

以动态的地质结构体为基础,研究自然岩体和工程岩体与地下水相互力学作用规律的科学.这个定义包含两层涵义:一方面研究在岩体应力场(包括人类工程力)作用下,岩体中地下水的运动规律;另一方面研究在地下水渗透力(seepage forces)作用下的岩体渗透稳定性问题.应用该理论可正确指导工程施工设计及地下水资源合理开采.它是一门新兴的正在发展中的边缘性交叉学科^[31].

3)岩土体流体力学(fluid geomechanics)是研究岩土体系统中气体、液体、固体之间的相互力学作用规律的科学.

4)化学岩体力学(chemical geomechanics)是研究岩体系统中液体-固体的化学相互作用而导致的岩体力学性状改变规律的科学.

9.8.3 耦合分析的核心问题

岩石工程面对的是复杂的地质体——岩体,岩体是一种具有复杂结构的多相介质体,天然状态下存在着地应力、地下水及温度等,岩石力学耦合分析的核心任务,就是要研究人类工程和自然相互作用下的由应力场、渗流场、温度场、地球化学场等相互作用引起的岩体变形和破坏规律.

1)影响岩体应力场的因素.它包括天然应力(或叫地应力)、工程应力、热应力、地球化学应力、渗透应力等.在运用岩体应力场分析工程岩体稳定性时,一定要综合考虑地应力场、工程应力场、热应力场、地球化学应力场、渗透应力场等.

2)影响岩体渗流场的因素.包括天然应力(或叫地应力)、工程应力、热应力、地球化学应力、渗透应力等.天然应力场和工程应力场的变化导致岩体结构的调整,从而改变岩体的渗透性能和空隙性状,同时也改变着地下水的补给、径流、排泄条件,从而影响岩体应力场.通过建立岩体的渗透系数、空隙率与应力的关系,描述岩体应力场变化对渗流场的影响.热应力场变化引起地下水性状的变化,从而导致地下水流动速度的改变.

3)岩体渗流场对应力场的影响.岩体中的地下水通过对岩体的物理作用、化学作用、空隙静水压力和动水压力的作用,改变岩体的力学性质,从而改变岩体的应力场.

9.8.4 岩体的渗透定理

9.8.4.1 孔隙型岩体渗透定理

孔隙型岩体渗透定理符合常温孔隙介质不变条件下的达西定律,即

$$v = KJ = -K \nabla H \quad (9-42)$$

式中, v 为渗流速度,也称比流量(specific discharge),它与渗透速度 u 的关系为: $v = nu$,这里 n 为孔隙率; J 为水力坡度(无量纲),它是一个与坐标方向无关且大于

0 的值; ∇H 为水力梯度, 它是一个与坐标方向有关的值; K 为渗透系数, 也称水力传导系数(hydraulic conductivity), $K = (\gamma/\mu)k$, 这里, γ, μ 分别为流体的容重和动力粘滞系数, k 为渗透率(permeability). 若岩体受应力作用时, 孔隙型岩体应力与渗流关系符合关系式 $K(\sigma) = K_0 \exp(-\alpha\sigma)$, 从而可推出:

可变形常温孔隙型岩体渗流公式为

$$v = K_0 \exp(-\alpha\sigma) J \quad (9-43)$$

式中, K_0 为 $\sigma = 0$ 时的渗透系数; σ 为有效应力(MPa); α 为待定系数.

若岩体既受应力又受温度作用时, 由于有

$$\begin{aligned} K(\sigma, T) &= \frac{\rho_0 g \exp[-\alpha_1(T - T_0)]}{\mu_0 \exp[-\alpha_2(T - T_0)]} k_0 \exp(-\alpha\sigma) \\ &= K_0 \frac{\exp[-\alpha_1(T - T_0)]}{\exp[-\alpha_2(T - T_0)]} \exp(-\alpha\sigma) \end{aligned}$$

故可导出

可变温度和应力的孔隙型岩体渗流公式为

$$v = K_0 \frac{\exp[-\alpha_1(T - T_0)]}{\exp[-\alpha_2(T - T_0)]} \exp(-\alpha\sigma) J \quad (9-44)$$

式中, α_1 为受温度影响流体密度变化的待定系数; α_2 为受温度影响流体动力粘滞系数变化的待定系数; T_0, T 分别为起始温度和温度变量.

9.8.4.2 裂隙型岩体渗透定理

岩体中常温不变形单裂隙渗流的立方定理是通过窄缝槽水力学实验得出的, 即

$$q = (\gamma b^3 / 12 \mu) J_f = K_f b J_f \quad (9-45)$$

式中, q 为裂隙的单宽流量; b 为裂隙宽度; $K_f = \lambda b^2 \rho g / \mu$ 为裂隙的渗透系数; λ 为与裂隙面形状和粗糙度有关的系数, 光滑平直时 $\lambda = \frac{1}{12}$; J_f 为水力坡度.

当岩体中存在密集裂隙时, 不同方向裂隙组在裂隙网络系统中相互连通, 一个方向上裂隙组的裂隙水流丝毫不受另一方向裂隙水流的干扰, 则裂隙介质岩体的渗流公式为

$$V = K_f J_f = \frac{\gamma \lambda}{\mu} k_f J_f = \frac{\gamma \lambda}{\mu} \sum_{i=1}^M b_i^3 S_i (1 - \alpha_i \alpha_i) J_f \quad (9-46)$$

式中, V 为渗流速度矢量; J_f 为水力坡度矢量; K_f 为渗透系数张量(hydraulic conductivity tensor); k_f 为渗透率张量(permeability tensor); M 为岩体内裂隙组数; S_i 为第 i 组裂隙的平均密度; b_i 为第 i 组裂隙的平均隙宽; I 为单位矢量; α_i 为第 i 组裂隙的平均方向余弦矢量.

若裂隙岩体受应力作用时,由试验结果知, $K(\sigma) = K_0 \sigma^{-D_f}$,故可得裂隙型岩体渗流公式为

$$V = K_{f0} J_f \sigma^{-D_f} \quad (9.47)$$

而同时考虑温度变化时,则裂隙型岩体渗流公式为

$$V = K_{f0} J_f \frac{\exp[-\alpha_1(T - T_0)]}{\exp[-\alpha_2(T - T_0)]} \sigma^{-D_f} \quad (9.48)$$

式中, K_{f0} 为初始渗透系数张量; D_f 为裂隙分布的分维数,一般 $0 < D_f \leq 2$, $D_f = 0$ 时,岩体内无裂隙存在(孔隙型岩体),此时可用 $K(\sigma) = K_0 \exp(-\alpha\sigma)$ 。

9.8.4.3 岩溶管道型岩体渗透定理

当岩溶管道中的水流流态为层流时,岩溶岩体中单管道渗透定理为

$$V = K J_c = (\gamma/8\mu) r_c^2 J_c \quad (9.49)$$

式中, K_c, J_c 分别为管流中的渗透系数和水力坡度; r_c 为管道的半径。

9.8.5 岩体渗流场、温度场与应力场耦合模型

由于岩体结构的复杂性,定量研究岩体水力学问题时不可能只用一种模式,建立岩体渗流场与应力场耦合模型一般采用三种方法^[32]:机理分析方法、系统辨识方法和混合分析方法。以上述岩体结构类型和耦合模型的建模方法为基础,将岩体渗流场、温度场与应力场耦合模型分为:集中参数型模型和分布参数型模型。集中参数型模型包括:多变量自回归模型、人工神经网络模型、非线性混沌动力学模型。分布参数型模型包括:连续介质模型、等效连续介质模型、裂隙网络模型、狭义和广义双重介质模型。这些模型大多已应用于岩体工程中。从现有的岩体渗流场、温度场与应力场耦合模型看,其中岩体渗流场与应力场耦合的连续介质和等效连续介质模型应用得相对较多,在这些耦合模型中渗流对应力的影响仅按有效应力理论。岩体渗流场与应力场耦合的裂隙网络模型应用较少。未来工程岩体稳定性分析中最结合实际的模型应该是岩体渗流场、温度场与应力场耦合的裂隙网络模型、狭义双重介质模型和广义双重介质模型。

集中参数模型是把岩体系统看成“黑箱”,运用系统的输入输出信息(如大坝的位移、库水位、坝内地下水位等观测资料)建立模型,分析预测岩体或岩体工程的稳定性。该模型未考虑岩体或岩体工程内的结构及力学、水力学性质。分布参数模型以岩体结构为基础,考虑岩体空间上的水力学特性,建立不同结构类型的水力学模型。在工程应用中关键要研究三个问题:一是模型的选择要以岩体结构为基础,采用现场地质调查、勘察、勘探、物探、试验等技术,揭示工程岩体的结构性特征,然后进行必要的背景概化,注意工程影响范围与区域岩体结构的关系,若工程影响范围内岩体相对完整,而区域岩体存在大断层时,仍可按连续介质处理;二是岩体力学

及水力学参数,通过现场实验、现场裂隙实测及模型反演等方法确定;三是边界条件,根据工程体影响范围及岩体水力学性质确定.对于相对完整,以孔隙为主的岩体运用连续介质模型,对于以裂隙为主且裂隙密集的岩体运用等效连续介质模型;对于以裂隙为主且裂隙稀疏的岩体运用裂隙网络介质模型;当岩体为岩溶管道网络型,也可运用该模型,只是将裂隙渗透定理改为管道渗透定理;对于既考虑岩块孔隙储水(岩块视为均质各向同性介质,其渗透性用标量渗透系数描述),又考虑裂隙导水的岩体可用狭义双重介质模型,而考虑岩块为密集裂隙时,用广义双重介质模型(岩块视为非均质各向异性介质,其渗透性用张量渗透(率)系数张量描述).

以下重点介绍耦合分析中的连续介质模型、等效连续介质模型、双重介质模型、裂隙网络介质模型.

9.8.5.1 岩体应力场、温度场与流体渗透压力场耦合的连续介质模型

对于一岩体系统而言,当岩体的空隙结构以孔隙为主,或以密集裂隙分布的裂隙为主时,表征体元足够小(相对研究区域规模),可运用机理分析法和混合分析法建立岩体渗流场与应力场耦合的连续介质模型.

假定岩体介质具有非均质各向异性渗流特点,当岩体介质干燥时,岩体应力的改变,其介质变形为非弹性的.在饱和状态下,岩体介质的变形为线弹性的.岩体应力场、温度场与流体渗透压力场耦合的数值模型可表述为

$$\left\{ \begin{array}{l} [K(\sigma_a, T)]\{p\} + \{Q\} = [S_s(\sigma_a, T)]\left\{\frac{dp}{dt}\right\} \\ \{\sigma\} = [D][B]\{U\} + \{p\} \\ [K_\lambda]\{T\} - [C_v]\{T\} = [S_c]\left\{\frac{dT}{dt}\right\} \\ K(\sigma_a, T) = k_{s0}\exp(-\alpha_1\sigma_a) \\ n(\sigma_a) = n_0\exp(-\alpha_2\sigma_a) \\ S_s(\sigma_a, T) = \rho(T)g[\beta(T)n(\sigma_a) + \alpha[1 - n(\sigma_a)]] \\ v = -\rho(T)gk_{s0}/\mu(T)[\rho(T)gZ + p] \\ \mu(T) = \mu_0\exp[-\alpha_3(T - T_0)] \\ \rho(T) = \rho_0\exp[-\alpha_4(T - T_0)] \\ \beta(T) = \beta_0\exp[-\alpha_5(T - T_0)] \end{array} \right. \quad (9-50)$$

式中, $\{\sigma\}$ 为岩体的应力列阵; $\{p\}$ 为流体渗透压力列阵; $\{Q\}$ 为渗流源(汇)项列阵; $\{U\}$ 为岩体的位移列阵; $[D]$ 为岩体的弹性矩阵; $[B]$ 为岩体的几何矩阵; $[K(\sigma_a, T)]$ 为考虑应力和异常温度作用的渗透矩阵; $[S_s(\sigma_a, T)]$ 为考虑应力和异常温度作用的贮水矩阵; v 为渗流速度; σ_a 为有效应力; n 为空隙率; α 为岩石的压

缩系数; β 为流体的压缩系数; $[K_\lambda]$ 为岩体的导热矩阵; $[C_v]$ 为流体的热流矩阵; $\{T\}$ 为温度列阵; $[S_c]$ 为岩体的贮热矩阵; $\mu(T)$, μ_0 分别是温度为 T , T_0 时的流体的动力粘滞系数; $\rho(T)$, ρ_0 分别是温度为 T , T_0 时的流体的密度; $\beta(T)$, β_0 分别是温度为 T , T_0 时的流体的压缩系数; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ 待定系数.

9.8.5.2 岩体渗流场与应力场耦合的等效连续介质模型

岩体是由岩块和结构面组成. 多数情况下岩块由小而密集的裂隙组成, 结构面是由裂隙、节理、断层、岩层层面、不整合面及片理面等组成. 当这些结构面分布相对较均匀, 且岩体的渗流取决于裂隙, 而岩块相对不透水时, 从宏观的角度把具有裂隙存在的岩体看作等效连续介质. 岩体的渗流可看作等效连续介质渗流, 用渗透系数张量描述岩体的渗透性能; 岩体中的应力看作等效应力, 用应力张量描述岩体的应力. 于是, 岩体渗流场与应力场耦合的等效连续介质数学模型可描述为

$$\begin{cases} \sigma_{ij} = T_{ijkl}^{-1} \epsilon_{kl} + T_{ijkl}^{-1} C_{kl} p \\ K_{ij} = (\lambda \gamma / \mu) (A_{kk} \delta_{ij} - A_{ij}) \\ - \gamma \frac{\partial}{\partial t} [(\sigma_{ij} - p \delta_{ij}) F_{ij} / \bar{h}] = \frac{\partial}{\partial x_i} [K_{ij} \frac{\partial}{\partial x_j} (p + \gamma Z)] \end{cases} \quad (9-51)$$

式中, σ_{ij} 为裂隙岩体的等效应力张量; ϵ_{kl} 为裂隙岩体弹性应变张量; λ 为无量纲标量, 当岩体中裂隙完全连通且光滑平直时 $\lambda = 1/12$, 否则, $\lambda \leq 1/12$; K_{ij} 为裂隙岩体的等效渗透系数张量; γ 为地下水的容重 $[ML^{-2}T^{-2}]$; μ 为水流的动力粘滞系数 $[ML^{-1}T^{-1}]$; $A_{ij} = \frac{\pi \rho}{4} \int_0^{b_m} \int_0^{r_m} \int_\Omega r^2 b^3 n_i n_j E(n, r, b) d\Omega dr db$ 为裂隙的几何张量, r, r_m 分别为圆形裂隙直径和最大直径, b, b_m 分别为裂隙隙宽和最大隙宽, n 为裂隙的法向方向, n_i, n_j 为其分量, $E(n, r, b)$ 为裂隙分布的概率密度函数, Ω 为空间角度域; Z 为位置高程; $F_{ij} = \frac{\pi \rho}{4} \int_0^{b_m} \int_0^{r_m} \int_\Omega r^3 n_i n_j E(n, r, b) d\Omega dr db$; $h = h + c(\sigma - p)$, c 为裂隙直径与初始隙宽之比, $c = r/b_0$, h 与循环荷载的次数有关, 在 Bandis 等(1983)的试验中 $h = 2 \times 10^2 \sim 2 \times 10^4$, 若循环荷载为一次数时, $h = 2 \times 10^2 \sim 2 \times 10^3$; $T_{ijkl} = M_{ijkl} + C_{ijkl}$ 称为裂隙岩体的 4 阶对称弹性柔度张量, M_{ijkl} 为岩块的 4 阶对称弹性柔度张量, C_{ijkl} 为裂隙的 4 阶对称弹性柔度张量.

当应力随时间变化很慢时, 可看作 $\frac{\partial}{\partial t}(\sigma_{ij}) = 0$, 则(9-51)式可简化为

$$\begin{cases} \sigma_{ij} = T_{ijkl}^{-1} \epsilon_{kl} + T_{ijkl}^{-1} C_{kl} p \\ K_{ij} = (\lambda \gamma / \mu) (A_{kk} \delta_{ij} - A_{ij}) \\ \gamma \frac{\partial}{\partial t} (p \delta_{ij} F_{ij} / \bar{h}) = \frac{\partial}{\partial x_i} [K_{ij} \frac{\partial}{\partial x_j} (p + \gamma Z)] \end{cases} \quad (9-52)$$

9.8.5.3 裂隙网络岩体渗流场与应力场的耦合模型

当岩体中裂隙或断层的分布高度离散,而且岩体的渗流主要取决于大的断裂时,运用连续介质或等效连续介质方法处理岩体渗流问题,容易引起较大的误差.特别是当岩石边坡的稳定性主要取决于断裂(或节理)或软弱结构面时,地下水渗透力主要作用于结构面上,若用连续介质方法计算地下水渗透力,则得出偏小的结果(整个岩体上的平均值),就可能将不稳定的边坡计算成稳定的边坡.若应用裂隙网络的非连续介质方法计算地下水渗透力就会得出与实际几乎相近的结果.这里仅考虑裂隙网络中发生渗流,岩块隔水,为弹性体,将运用非连续介质处理方法研究裂隙岩体渗流场与应力场耦合问题.

假定岩体内有 M 个线元, N ($N = N_1 + N_2 + N_3$, N_1 为内节点数, N_2 为第二类边界点, N_3 为第一类边界点) 个结点组成的裂隙网络,线元与结点的衔接矩阵为 $A = \{a_{ij}\}_{N \times M}$, 对应的关联阵为 A^* . 根据裂隙网络渗流原理和裂隙岩体应力分析原理,于是,裂隙网络岩体渗流场与应力场的耦合模型可表示为^[33]

$$\begin{cases} [G]\{H_f\} + \{Q\} - [A^*]W + [D]\frac{dH_f}{dt} = 0 \\ [K_n]\{U\} = \{F\} \\ \{\sigma\} = [D][B]\{U\} \\ [K_{jn}]\{U_j + U_p\} = \{F_j\} \\ \{\sigma_j\} = [D_j][B_j]\{U_j + U_p\} \\ K_f = K_0(\sigma_f - p_f)^{-D_f}, p_f = \gamma(H_f - Z) \\ U_{px} = 3.28\gamma H_f r(1 - \nu^2)/E \\ U_{px} = 3.28\gamma J_f r \cos\delta \{(1 - \nu^2)/[E(2 - \nu)]\} \\ U_{py} = 3.28\gamma J_f r \sin\delta \{(1 - \nu^2)/[E(2 - \nu)]\} \end{cases} \quad (9-53)$$

式中, $[A^*] = (A_1^*, A_2^*)^T$, A_1^* , A_2^* 分别为 $N_1 \times M$ 和 $N_2 \times M$ 阶关联矩阵;

W 为裂隙线元上垂向补给量向量;

$\{Q\} = \{Q_1 + A_1 F A_3^T H_{f3}, Q_2 + A_2 F A_3^T H_{f3}\}^T$, A_1, A_2, A_3 分别为 $N_1 \times M$, $N_2 \times M$ 和 $N_3 \times M$ 阶衔接矩阵, Q_1, Q_2 分别为内结点和第二类边界点上的源汇项, H_{f3} 为第一类边界点上的水头矢量, $F = \text{diag}(F_1, F_2, \dots, F_j, \dots, F_M)$, $F_j = \gamma b_j^3 h_j / 12 \mu l_j$, h_j 为 j 线元中充水高度, l_j 为 j 线元的长度.

$[D] = \text{diag}[D_1, D_2]$, D_1, D_2 分别为内结点和第二类边界点上的储水矩阵, $D_1 = \text{diag}(d_1, d_2, \dots, d_i, \dots, d_{N_1})$, $D_2 = \text{diag}(d_1, d_2, \dots, d_i, \dots, d_{N_2})$, $d_i = \frac{S_i}{2} \sum_{j=1}^{N'} b_j l_j$, S_i 为裂隙以 i 点为中心的表征单元域内弹性释水系数, N' 为结点 i 的

度数.

$\{dH_f/dt\} = \{dH_{f1}/dt, dH_{f2}/dt\}^T$, $\{H_f\} = \{H_{f1}, H_{f2}\}^T$ 为内结点和第二类边界点水头矢量列阵.

$$[G] = \begin{bmatrix} (A_1 F A_1^T) & (A_1 F A_2^T) \\ (A_2 F A_1^T) & (A_2 F A_2^T) \end{bmatrix};$$

K_0, K_f 分别为岩体裂隙网络初始和任意有效应力作用下的渗透系数;

p_f 为岩体裂隙网络中的渗透水压力; D_f 为与裂隙分布有关的分维数, 无量纲;

$[K_n], [K_m]$ 分别为岩块和裂隙网络节理元的总刚矩阵;

$\{\sigma\}, \{\sigma_f\}$ 分别为岩块和裂隙网络中的应力列阵;

$[D], [D_f]$ 分别为岩块和裂隙网络的弹性矩阵;

$[B], [B_f]$ 分别为岩块和裂隙网络的几何矩阵;

$\{U\}, \{U_f + U_p\}$ 分别为岩块和裂隙网络的位移列阵, 其中 U_p 为裂隙网络中地下水渗透压力产生的岩体裂隙位移量;

$\{F_f\}$ 为裂隙网络受到的外力;

U_{pz} 为裂隙面法向位移量;

U_{px}, U_{py} 为裂隙面切向位移量;

ν 为裂隙岩体的泊松比;

E 为裂隙岩体的弹性模量.

9.8.5.4 双重介质岩体渗流场与应力场的耦合模型

对于裂隙岩体来说, 由于裂隙的切割, 从力学和水力学性质上讲, 出现了岩块和裂隙两种介质, 依据岩块中空隙结构和渗流特点的差异性, 将岩体系统分成裂隙网络系统(忽略岩块中的渗流, 仅在裂隙网络中发生渗流), 狭义双重介质(岩体可看作由非连续的裂隙网络和具各向同性的孔隙岩块组成), 以及广义双重介质(岩体可看作由非连续的裂隙网络和具各向异性的等效裂隙岩块组成). 依据岩体系统中岩块和裂隙网络的组成特点, 分别研究岩体狭义双重介质和广义双重介质渗流场与应力场的耦合模型. 前者可将(9-53)式的裂隙网络模型(裂隙子系统)和(9-50)式的连续介质模型(岩块子系统)组合在一起, 构成岩体狭义双重介质渗流场与应力场的耦合模型; 后者可将(9-53)式的裂隙网络模型(裂隙子系统)和(9-51)式的等效连续介质模型(岩块子系统)组合在一起, 构成岩体广义双重介质渗流场与应力场的耦合模型.

以上的岩体渗流场与应力场耦合的模型, 可用有限元数值解法进行计算, 用迭代法求解, 也可组合刚度矩阵和渗透矩阵统一求解, 但要注意求解方程组时出现的

病态方程问题。

岩石力学中的耦合分析问题是日前研究的热门课题,还有许多问题值得进一步深入研究,解决耦合问题的难点是:①岩体结构的定量描述;②应力与渗流关系、应力与温度关系以及温度、化学作用、应力及渗流之间相互作用机理及关系;③工程应用的定量分析。

9.9 其 他

以上介绍的是岩石力学研究新进展的几个主要问题,每一个内容都形成了岩石力学研究的一个新的学科方向。例如,分形岩石力学、智能岩石力学等,这些已在解决复杂的岩石工程问题方面起到了重要的作用。实际上,岩石力学研究的主要成就还远远不止这些。

环境对岩石的破裂性能的影响逐渐受到人们的重视。环境中腐蚀物质的化学反应、应力腐蚀,加快了岩石的破裂,导致最终的失稳。因此,研究环境对岩石破裂特性的影响规律,评价环境影响下的岩体的长期稳定性、长期强度,已成为岩体工程的开发领域中的一个重要的研究课题。例如,湿润条件下的破坏韧性值比干燥条件下的要低,裂纹扩展速度加快。Lajtai 等报告了水对花岗岩时效变形的影响。Rebinder 等探讨了化学环境对钻进面上岩石力学性质的影响,比较了几种不同化学药剂的作用及其机制、用 Griffith 强度理论对由于化学物质的吸附使得矿物表面能降低、促进裂纹扩展等进行了说明。但是,当岩石钻进过程时间较短时,新裂纹的形成与新形成裂纹的化学物质的吸附作用以及发生速度还未很好地弄清楚。上述研究表明了环境对岩石力学性质的影响,但对其影响机制未很好地阐明,对破裂过程的模拟和预测还没有得到令人满意的结果。

为了说明化学环境条件对岩石的破裂性质的影响,实施了双扭转(double torsion)、国际岩石力学学会推荐的标准三点弯曲、单轴压缩、多阶段三轴压缩试验,对岩石在不同的化学环境下的破坏过程进行了声发射监测。为了说明岩石力学性质与 ζ 电位之间的关系,对不同的岩石和化学溶液组合进行了 ζ 电位测试。发现:与空气侵蚀条件相比,裂纹尖端的水或化学溶液使岩石的破裂韧度明显地降低;应力腐蚀破裂也明显地受到化学环境的影响,并依赖于 ζ 电位;抗拉强度明显地受到化学集结物的影响,并依赖于 ζ 电位,而三轴强度不会因化学集结物的变化而明显地变化。

对双抗扭试验测得的大岛花岗岩在蠕变、应力增加和松弛过程的声发射随应力演化的行为分别进行了时间分形分析。结果表明:无论是受化学溶液、水、还是空气的侵蚀,大岛花岗岩在蠕变、应力增加和松弛过程中都表现有时间分形特征;个别具有单一分形结构,大多数具有多重时间相关分形结构。这种分形特征因花岗岩

试件的各向异性、受力状态和过程以及受侵蚀的环境而有所区别.分形维数的改变与岩石系统状态的演化有对应关系,如系统临近破坏,分形维数就降低.

参考文献

- [1] 冯夏庭,王泳嘉.采矿工程智能系统.冶金工业出版社,1994
- [2] 冯夏庭.智能岩石力学导论.科学出版社,2000
- [3] 谭以安.模糊综合评判在地下峒室岩爆预报中的应用.第二次全国岩石力学与工程学术会议论文集,知识出版社,247~253,1989
- [4] 姚建国等.矿压显现预测的自适应模式识别方法研究.煤炭科学研究总院,1994
- [5] Feng Xia-Ting, Wang Yongjia, Yao Jianguo. A neural network model on real-time prediction of roof pressure in coal mines. *Int. J. of Rock Mech. Min. Sci.*, 33(6): 647-653, 1996
- [6] Feng Xia-Ting, M. Seto, K. Katsuyama. Neural dynamic modeling on earthquake magnitude series. *Geophysical Journal International*, 128: 547-556, 1997
- [7] Feng Xia-Ting, M. Seto. Fractal structure of time distribution of rock microfracturing. *Geophysics Journal International*, 136(1): 275-285, 1999
- [8] 冯夏庭、张治强.位移反分析的进化神经网络方法研究.岩石力学与工程学报, 18(5): 529~533, 1999
- [9] 谢和平.岩石、混凝土损伤力学.中国矿业大学出版社,徐州,1990
- [10] 谢强,姜崇喜,凌建明.岩石细观力学实验与分析.西南交通大学出版社,1997
- [11] 杨卫.细观力学和细观损伤力学,力学进展,22(1): 1~9, 1992
- [12] Kranz, R. L., Microcracks in rocks: a review, *Tectonophysics*, 100: 449-480, 1983
- [13] 雷兴林,马瑾,楠濂勤一郎等.三轴压缩条件下粗晶花岗岩闪长岩声发射三维分布及其分形特征.地震地质, 13卷2期, 97~106, 1991
- [14] 葛修润,任建喜,蒲毅彬,等.岩石细观损伤扩展规律的CT实时试验.中国科学(E辑), 30(2): 104~111, 2000
- [15] 许彦卿,丁卫华,蒲毅彬,等.压缩条件下岩石密度损伤增量的CT动态观测.自然科学进展, 9: 830~835, 2000
- [16] 庄天戈.CT原理与算法.上海交通大学出版社,1992
- [17] Takashi IKEDA, Koichi KOTANI, and Yuichiro MAEDA, et al.. Preliminary Study on Application of X-ray CT Scanner to Measurement of Void Fractions in Steady State Two-Phase Flows, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 20(1): 1-12, 1983
- [18] 谢和平.分形-岩石力学导论.科学出版社,1996
- [19] 殷有泉,张宏.模拟地震的应变软化数学模型.地球物理学报, 25(5): 414~423, 1982
- [20] 王来贵,黄润秋,王泳嘉,章梦涛.岩石力学系统运动稳定性及其应用.地质出版社,1998
- [21] 黄润秋,许强.工程地质广义系统科学分析原理及应用.地质出版社,1997
- [22] 殷有泉.地震过程中的突变.现代力学与科技进步, 304~308, 1997
- [23] Yishan Pan & Mengtao Zhang. Study of Chamber Rockburst by Cusp Model of Catastrophe Theory. *Applied Mathematics and Mechanics*, Vol. 15 No. 10, 1994
- [24] Hirata, T., T. Satoh, and K. Ito. Fractal structure of spatial distribution microfracturing in rock, *Geophys. J. R. astr. Soc.* 90: 367-374, 1987
- [25] 仪垂祥.非线性科学及其在地学中的应用.北京:气象出版社,1995

-
- [26] 苗天德. 滑坡分析预报的理论模式. 塑性力学与地球动力学文集. 北京大学出版社, 1990
- [27] 陈学忠, 井祥础. 非线性科学在地震研究中的一些应用. 地球物理学进展, Vol. 9, No. 2, 100~109, 1994
- [28] 刘元斌, 陈虬, 陈大刚. 非线性随机动力系统的稳定性和分岔研究. 力学进展, Vol. 26, No. 4, 437~452, 1996
- [29] 郑颖人, 刘兴华. 近代非线性科学与岩石力学问题. 岩土工程学报, Vol. 18, No. 1, 98~100, 1996
- [30] 郑哲敏, 周恒, 张涵信, 黄克智, 白以龙. 21 世纪的力学进展趋势. 力学进展, 25(4), 433~441, 1995
- [31] 仵彦卿, 张倬元. 岩体水力学导论. 西南交通大学出版社, 1995
- [32] 仵彦卿. 岩体水力学基础(一), 岩体水力学基本问题. 水文地质工程地质, No. 6, 24~28, 1996
- [33] 王恩志等. 裂隙网络地下水流数值模型及非连通裂隙网络水流的研究. 水文地质工程地质, 1: 12~14, 1992