



Numerical Test and Engineering
Application on Failure Process of Rock
under Static-Dynamic Loading

**静动载荷作用下岩石
破坏过程数值试验与应用**

左宇军 朱万成 邬忠虎 潘超 / 著



科学出版社

项目(51574093, 51774101)

国家科技支撑计划项目(2012BAB08B06)

贵州省高层次创新型人才培养项目[合同编号:黔科合人才(2016)4011号]

静动载荷作用下岩石破坏过程 数值试验与应用

**Numerical Test and Engineering Application on Failure
Process of Rock under Static-Dynamic Loading**

左宇军 朱万成 邬忠虎 潘超 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以数值试验为主要研究手段,对岩石在静动载荷作用下的破坏过程进行深入系统研究。介绍岩石在动载荷作用下的破坏过程数值分析原理、破坏过程影响因素、岩石层裂过程、SHPB 试验、巷道破坏过程数值分析、动载荷对卸压孔与锚杆联合支护影响的数值模拟及采动影响下断层活化诱导煤与瓦斯突出数值分析,通过对岩石静动载荷特性研究,将为寻求我国深部开采工程稳定和破碎的新理论和新方法提供科学的分析手段,也为岩体工程的抗裂设计、控制爆破技术、安全开采技术和地震工程等提供新的理论指导。

本书可供从事采矿工程、土木工程、隧道与地下工程、岩体力学、防护工程等工作的科技人员和高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

静动载荷作用下岩石破坏过程数值试验与应用= Numerical Test and Engineering Application on Failure Process of Rock under Static-Dynamic Loading/ 左宇军等著. —北京: 科学出版社, 2018

ISBN 978-7-03-058015-3

I. ①静… II. ①左… III. ①静载荷—作用—岩石破坏机理—数值试验 ②动载荷—作用—岩石破坏机理—数值试验 IV. ①TU45

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第131814号

责任编辑: 李 雪 武 洲 / 责任校对: 王萌萌

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 无极书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京数图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年8月第 一 版 开本: 720 × 1000 B5

2018年8月第一次印刷 印张: 14

字数: 300 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

在工程实践及自然界中,如矿岩开挖、岩爆、滑坡,有相当一部分岩石在承受动载荷作用之前,已经处于一定的静应力或地应力状态之中,这些问题都属于静动载荷作用理论所研究的范畴。研究静动载荷作用下岩石破坏过程对于揭示岩爆和煤与瓦斯突出等矿山动力灾害的机理具有重要意义。

岩石力学问题的研究主要分为理论分析、试验研究和数值模拟 3 个方面。实践证明对于巷道稳定性和煤与瓦斯突出等问题,静载荷作用举足轻重,但它不能阐明全部机理,外部载荷的动态扰动往往是岩爆等岩体失稳破坏的关键性因素。以往岩石力学的研究都采用静载荷作用下的强度准则。现在随着高速电子计算机和数值计算方法的发展,数值模拟的重要性日益凸显。静动载荷作用下岩石的力学特性与破坏机理是一项新的研究课题,静动载荷作用下岩石破坏过程的数值试验研究为深部开采中岩体稳定性及煤与瓦斯突出等问题提供了一种新的思路和方法。

本书首先采用基于细观损伤力学基础上开发的动态版 RFPA^{2D} 数值模拟软件,对动载荷作用下影响岩石破坏的因素进行数值模拟研究。并以岩石层裂破坏为例,采用动态版 RFPA^{2D} 数值模拟软件,对冲击载荷作用下非均匀性介质中应力波反射诱发层裂过程进行数值模拟,对其影响因素如应力波性质(应力波延续时间、应力波峰值和应力波波形)、材料性质(均质度、压拉比)、自由面和围压分别进行数值分析和比较。其次,采用动态版 RFPA^{2D} 数值模拟软件对大直径 SHPB 装置中压杆的应力波弥散效应进行二维数值分析,并从以下 3 个方面讨论波形弥散的影响:①SHPB 装置中压杆直径和杆长对弥散结果(主要是升时)的影响;②加载波形对弥散结果的影响;③压杆中的波形弥散对试验结果,如应力-时间曲线、应变-时间曲线、应力-应变曲线和应变速率-时间曲线的影响。最后,将以上研究成果,结合深部开采中巷道围岩稳定性和煤与瓦斯突出进行应用分析。

本书第 1 章为绪论,介绍研究对象的重要意义和国内外研究现状;第 2 章为岩石的动力学特性;第 3 章为静动载荷作用下岩石的本构模型;第 4 章为动载荷作用下岩石破坏过程数值分析原理;第 5 章为动载荷作用下岩石破坏过程影响因素分析;第 6 章为动载荷作用下岩石层裂过程数值模拟;第 7 章为非均匀性介质 SHPB 试验数值分析;第 8 章为动载荷作用下巷道破坏过程数值分析;第 9 章为动载荷对卸压孔与锚杆联合支护影响的数值模拟;第 10 章为采动影响下断层活化诱导煤与瓦斯突出数值分析;第 11 章为结论和展望。

本书是在国家自然科学基金面上项目(51574093, 51774101)、国家科技支撑计划项目(2012BAB08B06)、贵州省高层次创新型人才培养项目[合同编号:黔科合人才(2016)4011号]的资助下完成的,在此特别表示衷心的感谢!

本书的主要内容是著者在其博士论文《动静组合加载下的岩石破坏特性研究》的基础上,沿用论文中的主要学术观点,在博士后期间完成的。在研究过程中得到了博士生指导老师李夕兵教授和博士后指导老师唐春安教授的帮助和精心指导,在此对两位恩师表示深深的感谢!此外,著者的研究生邬忠虎、潘超、宋希贤等梦思通研究团队成员都参加了与本书内容相关的研究工作,在此也对他们表示感谢!在本书的撰写过程中,参阅了国内外相关专业的大量文献,在此向所有论著的作者表示由衷的感谢!

由于作者水平有限,书中疏漏之处,恳请读者批评指正!

著 者

2018年1月于贵州

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 静动载荷作用破岩	2
1.3 岩石裂纹扩展试验与测试	3
1.4 岩石裂纹扩展理论	4
1.5 动态扰动作用下岩石破裂过程的研究现状	5
1.6 岩石破裂过程数值分析	8
参考文献	9
第 2 章 岩石的动力学特性	14
2.1 应力波的基本概念	14
2.1.1 应力波的产生	14
2.1.2 应力波的分类	14
2.1.3 应力波方程的求解方法	16
2.1.4 应力波理论的应用	17
2.2 动载荷(应力波)作用下岩石的力学特性	17
2.3 剥落破裂	20
2.4 会聚效应造成的破裂	25
参考文献	27
第 3 章 静动载荷作用下岩石的本构模型	28
3.1 静动载荷作用下岩石的本构模型理论	28
3.1.1 基本假设	28
3.1.2 一维静动载荷作用下岩石的本构模型理论	29
3.1.3 三维静动载荷作用下岩石的本构模型理论	32
3.2 试验验证	37
3.2.1 一维静动载荷作用下岩石的理论与试验本构关系比较	37
3.2.2 二维静动载荷作用下岩石的理论与试验本构关系比较	38
3.2.3 三维静动载荷作用下岩石的理论与试验本构关系比较	44
参考文献	45

第4章 动载荷作用下岩石破坏过程数值分析原理	47
4.1 材料特性的赋值	48
4.2 细观单元的本构模型	51
4.3 有限元分析	54
参考文献	56
第5章 动载荷作用下岩石破坏过程影响因素分析	57
5.1 数值模型	57
5.2 数值模拟结果	59
5.2.1 静载荷作用	59
5.2.2 动载荷作用	61
5.3 本章小结	72
参考文献	72
第6章 动载荷作用下岩石层裂过程数值模拟	74
6.1 数值模型	75
6.2 数值模拟结果分析	77
6.2.1 不同应力波参数与不同应力波波波形对层裂的影响	80
6.2.2 不同岩石材料力学参数	87
6.2.3 不同自由面情况	92
6.2.4 不同围压	95
6.3 本章小结	99
参考文献	100
第7章 非均匀性介质 SHPB 试验数值分析	102
7.1 非均匀性材料 SHPB 试验的局限性	103
7.1.1 大直径 SHPB 装置偏离一维应力波理论基础	103
7.1.2 大直径 SHPB 装置偏离应力均匀假定的基础	104
7.2 非均匀性材料 SHPB 试验数值模拟与分析	105
7.2.1 非均匀性材料 SHPB 试验弥散效应的数值分析	105
7.2.2 大直径 SHPB 试验弥散效应对数值试样测试结果的影响	112
7.3 本章小结	121
参考文献	122
第8章 动载荷作用下巷道破坏过程数值分析	124
8.1 横观各向同性岩体中的巷道动力响应的数值分析	125
8.1.1 数值模型	126
8.1.2 巷道在球面冲击应力波作用下破坏过程的数值模拟与分析	128
8.1.3 小结	135

8.2 含不连续面巷道的动力破坏过程及应力位移特征数值分析	136
8.2.1 数值模型	136
8.2.2 巷道在球面冲击应力波作用下破坏过程的数值模拟	137
8.2.3 巷道围岩的应力-时间历程分析	140
8.2.4 巷道围岩的位移-时间历程分析	145
8.2.5 小结	149
8.3 爆炸应力波作用下巷道加固对围岩破坏过程影响的数值分析	150
8.3.1 数值模型	151
8.3.2 爆炸应力波作用下巷道加固对围岩破坏过程影响的数值模拟	152
8.3.3 巷道壁被加固对围岩破坏过程影响的应力-时间 历程和位移-时间历程分析	153
8.3.4 小结	155
8.4 深部岩体巷道在动力扰动下的破坏机理分析	156
8.4.1 数值模型	156
8.4.2 静压力作用下巷道破坏的数值模拟	157
8.4.3 动力扰动对巷道破坏的影响	159
8.4.4 小结	164
参考文献	164
第 9 章 动载荷对卸压孔与锚杆联合支护影响的数值模拟	167
9.1 数值模型	167
9.2 动载荷对卸压孔与锚杆联合支护影响的数值模拟	169
9.2.1 应力加载特性及演化过程	169
9.2.2 主应力大小变化规律	171
9.2.3 巷道围岩内部变形规律	173
9.2.4 巷道围岩的破裂特征	176
9.3 本章小结	178
参考文献	179
第 10 章 采动影响下断层活化诱导煤与瓦斯突出数值分析	180
10.1 数值模型	181
10.1.1 现场情况	181
10.1.2 数值模型及参数	184
10.1.3 数值试验内容	185
10.2 石门揭煤影响下断层活化诱导煤与瓦斯突出的作用机理研究	186
10.2.1 石门揭煤影响下断层活化诱导煤与瓦斯突出过程规律分析	186
10.2.2 单元的声发射能量释放及煤岩体的微破裂特征	189

10.2.3	揭煤影响下断层活化诱导煤与瓦斯突出过程中的煤岩层应力 演化规律	190
10.2.4	揭煤影响下断层活化诱导煤与瓦斯突出过程中的煤岩体损伤破坏 规律分析	200
10.3	本章小结	209
	参考文献	210
第 11 章	结论和展望	212
11.1	基本结论	212
11.2	展望	215

第1章 绪 论

1.1 研究背景和意义

在工程实践及自然界中,如矿岩开挖、岩爆、滑坡,有相当一部分岩石在承受动载荷作用之前,已经处于一定的静应力或地应力状态之中,这些问题都属于静动载荷作用理论所研究的范畴。特别是已成为我国乃至世界矿业界特别关注的深部岩体开采问题,受一定的高地应力和开采扰动作用,是典型的静动载荷作用问题^[1]。目前,建立在经验和经典线性力学基础上的现行设计规范只适合于浅部小载荷的巷道支护设计,即目前浅层开采及地表的工程项目运用现有的力学体系尚可以达到设计标准和安全要求,然而对于深部岩体工程,现行的力学体系已不能或只能部分应用于设计中,因为此时深部问题已不再是我们熟悉的各因素叠加的线性科学体系,而是非线性科学体系^[2]。这就要求我们寻求评价深部岩体工程稳定和破碎的新理论和新方法。

静动载荷作用下岩石破坏模型是静动载荷作用研究值得关注的方向^[1]。静动载荷作用下岩石破坏过程研究与矿岩的安全高效采掘、岩体工程的抗裂设计、控制爆破技术、石材加工技术和地震工程等有关。例如,①放炮落煤是目前诱发巷道围岩冲击地压的一个主要因素。据统计,国内采用炮采的矿井 50%以上都存在着严重的冲击地压或煤与瓦斯突出等巷道围岩动力失稳破坏问题^[3]。而煤系地层一般都赋存了很高的构造应力。防止巷道围岩动力失稳破坏的对策之一是在巷道设计时,尽量将巷道纵轴方向与水平最大压应力方向平行布置,避免互相垂直^[4],从某种程度上来说,就是改变巷道所处的静应力状态,从而改变动载荷作用下围岩的裂纹扩展方向。②在动力扰动下的层裂屈曲岩爆中,硐室表面附近存在周向压应力,当应力达到一定大小,初始裂纹将会平行或向最大主应力方向扩展^[5,6],在一定动力扰动下,压缩方向的裂纹会继续扩展,引起岩爆^[1,6]。③在控制爆破中,初始应力场的存在改变了爆轰波的传播规律,同时对裂纹发展起着导向作用^[7]。④在地震学中,研究处于地应力的断层在地震过程中的扩展方向可以给城市规划、构筑物的布置提供依据^[8]。这些问题都与静动载荷作用下岩石破坏过程有关,要求研究静动载荷作用下岩石破坏过程中裂纹的扩展方向。

从上述情况来看,静动载荷作用下岩石破坏过程是采矿和岩土工程领域具有重要现实意义的研究课题。研究静动载荷作用下的岩石破坏过程,可以进一步揭示静动载荷作用下的岩石力学与破坏特性,对重新寻求评价岩体工程稳定、岩石

破碎和采矿技术的新理论和新方法具有很高的研究价值；同时对于研究岩石、混凝土等材料的断裂破坏机理，提高对岩体破裂方向的控制，给岩体工程的抗裂设计和切割、预裂控制爆破技术等设计提供依据具有重要的指导意义。该问题的研究也是相关重大灾害事故研究的应用基础性课题，是国家自然科学基金项目指南中鼓励研究的方向。

1.2 静动载荷作用破岩

自 1962 年在奥地利成立“国际岩石力学学会”以来，岩石力学得到了很大发展。目前在岩石力学领域中，对岩石在静载荷作用下破坏的研究已经比较深透，对动载荷作用下的岩石本构特征及应力波在岩体中的传输的研究也取得了很大的进展，其理论和科研成果被广泛地应用于地质、矿业、水利电力、建筑、交通与国防等领域，为经济和国防建设的发展作出了重要贡献^[9-18]。理论和试验研究都表明，岩石在承受静动载荷作用时，其本构关系和力学特性有很大差异^[19-24]。同样，静动载荷作用下岩石的破坏问题也普遍存在于上述领域中，许多研究者还相继提出了多种相关理论^[25]，然而，这些研究基本限于只承受静载荷或动载荷作用的岩石力学问题。真正对静动载荷作用问题展开专门研究是近几年的事情^[1,26,27]。在试验方面，主要利用 INSTRON 电液伺服材料试验机研究了一维和二维静动载荷作用下岩石破坏与失稳的一些规律；在理论方面，主要应用突变理论和损伤力学分析了一维静动载荷作用下岩石失稳与破坏的机理，建立了静动载荷作用下岩石的本构模型和一维静动载荷作用下岩石断裂的突变理论准则与强度破坏准则；在工程应用方面，以单轴静动载荷作用试验为依据，对岩爆岩块弹射速度进行了理论近似确定。从目前的研究情况来看，对静动载荷作用下岩石破坏问题的相关研究还存在以下不足：

(1) 由于试验条件所限，只研究了低应变速率或中应变速率条件下一维和二维的情况，高应变速率和三维静动载荷作用下的试验研究还有待进行。

(2) 岩石结构的复杂性，导致岩石力学问题研究的复杂性，静动载荷作用的理论分析主要是采用一维模型表达原本是三维的岩石力学问题，如静动载荷作用下岩石的损伤和突变机理分析。由于数学上的困难，尽管有关二维和三维岩石破裂过程分析的研究受到了关注，但研究进展却极其缓慢。

(3) 建立的岩石静动载荷作用本构模型、破坏准则还不能很好地反映岩石在静动载荷作用过程中出现的非线性现象，并且建立的理论模型的参量较多，较难确定，所以，模型一般难以具体实施。

此外，静动载荷作用下岩石破坏具有瞬时完成的特点，且相关测试比较困难，

因此,目前静动载荷作用下岩石破坏问题的研究主要关注岩石破坏与失稳的结果,对静动载荷作用下岩石破坏过程的研究显得相对不足。

在岩石力学研究中,裂纹扩展引起的岩石破坏是一个很重要的课题^[28]。岩体的破裂与失稳过程实际上是在一定载荷作用下通过起裂、裂隙扩展、连接并形成宏观的贯通破裂面而完成^[28]。所以,研究静动载荷作用下岩石的破坏过程同样要研究静动载荷作用下岩石的起裂、裂隙扩展、连接与贯通过程。

1.3 岩石裂纹扩展试验与测试

目前,人们对岩石或含裂隙岩体在静载荷作用下有关裂纹的扩展规律的研究做了很多工作,对动载荷作用下有关裂纹扩展的研究也取得了一定的进展。在试验方面,主要是利用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)和光学显微镜等仪器^[29, 30],进行细观结构观察,分析岩石的细观破坏机制及其与宏观力学行为的关系;或利用各种试验装置研究裂纹的扩展方向与围压等的关系^[2]、裂纹形成与扩展及裂纹的止裂与控制等内容^[31]。近年来,节理裂隙岩体中,节理、裂隙在外载荷下的连接、贯通过程吸引了众多学者的广泛关注并取得了一些研究成果^[32-36]。动循环载荷作用下含裂隙类岩石材料的动变形、动强度特性虽然已有一些研究成果^[37, 38],但是,对动载荷作用下节理裂隙、岩体裂隙扩展、贯通过程及其与裂隙空间位置关系的研究才刚刚开始^[39]。针对越来越多的煤矿和金属矿进入深部开采后所表现出的一系列工程灾害问题,对深部岩体力学基础问题进行了大量研究^[40]。例如,在深部开采有关的静动载荷作用试验方面,主要研究了二维静动载荷作用下岩石裂纹的扩展方向,而一维和三维静动载荷作用下岩石裂纹的扩展方向有待研究^[1];在爆破研究方面,通过对存在不同初始应力场的几种材料的室内试验和地下矿山爆破实例的分析,研究了附加载荷下介质爆破特性、爆破裂纹扩展规律及高应力岩巷的控制爆破机理与技术^[7, 41-43],认为初始应力场对介质爆破特性和裂纹的扩展方向有较大的影响。此外,与静动载荷作用有关的岩体地震动力破坏问题,讨论了地应力和地形对岩体地震动力破坏的重要影响^[44],并指出研究岩体在地震动力作用下的破坏机制需要结合岩石力学、工程地质、地震工程、地震学等诸多学科,进一步探讨定量的分析方法,进行主要影响因素的量化计算。

在测试方面,尽管由于动载荷作用下岩石破坏具有瞬时完成的特点,研究动态应力场和动载荷作用下裂纹的扩展过程有较大的难度,但是众多学者还是做了不少工作。为了验证爆破数值模拟计算的结果,不少学者通过动光弹、超动态量测系统、高速自动分幅全息干涉法等研究爆炸应力场^[45, 46];为了研究岩石爆破与动载荷作用下的破裂过程,一些学者采用高速摄影和高性能数码摄像等技术来研究爆破

鼓包和裂纹的扩展规律^[39, 47, 48]。此外, 美国等发达国家在石油开采中广泛应用测震技术分析水压致裂过程^[49], 认为其与传统的测试方法比较, 可以实时监测岩层破裂带扩展过程并能以高精度测量破裂带几何参数, 如破裂带的长、宽和高^[50, 51], 而且能估计破裂带扩展方向及速率。

上述试验研究和现场观测, 由于设备和方法的差异, 得到的结果往往具有一定的差别; 受条件限制, 所得结果有时不能完全反映岩石等非均匀性材料的破裂规律, 或者获得的信息很有限。此外, 研究岩石的静动载荷作用需要各种辅助设备, 这些辅助设备给岩石破坏过程的观察带来了困难^[1]。因此, 由于试验手段的限制, 以往试验主要着眼于给定静载荷、动载荷或静动载荷作用下岩石的断裂破坏与失稳结果, 而不太关心上述载荷作用下起裂后裂纹的扩展趋势。

1.4 岩石裂纹扩展理论

在理论上, 人们基于断裂力学提出了许多有关裂纹扩展的理论和模型。例如, 冲击载荷作用下裂纹的起始判据^[52, 53], 可作为裂纹扩展方向判据的应变能密度因子判据^[54]; I 型裂纹的扩展方向及其稳定性分析^[55]。此外, 有学者还在分形几何(fractal geometry)^[30]、声发射^[56]和能量耗散^[57]等方面研究了裂纹的扩展。

从目前的理论研究来看, 断裂力学与断裂动力学的出现为研究裂纹的扩展提供了重要的理论依据。根据文献[58]与文献[59]可以认为, 静动载荷作用下岩石的破裂与失稳研究属于断裂力学的正问题, 着眼于如何控制、防止或诱发给定载荷下材料的断裂破坏, 而不甚关心载荷作用下起裂后裂纹的扩展趋势和最终的扩展结果; 而静动载荷作用下岩石的破坏过程中, 裂纹扩展方向的控制属于断裂力学的逆问题, 与前者恰恰相反, 它关心的是载荷的变化如何影响裂纹的扩展, 在确保裂纹扩展方向的前提下, 求解加载荷方式。对于岩石静动载荷作用问题, 人们目前关心的主要是断裂动力学的正问题, 对断裂动力学的逆问题重视不够。限于目前的研究现状, 本书也只着眼于对正问题的研究, 力求为以后逆问题的研究提供理论和试验基础。同时, 也注意到, 断裂力学理论有其局限性。例如, 当岩石、混凝土裂缝端部产生的微裂缝区和亚临界扩展长度较大而不能忽略时, 用线弹性断裂力学分析岩石类试样中的裂纹扩展就不再合适了^[60]; 裂纹从萌生、扩展到最后的失稳是一个过程, 而断裂力学则只研究固体中裂纹型缺陷扩展的规律, 却无法研究分析宏观裂纹出现以前材料中的微缺陷或微裂纹的形成及其发展对材料力学性能的影响, 而且许多微裂纹的存在并不能简化为宏观裂纹; 对于岩石来说, 要研究其受力后裂纹的扩展过程, 不但要研究已存在裂纹(如断裂力学试样中的预制裂纹)的扩展规律, 而且往往要研究新裂纹的萌生、裂纹的扩展及裂纹间的贯通。损伤力学的产生从某种程度上弥补了断裂力学的这种不足。但是, 值得一提的是

岩石类材料的非均匀性是一个不容忽视的因素,而基于岩石宏观层次建立的损伤力学模型往往是把岩石视为均匀性材料,只是引入了损伤内变量描述宏观结构单元的损伤特征,无法了解岩石细观结构对于外部载荷的响应。

1.5 动态扰动作用下岩石破裂过程的研究现状

作为开展对动态扰动触发深部岩体失稳破裂研究的基础,岩石和岩体在动载荷作用下变形、损伤与破裂过程的研究是其重要的基础。动载荷作用下岩石破裂过程实际上就是动态扰动激发的应力波在岩石中传播诱致岩石破裂的过程,这是岩石动力学的重要方面,与采矿工程、土木工程及某些军工领域的发展密切相关,因此,它的发展也引起了现代采矿、土木、石油、水电、建筑及地球物理等专业人员的浓厚兴趣和关注^[61,62]。因此,应力波诱致岩石破裂的研究一直是一个比较活跃的领域^[63]。本节从试验研究和理论及数值模拟研究着手,对动载荷作用下岩石破裂问题的研究现状予以综述,并就有关问题说明自己的观点。

岩石动力学试验技术是岩石动力学理论及其工程应用研究的基础,而试验设备是岩石动力学研究的手段。岩石动力学试验设备按照驱动类型主要分为:①液压试验系统;②分离式霍布金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)试验系统;③射弹试验系统;④落锤试验系统。这几种试验系统可以提供多种应变速率,下面分别介绍应用最为广泛的液压试验系统、SHPB 试验系统和射弹试验系统。

1) 液压试验系统

液压试验系统是以液体作为内在驱动力传递媒介的试验系统的统称。这一类试验系统通常用来进行静载荷作用下的试验,应变速率量级为 $10^{-6} \sim 10^{-2} \text{s}^{-1}$ 。在辅助以反应快速的油泵和阀后,可以完成动态试验。在压缩情况下,该类试验系统的加载速率可以达到 10^{-1}s^{-1} ;在拉伸条件下,可以接近 10^0s^{-1} 。这一类设备的优点是:如果刚度足够,通过增加电液伺服阀及合适的电子装置,可以实现比较恒定的应变速率或加载速率。在快速加载条件下,由于试验所用的时间很短,通过直接反馈控制得到恒定应变速率的方法实施起来难度很大,应变速率在很大程度上依赖于试验机刚度及试件的刚度。中国科学院武汉岩土力学研究所研制的 RDT-10000 型岩石高压动力三轴仪^[64],轴向载荷达 2.2MN,三轴围压达 1000MPa,可进行岩石或其他固体材料在中等应变速率下的动力学性质测试。王武林等^[65]用该设备对闪长岩与莫安质岩,分别以 $10^4 \text{MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $10^3 \text{MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $10 \text{MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 3 种加载速率对岩石试样进行加载试验,获得破坏强度与加载速率的关系。文献[66]用类似的快速加载设备系统地研究了加载速率在 $10^{-4} \sim 10^2 \text{MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 时花岗岩的抗压、抗拉和抗剪破坏特征,得出了强度随加载速率变化的规律,并提出了花岗岩

的动力破坏准则。李海波等^[67, 68]的试验结果表明, 当应变速率从 10^{-4} s^{-1} 增加到 10^2 s^{-1} 时, 花岗岩的抗压强度约增加 15%, 但弹性模量、泊松比和内摩擦角随应变速率的增加没有明显的变化趋势。左宇军等^[69]用 INSTRON 电液伺服疲劳试验机, 通过不同的加载频率及加载波形, 完成了应变速率由 $10^{-4} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 4 个数量级范围内岩石的准动态强度试验, 并研究了静动载荷作用下岩石的本构关系。张静宜和徐纪成^[70]用 INSTRON 电液伺服疲劳试验机开展了中等应变速率条件下岩石动态断裂韧度的测试, 研究了断裂韧度的应变速率依赖性。

2) SHPB 试验系统

SHPB 试验系统已广泛应用于研究岩石及其他工程材料在应变速率为 $10^1 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$ 下的动力性能与本构关系。SHPB 装置的基本原型是由霍布金森于 1914 年提出的, 当初是用雷管直接作用于试样, 没有输入杆, 它可能是测试瞬态脉冲应力的第一种方法, 仅可用于测量冲击载荷的脉冲波形; 直到 1949 年, Kolsky 将压杆分成两段, 通过加速的质量块、短杆撞击或炸药爆轰产生加速脉冲, 将试样置于输入杆和输出杆中间, 利用这一装置可测量材料在冲击载荷作用下的应力-应变关系^[71]; 1968 年, Kumar 首次使用短岩石试样在 SHPB 装置上进行了岩石动态强度试验; 稍后不久, Hakalehto 用这种装置进行了岩石在冲击载荷作用下的动态性能试验^[72]; 1972 年, Christensen^[73]又研制成功了一种对岩石加围压的三轴 SHPB 装置, 可在不同围压下对岩样进行动态冲击试验; 1980 年, 周光泉对分段 Hopkinson 杆实验技术的最新发展做了综述, 介绍了产生高应变率的几种常见加载方法。在国内, 20 世纪 80 年代之后, 朱瑞赓和吴绵拔^[75]、章根德^[76]、王武林和黄理兴^[77]、于亚伦等^[78-80]、王靖涛^[81, 82]、周光泉^[74]、赵明阶和吴德伦^[83]、吴德伦和叶晓明^[84]、李夕兵等^[85-91]、单仁亮等^[92, 93]、东兆星和单仁亮^[94]、乔河等^[95, 96]都使用 SHPB 等试验设备对岩石的动态力学性质进行了广泛的试验研究, 并基于试验结果提出了高应变速率条件下的岩石本构关系。于亚伦等^[79, 97]开展了三轴状态(有围压)条件下岩石的 SHPB 冲击破坏试验, 对岩石试样的破坏类型进行了分类, 得出了岩石动态破坏强度, 画出了动态三轴、动态单轴和静态单轴的破坏强度比较曲线, 并以最大剪应力条件建立了岩石的破坏判据, 以及三轴动态破坏强度、单轴动态破坏强度与围压的关系式。章根德^[98]用 SHPB 装置研究岩石的动态特性时, 发现应力波通过破裂岩石试样时会产生衰减和岩石动态强度的降低, 还分析讨论了影响动态强度的一些因素。Shan 等^[99]用 SHPB 装置测试了大理岩和花岗岩的应力-应变曲线, 并分析了岩石的变形与破裂特征。Meng 和 Li^[100]从波分离技术对 SHPB 装置进行改进, 以减少试验过程中波的衰减作用。文献[101]采用轴对称动态有限元 HONDO 程序对大直径 SHPB 装置中压杆横向泊松效应引起的应力波弥散进行二维数值分析, 认为大直径 SHPB 装置弥散效应对试验结果的影响很大, 必须予

以考虑。李夕兵等^[102,103]介绍了钟形及理想半正弦波加载进行岩石类脆性材料动态测试的试验技术,认为半正弦波加载可以明显减小岩石 SHPB 试验的波形振荡,并应用 LSDYNA 非线性动力分析有限元程序对该问题进行了数值模拟,证实和显示 SHPB 试验半正弦波加载的优越性。Li 等^[104]对 SHPB 装置进行了改进,在中-高应变速率条件下,大大提高了轴压、围压的测量范围,并研发了国内外首个能够实现静动载荷作用的大尺寸(直径为 75mm) SHPB 装置,考虑了静动载荷作用条件下单轴及三轴静态预应力状态对于动载荷作用下岩石破裂过程的影响,为研究动态扰动触发高应力硬岩的破裂机制提供了试验条件。

3) 射弹试验系统

射弹试验装置是利用分子量级的气体驱动,进行高速碰撞试验的专用设备。借助于射弹试验装置可以获得更高的加载速率。试验时将飞片粘贴于弹丸上,高压气体的突然释放推动弹丸沿抽成真空的炮管运动。当高速的弹丸碰撞到靶板时,产生一个较高的压力脉冲,由应力量计记录一组压力信号,不同的撞击速度产生不同的压力峰值。根据这一系列压力信号,进行材料的动态特性分析。杨军和王树仁^[105]、Yang 等^[106-111]选用一级轻气炮撞击的飞片试验技术,测试了大理岩试样在高应变速率($10^4 \sim 10^5 \text{ s}^{-1}$)条件下的变形特征,并探讨了冲击波作用下岩石破坏过程的能量耗散过程。信礼田和何翔^[112]使用一级压缩空气炮进行高速平面撞击试验,分别测量了砂岩、花岗岩和石灰岩试件组成的靶板中的应力脉冲波形,得到岩石的动态本构关系,了解了岩石在强冲击载荷下的某些力学性质和变形特征。Dancygier 和 Yankelevsky^[113]采用此类装置对高强混凝土进行动态冲击试验,通过气枪对弹头进行加速,射向设置在一定距离的混凝土板从而进行冲击破坏,试样采用宽 400mm、厚分别为 40mm 和 60mm 的正方形混凝土板,弹头的速度分别达到 $85 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $230 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,得到的应变速率为 $10^3 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$ 。Grotes 等^[114]采用类似的试验装置将直径 76.2mm、厚 10mm 的圆盘置于射弹的前部,进行冲击试验,用氦气对弹头进行加速,研究的应变速率量级为 10^4 s^{-1} 。另外,Gran 等^[115]利用爆炸气体做动力,分别施加在轴向和径向,对直径 149.2mm、高 301.6mm 的圆柱体进行动载荷试验,得到的应变速率为 $0.02 \sim 20 \text{ s}^{-1}$ 。这一类设备原理简单、易于改造,适用的应变速率范围较大,适应能力强,有着良好的发展前景。

试验工作为我们提供了动载荷作用下岩石的力学响应的基本资料,尤其使人们认识到了岩石弹性模量和强度等物理力学参数应变速率效应的存在。然而,由于动态冲击试验在很短的时间内完成,一般难以对岩石试样中应力波传播及诱致岩石破裂的过程进行直接观测。在这种情况下,数值模拟和数值试验方法的优势得以凸显。数值试验不仅仅是对已知现象和过程的再现,更重要的在于对未知过程及现象的探索。

1.6 岩石破裂过程数值分析

岩石这种非均匀性介质在静动载荷作用下宏观裂纹的扩展与破坏,也是各种不同尺度缺陷或微裂纹扩展、相互作用、聚合乃至贯通的宏观表现。但与岩石工程灾害密切相关的岩石破裂过程与失稳,往往是通过实验室小型岩石试样的单纯静载荷或单纯动载荷试验来理解的。然而,岩石破裂过程与失稳不仅与岩石的非均匀性有关,而且还涉及破裂过程中诸多通过现有测试技术难以观测的非线性现象(如岩石在破裂过程中的应力场,岩石微破裂演化过程的自组织临界现象、突变等^[116, 117]),并且,静动载荷作用下岩石破裂过程的演化比单纯静载荷或动载荷作用时还要复杂得多。这些复杂现象想要用解析理论进行描述是相当困难的,甚至是不可能的。因此,发展一种能够充分考虑岩石介质非均匀性并能充分考虑在静动载荷作用下缺陷之间相互作用的岩石破裂过程分析数值试验方法,进行岩石破裂过程及其工程灾害诱发机理的数值试验研究,无疑是解决这一问题的良方^[118]。

随着计算机技术的发展,数值模拟方法在岩石力学与工程中得到了越来越广泛的应用,由此也产生了许多数值模拟方法。数值模拟方法可以综合考虑多方面因素,而且其计算结果直观、可视化,有代表性的,如1984年邹定祥提出了露天矿台阶深孔爆破破碎过程的三维数学模型^[119]。将岩体视为各向同性弹性体,柱状药包在岩石中形成的爆破应力场被看成是等效球状药包爆炸形成的应力场的叠加,然后根据应力波理论得出应力波能量的三维分布,从而求得岩石的爆破块度分布。爆破数学模型研究主要关注爆破后的结果,而应用细观损伤力学研究开发的岩石破裂过程分析(rock failure process analysis, RFPA)数值模拟软件^[120-122],由于考虑了材料的非均匀性,具有跟踪裂纹扩展、贯通的分析功能,已在裂纹相互作用、矿柱破坏、岩爆机制、岩层移动、煤与瓦斯突出、混凝土和复合材料的断裂方面得到了初步的应用,但目前应用主要是针对二维静力学和动力学的基本力学问题及三维静力学问题,而对静动载荷作用下岩石破坏过程有待进一步研究。

此外,由于经济和社会发展的需要,我国目前相继建设和即将建设许多大型的岩土工程,需要巨大的计算规模和强大的计算能力。因此,采用并行计算技术,发展岩石破裂过程分析系统,提高计算速度和容量,对于深入分析岩土工程中细观破坏本质、工程灾害分析及稳定性评价等都有积极的意义^[123]。并行计算在国外得到了很大发展,自从Noor和Fulton发表了第一篇关于有限元并行计算的文章以来,有限元并行处理技术几乎与并行计算机同步发展。在国内,受到硬件水平的限制,有限元结构分析并行处理方面起步较晚,并行计算还处于发展阶段^[123]。目前,关于大规模岩石破裂过程分析的研究还非常少见。东北大学岩石破裂与失稳研究中心和大连大学材料破坏力学数值试验研究中心合作,研究开发了RFPA