

# 岩石细观力学

## 实验与分析

MESO—MECHANICS OF ROCK  
—EXPERIMENT AND ANALYSIS

谢 强 姜崇喜 凌建明 著

西南交通大学出版社

国家自然科学基金项目

# 岩石细观力学实验与分析

MESO-MECHANICS OF ROCK  
— EXPERIMENT AND ANALYSIS

谢强 姜崇喜 凌建明 著

(西南交通大学出版基金资助)

西南交通大学出版社

## 内 容 简 介

本书介绍了在扫描电子显微镜(SEM)下岩石的细观实验技术和方法,详细介绍了几种主要组构岩石连续破坏过程的直接观测成果,提出了一些基于此的损伤力学的分析方法。

本书可供岩石力学有关专业的研究人员和研究生参考。

## 岩石细观力学实验与分析

谢 强 姜崇喜 凌建明 著

\*

西南交通大学出版社出版发行  
(成都 二环路北一段 610031)  
成都飞机工业公司印刷厂印刷

\*

开本: 850×1168 1/32 印张: 4.25

字数: 102千字 印数: 1—500册

1997年4月第1版 1997年4月第1次印刷

ISBN7-81057-079-X/P-032

定价: 6.00元

## 序

传统的岩石力学研究采用的是宏观力学的实验与分析方法，并已取得了许多瞩目的成就。当今，随着众多重大岩石工程要求的不断提高和研究工作的逐步深入，人们日益认识到：由于岩石组固有的不均匀性，仅从唯象学角度以宏观尺寸探讨其力学机理显然是不够的，应当进一步从细观甚至微观尺度、“三观”相结合，更加全面、深入来探讨岩石力学问题。70年代后期，一些学者采用光学或电子显微镜开始研究岩石的细观破坏，但是这一细观破坏过程仍然是间接获得的，而且由于采用的是分块、分级加载和切片观测的方法，所得到的结果经常是非连续的，不完整的，因此前一时期以来并未取得更多令人鼓舞的进展。

1989年起，本书作者在国内率先利用具有加载装置的扫描电子显微镜对加载条件下的岩石破坏过程进行了连续观测研究，这使岩石细观力学实验工作有了新的进展。在先后两次得到国家自然科学基金资助的条件下，谢强博士和姜崇喜工程师等在岩石细观力学的实验方法、实验手段及其理论分析的探索与研究方面获得了大量有创新价值的成果。此外，近十年来，凌建明副教授一直致力于岩体损伤力学研究，并在岩石细观损伤力学和岩石细观时效损伤等领域也开展了许多创造性的研究工作。今天，我们十分高兴地看到了这些成果的初步总结——《岩石细观力学实验与分析》这部专著的出版。

该书集中体现了三方面的学术意义：一、作者开发了从专用设备、岩样加工工艺到观测记录的一整套完整的实验技术，可以对多种加载条件下岩石的细观破坏过程及其结果进行连续观测实验，它克服了原有实验方法的弊端，对岩石细观研究的发展具有重要贡献；二、通过这一技术，作者在不同加载条件下对不同岩

石的损伤和破坏过程进行了细观实验研究，展示了大量前所未见的实验结果，并从损伤的角度对岩石的破坏机理作出了科学的解释；三、作者将实验研究与理论分析相结合，进一步建立了岩石细观损伤和细观时效损伤的分析理论及其应用方法。纵观全书，作者们没有更多地复述已有的研究，而着重展示了他们在该领域所取得的令人感兴趣的资料数据和研究成果。可以看到，有关对岩石裂纹起裂、扩展与第三阶段岩石蠕变特征等内容成功观测与分析都是前所未见和极有价值的，这可能会在一定程度上改变我们已有的认识。从书中还可以看到作者们严谨、踏实的治学风，这也是十分难能可贵的。

岩石细观力学的实验与分析是当前岩石力学界理论研究的前沿和热点，这方面国内外虽有不少学者致力工作，但有关描述岩石损伤破坏过程实时实验的文献还非常少，对其实验技术、实时观测和理论分析等作系统论述的著作亦尚未见到。因此，该书的出版不仅为岩石细观力学研究打下了良好的基础，同时也反映了我国学者在这一领域的工作已处于国际同类研究的先进水平。当然，岩石细观力学实验与分析的研究十分复杂，还有极大量的工作要做，该书是一个很好的先导和开端。但是，这并不影响这本专著的科学价值与工程实用意义，因此，我很乐意将该书推荐给岩石力学的广大同行，并对它的问世表示诚挚的祝贺。

孙 钧

1996年冬于上海

---

\* 序言作者为同济大学教授、中国科学院院士、国际岩石力学学会副主席暨中国国家小组主席、中国岩石力学与工程学会理事长。

## 前 言

本书是在作者近年来所完成的，有关国家自然科学基金项目研究的基础上撰写而成。

岩石的破坏过程是研究岩石破坏机制、建立岩石的本构关系及强度理论所必需的基础，也是研究地震和工程岩体稳定性的基础。在工程应力水平下，岩石的力学特征主要受制于岩石的内部结构，因此，岩石细观水平的实验研究是岩石力学研究最重要的组成部分。对岩石细观力学研究最基本的方法之一，是在细观尺度范围内对岩石破裂进行直接连续观察。以往的研究所采用的方法大都是对一组岩样分级加载、卸载后作切片观察，具有非同一岩样、非连续观测的弊病，因而其结论的可信度较差。

本书作者自 1989 年起，采用具有加载台的扫描电子显微镜进行岩石破裂过程的连续观察，经过两个国家自然科学基金的资助，开创了一套完整的、专门的微岩样的加工、试验和观察的设备、工艺和技术，对四种主要结构类型的岩石进行了观测分析，修正和补充了以往研究中未能了解的事实，分析了岩石细观破裂机制和时效损伤的细观特征，初步建立了基于岩石损伤的岩石本构关系。从已见的文献报道看，仅有为数不多的研究人员在进行同类研究。

对岩石破裂的研究，自 Iris Borg(1966)的变形试验及显微观察和 Bieniawski(1967)发表的《岩石脆性破裂机制》起，三十年来，随着试验手段的更新，此类研究绵延不断。近年来，一些博士论文频频涉及于此，表明该项研究是岩石力学研究中的热点之一。

国内外有关岩石破坏观测研究的成果，多以论文散布于各种刊物。系统描述岩石细观破坏的专著，到目前为止，仅见有澳大

利亚 M. S. Paterson 1978 年出版的《实验岩石形变——脆性域》一书，其论述所依据的许多资料已较陈旧。因此，本书的出版，可以使有关的研究者了解一些令其感兴趣的岩石细观破坏的真实细节，以便补充和发展已有的岩石力学理论。

本书共分 9 章，西南交通大学谢强撰写第 1、2、5 章及第 7 章部分内容，西南交通大学姜崇喜撰写第 3、4 章，同济大学凌建明撰写第 6、8、9 章及第 7 章部分内容。全书由谢强修改定稿。

承蒙中国科学院院士、国际岩石力学学会(ISRM)副主席、中国岩石力学与工程学会理事长孙钧教授在百忙中为本书作序，作者对此表示深深的感谢。

在作者的研究工作中，得到蒋爵光教授、王岫霏副教授的诸多指导，钟凯工程师设计了微岩样加工磨具，特此致谢。

在作者的研究及本书的出版中，提供帮助的还有夏继祥教授、肖允发高级工程师、李忠孝高级工程师，以及李立、陈永萍、白云涛、刘超等，在此致谢。

限于水平，书中尚存在不足甚至错误，恳请读者批评指正。

作者

1996 年于成都

# 目 录

第1章 研究基础 .....	1
§ 1.1 研究的必要性 .....	1
§ 1.2 常规的宏观研究手段和方法 .....	2
§ 1.3 细观研究的界定及意义 .....	4
第2章 细观观测研究成果述评 .....	6
§ 2.1 细观观测研究概述 .....	6
§ 2.2 光学显微镜研究述评 .....	7
§ 2.3 电子显微镜研究述评 .....	9
§ 2.4 现有观测成果综述 .....	10
§ 2.5 现有观测实验技术的关键问题 .....	15
第3章 实验设备与技术 .....	17
§ 3.1 扫描电子显微镜 .....	17
§ 3.2 加载台的研制改造 .....	25
§ 3.3 微小试样的磨具的研制 .....	29
§ 3.4 岩石样品 .....	31
第4章 岩石破裂的细观实验研究 .....	36
§ 4.1 实验方法 .....	37
§ 4.2 图像衬度及实验观测 .....	40
第5章 SEM下岩石破裂过程观测 .....	47
§ 5.1 SEM下岩石加载的实验过程 .....	47
§ 5.2 胶结结构岩石的破裂过程 .....	50
§ 5.3 结晶结构岩石的破裂过程 .....	56
§ 5.4 隐晶结构岩石的破裂过程 .....	66
第6章 岩石细观损伤研究及岩石细观损伤 .....	68
§ 6.1 细观损伤力学及岩石细观损伤研究概述 .....	68



§ 6.2 岩石初始细观损伤的特征 .....	76
§ 6.3 岩石小试样细观起始扩展裂纹的特征 .....	77
§ 6.4 岩石损伤演化的细观特征 .....	79
<b>第 7 章 岩石细观破裂形成及损伤破坏 .....</b>	<b>85</b>
§ 7.1 不同组构岩石细观破裂形成机制 .....	85
§ 7.2 岩石细观破坏观察结果的意义 .....	86
§ 7.3 岩石的细观损伤破坏机理 .....	87
§ 7.4 “弹塑性”岩石的细观损伤破坏机理 .....	93
<b>第 8 章 岩石细观损伤破坏分析理论 .....</b>	<b>98</b>
§ 8.1 岩石细观损伤的状态描述 .....	98
§ 8.2 岩石的细观裂纹损伤模型 .....	103
§ 8.3 基于应变空间损伤表面的岩石损伤本构关系 .....	107
<b>第 9 章 岩石时效损伤的细观特征及分析方法 .....</b>	<b>111</b>
§ 9.1 岩石时效损伤的细观特征 .....	111
§ 9.2 岩石细观裂纹的时效扩展 .....	112
§ 9.3 塑性对岩石蠕变损伤的影响 .....	115
§ 9.4 单轴压缩蠕变条件下岩石细观损伤分析理论 .....	116
<b>参考文献 .....</b>	<b>122</b>

# Content

<b>Chapter 1</b>	<b>Research Foundation</b> .....	1
§ 1.1	Necessity and importance .....	1
§ 1.2	Conventional means and methods on macroscopic .....	2
§ 1.3	Extent of meso mechanics for rocks .....	4
<b>Chapter 2</b>	<b>Review of meso investigation on rock</b> .....	6
§ 2.1	About Meso Investigation.....	6
§ 2.2	Meso investigation with optical microscope.....	7
§ 2.3	Meso investigation with electron microscope.....	9
§ 2.4	Review of the existing achievements in this field.....	10
§ 2.5	Key to developing experimental technique.....	15
<b>Chapter 3</b>	<b>Experimental Equipment and Technique</b> .....	17
§ 3.1	Scanning electron microscope(SEM) .....	17
§ 3.2	Development of loading table .....	25
§ 3.3	Instrument used to prepare test sample .....	29
§ 3.4	Test sample of rock.....	31
<b>Chapter 4</b>	<b>Meso Experimental Research on Rupture of Rock</b> .....	36
§ 4.1	Experimental method .....	37
§ 4.2	Image Feature in SEM .....	40
<b>Chapter 5</b>	<b>Observation upon Rock Failure Process in SEM</b> .....	47
§ 5.1	Process of loading test for rock in SEM .....	47
§ 5.2	Failure process of cemented rock.....	50
§ 5.3	Failure process of crystalline rock .....	56
§ 5.4	Failure process of cryptocrystalline rock .....	66
<b>Chapter 6</b>	<b>Meso Damage of Rock</b> .....	68

§ 6.1 Review of meso damage mechanics and meso damage of rock .....	68
§ 6.2 Initial meso damage of rock.....	76
§ 6.3 Initial meso cracking of small sample of rock .....	77
§ 6.4 Meso characteristics of damage evolution .....	79
<b>Chapter 7 Meso Cracking and Damage Failure of Rock .....</b>	<b>85</b>
§ 7.1 Meso cracking mechanism of rock with various fabric ....	85
§ 7.2 Academic significance of observation results upon meso failure .....	86
§ 7.3 Mechanism of meso damage failure of brittle-elastic rock.....	87
§ 7.4 Mechanism of meso damage failure of elastoplastic rock .....	93
<b>Chapter 8 Analytical Theories of Meso Damage Failure for Rock .....</b>	<b>98</b>
§ 8.1 State description of meso damage of rock .....	98
§ 8.2 Meso crack damage model for brittle-elastic rock .....	103
§ 8.3 Damage constitutive relationship of rock based on damage surface in strain space .....	107
<b>Chapter 9 Time-dependent Meso Damage of Rock and Its Analytical Method .....</b>	<b>111</b>
§ 9.1 Mesoscopical characteristics of time-dependent damage of rock .....	111
§ 9.2 Time-dependent propagation of meso crack in rock.....	112
§ 9.3 Influence of plasticity on creep damage of rock .....	115
§ 9.4 Analytical theory for meso damage of rock under uniaxial compressive creep condition .....	116
<b>References .....</b>	<b>122</b>

# 第 1 章 研究基础

## § 1.1 研究的必要性

岩体稳定性的实质是岩体的变形和岩体的强度。岩体强度的本质就是岩体的破坏。在地震学中，地震的成因通常被解释为地壳岩体中的断裂产生与发展，或是断层两侧的岩体沿已有的断裂运动；在工程建设中，常见到边坡的崩塌与滑动、洞室围岩的坍塌、岩爆的产生、大坝基础的失稳等现象。地震的产生和工程岩体的失稳，都可归结为岩体的自然破坏。而为采矿、修建道路、水坝、房屋、采油、取水等进行的爆破、挖掘、钻井等工程活动对岩体的破坏则是人为破坏。一方面需要预报和防治岩体的自然破坏，另一方面为了工程的目的也需要研究破岩技术，这些都必须对岩体的破坏进行深入的研究。

同任何材料的破坏研究一样，岩体破坏研究中最基本的问题之一是岩体的破坏过程。在岩体的稳定性研究中，研究岩体的破坏过程是预报岩体的破坏、选择岩体支护最佳时间最基本的工作之一。例如，岩体破坏的初裂常被用作预报岩体破坏的关键性指标。目前，在坑道岩爆的预报中，常采用微地震的监测预报技术，而其基本的理论依据，就是岩石破坏前，其内部会产生大量的微裂纹，并以弹性波的形式向外释放能量。监测岩石发出的弹性波，即可预报岩体即将产生破坏。用 Kaiser 效应研究岩石的受力历史和岩石所处的地应力场特征，也是利用了岩石的破裂过程和破裂性质。地下工程开挖的新奥法施工的关键技术之一，是监测围岩的变形以确定支护时间。这些技术都是建立在岩体的破坏过程的研究基础之上的。因此，岩体的破坏过程的研究是认识岩

体稳定问题的基础。

在岩石力学中，对岩体稳定性的分析最终是以力学计算直接反映的，而力学参数的获取及本构关系的建立是以岩体的变形破坏过程为依据的。岩体是岩石材料和结构面的总和，岩体破坏研究的主要内容之一就是研究岩石的破坏。众所周知，在单向压缩条件下，理想化的岩石变形曲线可分为初始压密、弹性变形、屈服、峰值破坏和残余强度各阶段，这些阶段是与岩石的变形破坏过程和破坏机制对应的。因此，岩石的破坏过程和破坏机制是岩石本构的内因。只有充分研究了 this 内因，才能真正建立合乎岩石本质的本构关系。所以，岩石的破坏过程也是岩石力学分析的基础。

以上表明，岩石破裂过程是揭示岩石破坏机制，探讨岩石本构关系的内因，从而解决工程岩体在工程建设中的稳定性，以及探索因地壳岩石破裂而产生地震的原因及发生发展规律的基础性研究。

## § 1.2 常规的宏观研究手段和方法

研究岩石的破坏过程，最常见的方法是将天然岩石制成一定标准的试样，放在压力机(普通压力机和刚性压力机)上作压缩、拉伸或剪切实验，通过记录加载过程中的应力应变的变化、监测声发射事件的频率和数量，并辅以肉眼的直接观察来分析岩石的破坏特征和破坏过程。这一技术最大的优点是将岩石的变形过程定量描述出来，从而获得岩石的力学参数和本构关系曲线，以供深入研究和力学计算之用。毫无疑问，这是岩石破坏研究中最基本的方法之一。通过大量的实验研究，岩石力学家已经积累不少的岩石变形曲线，并不断地提出和改善描述这些曲线的本构关系，即对岩石力学“形”的研究已经相当深入。但是，对反映岩石力学的“实”的岩石破坏(主要指脆性破坏)过程，基本上仅了

解岩石的破坏遵循破裂源的孕育、扩展，最终发展为宏观断裂破坏这一过程的大概。

从目前采用较多的压力机实验看，岩石的破坏过程是通过试样的位移量和声发射事件数得到的，因而由此获得的结论基本上是间接的；在变形过程中，岩石内部的变化基本上是一种推断的结论；对涉及岩石破坏机理的一些关键性问题，如破裂最初孕育的位置、已有的源破裂的发展等，都所知甚少。有憾于此，研究者们一直致力于实验技术的改进，如采用多探头测量、破裂岩样的切片观察、岩样的复膜观测等。这些工作丰富了人们对岩石破坏机理的认识，使岩石力学的理论从早期单纯的材料力学基础逐步将断裂力学、损伤力学的理论溶入和发展到自己的理论之中。

基于常规压力机得到的结果，目前在岩石力学中大致有三种关于岩石的力学模式：第一种模式是连续介质模式，即不论岩石是弹性的、塑性的，还是粘性的，在岩石的变形过程中，岩石内部的质点是连续的；第二种模式是断裂力学模式，即岩石内部存在着介质间断的裂纹，岩石材料的破坏是裂纹尖端应力集中并超过岩石强度而导致该裂纹的扩展；第三种模式是损伤力学模式，即岩石内部存在着连续分布的缺陷，岩石材料的破坏是岩石内聚力进展性减弱，导致体积单元破坏而发展到宏观破裂的。

岩石力学计算理论是依据上述模式建立起来并加以实施的，其中有代表性的分析方法是基于裂纹扩展的断裂力学理论分析方法。断裂力学以研究裂纹的扩展为基本出发点和归属，对各种裂纹尖端的应力进行计算，建立起表达裂纹扩展的断裂判据，以此衡量岩石材料的破坏。然而，先避开单个或有限个裂纹的研究能否表达岩石本来的组构特征不谈，就裂纹的扩展而言，在天然岩石的常规压力机实验中，极难直接观察到新裂纹在多大程度上就是在原来的裂纹的尖端扩展的和以何种方式扩展的。因此，从某种意义上看，岩石力学理论和计算方法的完善，必然要建立在対岩石破裂过程和破坏机制深入研究的基础之上，而其中首要的关

键问题，无疑是对岩石的破裂过程进行直接的观测。

### § 1.3 细观研究的界定及意义

岩石破裂的研究，就其所依据的研究对象的尺度大小而论，可分为宏观、细观和微观三类。关于这三类的划分，目前并没有一个统一的标准。从地质学的观点看，岩石破坏后产生的断裂面可以是野外岩体中的各种断层、节理，手标本上发育的破劈理、叶理，显微镜下可观测的微裂隙和矿物晶体内部的位错等。这些不同级序的断裂面即使成因可以相同，但它们对岩石力学性质的影响却有较大差异。因此，按照作者的观点，将野外普遍发育的，影响工程岩体力学特征的断层、节理分为宏观级；将发育在岩石结构中，用肉眼或显微镜观测，直接影响岩石的力学特征的裂纹分为细观级；将发育在矿物晶体内部，一般对岩石的宏观力学性质没有直接影响的那些位错分为微观级。

已有的实验观察表明，岩石破裂时，其内部的裂纹的产生和扩展主要是沿矿物颗粒的边缘进行的。这表明，对岩石破裂过程的研究而言，上述分级是合适的，而将研究的尺度确定在细观水平上也是合适的。此外，从研究实施的角度看，宏观研究多结合野外测绘及现场实验进行。由于观测手段及耗资等原因，所作的研究总是有限的。细观研究多以室内岩样力学实验与显微镜观测的方式进行，以现在的经济技术手段可行而论，细观水平上岩石破裂过程的研究仍然是当前主要的研究方法。

岩石破裂过程的细观研究，仅是岩体稳定性研究的一部分。应该说，这种研究与工程的需要是有一段距离的。但是，在岩体稳定这个大课题中，岩石细观破裂过程和破坏机制的研究是一个重要的、必不可少的组成部分。首先，在自然界中的确存在近乎完整的岩体，它的结构面极少而间距极大，其岩体的性质几乎就决定于组成它的岩石的性质。比如，宝天铁路 K1261~K1263 一

段，岩性为砂砾岩，节理间距达 15m，基本可按完整岩体分析计算。其次，岩体中发育有大量的非贯通结构面。岩体破坏时，这些非贯通结构面的扩展和连接必然造成岩桥的破坏，其实就是岩石本身的破坏。再次，从某种意义上看，岩石的结构和岩体的结构有类似之处。它们都可视为相对连续、完整、独立的单元体的组合，不同的只是这些单元体的边界的成因和形态。因此，在岩石细观水平上观察研究岩石的破裂过程和破坏机制，对研究岩体是有参考价值的。这些都是岩石细观研究的意义。



## 第2章 细观观测研究成果述评

### § 2.1 细观观测研究概述

将岩石破坏与细观裂纹结合起来的研究可以上溯到 Griffith 关于材料破坏的脆性理论。Bridgman 在皂石、大理岩和粗玄岩的单轴实验时,把观察到的岩石破裂前的非弹性体积增大(扩容),归因于结构的变化和宏观破裂的预兆。60年代初,茂木清夫(1962)在加压岩样的磨光面上观察到岩石破裂前会发生大量的微裂纹。Brace 等(1966)的研究阐明了微裂隙导致宏观破裂的变形过程,并将其过程划分出四个阶段。1967年, Bieniawski 发表了《岩石脆性破坏机制》一文,一般认为该文是有关岩石脆性破裂机制和断裂理论的较早的一篇系统论述。1970年, Scholz 在《岩石变形中微断裂的作用》一文中总结了已有的工作,详细讨论了岩石破裂过程与微裂纹的关系。至此,岩石变形过程中的扩容和断裂生长发育基本得到较完整的解释,并为人们所接受。

在岩石破坏过程的研究中,除了细观观测之外,另一项重要技术是声发射监测。研究证明,岩石中局部的微破裂作用会产生声发射,因而可利用接受这种声发射来研究岩石的破坏。Obert 和 Duvall(1942)首先将声发射技术用于岩石破坏预报。其后 Mogi(1962)、Brown(1966)、Scholz(1968)、Wu(吴大铭)(1975)就变形曲线、扩容、临界破坏与声发射的关系作了大量研究。特别是 Scholz(1972)利用不同换能器测定弹性波时间差以确定破裂源的研究及其成果,直至现在仍然是极有意义的。

除了对岩石力学特征的研究之外,细观破坏过程的观测研究最直接的实用价值是在岩爆和地震预报中的应用。岩爆和地震发