

岩石细观损伤力学模型研究若干进展

杨丽娟, 邵国建

(河海大学工程力学系, 江苏 南京 210098)

摘要: 介绍了岩石细观损伤和岩石细观力学的研究方法, 综述了国内外岩石细观损伤模型的研究现状, 并分类归纳了几种典型的岩石细观损伤模型以及在细观层次上对岩石实验研究的成果, 论述了该领域中存在的问题并对其今后的发展方向提出了建议。

关键词: 岩石; 细观损伤; 微裂纹; 损伤变量; Weibull 分布; 数值模型

中图分类号: TU452 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-7647(2006)S1-0171-05

岩石是由多种矿物晶粒、孔隙和胶结物组成的混杂体。作为一种地质体, 岩石经历了漫长的成岩和改造历史, 赋存在一定的地质和应力环境中, 具有内在的缺陷, 因而它的强度、变形和破坏特性不仅与错综复杂的工程地质、水文地质条件有关, 而且强烈地受到其内部细、宏观缺陷的影响、制约和控制。长期以来, 人们对岩石宏观力学性能的劣化直至破坏全过程的机理、本构关系、力学模型和计算方法都非常重视, 并且用各种理论和方法进行了研究, 取得了许多重要成果^[1-5]。但是, 这些研究几乎都是从唯象学的角度来考察岩体或岩石的强度、变形和破坏失稳等宏观特性, 而很少从微、细观尺度研究这些宏观特性的力学机理。近年来, 人们逐渐认识到岩石内部包含了从微观到细观并到宏观的各种尺度的缺陷, 岩石的损伤、破坏现象涉及从微观到宏观各种尺度的过程, 以及各层次的互相耦合。从根本上讲, 岩石的力学行为是由其内在的细观结构所决定的, 尤其是受岩石细观损伤及其演化、发展的控制。因此, 为了建立岩石细观结构各种缺陷及其特性的不均匀性与其宏观力学特性的关系, 真正、全面的解决岩石的损伤问题, 还需要从材料的细观尺度研究做起。

1 岩石细观损伤力学

最早开展岩石损伤力学研究的是 Dougill^[6]和 Dragon 等^[7], 根据断裂面的概念研究了岩石的脆塑性损伤行为, 并建立了相应的连续介质模型。后来, 包括 Krajcinovic, Kachanov, Costin 等在内的一批学者分别从不同的角度将损伤力学应用于岩石材料, 同

时又从岩石本身的细观组构特征出发探讨其损伤机理, 建立相应的模型和理论。

细观损伤力学既没有连续介质损伤力学(CDM)中的唯象学假设, 同时也略去物体损伤的微观物理过程, 而是从颗粒、晶体、微裂纹、孔洞等细观结构层次研究各类损伤的形态、分布及演化特征, 从而预测材料的宏观力学特性。细观损伤理论实际上是一种采用多重尺度的连续介质理论。细观损伤力学将岩石看作非均质复合材料。选择适当的岩石细观结构模型, 在细观层次上划分单元, 考虑简单的破坏准则或损伤模型反映单元劲度的退化, 利用数值方法计算模拟岩石试件的裂缝扩展过程及破坏形态, 直观地反映出试件的损伤断裂破坏机理。细观损伤力学的研究需要将试验、理论分析和数值计算三方面相结合。试验观测结果提供了细观损伤力学的实物物性数据和检验判断标准, 理论研究总结出细观损伤力学的基本原理和理论模型, 数值模拟计算是细观损伤力学不可少的有效研究手段。人们可以在细观层次上合理地采用各相介质本构关系的情况下, 借助于计算机的强大运算能力, 对岩石复杂的力学行为进行数值模拟。

2 岩石细观损伤的数值模型

岩石细观损伤实验是研究其损伤过程和宏观力学性质的基本手段。但是, 由于岩石实验可重复性差, 不可避免地造成实验数据离散, 并且伴有尺寸效应, 试验结果不能反映岩石的特性。因此, 除了继续致力于实验方面的研究外, 有必要采用其他辅助手段研究岩石材料的损伤破坏行为。细观损伤数值模

拟,在计算模型合理和岩石特性数据足够精确的条件下,可以取代部分实验,而且能够避开实验条件的客观限制和人为因素对其结果的影响。研究者从岩石类材料内的颗粒、微裂纹、孔洞等细观尺度上研究了各类损伤破坏的形态分布及其演化特性,寻找岩石损伤的破坏规律^[8]。

1975年,Gurson^[9-10]在McClintock等学者的基础上发展了一套比较完整的细观本构模型,用以描述微孔洞损伤对材料变形行为的影响,这是细观损伤力学的一个重大进展。Costin^[11]从脆性材料微裂纹发育的角度建立了一个微裂纹损伤模型,用于分析脆性岩石的变形和破坏。Hull^[12]依据孔洞的形态、尺寸和密度定义了细观损伤变量,并根据孔洞的自相似扩展原理,直接建立了损伤率与应变率之间的关系。在国内,谢和平最早从事岩石损伤力学方面的研究,他基于岩石微观断裂机理和蠕变损伤理论的研究,把岩石蠕变有限元分析和损伤分析结合起来,形成了岩石损伤力学的思想体系^[13]。他首次在联系岩石微损伤与宏观断裂方面运用分形几何理论定量描述损伤,提出了分形损伤力学理论^[14],但分形损伤力学在工程应用方面尚有大量工作要做。还有一类是细观计算损伤力学。该方法将连续介质离散成杆系或梁系,形成格构模型(Lattice model)。Schlangen等^[15-16]利用格构模型结合试验分析了脆性材料的细观断裂机制。唐春安^[17-18]在有限元的基础上提出了类似的模型,用于研究岩石材料的损伤、地震能释放和声发射问题。近十几年来,基于岩石的细观结构,人们提出了许多研究岩石损伤过程的细观力学模型,典型的有岩石细观裂纹损伤模型^[19]、唐春安等^[20-21]提出的随机力学特性模型、周维垣等^[22]提出的一种描述岩石、混凝土类材料断裂损伤过程区的细观力学模型和刘齐建等^[23]提出的岩石细观统计损伤模型。

2.1 岩石细观裂纹损伤模型

对于岩石、混凝土这类脆性材料,损伤主要是微裂纹的形成和扩展。前人对微裂纹和微孔洞的研究已相当深入,Nemat-Nasser等^[24],Tvergaard^[25],Gilormini等^[26]都作了总结。高蕴昕等^[27]定量研究了微裂纹尖对材料断裂韧性的影响。由于岩石内部含有大量随机分布的微裂纹,且具有定向性,因此,可以根据微细观裂纹的分布、密度和方向及其动态变化来描述损伤及其演化,从而建立岩石损伤的微裂纹模型或细观裂纹模型。

Grady等^[28]将细观裂纹密度定义为裂纹影响区的岩石总体积与岩石体积之比,激活的裂纹数服从双参数Weibull分布,由此建立岩石细观裂纹损伤演

化方程:

$$D = C_d \epsilon^{m-6} \quad (1)$$

式中: C_d 是各参数的综合反映,称之为“细观裂纹损伤系数”; ϵ 为轴向应变; m 为微裂纹分布参数。

将式(1)耦合到线弹性应力应变关系中得到脆性岩石的细观裂纹损伤本构模型:

$$\sigma = E\epsilon - EC_d \epsilon^{m-5} \quad (2)$$

需要指出的是,上述细观裂纹损伤模型尚有不足:①所用的变量均为标量,故只能处理各向同性损伤问题;②没有考虑初始压密所引起的非弹性响应。

2.2 随机力学特性模型

1993年唐春安^[29]提出了岩石细观单元强度满足某个正态统计分布的假设,认为细观非均匀性是造成准脆性材料宏观非线性的根本原因,用统计损伤的本构关系考虑了岩石材料的非均匀性和缺陷分布的随机性。此后,唐春安等考虑到岩石内部力学特性分布的随机性,将岩石材料特性按照某个给定的Weibull分布来赋值,然后投影在网格上进行有限元分析,并赋予各相材料单元以不同的力学参数,从数值上得到一个力学特性随机分布的岩石数值试样。用有限元法计算这些细观单元的应力和位移,按照弹性损伤本构关系描述细观单元的损伤演化,按最大拉应力(或者拉应变准则)和摩尔库仑准则分别作为细观单元发生拉伸损伤和剪切损伤的阈值条件,使得非均匀岩石材料破坏过程的数值模拟得以实现。

2.3 岩石细观网格开裂模型

自1961年Kaplan将断裂力学引入岩石、混凝土材料以来,有关这两种材料的断裂力学研究主要集中在断裂过程区的研究。著名的模型有虚拟裂纹模型(FCM)^[30]、钝化带模型^[31]及等效裂纹长度模型^[32]等。周维垣等^[22]根据前人的理论采用非均匀质体的统计断裂力学模型及数值模拟方法,研究断裂微裂纹损伤过程区的扩展过程,提出了岩石细观网格开裂模型。

进行数值分析时,先将岩石材料离散为一组正规排列的三角形结构,三角形结构的大小近似等于岩石中多数结构的尺寸(即岩石中晶格的尺寸)。离散结构的大小选择也要考虑试件大小及分析计算中计算量大小等因素。这种离散便于结构网格的自动划分与数值分析,可以反映细观构造的细节,能描述变形损伤的局部化,克服一般有限元法的缺陷。

由晶体强度理论知,在细观层次上本构关系为

$$\sigma_t = \frac{E\lambda}{2a_0} \pi \quad (3)$$

式中: λ 是幂数; a_0 是原子间距; E 是细观弹性模量。

由细观构造引起的晶体强度的不均一性,可以

直接对细观构造进行统计观测和实验,也可以假定细观结构的组成及其力学参数服从一定的分布函数,此模型可用双参数 Weibull 的分布模型来描述:

$$P(x) = \left(\frac{\alpha}{x_u}\right) \left(\frac{x}{x_u}\right)^{\alpha-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{x_u}\right)^\alpha\right] \quad (x \geq 0, \alpha \geq 1) \quad (4)$$

式中: x_u 是位置参数; α 是形状参数。

根据微裂纹损伤过程区的形状是分形规律树枝状的微裂纹网络,可以微裂纹网络求出逾渗概率 $P(a)$:

$$P(a) = \sum_{n=1}^k \left(\frac{a_n}{a}\right)^\alpha \quad (5)$$

当 $a = 0.15 \text{ mm}$ 时, $P(a) = 0.138$ 。

材料细观破坏表现为拉断形状,即当细观结构(晶体)承受的拉力超过其抗拉极限后,微裂纹起裂。在考虑微裂纹起裂时,采用强度统计理论中的“最弱环假设”。计算分析过程为:先求解某一状态下的位移和应力(各细观结构),确定一组可能的开裂结构;然后计算每一细观结构的开裂概率(考虑开裂方向、个数、损伤的累积效应等因素),如果细观结构开裂,则进入下一个循环。

2.4 岩石统计损伤模型

Krajcinovic 等^[33]从岩石材料内部裂隙分布的随机性出发,将连续损伤理论和统计强度理论有机地结合起来,提出了一个统计损伤模型,为开展岩石类材料本构模型的研究开辟了一条崭新的途径。徐卫亚等^[34]、曹文贵等^[35-36]以岩石屈服准则作为岩石微元强度的表示方法,进而求得损伤变量,并据此建立出反映岩石损伤软化的统计本构模型。

由于岩石材料内部构造极不均匀,各微元所具有的强度都不相同,考虑到岩石损伤是一个连续过程,因此可假设岩石微元破坏前服从虎克定律且各微元强度服从 Weibull 分布,其概率密度函数 $P(F)$ 为

$$P(F) = \frac{m}{F_0} \left(\frac{F}{F_0}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{F}{F_0}\right)^m\right] \quad (6)$$

式中: m 及 F_0 为反映岩石材料力学特性的 Weibull 分布参数。

定义损伤变量 D 为岩石中已经破坏的微元数目 N_t 与总微元数目 N 之比,即

$$D = \frac{N_t}{N} \quad (7)$$

$$\text{而} \quad N(F) = \int_0^F NP(x) dx \quad (8)$$

将式(6)(8)代入式(7),得

$$D = \frac{N(F)}{N} = \frac{N \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\frac{F}{F_0}\right)^m\right] \right\}}{N} = 1 - \exp\left[-\left(\frac{F}{F_0}\right)^m\right] \quad (9)$$

根据应变等效性假设^[37],有

$$\sigma_{ef} = \frac{\sigma}{1-D} \quad (10)$$

式中: σ_{ef} 为有效应力; σ 为无损伤状态材料的应力。

将式(9)代入式(10)便可得到岩石统计损伤本构模型。

2.5 其他模型

李长春等^[38]于 1989 年考虑分布微裂纹对岩石材料力学性质的影响,根据弹性介质假设、小裂纹假设和等效裂纹假设,采用自洽方法建立了岩石类脆性材料的细观损伤本构关系。1995 年,李广平^[39]将有效场方法用于分析压缩荷载作用下岩石材料的二维和轴对称微裂纹损伤模型,并建立了岩石材料微裂纹损伤的三维 Taylor 模型。随后,李广平等^[40]提出了真三轴条件下的岩石细观损伤力学模型,建立了岩石损伤演化方程,其主要贡献是考虑了中间主应力对本构关系的影响。1997 年,李皓^[41]将金属材料中微裂纹扩展域的概念引入了岩石细观损伤本构模型研究中。1999 年,邢纪波等^[42]在离散元的基础上提出了梁-颗粒模型,用以模拟岩石材料的细观力学行为,此模型兼有离散元抗压和梁模型抗拉的优点。2000 年,杨小林等^[43]基于现有岩石爆破机理和岩石细观损伤力学建立了损伤模型和断裂准则,阐述了岩石爆破损伤断裂的细观理论。2001 年,肖洪天等^[44]通过分析双向应力状态下裂纹的闭合、滑移引起的变形,将变形分为岩石介质的变形、张开裂纹的闭合、滑移引起的变形和由于分支裂纹扩展引起的变形等 3 部分来研究,最后将 3 种机制引起的变形叠加,得到细观岩石力学模型。2002 年,杨强等^[45]采用二维格构模型在细观尺度上模拟岩石类材料的破坏过程。2005 年,韦立德等^[46]利用对应性原理建立了基于细观力学的盐岩蠕变损伤本构模型。谢和平等^[47]指出能量释放是引发岩石整体突然破坏的内在原因,能量耗散使岩石产生损伤,并导致岩性劣化和强度丧失。他给出了基于能量耗散的强度丧失准则和基于可释放应变能的整体破坏准则,分析了各种应力状态下岩石单元整体破坏的临界应力。

3 岩石细观损伤的实验研究

试验的作用有两个方面:一方面,为细观数值模拟提供基础数据,包括试样组成材料的细观力学性质、试样的尺寸等;另一方面,检验数值模拟结果的可靠性。进行细观力学数值模拟试验要以基本试验数据为基础,数值模拟的结果最终还要得到宏观试验结果的验证。

研究证明,岩石中局部的微破裂作用会产生声

发射,因而可利用接收这种声发射来研究岩石的性质。Obert 等^[48]首先将声发射技术用于岩石破坏预报,其后 Scholz^[49]等就变形曲线、扩容、临界破坏与声发射的关系又作了大量的研究。在岩石损伤检测方面,声发射(acoustic emission,简称 AE)技术在岩石损伤破坏机理的研究方面有许多进展。唐春安、陈忠辉等^[50-51]基于岩石损伤和声发射具有一致性的假定,用连续损伤力学观点推演出岩石声发射的一般理论模式,通过解析理论讨论了单轴压缩状态下岩石声发射的 Kaiser 效应。

用于岩石细观观测研究的电子显微镜主要有两种:透射电子显微镜和扫描电子显微镜(简称 SEM)。实验研究证明扫描电子显微镜在岩石细观观测中更有效。1990 年,傅学敏等借助于扫描电镜从微观入手,分析了岩体膨胀过程中岩石内部颗粒结构的变化特征,利用分形几何理论提出了用来模拟软岩膨胀力学行为的膨胀本构模型。1990 年,卢应发等^[52]完成了大理岩静态和循环荷载试件的电镜分析。1993 年凌建明等^[53]用扫描电镜进行了不同类型岩石材料的实时加载观测,建立了脆性岩石细观损伤模型。1995 年,赵永红^[54]对大理岩受单轴压缩时裂纹随外载增加时的变化过程进行了扫描电镜实时观测研究。

CT(computerized tomography)检测因具有多层扫描、可采用国际标准圆柱形试件、无损检测等优点而受到国内外的广泛关注。自 20 世纪 90 年代以来,国内外学者利用 X 射线 CT 检测技术在岩石损伤力学特性研究方面已取得了许多成果。Verhelst 等^[55]于 1995 年利用 X 射线 CT 机研究了岩样的微裂纹和不均一结构。杨更社^[56]于 1995 年在国内最早应用医用 X 射线 CT 机重点对岩石的初始损伤特性进行了研究,给出了用 CT 数表示的岩石损伤变量公式,并对单轴压缩荷载作用下砂岩的损伤扩展机理进行了 CT 实时初步试验研究。2001 年,任建喜、葛修润等利用 CT 的检测结果提出了单轴压缩分段损伤模型等。

2000 年,葛修润等^[57]建议中国科学院武汉岩土力学研究所建立了一套基于 CCD(charged coupled device,电荷耦合器件)技术的岩石细观损伤力学试验系统,该试验系统已研制成功,并完成了长江三峡水利枢纽工程永久船闸处的角闪斜长花岗岩受环境侵蚀的岩石化学损伤破坏机理研究。

4 结 语

岩石细观损伤模型研究仍是一个充满挑战的领域。虽然现有的细观分析取得了比较成熟的成果,但尚有一些不足。例如,裂纹的发育规律还很难用实验测得,进一步的损伤变量定义也十分困难,如何更好

地建立细观力学特性与宏观响应之间的关系等。因此,从细观出发建立反映岩石宏观力学特征的细观力学模型还不多。对于本构模型研究中的一些有待深入研究的问题,仍然需要不断地探索更严密的理论,构造更符合所研究岩石的损伤本构模型来解决。

当前岩石细观损伤力学数值模拟主要沿着三个方向进行:①岩石细观模型的建立,即如何构筑一个包含必需信息的细观模型来反映岩石的特征;②将连续介质力学、损伤力学和计算力学相结合去分析细观尺度的变形、损伤和破坏过程;③基于对细观结构和细观本构关系的认识,将随机分析等理论与计算力学相结合去预测岩石的宏观性质和本构关系,对岩石试件的宏观响应进行计算仿真。

参考文献:

- [1] KRAJCINOVIC D, BASISTA M, SUMARAC D. Micromechanically inspired phenomenological damage mode[J]. Appl Mech, 1991, 58: 305-310.
- [2] KRAJCINOVIC D, MASTILOVIC S. Some fundamental issues of damage mechanics[J]. Mech Mater, 1995, 21: 217-230.
- [3] MARIGO J J. Modelling of brittle and fatigue damage for elastic materials by growth of microvoid[J]. Eng Fract Mech, 1985, 21(4): 861-874.
- [4] BUI H D, EHRLACHER A. Propagation of damage in elastic and plastic solid[M]. Oxford: Pergamon, 1981.
- [5] BUI H D, EHRLACHER A. The steady state propagation of a damaged zone of an elastic brittle solid[J]. ICF-6, 1984, 2: 10-15.
- [6] DOUGILL J W, LAU J C, BURT N J. Toward a theoretical model for progressive failure and softening in rock, concrete and similar materials[C]//Mechanics in Engineering. Virginia: American Society of Civil Engineers CASE Press, 1976: 335-355.
- [7] DRAGON A, MROZ Z. A continuum model for plastic brittle behavior of rock and concrete[J]. Eng Sci, 1979, 17(1): 121-137.
- [8] ALAIN S, BARY B. Coupled damage tensors and weakest link theory for the description of crack induced anisotropy in concrete[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2002, 69: 1925-1939.
- [9] GURSON A L. Plastic flow and fracture behavior of ductile materials incorporating void nucleation, growth and interaction[D]. Providence: Brown University, 1975.
- [10] GURSON A L. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: part I-yield criteria and flow rules for porous ductile media[J]. Eng Mater Tech, 1977, 99(1): 2-15.
- [11] COSTIN L S. A microcrack model for the deformation and failure of brittle rock[J]. Geophys Res, 1983, 88(B11): 9485-9492.
- [12] HULT J. Effect of voids on creep rate and strength, damage mechanics and continuum modeling[M]. New York: ASCE, 1985.
- [13] 谢和平. 岩石混凝土损伤力学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990.

- [14] 谢和平. 分形-岩石力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [15] SCHLANGEN E ,GARBOCZI E J. Fracture simulations of concrete using lattice models :computational aspects[J]. Engng Frac Mech ,1997 57(2/3) 319-332.
- [16] SCHLANGEN E ,van MIER J G M. Experimental and numerical analysis of micromechanisms of fracture of cement-based composite[J]. Cement & Concrete Composites ,1992 ,14(2) : 105-118.
- [17] TANG Chun-an ,KAISER K. Numerical simulation of cumulative damage and seismic energy release during brittle rock failure-part I :Fundamentals[J]. Rock Mech Min Sci ,1998 ,35(2) :113-121.
- [18] TANG Chun-an. Numerical simulation of progressive rock failure and associated seismicity[J]. Rock Mech Min Sci ,1997 ,34(2) 249-261.
- [19] 谢强, 姜崇喜, 凌建明. 岩石细观力学实验与分析[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1997.
- [20] 朱万成, 唐春安, 赵文, 等. 混凝土试样在静态载荷作用下断裂过程的数值模拟研究[J]. 工程力学, 2002 ,19(6) : 148-153.
- [21] 唐春安, 朱万成. 混凝土损伤与断裂-数值试验[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [22] 周维垣, 剡公瑞. 岩石、混凝土类材料断裂损伤过程区的细观力学研究[J]. 水电站设计, 1997 ,13(1) :1-9.
- [23] 刘齐建, 杨林德, 曹文贵. 岩石统计损伤本构模型及其参数反演[J]. 岩石力学与工程学报, 2005 ,24(4) :616-621.
- [24] NEMAT-NASSER S ,HORI M. Micromechanics :overall properties of heterogeneous materials[M]. North-Holland :Elsevier Science Publishers B. V. ,1993.
- [25] TVERGAARD V. Material failure by growth to coalescence [J]. Adv Appl Mech ,1990 27 83-151.
- [26] GILORMINI P ,LICHT C ,SUQUET P. Growth of voids in a ductile matrix :a review[J]. Arch Mech ,1988 40(1) :43-80.
- [27] 高蕴昕, 余寿文, 郑泉水, 等. 带微裂纹物体的有效断裂韧性[J]. 力学学报, 1998 30(1) :109-115.
- [28] GRADY D E ,KIPP M L. Continuum modelling of explosive fracture in oil shale [J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr ,1980 ,17(2) :147-157. .
- [29] 唐春安. 岩石破裂过程中的灾变[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.
- [30] HILLERBORG A. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements [J]. Cement and Concrete Research ,1976 6(6) :773-782.
- [31] BAZANT Z P. Mechanics of fracture and progressive cracking in concrete structures[C].//Fracture Mechanics of Concrete. Dordrecht :Martinus Nijhoff Publisher ,1985.
- [32] JENG Y S ,SHAH S P. A fracture toughness criterion for concrete[M]. Evanston :Northwest University Publisher ,1984.
- [33] KRAJCINOVIC D ,SILVA M A G. Statistical aspects of the continuous damage theory[J]. Solids Structures ,1982 ,18(7) : 551-562.
- [34] 徐卫亚, 韦立德. 岩石损伤软化统计本构模型的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002 21(6) :787-791.
- [35] 曹文贵, 方祖烈, 唐学军. 岩石损伤软化统计本构模型之研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998 ,17(6) :628-633.
- [36] 曹文贵, 赵明华, 唐学军. 岩石破裂过程的统计损伤模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2003 25(2) :184-187. .
- [37] LEMAITRE J. How to use damage mechanics[J]. Nuclear Engineering and Design ,1984 80(1) 233-245.
- [38] 李长春. 岩石类脆性材料的细观损伤本构关系[J]. 岩土力学, 1989 ,10(2) 55-68.
- [39] 李广平. 类岩石材料微裂纹损伤模型分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1995 ,14(3) 229-235.
- [40] 李广平, 陶振宇. 真三轴条件下的岩石细观损伤力学模型[J]. 岩石力学与工程学报, 1995 ,17(1) 24-31.
- [41] 李皓. 岩石细观损伤理论及其力学过程模型的研究[D]. 武汉: 武汉水利电力大学, 1997.
- [42] 邢纪波, 余良群, 王泳嘉. 三维梁-颗粒模型与岩石材料细观力学行为模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 1999 ,18(6) :627-630.
- [43] 杨小林, 王树仁. 岩石爆破损伤断裂的细观机理[J]. 爆炸与冲击, 2000 20(3) 247-252.
- [44] 肖洪天, 周维垣. 脆性岩石变形与破坏的细观力学模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001 20(2) :151-155.
- [45] 杨强, 张浩, 周维垣. 基于格构模型的岩石类材料破坏过程的数值模拟[J]. 水利学报, 2000(4) :46-50.
- [46] 韦立德, 杨春和, 徐卫亚. 基于细观力学的盐岩蠕变损伤本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005 ,24(23) :4253-4258.
- [47] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005 24(17) 3003-3010.
- [48] OBERT L ,DUVALL W. Use of subaudible noise for prediction of rock bursts[M]. Washington D C :U. S. Bureau of Mines , 1942.
- [49] SCHOLZ C. Experimental study of the fracturing process in brittle rock[J]. Geophys Res ,1968 73 :1447-1454.
- [50] TANG Chun-an ,CHEN Zhong-hui ,XU Xiao-he et al. A theoretical model for Kaiser effect in rock[J]. Pure Appl Geophys , 1997 ,150(1) 203-215.
- [51] 陈忠辉, 唐春安, 徐小荷, 等. 岩石声发射 Kaiser 效应的理论和实验研究[J]. 中国有色金属学报, 1997 ,7(1) 9-12.
- [52] 卢应发, 张梅英, 葛修润. 大理岩静态和循环荷载试件的电镜分析[J]. 岩土力学, 1990 ,11(4) :75-80.
- [53] 凌建明, 孙钧. 脆性岩石的细观裂纹损伤及其实效特征[J]. 岩石力学与工程学报, 1993 ,13(4) 304-312.
- [54] 赵永红. 受压岩石中裂纹发育过程及分维变化特征[J]. 科学通报, 1995 40(7) :621-623.
- [55] VERHELST F ,VERVOORT A ,DEBOSSCHER P H et al. X-ray computerized tomography :determination of heterogeneities in rock sample[C].//The 8th International Congress on Rock Mechanics[C]. Rotterdam :A. A. Balkema ,1995 :105-108.
- [56] 杨更社. 岩体损伤力学特性及细观损伤的 CT 识别[D]. 西安: 西安理工大学, 1995.
- [57] 葛修润, 任建喜, 孙红, 等. 岩石损伤力学宏观细观试验研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004.

(收稿日期 2006-04-12 编辑 熊水斌)