

岩石裂纹演化及其力学特性的研究进展*

张晓春 杨挺青

华中理工大学力学系, 武汉 430074

缪协兴

中国矿业大学数力系, 徐州 221008

摘 要 综述评介了岩石裂纹(缺陷)演化及其力学特性研究的近期进展. 其内容包括: 微细观裂纹演化及其力学特性, 时间相关性, 裂纹扩展与岩石破坏, 并结合某些工程问题进行了讨论.

关键词 微裂纹扩展, 时间相关, 损伤, 岩爆

1 引言

近十几年来, 随着采矿工程和地下结构工程的迅速发展, 岩石类材料的裂纹扩展及其力学特性的研究愈来愈受到学术界和工程界的重视. 岩爆, 地下永久性洞室、仓储结构的变形, 深部采矿隧道的支护以及采油钻孔孔洞的稳定等等都与此有关.

岩石类材料是含夹杂、孔洞、裂隙和微结构面的各向异性介质. 其裂纹扩展和力学特性与材料的微观结构、受力状态和环境密切相关. 在外载作用下, 岩石内部微缺陷的成核、扩展以及这一过程中的时间和温度因素决定了岩石变形的特性. 随着外载的增加, 微缺陷进一步扩展, 最终导致岩石材料的失效.

岩石类材料在不同压应力作用下出现的变形包括: 初始的压实, 近线性弹性变形, 初始应变硬化, 应变软化, 膨胀(或碎屑岩石的压实)和局部弱化. 这些特性主要来自于岩石微结构在不同应力状态下的演化, 原有裂纹的成核和扩展被视为岩石变形和失效的主要机制. 源于初始缺陷的次生裂纹及其张开导致非弹性体积增加、膨胀, 极大地影响了应力-应变关系和岩石的力学性质^[1~4].

目前, 根据岩石类材料变形的不同特征, 人们在岩土工程中分别考虑其脆性、半脆性、流变性、断裂与损伤积累特性, 研究受载情况下岩石微观结构的演化和宏观失效之间的联系, 从而分析失效的先兆现象和确定失效前的临界载荷, 这在工程设计和灾害预报中具有极其重要的作用.

近十年来岩石力学发展迅速^[1~8], 岩石微细观裂纹演化、破坏方面的研究尤为突出. 本文着重讨论岩石微细观裂纹的演化与力学特性、时间相关性和损伤描述, 并结合某些工程问题进行一些讨论.

收稿日期: 1997-07-02, 修回日期: 1998-01-19

* 国家自然科学基金资助项目(59734090)

2 微裂纹 (缺陷) 扩展模型

大多数岩石的异质微结构导致颗 (晶) 粒尺度上的高度各向异性, 造成局部应力集中, 这样即使岩体整体受压, 在这些应力集中区域, 往往存在局部张应力, 这样就在岩体内部引起延性 I 型微裂纹, 其扩展亚平行于最大压应力方向. 裂纹的初始扩展可能是稳定的, 随着应力的增加, 进一步连续扩展将是不稳定的. 同时, 微裂纹扩展的这一阶段同应变硬化膨胀有关, 并产生应力诱发的弹性各向异性, 导致岩石变形的非线性. 对于这种情况, 裂纹扩展引起的非线性变形的描述和分析有许多模型^[1,4,9], 如: 滑移开裂模型、预存缺陷扩展模型、晶粒间的弹性错位、孔洞应力集中模型等. 常用和最有影响的是滑移开裂模型和预存缺陷扩展模型.

二维滑移开裂模型最初是由 Brace 和 Bombolakis (1963) 提出的. 对于远场压力作用, 预存滑移裂纹面承受正应力和剪应力, 一旦具有粘着力和摩擦力的两裂纹面发生相对滑动, 裂纹尖端局部张应力在预存裂纹的两端产生张性翼裂纹, 其扩展受 I 型应力强度因子 K_I 控制, 模型表明张性翼裂纹长度随主压应力增加而扩展, 其方向平行于主压应力方向, 侧向压力对裂纹的扩展起限制作用, 使张性翼裂纹扩展到一定长度后停止. 此模型提出后得到了广泛的应用. 微观力学理论和实验研究表明^[1,10,11]: 该模型对研究岩石中微裂纹延性开裂机制及岩石类材料非线性变形是非常适宜的. 如对裂纹应变的分析计算^[8,12], 裂纹状态 (扩展和相互作用) 与岩石应力应变曲线的相应关系 (应变硬化和应变软化) 的研究^[11,13].

预存缺陷扩展模型是 Nemat-Nasser 和 Hori^[3] 等在定量分析和实验验证的基础上, 提出的一个二维模型, 通过该模型可解释缺陷诱发裂纹的扩展导致岩石的劈裂现象, 进一步研究指出^[14]: 三轴压力下裂纹的相互作用使得扩展失去稳定, 导致裂纹局域化形成, 并控制材料的强度及最终的失效面. Germanovich 等^[15] 采用数值计算和实验方法研究了二维和三维情况下预存裂纹扩展和相互作用, 在一定程度上揭示了岩石脆性断裂的机制.

两种模型形成的翼裂纹的开裂由材料的断裂韧性 (I 型) 控制, 基于不同模型给出了相应的应力强度因子计算公式^[1,9]. 而 Baud 等^[16] 的研究进一步表明, 翼裂纹的 I 型应力强度因子与翼裂纹的方位 θ 和长度 l 相关, 即对于短的翼裂纹是与 θ 相关的, 对于长裂纹是与 l 相关的, 对此给出了翼型裂纹尖端 I 型应力强度因子的修正公式

$$K_I = -3\sigma_{\text{eff}} \sqrt{\frac{a + l_{\text{eq}}}{\pi}} \sin^{-1} \left(\frac{a}{a + l_{\text{eq}}} \right) \sin \theta \cos \frac{\theta}{2} + \frac{1}{2} \{ (\sigma_1 + \sigma_2) + (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2(\theta + \beta) \} \sqrt{\pi l} \quad (1)$$

其中

$$|\sigma_{\text{eff}}| = \left| \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\beta \right| - \mu \left| \frac{1}{2} [(\sigma_1 + \sigma_2) + (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\beta] \right|$$
$$l_{\text{eq}} = \frac{9}{4} l \cos^2 \frac{\theta}{2}$$

式中 σ_{eff} 为有效剪应力, l_{eq} 为等效翼裂纹长度, a 为初始裂纹的尺寸, β 为初始裂纹与 σ_2 方向的夹角, μ 为摩擦系数.

与滑移开裂模型相比, 预存缺陷扩展模型还适用于研究由圆形孔洞缺陷诱发的裂纹扩展问题^[17,18].

3 裂纹群的演化、相互作用及声发射效应

3.1 裂纹群演化和相互作用

裂纹群演化控制大裂纹的扩展,如裂纹尖端的微裂纹可处理为相互平行的翼裂纹群。Dyskin 和 Germanovich^[19]认为缺陷的剪切扩展是适宜的翼裂纹取向及结构连续连接的过程,与数学上的理想裂纹相比它具有一定的厚度。缺陷诱发的应力场使扩展的翼裂纹排列互相平行,其连接扩展比张性开裂占有优势,由于剪应力集中,缺陷的这种连接扩展方向一经确定便保持不变,这在一定程度上解释了缺陷扩展的方向性。

对于微裂纹控制的裂纹扩展和大尺度裂纹扩展过程,裂纹具有一定的厚度,过程区内尺度效应由体积单元内的微裂纹分布所控制。大裂纹的扩展是由于其前端体积单元的连续断裂,并使裂纹产生有效厚度,体积单元的厚度受两个方面的影响^[20]:(1)由于裂纹厚度的增加裂端应力集中减小;(2)由于体积单元尺度增加体积单元的强度减小。此外,裂纹过程区和裂纹厚度有三种不同情况存在:①裂纹厚度 H 远小于过程区长度 d ,裂纹相对于小参数 (H/d) 的渐进处理可归结为极薄的具有粘聚区的常见模型,粘聚区可模拟成过程区,裂纹模型类似于 Dugdale 或 Barenblatt 模型;②裂纹厚度与过程区长度相当;③过程区长度远小于裂纹厚度。在一定范围内,③与②类似。在后两种情况下,裂端的状况仅受裂纹厚度 H 控制。在模拟裂纹相互作用时, Dyskin 和 Germanovich^[21]提出多尺度裂纹概念,强调了各尺度裂纹对断裂韧性的影响。

裂纹群的演化导致局部弱化区的出现,其裂纹的密度和细晶粒的尺度都影响着岩石的强度。Wong 等^[22]的研究表明:细晶粒大理石峰值强度随初始裂纹密度快速减小,呈非线性特性;但当裂纹密度超过某一临界值时,峰值强度对裂纹密度变得相对不敏感。粗晶粒大理石在初始裂纹密度大于 0.025 时强度随裂纹密度大致保持常数。单轴压缩强度取决于剪切裂纹表面的摩擦系数、预存剪切裂纹的尺度、密度、岩石的断裂韧性和翼裂纹的临界尺寸,峰值强度随平均晶粒尺度的负二次方根变化。对于混凝土、岩石等半脆性材料,裂纹起裂和扩展是率相关的,并受尺度影响^[23,24]。此外,倪玉山评述了混凝土断裂尺寸效应的研究状况^[25]。

吴立新和王金庄^[26]探讨了煤岩组分及其含量、煤岩内部微观损伤和裂隙含量(裂纹面积率)等对煤岩强度的影响。Wong 等^[27]研究了孔隙岩石失效模型中加载路径和孔隙度的影响,认为高孔隙度岩石晶粒破碎和孔隙坍塌是主要的压缩机制。微观过程控制着破碎流动时应变硬化的演化,并导致岩石的脆性。

裂纹间的相互作用和联合将产生局部弱化并最终导致岩石的宏观失效。岩石材料断裂过程的主要特性可由两种机制描述^[9,15]。第一种机制是与预存裂纹的有效扩展有关,在裂纹扩展的后一阶段相互作用起主导作用,这种机制引起劈裂破坏。另一机制在于小裂纹成核和新裂纹的形成与扩展,在岩体内形成局部衰坏区。在这一区域裂纹数量增加比裂纹扩展更为敏感,在有效张性裂纹或翼裂纹扩展被阻止(如围压作用),或岩石对新裂纹成核的阻力小于随后裂纹扩展的阻力时,这一机制便起主导作用,该机制可预测岩石的剪切断裂。预存缺陷产生的应力集中导致非面内翼裂纹扩展仍是上述两种机制的基本模型。

尽管三维劈裂破坏类似于二维的情况,但裂纹扩展初始阶段在本质上与二维情况不同。与二维状况相比,单一三维裂纹不再扩展,而是大量微裂纹的成核和扩展,在局部形成弱化区,这导致岩石动力学的、类似突出的失效,这种失效也可能发生在弱化区内部单个裂纹上^[9,15,28]。大量裂纹的相互作用导致扩展裂纹在尺寸上的分化,如在载荷的某一阶段,主控裂纹变得很大(理论上是有限的),以至成为宏观的断裂^[20]。在岩石试件中,从初始微细观的三维裂纹到产生大尺度类似二维断裂的机制,可能是基于微观翼裂纹在垂直载荷方向产生的张应力。翼裂纹扩

展受 I 型应力强度因子控制, 对于周期滑移裂纹模型, 裂纹的相互作用特征可由 I 型裂纹应力强度因子中的相对裂纹长度参数反映^[11,13]. 对于预存缺陷裂纹模型, 文 [9] 给出了双裂纹情况下的 I 型应力强度因子, 从中可以看出, 相当接近的共线裂纹的相互作用造成的裂端外应力集中和裂纹已联合造成的应力集中相同. 可见, 裂纹的相互作用所带来的材料弱化是很值得重视的.

3.2 裂纹扩展的声发射效应

对于岩石类材料, 孔隙的坍塌或微裂纹的扩展, 都会有声发射产生. 在轴向压缩实验过程中, 岩石试件最初表现为体积近似线性减小, 但随着载荷的增加, 体积的变形由减小变为增大, 并表现出非线性特性, 声发射活动的数量正比于扩容水平. 这表明扩容和断裂与损伤积累的量相关, 每一个缺陷在加载过程中都对扩容和声发射起作用^[12].

声发射的振幅和频率参数可反映微开裂的数量和裂纹的尺寸, 是与材料的弱化相关的, 如岩石的软化特性^[29]. 陈宗基^[30] 对此在理论上给出了一种解释, 认为屈服面和破坏面是一同轴的两个圆锥面, 在这两个圆锥面之间的空间是扩容、微裂隙活动及声发射区. Pestman 等^[31] 利用声发射技术对砂岩的损伤扩展进行了研究, 给出一种应力空间内损伤面的定义, 且损伤面上的点可由 AE 活动来表示. 在岩石类材料中, 由缺陷诱发的微裂纹及其扩展对于侧向限制应力是敏感的^[1,2]. 因此, 声发射活动还与围压有密切相关, 陈忠辉等^[32] 对此作了有益的探讨.

此外, 声发射特性与岩石强度和蠕变过程有关. Yamashita 等^[33] 的岩石断裂和蠕变的实验研究表明: 声发射活动在施加的应力水平达到失效强度的 40% 时开始; 在施加的应力水平达到失效强度的 70% 时, 声发射活动快速增加, 岩石表现出明显的塑性特性. 对于蠕变过程的发展而言, 声发射活动主要集中在第三级蠕变阶段.

4 微裂纹扩展的变形 - 时间相关性

微裂纹的扩展是与时间相关的. 应力侵蚀和裂纹的亚临界扩展可用裂纹开裂速度和应力强度因子相关的经验 Charles 幂率公式表示为

$$\frac{dl}{dt} = \frac{A}{b} K_1^n \quad (2)$$

式中 l 是裂纹的长度, A 和 n 是取决于材料类型、湿度和温度等的常数. Kemeny^[12] 利用滑移开裂模型并考虑岩石裂纹亚临界扩展, 对变形的时间相关性进行了模拟, 该方法较好地预测了 Oshima 花岗岩应力应变曲线对施加的应变率的相关性, 并能模拟瞬态和第三级蠕变的发生. 给出的相应的经验公式表明瞬态蠕变与时间呈对数相关, 即

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_0 + C_1 \ln(1 + C_2 t) \quad (3)$$

式中

$$\begin{aligned} \varepsilon_0 &= \frac{\sigma_1}{E} [1 + 2\chi\pi(\sin\theta \cos\theta - \mu \cos^2\theta)^2] \\ C_1 &= \frac{16\sigma_1\chi c^2(\sin\theta \cos\theta - \mu \cos^2\theta)^2}{E\pi(1+n/2)} \\ C_2 &= \frac{A(2l_0\sigma_{\text{eff}} \cos\theta)^n(1+n/2)}{\pi^{n/2}} \end{aligned}$$

χ 为裂纹密度, E 为弹性模量, l_0 为初始裂纹长度, μ 为摩擦系数. 不稳定蠕变发生在裂纹密度达到临界值时, 是由裂纹的相互作用导致的.

Yoshida 和 Horii^[2] 基于微观力学基础建立了岩石蠕变特性的预测模型, 认为裂纹扩展的时间相关机制是裂端的应力侵蚀, 应力侵蚀裂纹扩展可由幂律公式描述, 应力强度因子由预存缺陷模型导出. 最后, 在微观力学模型的基础上给出岩石的本构方程, 并补充到有限元程序中以分析地下结构的长期稳定性.

值得注意的是这里的变形 - 时间相关特性并不涉及材料时间相关的本构关系, 仅考虑缺陷扩展过程的时间相关的非线性变形, 岩体 (不含缺陷) 仍被视为弹性的、与时间无关的. 这方面的研究对深部核废料地下储藏及永久硐室等往往具有特殊的意义.

最近, 文 [34] 对含裂纹体蠕变断裂理论及其应用做了较全面的评述, 但涉及岩石蠕变裂纹扩展的分析不多. 岩石材料的蠕变裂纹扩展主要发生在蠕变过程的后两个阶段, 即稳态蠕变阶段和加速蠕变阶段. 在瞬态蠕变阶段, 裂纹趋于张开但没有扩展. 裂纹稳定扩展发生在稳态蠕变阶段, 不稳定的裂纹扩展发生在加速蠕变阶段. 对于短期蠕变断裂, 断裂韧性作为岩石的失效判据是适宜的^[35]. 此外, Yamashita 等^[33] 在岩石蠕变实验中发现, 声发射活动与蠕变各阶段都存在其相应关系.

在蠕变裂纹扩展中, 幂率蠕变固体奇异性裂纹尖端场受加载条件、裂纹深度和几何形状影响, 材料的寿命由蠕变裂纹扩展控制, 失效时间的评估可由时间相关的加载参数 $C(t)$ 获得^[36]. Stamm 和 Walz^[37] 分析研究了粘弹性材料裂纹尖端场, 通过定义模拟材料非弹性性质的标量势函数 $\Omega(\sigma_{ij}, B_\alpha)$, 推导出具有内变量 α_{ij} 的本构表达式.

5 损伤力学描述

早期提出岩石类材料损伤力学研究的是 Dougill^[38], 其后 Dragon 和 Morz^[39] 利用断裂面概念对岩石和混凝土的连续损伤行为进行了理论探讨. Krajcinovic^[40] 等的研究对此起了很大的推动作用. 其后, 人们根据不同损伤机制及其基础理论建立起各种损伤理论, 并将其应用于岩石材料的非线性、塑性、粘塑性损伤问题研究, 取得了许多成果. 如: 描述了混凝土材料塑性流动和微开裂导致的非弹性性质, 损伤扩展、硬化和软化响应等. Aub-Lebdeh 和 Voyiadji^[41], Yzadani 和 Schreyer^[42], 李兆霞^[43] 等提出塑性与损伤机制相结合的损伤模型. 谢和平等^[44] 在对不同围压下混凝土受压力学特性的实验后, 根据等效应变假设和内变量理论, 建立了混凝土弹塑性损伤本构方程. 在连续损伤力学 (CDM) 框架内, 基于具有内变量和 Darcy 率的不可逆热力学, Cheng 和 Dusseault^[45] 给出一损伤和空隙压力耦合的连续统模型. Aubertin 等^[46] 在本构方程中引入损伤内变量以描述软岩非弹性特性, 建立起 SUVIC-D 模型. 在粘弹性损伤方面, 受压蠕变和损伤扩展的耦合作用被引入本构方程, Chen 等^[47] 近期对岩盐蠕变失效的研究导出了多机制变形耦合断裂模型 (MDCF) 以描述盐岩的蠕变失效. 软岩的大量实验研究表明, 蠕变模量与加载率相关, 缪协兴等^[48] 建立了具有蠕变模量的软岩蠕变损伤方程. Park 等^[49] 提出一考虑率相关损伤扩展效应的粘弹性连续统损伤模型, 并将其成功地应用于沥青混凝土受单轴应力等应变率作用的性能表征.

对于损伤岩石的断裂, Labuz 等^[50] 探讨了损伤岩石微裂纹相关的断裂问题, 初步揭示了损伤岩石断裂能量耗散的规律. 凌建明^[51] 对岩石蠕变裂纹起裂与扩展进行了损伤力学的初步分析. 其后, 孙钧和凌建明^[52] 结合三峡工程高边坡问题, 研究了闪云斜长岩的细观损伤特性, 并依据脆弹性岩体的细观损伤理论, 分析了岩石细观时效损伤对高边坡岩体稳定性的影响. 从近期的岩石力学研究来看, 断裂和损伤已融合为岩石力学研究的一个主题, 并成为当前研究的热点.

6 结 语

近十几年来, 岩石裂纹演化及其力学特性的研究取得了显著的进展.

岩石裂纹的演化及其力学特性的研究对于岩土工程的灾害预防有着极其重要的意义. 首先, 地下结构围岩裂纹的不稳定扩展常导致的灾难性事故, 如地下硐室的岩爆, 采矿工程中的冲击矿压, 石油钻孔中的突出等等. 它们的发生与地下结构围岩壁附近的裂纹、应力集中、自由表面影响密切相关, 而裂纹的扩展方式以及贯通后的变形及稳定性则是研究的关键^[53]. 目前, 已有一些研究者根据试验和理论分析, 对孔洞岩壁附近裂纹扩展形成岩石薄层以及薄层动力失稳导致上述灾害发生的机制进行了探讨^[54~56]. 我们的研究表明, 围岩裂纹扩展临界条件的满足是矿山冲击矿压发生的必要条件^[57,58], 滑移裂纹群相互作用、联合形成层裂板结构的机理, 适宜于片帮型冲击矿压发生机制的分析^[59,60]. 相应的试验研究可重显围岩壁面附近层裂结构的形成过程, 并能揭示自由表面影响、裂纹扩展、联合与壁面位移突变存在的内在联系^[56]. 但是如何将裂纹或缺陷的演化、相互作用与宏观变形和失效联系起来仍是亟待解决的问题. 其次, 地下结构与采矿工程中岩爆等灾害与声发射活动的规律已为人们认识到, 微细观缺陷的扩展伴随声发射活动, 是岩石损伤能量释放的特征. 声发射活动作为岩爆等灾害发生的先兆信息, 已在采矿业中得到了广泛的应用^[61~64], 但其准确性远不尽人意, 加强对两者相关性的定量研究将对采矿业和地下工程有着现实的价值. 此外, 深部矿井由于岩石特性的软化, 岩石流变损伤断裂的研究将是极为重要的领域.

参 考 文 献

- 1 Myer L R, Kemeny J M, Zheng Z, Suarez R, Ewy R T, Cook N G W. Extensive crack in porous rock under differential compressive stress. *Appl Mech Rev*, 1992, 45(8): 263~280
- 2 Yoshida H, Horii H. A micromechanics-based model for creep behavior of rock. *Appl Mech Rev*, 1992, 45(8): 294~303
- 3 Nemat-Nasser S, Horii H. Compression-induced nonplanar crack extension with application to splitting, exfoliation, and rockburst. *J Geophys Res*, 1982, 87(B8): 6805~6821
- 4 Wang E Z, Shrive N G. Brittle fracture in compression: mechanics, models and criteria. *Engineering Fracture Mechanics*, 1995, 52(6): 1107~1126
- 5 陶振宇. 试论岩石力学的最新进展. *力学进展*, 1992, 22(2): 161~172
- 6 唐辉明, 晏同珍. 岩体断裂力学理论与工程应用. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993. 1~9
- 7 凌建明. 节理裂隙岩体损伤力学研究中的若干问题. *力学进展*, 1994, 25(2): 257~263
- 8 陈良森, 李长春. 关于岩石的本构关系. *力学进展*, 1992, 22(1): 173~181
- 9 Germanovich L N, Salganik R L, Dyskin A V, Lee K K. Mechanisms of brittle fracture of rock with pre-existing crack in compression. *Pageoph*, 1994, 143(1/2/3): 117~149
- 10 Kachanov M. A microcrack model of rock inelasticity, part I: frictional sliding on microcrack. part II: propagation of microcracks. *Mech Mat*, 1982a(1): 3~28
- 11 Kemeny J M, Cook N G W. In: Proc 2nd International Conference Const. Laws for Eng Mat, 1987, 2. 879~887
- 12 Germanovich L N, Dyskin A V, Tsyulnikov N M. A model of the deformation and fracture of brittle materials with cracks under uniaxial compression. *Mechanics of Solids*, 1993, 28(1): 116~128
- 13 Kemeny J M. A model for nonlinear rock deformation under compression due to sub-critical crack growth. *Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr*, 1991, 28(6): 459~467
- 14 Horii H, Nemat-Nasser S. Compression-induced microcrack growth in brittle solids: axial splitting and shear failure. *J Geophys Res*, 1985, 90(B4): 3105~3125
- 15 Germanovich L N, et al. Simulation of crack growth and interaction in compression. In: Fujii, ed. Proceeding 8th International Congress on Rock Mechanics, Tokyo, Japan, 1995. 219~226
- 16 Baud P, Reuschle T, Charlez P. Technical note: An improved wing crack model for the deformation and failure of rock in compression. *Int J Rock Mech Sci & Geomech Abstr*, 1996, 33(5): 539~542
- 17 Isida M, Nemat-Nasser S. A unified analysis of various problems relating to circular holes with edge cracks. *Eng Fract Mech*, 1987, 27(5): 571~591

- 18 Dyskin A V, Germanovich L N, Ustinov K B. Asymptotic solution for long cracks emanated from a pore in compression. *Int J Fracture*, 1993, 62: 307~324
- 19 Dyskin A V, Germanovich L N. A model of fault propagation in rocks under compression. In: Daemen, Schultz, eds. *Rock Mechanics*. 1995. 731~738
- 20 Dyskin A V, Germanovich L N. A model of growth in microcracked rock. *Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr*, 1993, 30(7): 813~820
- 21 Dyskin A V, Germanovich L N. Macrocrack propagation in materials with multi-scale microcracking. In: Rossmanith, ed. *Proceedings of The Second International Conference on Fracture and Damage of Concrete and Rock*, Vienna, Austria, 1992. 384~393
- 22 Wong R H C, Chau K T, Wang P. Microcrack and grain size effect in Yuen Long Marbles. *Int J Rock Mech Sci & Geomech Abstr*, 1996, 33(5): 479~485
- 23 Bazant P Z, Gettu R. Determination of nonlinear fracture characteristics and time dependence from size effects. In: S P Shah, et al. eds. *Fracture of Concrete and Rock: Recent Development*, Elsevier, London, 1989. 549~565
- 24 Bazant Z P, Milan Jirasek. R-cure modeling of rate and size effects in quasibrittle fracture. *Int J Fracture*, 1993, 62: 355~373
- 25 倪玉山, 张琦. 混凝土断裂尺寸效应的研究进展. *力学进展*, 1997, 27(1): 97~105
- 26 吴立新, 王金庄. 煤岩流变特性及其微观影响特征初探. *岩石力学与工程学报*, 1996, 15(4): 328~332
- 27 Wong T F, Szeto H, Zhang J X. Effect of loading path and porosity on the failure model of porous rocks. *Appl Mech Rev*, 1992, 45(8): 281~293
- 28 Germanovich L N, Carter B J, Ingraffea A R, Dyskin A V, Lee K K. Mechanics of 3-D crack growth under compressive loads. In: Aubertin, Hassani, Mitri, eds. *Rock Mechanics*, Balkema, Rotterdam, 1996. 1151~1160
- 29 Cox S J D, Meredith P G. Microcrack formation and material softening in rock measured by monitoring acoustic emissions. *Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr*, 1993, 30(1): 11~24
- 30 陈宗基. 岩爆的工程实录、理论与控制. *岩石力学与工程学报*. 1987, 8(1): 1~13
- 31 Pestman B J, Munster V J G. An acoustic emission study of damage development and stress-memory effects insandstone. *Int J Rock Mech Sci & Geomech Abstr*, 1996, 33(6): 585~593
- 32 陈忠辉, 傅宇芳, 唐春安. 岩石破裂声发射过程的围压效应. *岩石力学与工程学报*, 1997, 16(2): 65~70
- 33 Yamashita S, Sugimoto F, Otsuka K. On the fracture mechanism and creep behavior of rock under compressive lode. In: Bawden, Archibald, eds. *Innovative Mine Design for The 21st Century*. 1993. 959~968
- 34 杨挺青. 含裂纹体蠕变断裂理论及其应用研究. *力学进展* (待发表)
- 35 Zhao X L, Roegiers J C. Creep crack growth in shale. In: Daemen, Schultz, eds. *Rock Mechanics*. 1995. 135~140
- 36 Busso E P, Dean D W, Linkens D. On the effects of loading conditions and geometry on time-dependent singular crack tip fields. *Engineering Fracture Mechanics*, 1995, 50: 231~247
- 37 Stamm H, Walz G. Analytical investigation of tips fields in viscoplastic materials. *International Journal of Fracture*, 1993, 64: 135~155
- 38 Dougill J W, et al. *Mechanics in Eng. ASCE · EMD*, 1976: 333~355
- 39 Dragon A, Mroz Z. A continuum model for plastic-brittle behaviour of rock and concrete. *Int J Engineering Sciences*, 1979, 17(2): 121~137
- 40 Krajcinovic D, Fonseka G U. The continuous damage theory of brittle materials. *J Appl Mech*, 1981, 48(4): 809~815
- 41 Abu-Lebdeh T M, Voyiadjis G Z. Plasticity-damage models for concrete under cyclic multiaxial loading. *Journal of Engineering Mechanics*, 1993, 119: 1465~1484
- 42 Yazdani S, Schreyer H L. Combined plasticity and damage mechanics model for plain concrete. *Journal of Engineering Mechanics*, 1990, 116: 1435~1449
- 43 Li Zhaoxia. Damage model for hardening and softening material in general state of stress. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 1994, 7: 323~333
- 44 谢和平, 董毓利, 李世平. 不同围压下混凝土受压弹塑性本构模型的研究. *煤炭学报*, 1996, 21(3): 245~270
- 45 Cheng H, Dusseault M B. Deformation and diffusion behavior in a solid experiencing damage: a continuous damage model and its numerical implementation. *J Rock Mech Sci & Geomech Abstr*, 1993, 30: 1323~1331
- 46 Aubertin M, Gill D E, Ladanyi B. Constitutive equations with internal state variables for the inelastic behavior of soft rocks. *Appl Mech Rev*, 1994, 47(6), Part 2: s97~s106
- 47 Chen K S, Bodner S R, San Antonio. A damage mechanics treatment of creep failure in rock salt. *Int J Damage Mech*, 1997, 6: 121~153
- 48 Miao Xiexing, Chen Zhida. A creep damage equation for rock. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 1994, 7: 318~322
- 49 Park S W, Kim Y R, Schapery R A. A viscoelastic continuum damage model and its application to uniaxial behavior of asphalt concrete. *Mechanics of Materials*, 1996, 24: 241~255
- 50 Labuz J F, Chen C N, Berger D J. Microcrack-dependent Fracture of damaged rock. *International Journal of fracture*, 1991, 51: 231~240
- 51 凌建明. 岩石蠕变裂纹起裂与扩展的损伤力学分析方法. *同济大学学报*, 1995, 23: 141~145
- 52 孙钧, 凌建明. 三峡船闸高边坡岩体的细观损伤及长期稳定性研究. *岩石力学与工程学报*, 1997, 16(1): 1~7

- 53 Dyskin A V, Germanovich L N. Model of Rockburst Caused by Cracks Growing near Free Surface. In: Young, ed. Rockburst and Seismicity in Mines. 1993. 169~174
- 54 Germanovich L N, Galybin A N, Dyskin A V, et al. Boreole stability in laminated rock. In: Prediction and Performance in Rock Mechanics and Rock Engineering, Balkema, Rotterdam, Eurock'96. 1996. 767~776
- 55 Germanovich L N, Roegiers J C, Dyskin A V. A model for borehole breakouts in brittle rock. In: Rock Mechanics in Petroleum Engineering, Balkema, Rotterdam, Eurock'94. 1994: 361~369
- 56 Mokhel A N, Kulinich Yu V, Germanovich L N, et al. Modeling borehole instabilities associated with natural crack systems. In: Aubertin, Hassani, Mitri, eds. Rock Mechanics. 1996. 1285~1294
- 57 张晓春, 杨挺青, 缪协兴. 三河尖煤矿冲击矿压发生机制分析. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(5): 508~513
- 58 缪协兴, 翟明华, 张晓春, 杨挺青. 岩(煤)壁中滑移裂纹扩展的冲击矿压模型. 中国矿业大学学报, 1999(1)
- 59 张晓春, 缪协兴, 杨挺青. 冲击矿压的层裂模型及试验研究. 岩石力学与工程学报, 1999(6)
- 60 张晓春, 杨挺青, 缪协兴. 冲击矿压的模拟试验研究. 岩土工程学报, 1999, 21(1)
- 61 Calder P N, Archibald J, Madsen D, Bullock K. High frequency precursor analysis prior to a rockburst. In: Fairhurst, ed. Rockbursts and seismicity in mines. 1990. 117~181
- 62 Archibald J F, Calder P N, Moroz B, et al. Applications of microseismic monitoring to stress and rockburst precursor assessment. *Mining Science and Technology*, 1988,25(7): 123~132
- 63 Keginald H, et al. High frequency acoustic emission/microseismic studies associated with structural instabilities in underground mines. In: Fairhurst, ed. Rockbursts and Seismicity in Mines, 1990. 199~204
- 64 Fujii Y, Ishijima Y, Deguchi G. Prediction of coal face rockbursts and microseismicity in deep longwall coal mining. *Int J Rock Mech Min Sci*, 1997, 34(1): 85~96

THE NEW ADVANCES OF CRACKS DEVELOPMENT AND MECHANICAL PROPERTIES OF ROCK

Zhang Xiaochun Yang Tingqing

Department of Mechanics, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074

Miao Xiexing

China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008

Abstract This paper reviews the recent advances on cracks/defects development and its mechanical properties of rock, including micro-cracks/defects development and mechanical properties, the time-dependent cracks/defect development and the application of rock damage mechanics.

Keywords micro-cracks growth, time-dependent, damage, rockburst