

Energy Evolution Mechanism during Rock Deformation and Failure

岩石变形破坏过程中的 能量演化机制

张志镇 高峰 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB226804,2011CB201205)

国家自然科学基金项目(11202108)

中央高校基本科研业务费专项资金(2014QNA80)

中国博士后科学基金资助项目(2014M550315,2014M550316)

岩石变形破坏过程中的能量演化机制

张志镇 高峰 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书以试验和理论分析为主要研究手段,针对岩石变形破坏过程中的能量演化机制,从能量转化作用、能量演化及分配规律、能量演化的非线性特性、能量演化的细观特征等四个方面研究了岩石在受载过程中的能量行为。全书共分6章,第1章是绪论,主要对研究背景及意义、研究现状及不足、研究内容及方法进行了阐述;第2章归纳了岩石变形破坏中的能量种类,探讨了岩石变形破坏方式与能量转化间的关系;第3章主要利用试验手段获得了岩石受载过程中的能量演化及分配规律;第4章建立了岩石能量转化的自我抑制模型,并揭示了其分叉和混沌特性;第5章沟通了岩石细观几何及强度特征—能量演化特征—细观破裂特征的内在联系,探究了岩石能量演化的细观响应;第6章系统总结了研究成果,并对下一步工作进行了展望。

本书可供地质、采矿、岩土工程及相关领域的科研人员、工程技术人员、研究生和高年级本科生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

岩石变形破坏过程中的能量演化机制 / 张志镇,高峰著.

徐州:中国矿业大学出版社,2014.7

ISBN 978-7-5646-2373-9

I. ①岩… II. ①张… ②高… III. ①岩石变形—能量
转换—研究 IV. ①TU454

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第135608号

书 名 岩石变形破坏过程中的能量演化机制

著 者 张志镇 高峰

责任编辑 杨 洋

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 10 字数 240千字

版次印次 2014年7月第1版 2014年7月第1次印刷

定 价 35.00元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)



前 言

岩石的变形破坏规律是岩石力学的核心,也是固体力学的重要组成部分。长期以来,学者们利用黏弹塑性理论来研究岩石的本构行为和强度准则,后来又发展了断裂力学和损伤理论,但是由于岩石本身的结构、组分等的复杂性和所处外部应力、地质环境的复杂性,工程岩体的力学行为及物理响应十分复杂。具体来说,首先,孔隙、裂隙、节理、断层、夹杂等非连续构造大量充斥其中,基质内部细观结构也极不均匀,是典型的非均匀非连续介质;其次,不同应力状态、应力路径、应力速率和加载历史下岩石力学性质差别很大;再次,岩石所处温湿、化学等地质环境也会显著影响其物理力学性质。这些岩石的自然属性和特殊性给确定的力学分析和预测带来很大的困难,表现在工程实践上,即诸如岩爆、煤与瓦斯突出、围岩失稳甚至地震预测等难题尚未得到很好的解决。

由热力学定律可知,物质破坏是能量驱动下的一种状态失稳现象。实际上,在各种岩石工程中,对岩体的开采、扰动和改造总是伴随着能量的输入、积聚、耗散和释放,而受载岩石的变形破坏乃至支护加固过程即是能量的转移和转化过程。以地下煤岩体为例,人为采掘及其所诱导的顶底板岩层运移对煤岩体输入能量,另外还可能受到热能、辐射能的影响,这些能量一部分会聚积在煤岩体内,转化为煤岩体的弹性变形能,并在其破坏时释放出来,另一部分会导致煤岩破裂从而转化为破裂表面能、电磁辐射、红外辐射、声发射等能量耗散掉。因此,从能量角度研究岩石变形破坏规律,建立岩石破坏过程中的能量变化规律及其与变形破坏之间的联系,可能更具普适性,更接近岩石的变形破坏本质,对于岩体力学行为的深入认识带来一种崭新的视角。

近年来,学术界和工程界对岩石能量行为的研究越来越多,并尝试将其应用于相关岩石工程实践,取得了可喜进展。本书以此为基础,主要在四个方面对岩石变形破坏过程中的能量行为进行了初步研究,分别对应第2、3、4、5等4个主体章节。

第2章主要阐述岩石变形破坏过程中的能量种类及各自的表达式,并从破碎块度和破碎剧烈程度两方面初步分析岩石的变形破坏方式与能量转化之间的关系,最后,探讨能量转化的微观机制及其影响因素。

第3章主要研究单轴、三轴加载情况下岩石内能量输入、积聚弹性能、耗散能随应力的变化规律,以及积聚弹性能和耗散能的分配规律,并考察围压、加载速率、含水率、岩性等因

素对此规律的影响。进一步地,通过分析三种典型开采条件(放顶煤开采、无煤柱开采及保护层开采)下应力状态的改变,分析不同开采条件下的能量演化规律。

第4章通过对岩石能量传递数学模型的简化,得到受载岩石能量演化的自我抑制模型,并基于此分析岩石能量演化的分叉和混沌特性,进而提出能量迭代增长因子的概念,可反映岩石破裂的不同阶段。

岩石的细观结构特征(基元均匀性、平均强度、细观特征尺度等)、裂隙特征(微裂纹密度、裂隙倾角、裂隙间距等)等极大影响着受载岩石的能量特征,而不同的能量特征又影响着变形破坏过程的微破裂演化以及破断面的几何特征(分形维数)。第5章主要对这两方面的影响规律进行了定量研究。

岩石变形破坏过程中的能量演化机制将丰富和深化人们对受载岩石力学行为的认知,可能推动如岩爆、冲击矿压等岩石力学中较困难课题的认识和研究,亦会对相关岩石工程实践带来另一视角的指导参考。

在本书研究、撰写过程中,特别感谢中国矿业大学李玉寿副教授、赵鹏高工,四川大学刘建锋副教授、李佳伟硕士、李天一硕士、徐明明硕士,中国矿业大学林斌硕士、滕腾博士、薛熠博士,中国科学院力学所田智立硕士,南通大学徐小丽副教授在实验室试验中的帮助;感谢山东科技大学刘星光博士在试验数据处理方面的帮助;感谢中国矿业大学张亚鹏硕士在MATLAB绘图方面的帮助;感谢中国矿业大学张慧星副教授、小木虫网友 onesupeng 在微分方程稳定性分析方面的帮助;感谢中国矿业大学李玺茹硕士、宋良博士在数值试验方面的帮助;感谢中国矿业大学(北京)彭瑞东副教授提供分形维数计算软件。

由于作者水平所限,错误和不妥在所难免,望读者朋友批评指正。

作者

二〇一四年二月

目 录

1 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 研究现状及不足	2
1.2.1 岩石受载下的能量演化规律	2
1.2.2 岩石能量耗散及释放的微细观响应	6
1.2.3 岩石受载的能量耗散本构及灾变准则	7
1.2.4 研究不足	10
1.3 研究内容及方法	10
1.3.1 研究内容	10
1.3.2 研究方法与技术路线	11
1.4 主要创新点	11
2 岩石变形破坏过程中的能量转化作用	13
2.1 引言	13
2.2 岩石变形破坏过程中的能量种类	13
2.3 岩石变形破坏和能量转化之间的关系	17
2.3.1 岩石变形破坏中的能量转化	17
2.3.2 能量转化性质与岩石变形破坏方式的关系	19
2.4 岩石能量转化的微观机制及影响因素	24
2.4.1 弹性能积聚的微观机制	24
2.4.2 塑性能耗散的微观机制	25
2.4.3 断裂表面能耗散的微观机制	28
2.4.4 岩石能量转化的影响因素	28
2.5 小结	29
3 岩石变形破坏过程中的能量演化规律	31
3.1 引言	31
3.2 试验中的能量计算方法	31
3.3 单轴加载下岩石能量演化试验及分析	32

3.3.1	试验设备及方法	32
3.3.2	试验岩样	33
3.3.3	加载过程中能量演化规律	34
3.4	岩石能量演化的加载速率效应	39
3.4.1	试验概述	39
3.4.2	岩石能量演化规律的加载速率效应	39
3.4.3	讨论	42
3.5	岩石能量演化的围压效应	44
3.5.1	试验概述	44
3.5.2	岩石能量演化规律的围压效应	45
3.6	岩石能量演化的岩性效应	53
3.6.1	试验概述	53
3.6.2	岩石能量演化规律的岩性效应	54
3.7	岩石能量演化的水环境效应	58
3.7.1	试验概述	58
3.7.2	岩石能量演化规律的水环境效应	58
3.8	采动应力条件下岩石的能量演化分析	61
3.8.1	三种典型的采动应力路径	61
3.8.2	不同采动应力条件下的能量演化规律	64
3.8.3	采动条件下能量演化路径探讨	66
3.9	小结	66
4	岩石能量演化的非线性特性	69
4.1	引言	69
4.2	岩石能量演化的数学描述	69
4.3	岩石能量演化的稳定性分析	72
4.4	岩石能量的自我抑制演化模型	73
4.5	岩石能量演化的分叉和混沌特性	78
4.5.1	混沌理论与 Logistic 系统	78
4.5.2	分叉和混沌特性	80
4.5.3	岩石能量演化混沌特性在失稳灾害中的体现	82
4.6	小结	82
5	岩石能量演化的细观特征	84
5.1	引言	84
5.2	岩石能量演化特征指标	84
5.3	岩石能量特征与细观结构特征的关联	85

5.3.1	基本思路	86
5.3.2	基元平均强度的影响	86
5.3.3	基元分布均匀性的影响	89
5.3.4	细观特征尺度的影响	92
5.3.5	岩石细观特征对能量耗散行为的影响	95
5.4	岩石能量特征与裂隙特征的关联	97
5.4.1	微裂纹密度的影响	97
5.4.2	裂隙倾角的影响	99
5.4.3	裂隙数目的影响	102
5.4.4	裂隙间距的影响	104
5.4.5	裂隙对岩石能量特征的影响	107
5.5	岩石细观结构和裂隙分布影响能量特征的启示	108
5.6	岩石能量特征与破断面分形特征的关联	110
5.6.1	不同能量特征的岩样制备及试验设备	111
5.6.2	能量特征与破断面分形特征的关联	112
5.6.3	破断面特征形成机理的讨论	116
5.7	岩石能量特征与微破裂演化特征的关联	117
5.7.1	岩石能量特征与细观结构的关系	118
5.7.2	岩石微破裂演化与细观结构的关系	119
5.7.3	岩石能量特征与微破裂演化的关系	119
5.8	岩石能量特征决定微破裂演化的启示	125
5.9	小结	126
6	结论与展望	128
6.1	结论	128
6.2	展望	131
	参考文献	132
	变量注释表	148

1 绪 论

1.1 研究背景及意义

长期以来,对岩体进行变形破坏判别的依据是经典的黏弹塑性理论^[1],后来又发展了断裂与损伤力学,然而,受地质构造的影响,岩体是典型的非均匀非连续介质,孔隙、裂隙、节理、断层、夹杂等非连续构造大量充斥其中,基质内部细观结构也极不均匀^[2];不同应力状态和应力路径下岩石力学性质也有较大差异;岩体受静载和动载作用会产生完全不同的破坏方式;局部高应力和高应变使得岩体产生强度丧失,但并不一定导致其整体失稳破坏^[3];这些岩石的自然属性和特殊性质给确定的力学分析和预测带来很大的困难,表现在工程实践上,即诸如岩爆、煤与瓦斯突出、围岩失稳甚至地震预测等还没有得到很好解决。

由热力学定律可知,物质破坏是能量驱动下的一种状态失稳现象^[4]。实际上,在各种岩石工程中,对岩体的开采、扰动和改造总是伴随着能量的输入、积聚、耗散和释放,而受载岩石的变形破坏乃至支护加固过程即能量的转移和转化过程,以地下煤岩体为例,人为采掘及其所诱导的顶底板岩层运移向煤岩体输入能量,另外还可能受到热能、辐射能的影响,这些能量一部分会聚积在煤岩体内,转化为煤岩体的弹性变形能,并在其破坏时释放出来,另一部分会导致煤岩破裂从而转化为破裂表面能、电磁辐射、红外辐射、声发射等能量耗散掉。因此,从能量角度研究岩石变形破坏规律,建立岩石破坏过程中的能量变化规律及其与变形破坏之间的联系,可能更具普适性,更接近岩石的变形破坏本质^[5-7],为对岩体力学行为的深入认识带来一种崭新的视角。

岩石变形破坏过程中的能量演化机制研究以能量演化作为变量,是一种较新的观点,尚未成体系,个人认为主要包括以下几方面:

① 受载岩石的能量演化规律——主要分析岩石在各种复杂应力路径下不同的应力应变状态所对应的能量状态;不同赋存环境对其能量演化规律的影响;岩石微细观结构特征对能量演化规律的影响;各种地球物理响应与能量演化的关系等。

② 岩石变形破坏形态与能量演化特征的关系——岩石变形破坏形态可大致分为3种,即渐进破坏、动态破坏和冲击破坏。对于同一种岩石来说,3种破坏形式都可能发生,但其

破坏过程中的能量演化特征必然是不同的,这两者之间一定存在着某种联系。

③ 岩石能量灾变准则——岩石吸收的能量、积聚的弹性能以及耗散的能量达成某种关系时,其便会发生相应形式的破坏,这种以能量表达的灾变准则将会丰富并进一步揭示岩石破坏的内在机理。

岩石变形破坏过程中的能量演化机制将会丰富和深化人们对受载岩石力学行为的认知,鉴于其从物质破坏的能量驱动本质为着眼点,将可能推动如岩爆、冲击矿压等岩石力学中较困难课题的认识和研究,亦会对相关岩石工程实践带来另一视角的指导参考。

1.2 研究现状及不足

对于岩石变形破坏过程中的能量演化机制,国内外学者利用各种研究手段进行了一些研究,这些研究大部分都是借助能量的方法来探讨自己领域的某个问题,而以岩石能量演化为研究对象的研究还不太多,下面将从岩石受载下的能量演化规律、岩石能量耗散及释放的微细观响应和岩石受载的能量耗散本构及灾变准则三个方面来阐述这些研究成果。

1.2.1 岩石受载下的能量演化规律

要想从能量角度解决岩石工程领域的力学分析问题,必须首先弄清不同加载路径和方式下岩石内能量演化规律,这是岩石能量原理的基本内容。

受载岩石变形破坏过程中能量的演化可分为四个过程,即能量输入、能量积聚、能量耗散和能量释放^[8]。外界对岩石做功,即由机械能或者热能等转化为岩石的变形能,但并不是所有的能量输入都会转化为弹性能聚积在岩体内,而是其中的一部分进一步转化为破断面表面能、辐射能、摩擦热能等耗散掉,如图 1-1 所示,这些耗散的能量不会再从岩石中释放出来,这正是导致岩石产生不可逆损伤的原因^[9]。

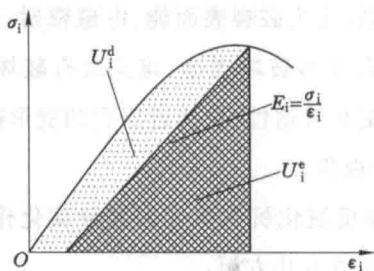


图 1-1 岩石变形破坏中的弹性能和耗散能^[4]

不同的加载情况下岩石会表现出不同的能量演化特征:

(1) 单轴压缩情况

破坏之前,输入总能量、积聚弹性能、耗散能都随着应力水平的增加而增大,吸收总能

量增加最快,弹性能次之,耗散能最慢;弹性能随轴向应力呈现非线性增长^[8],加载初期增长速率较小,随后慢慢增大,临近破坏时又增长放缓;耗散能起初增长较缓慢,在即将破坏阶段显著大幅增加^[10-12],如图 1-2 所示。硬岩和软岩有较大的差异,硬岩在破裂前内部耗散能较小,输入的能量转化为弹性能的比例很大;而软岩则耗散大部分外界输入的能量,弹性能相对较少^[4]。而不同的加载速率下,岩石能量特征亦有不同,加载速率越大,其能量输入和积聚弹性能越多,储存的弹性能占能量输入的比例越大^[4,12],而耗散能则随应变率的增加先增加后减小^[13,14],并且以应变率为 $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 为阈值,当低于此阈值时,能量输入和积聚弹性能率敏感性不显著,高于阈值时表现出较强的率相关性^[13]。岩石的密度也会影响其能量耗散行为,密度越大,发生的能量耗散越小^[15]。岩石的弹性模量随着能量耗散呈线性降低^[16]。

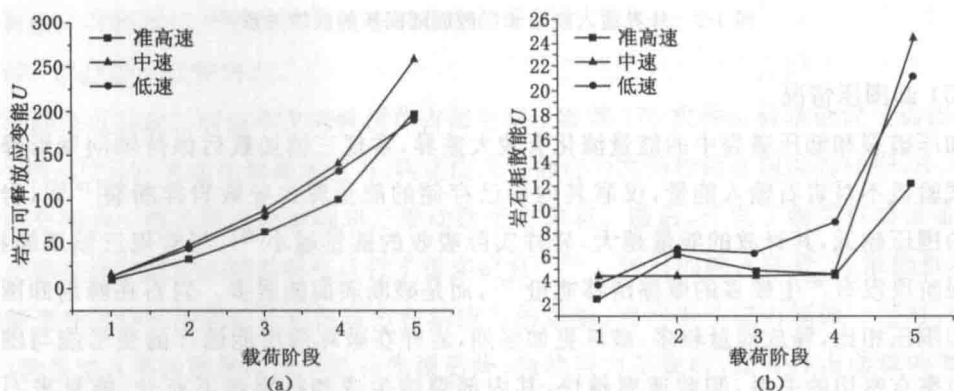


图 1-2 受载岩石弹性能和耗散能随应力的变化^[11]

(2) 单轴拉伸情况

随着载荷的增加,其外载输入的能量也相应增多,耗散能也大幅增加,割线模量逐渐减小,表现了岩样经过某一拉伸荷载下能量耗散引起的刚度降低^[9]。能量耗散越大,内部损伤越严重^[17],刚度降低越明显。

(3) 双向压缩情况

可分为固定一侧压加轴压和双向同步加载两种情况,侧压越大,破坏时的输入能量、耗散能量和储存的弹性能都越大,临近破坏时弹性能增长速率大于耗散能,破碎程度越严重^[18],说明侧压对能量耗散有抑制作用。此外,加载速度也会对能量行为有所影响^[18]。

(4) 三轴压缩情况

相对于单轴压缩情况,三轴加载试样达到破坏时外界输入的能量大幅增加,并且随着围压呈线性增长关系^[19,20],耗散能也与围压呈线性关系^[20],如图 1-3 所示。而应力路径对此基本无影响^[19],峰后岩石能量主要以内部剪切滑移的摩擦功的形式耗散,塑性变形量与耗散能之间具有良好的线性关系^[21]。相对来讲,产生破断面所需表面能是比较少的,这与

单轴压缩也有很大的不同。低围压时岩样实际吸收的能量很小,而且增加较为缓慢;但高围压时岩样实际吸收的能量很大,增加较为迅速^[20]。

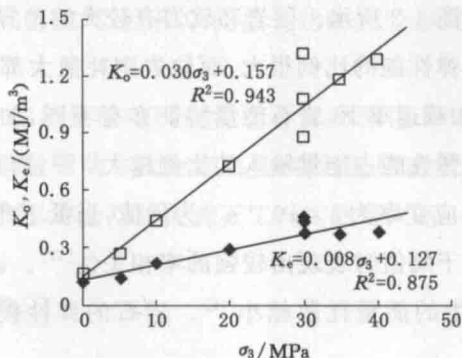


图 1-3 外界输入能量和耗散能随围压的线性关系^[20]

(5) 卸围压情况

加压破裂和卸压破裂中的能量演化有较大差异,常规三轴加载后保持轴向变形降低围压时试验机不对岩石输入能量,仅靠其内部已存储的能量释放导致岩样断裂^[19,22],岩样破裂时的围压越低,其释放的能量越大,岩样实际吸收的能量越小^[19],与常规三轴压缩相比,其屈服阶段没有产生较多的摩擦滑移能量^[19],而是破断表面能居多。岩石在峰前卸围压与峰后卸围压相比,释放能量较多,破坏更加强烈,岩样在破坏前所能储存的变形能与围压和卸载速率有密切的关系,卸载速率越快,其内部裂隙生成和扩展越不充分,能量来不及释放,而在岩样破裂时大量积聚的弹性能短时间内转化为破裂面表面能和碎块动能,破坏的剧烈程度越大^[23-27]。此外,卸围压方式也会引起影响,卸围压时增加轴压与轴压不变相比,其围压卸载终值越低,并且外界还在输入能量,所以破坏时释放的能量便越大,破坏也就越剧烈。值得说明的是,在工程实践中,尤其是对岩体的人为工程扰动中,卸压破裂和失稳是主要的破坏方式,岩爆、冲击矿压等动力灾害亦多是由于聚积大量能量的岩体突然卸压而导致的^[23,28-32]。

(6) 冲击加载情况

主要有拉伸和压缩两种,通常利用 SHPB 装置^[17,39-43]、轻气炮^[44,45]、落锤^[46]或数值模拟来^[47]进行。岩石在冲击加载下比静态加载需要输入更多的能量,冲击速度越大,输入的能量越多^[17],耗散能量(由 Rayleigh 线与 Hogoniot 冲击绝热线之间的面积计算得到)也越多^[44,45];而要达到对岩石同等的破坏程度,冲击加载比静态加载消耗的能量小^[33]。能量输入对岩石的损伤有较大影响,进一步决定破碎块度的分布,它们之间遵循一种耦合的关系^[34],随着能量输入的增大,破坏后岩样碎裂度更高,破碎平均块度与能量输入密度成反比^[35],碎块飞溅动能更大^[36,37]。相同的能量密度作用下,冲击延时对岩样损伤及碎裂度影响较大,延时越大,造成的损伤越大,块度尺寸越小,数目越大^[34]。而对于工程岩体来说,内

部有大量的裂隙及孔隙,结合分形理论又可考虑裂隙面的粗糙度,应力波穿越裂隙时能量耗散与裂隙面的粗糙度有很大关系,裂隙面分形维数越大(越粗糙),其能量耗散越大^[38-40],且能量耗散比也呈非线性增大,但存在一临界分维值,当小于此临界值时,能量耗散比与平直裂隙相当^[38,39]。输入的能量主要以热能和塑性能的形式耗散,分形维数越大,粗糙表面相互挤压和摩擦所产生的热能越多,应力容易集中从而造成塑性能也增多,所以总的耗散能就越多^[40]。含孔隙岩石冲击加载下的能量耗散和其孔隙性质有很大关系,在相同的冲击速度下,岩样的孔隙率越大,反射能量越多,透射能越少,耗散的能量越多^[41,42],能量耗散率线性增加^[43],临近破坏所耗散的总能量越少^[41,42],低孔隙率(小于10%)和低加载速率条件下,输入能量主要消耗于固体介质开裂、微塑性^[47]和孔隙连通,而高孔隙率(大于15%)和高加载速率条件下,输入能量主要消耗于孔隙变形^[43]。学者也对含空洞试件受冲击动载下的能量输入和耗散以及碎块的飞溅速率等进行了研究^[46]。

(7) 动静组合加载情况

动静组合加载思想由李夕兵教授和古德生院士在第175次香山科学会议上提出^[48],如图1-4所示^[49],动力扰动和高地应力、构造应力等静应力共同作用在深部岩体中,A、B处应力状态分别为一维动静组合加载和三维动静组合加载。随后,开发了相关仪器设备^[49,50],并对动静组合加载中的能量特征进行了很多研究^[50-58]。岩石的输入能量、耗散能量和破坏时的能量释放特征等同时受到静应力和动应力的影响,当冲击动应力幅值一定时,静应力越大,能量输入率和能量耗散率都是先增后降;当静应力不变时,随着冲击动载的增大,能量输入率和能量耗散率逐渐减小^[50]。对于一维动静加载,当静应力处于弹性阶段时,即岩样内储存大量的弹性能,此时若输入动态能量,则会诱使内部能量释放,释放的总能量大于输入的能量,即表现为“岩爆”的特征,而若输入的能量过大,岩样则会吸能破碎;当静应力处于屈服阶段时,不管输入能量多大,岩样都会吸能破碎,而不会表现出“岩爆”特征^[57]。当轴向静应力满足一定条件时,不论围压如何变化,岩石单位体积释放能会随着轴压的增大

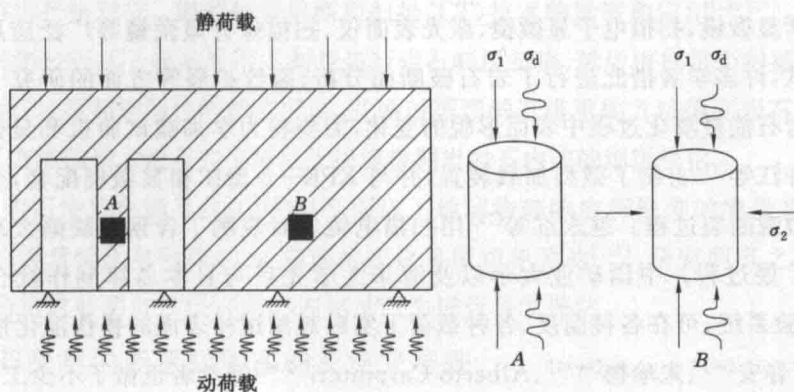


图 1-4 工程岩体中的动静组合加载情况^[49]

而降低,当常规静载轴压比为 0.6~0.7 时,转化为吸能状态^[58]。总之,不同的动静载组合比例会改变岩石内能量演化特征,这可给工程实践带来许多启示。

(8) 其他加载情况

一些学者也研究了三轴弯曲^[59,60]、周期动载荷^[61-65]、孔隙水压^[66]等作用下岩石的能量特征。研究表明,与单轴压缩、三轴压缩和拉伸相比,三轴弯曲破坏所需能量最少^[59]。受周期动载荷作用下,岩石释放的能量随着加载频率增加而减少,随加载幅值增加而增加,且能量大小与岩石类型有关^[64]。

此外,还研究了岩石能量特征的尺寸效应^[67,68]和温度效应^[69-72]。

一些学者利用各种数值方法,对岩体及结构受载过程的能量演化进行了计算研究。夏昌敬等^[73]利用 ANSYS/LS-DYNA 程序分析了爆炸荷载下岩石中的能量耗散过程,并讨论了不同爆源位置对能量演化的影响。王学滨^[74]利用有限差分程序(FLAC)研究了岩石中缺陷对弹性能储存的削弱性质。许尚杰等^[75]把岩石作为颗粒聚积体,利用 PFC 平台研究了单轴压缩下不同颗粒组分试件边界能量、摩擦能、黏结能和动能的变化,根据能量演化规律解释了试件的破坏机制。孙倩等^[76]基于双线性应变软化本构模型和能量耗散原理,利用 FLAC 中的 FISH 语言开发了岩石破裂计算程序,并成功应用于巴西劈裂和中间裂隙拉伸试验的破裂过程模拟中。

尽管数值模拟存在许多问题,但由于其经济性和重复性有着无可比拟的优势,随着岩石能量机制研究的深入,可望进一步取得有价值的进展。

1.2.2 岩石能量耗散及释放的微细观响应

岩石宏观表现出的能量耗散及释放行为,一定存在着相应的微细观机制,而要探索这些机制,就要科学地评估岩石的能量特征,便需要借助一些先进测试设备获得岩石变形破坏过程的地球物理响应,常见的有断口形貌扫描分析、热红外辐射、声发射、电磁辐射、CT 扫描等。

(1) 断口形貌扫描分析

各种光学显微镜、扫描电子显微镜、激光表面仪、扫描探针显微镜等广泛应用于岩石表面的分析测试,许多学者借此进行了岩石破断面分析、裂纹扩展等方面的研究^[77,88]。为了进一步研究岩石能量演化过程中表面形貌的变化,需要将力学加载试验机和显微观测设备整合起来。许江等^[77]自制了微型加载装置,并与 XPK—6 型矿相显微镜配套,全程观测了细粒砂岩的微观断裂过程。赵永红等^[78]用扫描电镜实时观测了含预制缺陷大理岩试件的裂纹产生和扩展过程。中国矿业大学以及清华大学先后与日本岛津制作社合作研发了 SEM 加载试验系统,可在各种温度、各种载荷下实时观测试样表面的损伤演化情况^[88]。凌建明等^[79]、唐春安^[80]、朱珍德^[84-86]、Alberto Carpinteri^[82,83]等学者也做了不少工作。

(2) 热红外辐射

岩石破裂时发生的红外辐射现象,是一种能量耗散,国内外学者在此方面进行了大量

的研究,为分析岩石的损伤机理,并解释红外辐射导致的能量耗散机理打下基础。从 1990 年起,邓明德、崔承禹、耿乃光^[89,90]、M. P. Luong^[91,92]从基础理论、模拟实验研究入手,在实验室对不同岩性和结构的岩石加载直到破裂的过程中使用各种波段的遥感前兆和适用的波段,对岩石样品的红外辐射进行了观测研究。随后,以吴立新和刘善军为代表,研究了煤岩、大理岩等在不同加载方式下的红外辐射特征^[93-97],并以此对岩石破裂进行预测^[98-101]。姜耀东、赵毅鑫等^[102]对不同冲击倾向煤岩的红外辐射特征进行了观测,并探讨了其与冲击倾向性的关系。

(3) 电磁辐射

20 世纪 50 年代,М. И. Волярович 和 Э. И. Пархоменко 用实验方法记录和研究了花岗岩、片麻岩和脉石英试样的压电现象^[103],并记录到了光发射,这是关于岩石电磁辐射的最早报道。美国学者 Nitson 也报道了实验室岩石压电效应的研究成果^[104]。80 年代中后期,T. Ogawa^[105]、钱书清^[106]、B. T. Brady^[107,108]、徐为民^[109]、孙正江^[110]等进行了大量的实验室试验,郭自强^[111,112]、朱元清^[113]等对电磁辐射的机理进行了研究。从 90 年代开始,中国矿业大学何学秋教授及其团队^[114-117]系统研究了含瓦斯煤岩破裂失稳过程中的电磁辐射现象,对煤岩电磁辐射的产生机理、特征、规律及传播特性等进行了深入分析,并将其应用于煤与瓦斯突出^[114]、冲击矿压^[118-120]的预测预报中。V. Frid^[121,122]也进行了类似研究。

(4) 声发射和 CT 扫描

岩石受载过程中,微裂纹形成和扩展、裂纹面的摩擦滑移等将使得岩石内的应变能以弹性波的方式快速释放,产生次声波、声波或超声波,就是声发射现象^[123]。声发射的振幅和频率等参数可反映微开裂的数量、尺寸、方位等,是与岩石的损伤程度相关的。国内外大批学者围绕声发射的机理、不同加载方式下信号特征与岩石力学性质的关系^[124-127]、对岩石破裂的预测^[128,129]等进行了广泛而深入的研究,也揭示了岩石损伤过程中的能量耗散特征。声发射法在探测岩石内部微裂纹成核和扩展方向方面有优势,但声发射事件的统计定量分析结果与微观损伤结果难以严格对应。随着计算机断层扫描(CT)技术的发展和运用^[130-133],可以实现对岩石内部的观测分析,CT 技术采用 X 射线进行岩石断层扫描,然后根据每个扫描断层分辨单元的 CT 数判断岩石相应部位的物理密度,并通过适当的三维重构方法得到岩石的内部结构图像^[47]。CT 方法的最大优点在于可以无损地检测出岩石内部的细微变化。

实际上,岩石中变形能是占绝大比例,而以上地球物理响应所携带的能量是较少的,但是这些响应的能量变化与弹性能、耗散能的演化是密切相关的^[134],研究两者之间的关系将有助于人们利用这些测试手段对岩体内能量行为进行科学评估。

1.2.3 岩石受载的能量耗散本构及灾变准则

有关岩石能量的理论分析主要有两个方面:第一,研究岩石能量耗散及释放与其破裂和本构行为的关系;第二,从势能的极值及数学分析角度建立煤岩体结构的突变模型,以确

定煤岩体结构发生失稳的条件。

(1) 岩石能量耗散及释放与其破裂和本构行为的关系

学者们从不同的理论出发研究了不同加载方式下岩石变形破坏全过程的能量演化及破裂失稳准则^[3,135-158]。谢和平等^[3]区分了岩石强度丧失和整体破坏的概念,并指出岩石能量耗散引起损伤,进而导致岩石强度丧失,而能量释放则是引起岩石整体破坏的内因。通过定义能量损伤变量,建立了基于能量耗散的强度丧失准则和基于能量释放的岩体整体破坏准则,给出了各种应力状态下岩体单元整体破坏的临界应力。在此基础上,张后全等^[135]考虑了岩石材料拉压强度不等和中间主应力对强度影响特点,建立了一种真三轴能量强度准则,并利用厚壁圆筒试验进行了验证。LIU Guanglian^[136]提出了有限应变能强度理论。彭瑞东等^[139]依据非平衡热力学理论,分析了岩石变形破坏过程中的能量平衡和熵平衡,并基于此揭示了岩石受载变形直至破裂时的能量演化过程。赵忠虎等^[140,141]从微观尺度探讨了岩石变形破坏的能量过程,并推导了能量传递方程,提出了利用耗散结构理论研究能量耗散、利用突变理论研究能量释放的思路。王学滨等^[142-144]基于梯度塑性理论,探讨了单轴压缩岩样内部剪切带的变形失稳过程,并以此计算了峰前耗散能、峰后耗散能^[144]以及轴向和侧向变形的耗散能^[143],进一步得到了能量失稳判据^[142]。柴文革等^[145]划分了岩石能量释放区域和能量吸收区域,并结合应力—应变曲线对此进行计算,进而推导了能量分叉失稳准则。陈旭光等^[146]考察了压剪加载,给出了单轴压剪破坏过程中裂纹贯通表面能、摩擦耗能、释放动能的表达式,并得到了岩石力学参数对释放动能的影响规律。Pietro Cornetti等^[147]在有限断裂力学框架内发展了一种新的应力—能量耦合破坏准则,传统的应力准则和新近发展的能量准则存在不可调和的冲突,此准则消除了裂纹恒定前进的假设,并利用高强混凝土的三点弯曲试验证实了耦合模型可以解释准脆性材料的尺寸效应。谢和平等^[148]提出了岩石分形模型,并基于此进行了能量耗散分析。A. Thomas等^[149]基于分形理论,提出断裂所消耗的能量与材料结构特征之间的关系。

在动态加载方面,李夕兵等^[150]利用傅立叶变换分析方法考察了矩形波、钟形波和指数衰减波在不同延续时间下加载于岩石上的能量耗散及释放。Y. Petrov等^[151-155]做了系列研究,对一个平面应变条件下板中心 I 型裂纹的动态扩展能量特征进行考察,发现动载荷的振幅和频率的特定组合下,其裂纹扩展所需能量最小。DENG Jian等^[156]基于岩石动态断裂准则和傅立叶变换理论,对岩石在随机应力波加载下的力学响应和能量耗散进行了分析,计算了穿过岩石的谐波成分的频率和能量比,发现岩石越硬,吸收的能量越少,穿过岩石的弹性波越多,频率域越窄。

对于动静组合加载,李夕兵等^[157]说明了应变能密度准则的适用性,并以机械模型为基础确定了一维动静组合加载下的临界应变能密度。

此外,左建平^[158]基于最小耗能原理,考虑岩石的塑性耗散能和热传导耗散能,建立

了温度和载荷耦合影响下的岩石屈服破坏准则。

一些学者利用岩石能量耗散与释放建立了岩体的损伤本构模型。朱维申等^[159]基于Betti能量互易定理、修正自洽法理论以及裂隙扩展过程的能量变化建立了岩体的能量损伤演化方程,进一步利用有效应力将损伤发展和塑性变形进行耦合,建立了裂隙岩体的三维脆弹塑性断裂损伤本构模型。陈卫忠等^[160]进一步考虑了裂隙闭合以及裂隙面摩擦效应,建立了节理裂隙岩体的各向异性损伤本构模型。朱维申等^[161,162]从热力学不可逆过程入手,对岩体掘进中的能量耗散进行了分析,提出了岩体单元损伤、塑性和拉破坏情况下的能量耗散表达式,探讨了能量耗散对岩体本构的影响,最终建立了复杂围岩的能量耗散本构模型和强度准则。李树忱等^[163]应用能量耗散的基本原理,对弹性损伤的能量耗散进行求解,建立了损伤演化方程和弹性损伤屈服准则。在岩体的动态本构方面,李海波等^[164]运用裂纹滑移模型和裂纹扩展能量守恒原理,构建了应变率处于 $10^{-4} \sim 10^0 \text{ s}^{-1}$ 之间的花岗岩动态本构模型,并基于此分析了裂纹扩展引起的应变非线性特征。张安康等^[165]以动力放大系数的形式表征应变率,基于弹性余能等效原理,建立了类岩石材料的能量基率相关弹塑性损伤模型。此外,杨松林等^[166]揭示了单裂隙扩展过程中裂隙整体变形能和裂隙尖端局部能量释放的等效性,并基于此对裂隙岩体的有效体积模量和有效弹性模量进行了估计。

一些学者从能量耗散及释放的观点出发,将其应用于相关的工程实践中,如水坝界面摩擦失稳^[167]、岩石破碎^[150]、船闸边坡稳定性分析^[160-162]、强震前地震能量释放^[168]、水电工程洞群施工顺序优化分析^[162]、隧洞围岩整体破坏^[3,169,170]、矿山采场围岩能量运移^[171]、水压致裂测量地应力^[172]、深部岩体分区破裂化^[173,174]、岩爆^[175-178]、煤与瓦斯突出^[179]、冲击矿压^[180-183]等。

(2) 以岩体势能极值确定失稳突变条件

此方面主要为唐春安、周筑宝、赵阳升、潘岳等人所做的工作。唐春安等^[184]针对岩石在加载系统作用下破裂过程的非稳定性问题,提出了岩石加载系统失稳的尖点突变模型,得到了灾变时试样的突跳量与能量释放量的简单表达式。周筑宝等^[185]依据非平衡热力学理论,提出并证明了一个适用性更强的最小耗能原理^[186],指出任何耗能过程都将在与其相应的约束条件下以最小耗能的方式进行,并在此基础上给出了建立材料破坏理论^[187]、材料本构理论^[188]和变分原理^[189]的新思路和新方法。蔡美峰等^[190]基于突变理论和岩体工程系统能量分析,得到了岩体工程开挖系统破坏失稳的能量突变准则。祝玉学等^[191]以能量水平为交互作用矩阵编码,考察了岩体中能量的源和汇以及能量的路径流,分析了工程系统熵的变化。赵阳升等^[192]抓住岩体动力破坏释放的能量远大于诱发能量的客观事实,提出岩体动态破坏所需的能量等于岩石单轴加载下的破坏能量,即最小能量原理。潘岳等^[193-198]利用突变理论对岩体动态失稳问题进行了系统研究,根据能量守恒原理,导出岩体失稳前后能量增量的平衡关系,进而得到岩体动力失稳的突变模型。处于极限状态的岩体系统,不论是在准静态还是动力失稳的变形破坏过程中,系统总势能总是向减小的方向发