纳起来主要有以下几种。

1.3.3.1 原位试验法

毋庸置疑,获得岩体力学参数最准确的方法是进行现场原位试验。从 20 世纪 40 年代开始,国内外先后进行了大量的大型现场原位试验^[103]。第一个大型现场抗压试验是由美国的 Greenwald 于 1937 年在 Pittsburgh-Seam 煤矿完成的,所用试件尺寸为 0.8~1.6 m,宽高比 0.5~1.0。随着大型水利水电工程的兴建,我国在几个大型岩体工程中开展了现场原位试验。例如,葛洲坝水电工程曾进行过大型岩体力学试验,历时一年左右。由于这种试验需要的时间长,费用高,不是每一个工程都能进行或必须进行的,其发展受到一定限制。另外,现场原位试验还存在一些技术上尚未解决的问题,例如,Rocka 和 Dasilv(1970)、Shroedev(1974)、Bieniawski(1979)等在进行现场原位试验时发现原位试验结果具有很大的分散性^[104],不同试验方法得到的试验结果之间相差很大。

1.3.3.2 经验折减法

经验折减法是目前工程应用最多的一种岩体力学参数取值方法。就其主要特点和

工程应用情况而言,经验折减法大致可以分为简易强度折减法、岩体分级法、经验公式法等3种方法。由于简易强度折减法没有考虑地下水的影响和工程岩体所处的应力状态,不考虑岩体中结构面的性质,人为因素的主观影响比较大,故存在的问题较多。目前,应用最多、最广泛的是工程岩体分级法和经验公式法。国内外最常用的岩体质量分级方法主要有中国国家标准《工程岩体分级标准》^[105]、地质力学指标RMR分类法^[106,107]和Q分类法^[108]。前两种方法提供了不同级别岩体所对应的岩体力学参数范围。根据岩体分级方法判定岩体质量级别后,即可估算出岩体力学参数值。另外,工程实践证明,根据岩石室内试验结果,结合现场具体工程条件,参考某些经验计算公式也可以得到比较可靠而实用的岩体力学参数^[103]。这些经验公式中,比较著名的有Hoek-Brown公式^[102]、格吉公式^[109]和费辛柯公式。Helgstedt^[110]和Sheorey^[111]总结了现有的经验公式法,认为基于岩体破坏非线性的Hoek-Brown经验准则比较全面地反映了岩体结构等特征对岩体强度的影响,是发展最完善的方法。

1.3.3.3 位移反分析方法

岩土工程位移反分析的基本思想是由Karanagh^[112]在1971年提出来的,其基本方法是利用现场实测得到的位移数据,运用有限元等方法计算岩体力学参数等原始数据。实践证明,位移反分析法不但能够克服其他方法得到的岩体力学参数的片面性,而且可以达到较高的精度,因此在边坡、地下工程等岩土工程参数辨识中得到广泛应用。在国外,1974年Sakurai根据围岩的蠕变位移,采用解析方法计算了岩体的黏滞性系数^[113];1976年Kirsten^[114]运用有限元法和解析法得到了岩体弹性模量;1980年意大利的Gioda^[115]开始研究弹塑性位移反分析,利用实测位移计算得到了岩体的黏聚力、内摩擦角等参数;1979年Sakurai提出了一种实用的有限元反分析方法^[116]。随着商业软件的发展,基于数值计算方法进行位移反分析的研究日趋增多^[117,119]。在国内,1981年杨志法教授提出了位移图谱反分析方法,利用事先建立的图谱反演地应力分量与弹性模量^[120];随后,学者们将人工智能技术引入位移反分析中,取得了一系列的研究成果^[121,123]。近年来,智能化位移反分析方法发展迅速,主要有:①基于人工神经网络的位移反分析法;②基于遗传算法的位移反分析法;③基于支持向量机方法的位移反分析法。

1.3.3.4 不确定性分析方法

由于岩体工程是一个高度复杂的不确定性系统,无论采用何种方法,确定的岩体力学参数始终存在一定的模糊性和随机性。为此,许多学者运用各种不确定性理论开展了岩体力学参数取值研究。由于岩体力学参数的统计特征和随机性显著,徐建平等^[124]、王如路等^[125]在统计分析理论和随机过程理论的基础上开展了岩体力学参数研究。另外,岩体力学参数的样本存在离散性,其本身就是一个模糊随机变量,应符合随机模糊概率分布。黄志全等^[126]、李胡生等^[127]基于可靠性理论对岩体力学参数的模糊概率分布特征开展了一系列的研究。此外,基于可拓学原理的岩体力学参数研究也取得了一些进展。例如,原国红等^[128]引入模糊理论隶属度的概念,综合可拓评判方法,提出了一种定量指标权重的确定方法。

现有的岩体力学参数取值方法种类较多,其中应用Hoek-Brown经验公式对岩石力学参数进行折减,从而获得工程所需岩体力学参数,是目前岩石力学与工程界应用最多的方法。