

矿山岩体力学及工程的研究进展与展望

谢和平

(中国矿业大学北京校区, 北京 100083)

[摘要] 文章针对采矿工程的实际问题, 综述了矿山岩体力学理论与应用的研究进展, 主要内容包括矿山岩体力学的损伤研究与应用、矿山岩体力学的分形研究与应用和矿山岩体力学损伤与分形研究的工程应用; 讨论了矿山岩体力学今后的研究方向, 即深部开采带来的工程灾害防治、开采方法选择的科学问题与关键技术措施。

[关键词] 矿山岩体力学; 研究现状; 展望

[中图分类号] TD31 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2003)03-0031-08

1 概述

中国是世界上少数几个一次能源以煤为主的国家。中国的一次能源中煤炭约占74%, 它提供了78%的发电能源、70%的化工原料和60%的民用商品能源。在探明的化石能源中煤炭占94.3%, 石油天然气仅占5.7%。尽管煤炭在一次能源中的消费比重将逐年下降, 但并不能动摇煤炭的主导地位, 根据有关资料, 预计到2020年一次能源中煤炭占有的比例约为68%, 2050年仍占50%左右。因此为了满足国民经济建设的需要, 在今后相当长的历史时期内仍需保证煤炭的高产稳产。但目前我国煤矿的安全状况不容乐观, 百万吨死亡率高于发达国家几十倍甚至上百倍之多。

煤矿工程灾害事故主要有煤与瓦斯突出、顶板事故、水灾、火灾、粉尘爆炸等, 这些灾害事故的预测、预报、防治与人们对煤岩体物理力学行为的认知水平密切相关。岩体在掘进与开采前处于平衡状态, 人为的采矿工程活动打破了这种平衡, 致使煤岩体产生变形、移动与破坏, 这些工程灾害事故发生的本质就是岩体力学问题, 因此矿山岩体力学既是采矿工程的应用基础理论, 更是采矿工程设

计、矿山安全事故机理分析的必要手段和方法。然而矿山岩体力学面对采矿工程的环境和条件, 其研究不是现有力学理论所能解决的, 具有鲜明的特殊性: a. 受力状况测不准; b. 采矿工程处于卸荷力学状况; c. 研究对象大都是无限体问题; d. 采矿工程面对复杂的环境。

笔者综述了矿山岩体力学理论与应用研究进展, 既涉及了矿山岩体力学中一般力学的固有研究理论与方法, 又突出了采矿工程的特殊性。主要内容包括矿山岩体损伤力学及其应用、矿山岩体力学的分形研究与应用、矿山岩体力学损伤与分形研究的工程应用等。

2 矿山岩体损伤力学及其应用

在矿山开采过程中, 周围裂隙岩体受采动影响不断演化导致灾害性事故。我们已在20世纪80年代建立了矿山裂隙岩体宏观损伤力学模型, 考虑到裂隙岩体中裂隙分布, 在考虑大变形的基础上, 引进损伤力学系统, 研究了岩体的力学行为, 推导出损伤的状态方程^[1]:

$$d\sigma = \tilde{C}:ds + \frac{\partial \tilde{C}}{\partial D}:s:dD = \tilde{C}:ds - 2M^{-1}:$$

$$\frac{\partial M}{\partial D} : \sigma : dD, \quad (1)$$

$$\dot{Y} = -2M^{-1} : \frac{\partial M}{\partial D} : \sigma : s. \quad (2)$$

据此预测的岩体单轴压缩下的应力应变曲线与实验曲线具有很好的一致性, 中科院岩土所根据该模型建立的盐岩蠕变本构关系可很好地反映盐岩蠕变的全过程, 即瞬态蠕变、稳态蠕变及加速蠕变(见图 1), 从实际上验证了该损伤能量耗散模型的正确性。

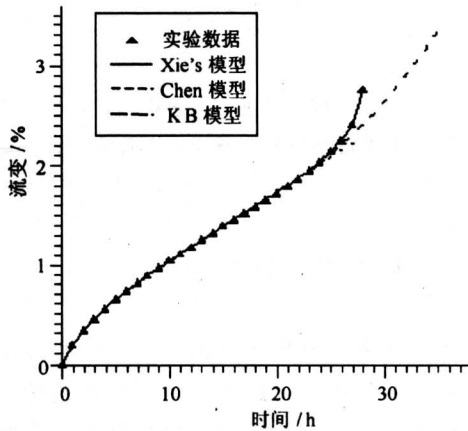


图 1 单轴压缩下盐岩蠕变实验值与理论值的比较

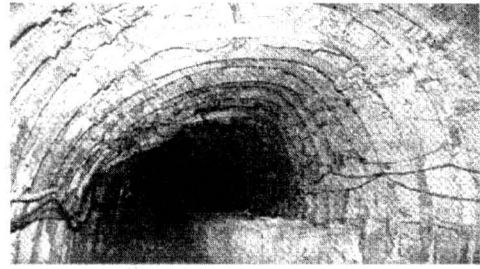
Fig.1 Comparison of theoretical values with experimental results of salt rock under uniaxial compression

此外, 我们还提出了岩石蠕变非线性大变形损伤力学理论及有限元数值方法, 成功预测了采动围岩的损伤大变形程度和蠕变稳定过程。例如, 把上述理论成果与新奥法结合, 在河南省鹤壁矿务局两个矿井用巷道支护设计代替原支护设计中的 U 型钢支架, 有效地控制了巷道围岩变形, 取得了近千万元的经济效益。图 2 为河南鹤壁矿务局第 10 煤矿的 -575 m 水平转载皮带巷、埋深 725 m 的支护效果对比: 图 2a 为原支护效果, U 型钢支架扭曲变形, 巷道表面混凝土剥落; 图 2b 为现支护效果, 取消了原设计中的 U 型钢支架, 方案施工 2 年后巷道保持稳定, 表面完好。

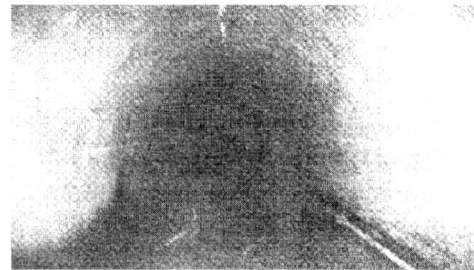
3 矿山岩体力学的分形研究与应用

采矿工程和岩体工程中经常遇到断层、节理、破碎断裂、矿体块度控制等非连续行为, 在岩石损伤力学描述岩体整体宏观连续性行为的基础上, 我们引入分形方法对破断岩体的非连续行为进行研

究, 并在破断岩体工程中得到了应用。



a 原支护效果



b 现支护效果

图 2 支护效果对比

Fig.2 Comparison of tunneling results between initial plan (a) and current plan (b)

3.1 裂隙岩体断裂、裂纹扩展过程的分形研究

3.1.1 裂纹临界扩展力的分形研究^[2] 对岩石断口的微观分析发现, 裂纹扩展路径十分不规则, 据此提出裂纹扩展的分形模型(见图 3), 得出裂纹扩展的临界力

$$G_{crit} = 2[L(\epsilon)/L_0]r_s. \quad (3)$$

式中 L_0 为裂纹的表观长度, r_s 为单位宏观量度断裂面积的表面能, $L(\epsilon)$ 为裂纹的实际长度, 用分形理论表示为

$$L(\epsilon) = L_0^D \epsilon^{(1-D)}. \quad (4)$$

式中 L_0 为裂纹路径的直线长度, D 为裂纹的分形维数, ϵ 为测量码尺。

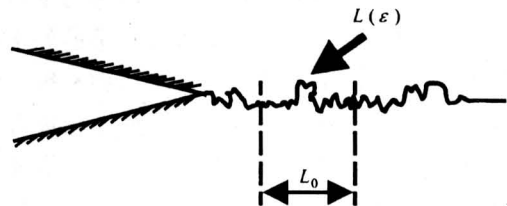


图 3 岩体裂纹扩展的分形模型

Fig.3 Fractal model of crack propagation in rock

应用该理论对岩体穿晶断裂、穿晶沿晶耦合断裂进行分析，分析结果与实测值基本相符，并且对同一晶粒尺寸最易出现的断裂形式是沿晶断裂和沿晶与穿晶的耦合断裂，解释了多年来人们无法定量解释的断裂现象。

3.1.2 裂纹分叉增韧的分形研究 裂纹分叉的几何非规则性是材料的物理力学、变形破坏和细观结构效应的综合反映，是岩石材料断裂的普遍现象。我们根据裂纹分叉群的自相似特征，建立裂纹分叉的分形模型，得出^[3]

$$\frac{K}{K_0} = \left[2 \cos \frac{\pi\beta}{2} \right]^\varphi,$$

$$\varphi = \frac{1}{2} \left(\ln 2 / \ln \left(2 \cos \frac{\pi\beta}{2} \right) - 1 \right). \quad (5)$$

式中 K 为材料断裂韧性， K_0 为没有考虑分叉不规则性的断裂韧性。该分析结果与实验具有很好的一致性，即分叉角越小，分叉断裂越易发生，裂纹分叉使材料断裂韧性提高，即分叉可使断裂韧性值增加。

3.1.3 裂纹动静态扩展的分形研究 长期以来，学术界将裂纹扩展的路径假设为一条平直的直线，一直无法解释实验观测到的裂纹扩展速率只有 Rayleigh 波速一半这一现象。大量试验表明，在快速断裂中，即便是脆性材料也会产生粗糙的断裂表面和不规则的扩展路径。根据建立的裂纹扩展分形模型（见图 3），导出相应的裂纹扩展速率比^[4]

$$v/v_0 = (d/\Delta a)^{1-D}. \quad (6)$$

式中 v_0 为表观裂纹扩展速度， v 为分形裂纹扩展速度， Δa 为裂纹扩展步长， d 为岩石晶粒尺寸。

裂纹扩展的分形模型考虑了不规则裂纹的长度效应和弯折效应，更好地描述了分形裂纹扩展中裂纹速度、裂纹长度和裂纹弯折角对动态应力强度因子的影响^[4]。从表 1 可以看出理论与实验结果一致，很好地解释了大多数实验观察到的裂纹扩展速度 v_0 仅是 Rayleigh 波速 C_r 的一半左右的实验现象，揭示了实验测定 v_0 总是明显低于 C_r 的物理本质。

表 1 裂纹扩展速度实验值与理论值的对比

Table 1 Comparison of crack propagation between theoretical values and experimental results

分维 D	实验值 v_{exp}	Xie 公式	Freund 公式	Watanabe 公式
1.255	0.32	0.301	0.97	0.65

3.2 节理断层的分形特征与分形描述

天然岩体中节理十分发育，由于岩体节理的强度和刚度通常比岩体本身低一个甚至几个数量级，因此对岩体节理力学行为的研究一直是岩体工程中一个十分富有挑战性的课题。根据大量岩体节理的表面形貌特征，发现可以用广义的 Koch 曲线生成元来模拟节理的空间构形。基于此，建立了一个描述节理面粗糙性的分形模型（见图 4），并根据对标准 JRC 曲线的回归分析，得出了如下统计关系：

$$JRC = 85.2671 (D - 1)^{0.5679}, r = 0.99. \quad (7)$$

式中 C_{JR} 为节理粗糙度系数， D 为节理粗糙性的分形维数， r 为相关系数。

与真实值对比表明，该模型（式（7））可以准确地描述出节理表面的粗糙度，而且描述模型仅需两个统计参数，简单易行。

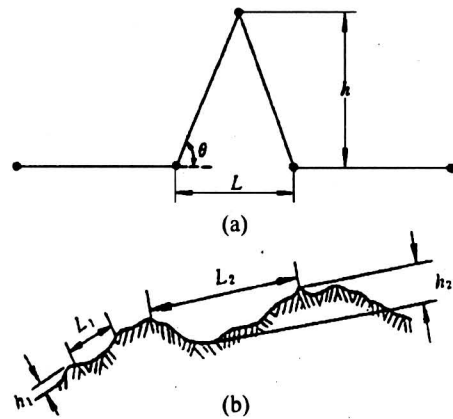


图 4 分形节理生成元 (a) 和岩体节理的分形模型 (b)

Fig.4 Generation of fractal joint (a) and fractal model of rock joint

图 4 中的分形模型是对节理表面一维剖线的描述，但对二维表面的直接量测学术界一直没有科学客观的方法。为此，提出了一种直接计算节理表面分形维数的方法——投影覆盖法（projective covering method），见图 5。通过这种方法，成功地直接计算了粗糙表面的分维，解决了学术界一个长期悬而未决的难题。并据此分析了节理表面形貌的多重分形行为^[5]。

此外，还提出了断层节理表面形貌生成的分形插值方法。如根据断层露头 and 钻孔提供的少量信息生成整个断层表面形貌的分形插值方法，其结果十分理想（见图 6）^[6]。利用 Mandelbort-Weierstrass 函数生成分形节理，系统进行了分形节理在单压和

压剪载荷作用下节理的应力场分析^[7]。取得的研究成果为节理岩体的工程设计提供了理论依据。

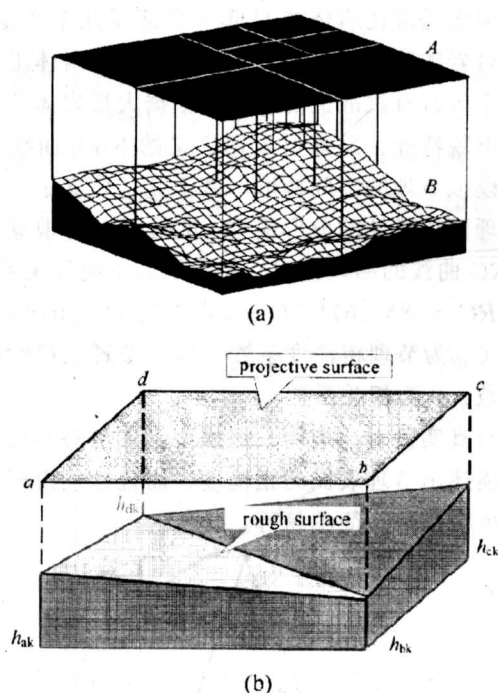


图5 投影覆盖法 (a) 和粗糙表面面积的估算方法 (b)

Fig.5 Schematic view of projective covering method (a) and estimation of rough surface area (b)

3.3 岩体的分形统计强度描述

强度是裂隙岩体最重要的力学参数之一，与金属材料不同的是岩体强度具有离散性和体积效应。在岩体力学研究中，目前大多数都通过宏观实验、用统计的方法来描述，这些分析方法一方面是唯象的和经验的，另一方面没能反映岩体细观结构特征，无法建立岩体细观结构断裂机制与宏观力学性能之间的联系。研究发现，正是由于岩体材料细观结构的不规则性，使得岩体强度呈现明显的离散性和体积效应。目前众多实验表明，岩体中细观裂纹等缺陷的形貌及空间分布具有自相似特征，缺陷的尺度与密度分布服从幂律关系，因此可用分形几何方法来描述。

若裂纹尺度为分形分布，则有

$$N = Ca^{-D} \quad (8)$$

式中 N 是裂纹尺度大于 a (a 为孔隙的特征尺寸，如 Griffith 裂纹半长) 的裂纹数目， D 为分形维数， C 是比例常数。

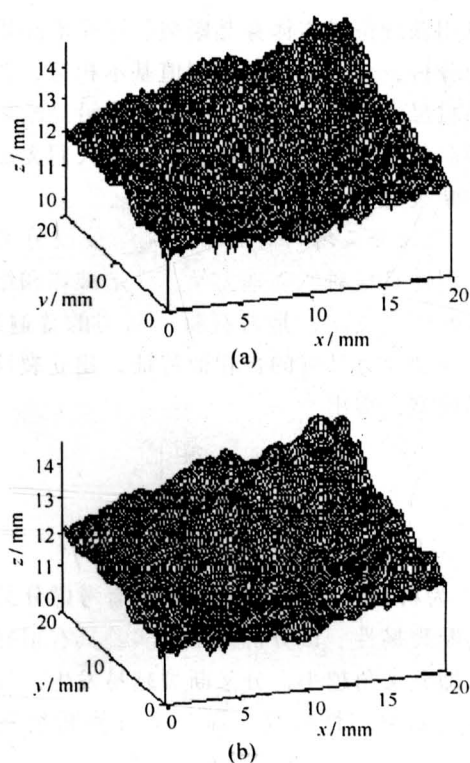


图6 激光扫描获得的真实表面 (a) 和根据 25% 信息用分形插值生成的节理表面形貌 (b)

Fig.6 A real surface topography measured by laser profilometer (a) and generation of rough surface using fractal interpolation based on 25% information content (b)

岩体统计强度表示为^[8]

$$\bar{\sigma} = \frac{\alpha K_{IC}^0}{\pi^{1/2}} l^{-d_f/2} (G\gamma V)^{-1/2D} \Gamma\left(1 + \frac{1}{2D}\right) \quad (9)$$

式中 α 为应力状态因子 (如平面应力状态, $\alpha = 1$), G 为依赖于载荷系统与裂纹方位分布的常数, γ 为裂纹平均密度, V 为岩体体积, l 为组成岩体的晶粒尺度, D 为裂纹分布的分形维数, d_f 为裂纹剖线的分形维数, K_{IC}^0 是常规的断裂韧度, Γ 为 Gamma 函数。此式综合反映了裂纹尺度分布、方位分布和裂纹表面不规则程度对材料强度的影响, 它将材料细观结构特性与材料物理力学性能联系在一起, 使材料强度得到了更深入细致的表述, 而参数 d_f , γ , D , l , G 只需通过材料细观结构的几何分析就可得到。

3.4 岩体破碎块度与能量耗散的分形理论

事实上宏观破碎的过程是能量耗散过程, 并具有分形性质。实验观察表明, 材料的宏观破碎是由

小破裂群体集中而形成的，小破裂又是由更小的破裂群体集聚而来，这种自相似性的行为必然导致破碎后碎块块度和能量耗散也具有自相似的特征。

3.4.1 破碎块度分布的分形度量 岩体块度分布的分形性可以从两方面去理解，一方面破碎过程与岩块形状具有自相似性，碎块尺度分布具有幂律特征，是统计意义上的分形；另一方面，细观结构分析表明，岩体细观结构中孔洞、裂隙为分形分布，而碎块是裂隙扩展的直接结果，因此，分形孔隙岩体结构导致分形破碎块度分布具有内在的、必然的联系。

注意到质量与块度尺寸的相关性 $M \propto R^3$ ，得出

$$D = 3b。 \tag{10}$$

或者由 Weibull 分布推导出

$$D = 3 - \alpha。 \tag{11}$$

式中 b, α 是质量 - 频率分布指数。因此只要测定 α 或 b ，就可以计算出块度分布分维 D 。

3.4.2 爆破能量释放分形研究 煤岩体爆破后形成的碎块在很大的尺度范围内满足分形分布特征，爆破分形破碎的理论模型建立过程如图 7 所示。以此导出，爆破破碎过程中分形维数的碎块构成一个分形体。分形维数的定义为

$$D = 3 \lg p / \lg kD。 \tag{12}$$

推导出分形能量与尺寸的关系为

$$E = Cr^{D-3}。 \tag{13}$$

在煤体破碎一特定尺度 ($r = r_0$) 下，变换可得

$$D = A \lg E_r + B。 \tag{14}$$

式中 $A = \lg E / \lg r$, $B = 3 - \lg C / \lg r$, C 为与材料有关的常数。耗散能密度 $E_r = (起爆药能 E_{DDNP} + 炸药能 E_{RDX}) / 破岩体积 V$ 。式 (14) 表明破碎块度分形维数与耗散能量密度对数成正比，可以作为衡量爆破效果的定量指标。通过一系列实验，证明了上述理论的正确性，并可直接应用于解决采矿工程等工程实际问题。

4 矿山岩体力学损伤与分形研究的工程应用

4.1 坚硬厚煤层放顶煤开采的分形研究与应用

坚硬厚煤层放顶煤开采被认为是煤炭生产的一项技术难题，我们在原煤炭部“九五”科技重点攻关项目“坚硬厚煤层综放开采关键技术研究”的研究中，运用分形方法和能量耗散理论建立了顶煤破

碎块度控制的数学力学模型 (式 (14))，提出和设计一套“顶煤弱化预爆破技术方案”，保证了顶煤放落的块度要求，提高了回收率。

耗散能量密度 E_r 与炸药量的关系为 $E_r = (起爆药能 E_{DDNP} + 炸药能 E_{RDX}) / 破岩体积 V$ ，这样根据式 (14) 来调节炸药量与破碎块度的效果，即实现破碎块度控制。

在实验中用不同炸药量下对同一煤样模型进行爆破测量分析，统计计算结果如图 8，图中显示随着炸药单耗对数值的增加，即耗散能量的增加，块度的分维数随之线性增加，完全证明了我们以上理论分析 (式 (14)) 的正确性。实验爆破后的块度分布随着炸药单耗的增加显得越来越均匀，而破裂的特征尺度逐渐减小，也就是破碎效果越理想。

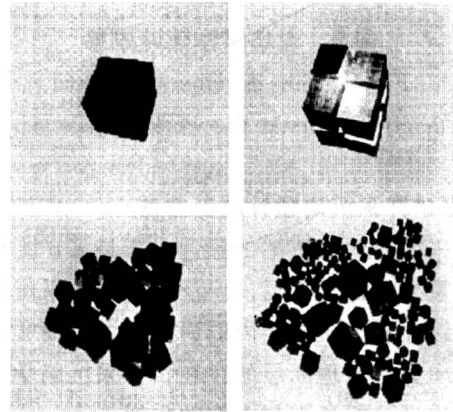


图 7 煤岩破坏过程的分形模型

Fig.7 Fractal model of rock and coal fragmentation process

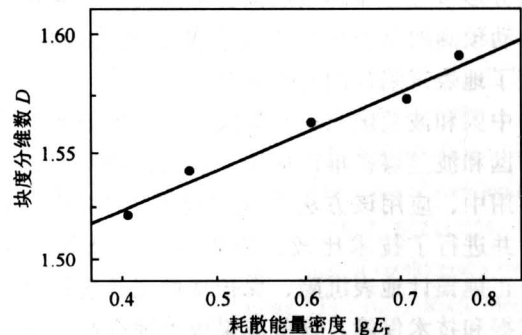


图 8 破碎块度分维与爆炸能耗的关系

Fig.8 Relation between fractal dimension of fragment size distribution and energy density

将上述理论成果应用于大同矿务局忻州窑矿 8911 工作面，在现场实验了 3 种爆破孔网方案。实验表明，三角形布孔效果最佳，裂隙分形维数达

1.607 3; 而五孔布置(中间加空孔)效果最差, 裂隙维数只有 1.478 9; 方形布孔效果居中。图 9 是三角形布孔的现场实施效果图。可以看到, 在以上理论指导下形成的坚硬顶煤软化技术实施后, 顶煤块度得到了有效控制, 现场实测放煤块度为 0.38 m, 顶煤回收率达到 75.7%, 吨煤开采成本平均下降 5.53 元, 取得了非常大的经济效益。



图 9 现场煤体破碎效果

Fig. 9 Size distribution of coal fragments at the working face

4.2 煤矿开采沉陷预计的新方法

开采前对地表沉陷的预计一直是采矿工程界一个十分重要的课题, 目前广泛使用的开采沉陷理论属于连续介质力学框架内的研究成果, 而实际上由于岩层中大量节理断层的存在, 开采沉陷学中的非连续介质理论逐渐引起人们的重视。

对富含断层和节理的非连续矿山岩体, 课题组应用分形方法得到了岩体断层滑移、沉陷量与节理空间分布、粗糙度的定量关系(见图 10)^[9]。提出了以分形节理分布和断层面粗糙度为特征参量的岩体移动预测的新方法, 大大降低了地质勘探费用, 提高了地表沉陷预测的准确性。

中国和波兰国家科委连续三年资助该研究成果在中国和波兰煤矿推广应用。在河南鹤壁矿务局生产应用中, 应用该方法为矿方提供了 13 种开采方案, 并进行了技术比较, 为矿方合理选择开采方案、正确预计地表沉陷, 保护地面建筑物提供了科学依据和技术保障。这些成果极大地提高了安全生产效率, 直接经济效益数千万元以上。

4.3 岩爆预测

岩爆是矿山开采中常见的工程灾害, 其预测预报是个世界性难题。研究表明, 从小尺度断裂(微断裂, mm)到大尺度断裂(地震, km)的损伤演化过程都表现出分形的特征, 由此推断, 像岩爆这样的中等尺度的损伤断裂也可能具有分形的特征。

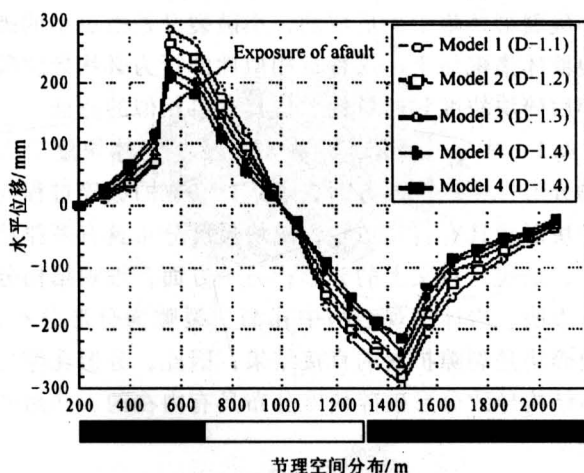


图 10 不同粗糙度条件下断层带附近的地表水平移动值

Fig. 10 Horizontal displacement near a fault with different roughness

微震发生次数与其空间位置的关系是一个分形关系, 预示着分形理论有可能成为研究岩爆的理论工具。

随着采动应力的增大, 岩体局部微裂隙也相应增加, 且在岩体内的某些区域形成集聚区, 该区域的裂纹密度明显大于其背景区域。随着采动应力的进一步增大, 集聚区将经历一个损伤愈合过程, 此时一部分应变能被吸收, 该过程就是声发射探测中的平静期。声发射探测实验表明, 该过程是岩爆发生前的反常现象。损伤愈合过程后, 持续作用的高采动应力使得裂纹非常容易聚集, 此时就可能发生岩爆。我们得出一般的统一表达式^[10]为

$$D = C_1 \exp(-C_2 E) \quad (15)$$

式中 C_1 , C_2 为随区域和量测尺度变化的常数。

这从物理机理上解释了为什么低的分维值对应一个岩爆或地震。一个低分维值的出现, 意味着岩体内将形成一个大的断裂表面或断裂体积, 则根据声发射事件分布的分维值 D 的减小, 可以预测预报岩爆的发生。

4.4 煤矿粉尘研究

煤矿生产中, 粉尘的危害是最严重、也是最难治理的灾害之一。研究表明, 岩土和煤的颗粒和孔隙都表现出分形特征, 即具有统计意义上的自相似性。分形理论用于对粉尘表面形态进行建模的原理是利用对初始元反复复制生成元的过程来模拟粉尘的尺寸分布和空间构形, 也就是说, 运用分形构造过程来进行模拟。

假设粉尘颗粒符合 Gaudin-Schuhmann 分布，可以推导出

$$s_m = [K_{SV}(3 - D)K^{1-D_s}] / [\rho(4 - D - D_s)] \quad (16)$$

式中 D_s 为粉尘颗粒表面的分形维数，其值为 2~3， K_{SV} 为比表面 - 体积形状因子， ρ 为固体的密度。公式 (16) 提高了理论计算精度，为分析煤矿粉尘危害，改善煤矿生产与安全环境提供了有效方法，该理论工作得到了现场验证。

5 研究展望

随着浅部资源的逐渐减少和枯竭，地下开采的深度越来越大。我国已探明的煤炭资源量占世界总量的 11.1%，而石油和天然气仅占总量的 2.4% 和 1.2%，在今后相当长的历史时期内仍需保证煤炭的高产稳产，但我国的煤炭资源埋深在 1 000 m 以下的为 2.95×10^{12} t，占煤炭资源总量的 53%。目前煤矿开采深度以每年 8~12 m 的速度增加，可以预计在未来 20 年我国很多煤矿将进入到 1 000~1 500 m 的深度。目前大批金属与有色金属矿山也进入采深超过 1 000 m 的深部开采阶段。

我国煤炭资源开发的总体特征是经济相对落后的西部煤层埋藏浅，而东部的部分矿区如开滦、北票、淮南、长广、新汶、徐州等都相继进入深部开采，未来 10 年我国煤矿深部开采的问题将越来越突出；金属矿方面，据不完全统计，国外开采超过 1 000 m 的金属矿山有 80 余座，其中以南非最具代表性。目前，南非绝大多数金矿的开采水平在 1 000 m 以下，其中 AngloGold 公司的西部深水平金矿达到了 3 700 m。另外，加拿大、美国、澳大利亚、印度等国家的一些金属矿采深已超过 1 000 m。我国一些金属矿也相继进入深部开采，如铜陵狮子山铜矿采深已达 1 100 m，山东玲珑金矿采深已达 800 m，抚顺红透山铜矿已进入 900~1 100 m 深度，冬瓜山矿深度达 1 000 m，湘西金矿超过 850 m。

深部资源开采一直是国内外采矿工程界一个十分重要的研究课题，一些在浅部开采中的工程灾害都将在深部开采中以更加明显的方式表现出来，如：巷道变形剧烈，采场矿压显现剧烈，采场失稳加剧，岩爆与冲击地压聚增，瓦斯高度聚积诱发严重安全事故。在深部开采条件下，岩层温度将达到摄氏几十度的高温，造成作业环境恶化。矿山深部开采诱发突水的几率增大，突水事故趋于严重。此

外，井筒破裂、煤自燃发火等事故也大量增加，深部开采对地表环境也往往造成严重损害。如果仍然习惯于浅部开采条件下的地质作用特征和矿山压力显现规律来推断和分析深部开采的安全事故及相关现象，显然远远不够。因此，应予以高度重视并广泛开展研究与探索。

深部与浅部的区别在于“三高”（高应力、高温度和高渗透压）及明显的时间效应。在这样的条件下，煤岩的基本力学行为（即变形特征、破坏特征与强度特征等）都将发生变化，针对这些问题，必须联合国内外有关研究机构和大学，从深部开采中的岩石力学基础科学问题、深部开采诱发的重大工程灾害的机理、预测和控制的科学问题和深部开采的理论与关键技术等方面，来探讨深部开采中的科学问题与工程技术。

参考文献

- [1] 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
- [2] Xie H. Fractals in rock mechanics [M]. A A Balkema Publishers, Netherlands, 1993
- [3] Xie H. The fractal effect of irregularity of crack branching on the fracture toughness of brittle materials [J]. Int J Fracture, 1989, 41(4): 267~274
- [4] Xie H, Sanderson D J. Fractal effects of crack propagation on dynamic stress intensity factors and crack velocities [J]. Int J Fracture, 1995, 74: 29~42
- [5] Xie H, Wang J A. Direct fractal measurement of fracture surfaces [J]. Int J Solids & Structures, 1999, 36: 3073~3084
- [6] Xie H, Sun H, Ju Y, et al. Study on generation of rock fracture surfaces by using fractal interpolation [J]. Int J Solids & Structures, 2001, 38: 5765~5787
- [7] Xie H, Wang J A, Xie W H. Fractal effect of surface roughness on the mechanical behavior of rock joints [J]. Chaos, Solitons & Fractals, 1997, 8(2): 221~252
- [8] Xie H, Gao F. The mechanics of cracks and a statistical strength theory for rocks [J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2000, 37: 477~488
- [9] Xie H, Yu G M, Yang L, et al. The influence of proximate fault morphology on ground subsidence due to extraction [J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1998, 35(8): 1107~1111
- [10] Xie H, Pariseau W G. Fractal character and mechanism of rock bursts [J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1993, 30(4): 343~350

Review and Prospect of Mechanics of Jointed Rock Masses and Its Applications

Xie Heping

(China University of Mining and Technology, Beijing Campus, Beijing 100083, China)

[Abstract] Mechanics of jointed rock masses is a new branch derived from mining engineering and engineering mechanics. Aimed at the practical problems in mining engineering, this paper reviews the recent developments in mechanics of rock masses and its applications, including damage mechanics of rock masses and its applications, and fractal theory and applications of mechanics of rock masses. Moreover, a development tendency of mechanics of rock masses, i. e., the scientific points and key techniques for prevention of engineering catastrophes and selection of mining method of deep mining, is discussed in the paper.

[Key words] mechanics of jointed rock masses; recent development; prospect

地下水渗流数字化动态可视系统通过专家鉴定

2002年12月21日,江苏省科学技术厅邀请国内专家对江苏省农业科学院原子能研究所完成的“地下水渗流数字化动态可视系统”进行了技术鉴定。鉴定委员会专家一致认为:

1. 地下水渗流数字化动态可视系统首次引入高精密的航空定向器,使他下水流速定向的测量精度提高了一个数量级,并且,实现了地理磁偏角的随时校正;还可以以建筑物的方位为零点,进行相对位置的测量,其测量更加准确可靠。应用压力传感技术测量水深,井中水容重和识别地下水水面是先进的,并为能量测量方法中的位能和压能的定量测量打下了基础。从而,使水文地质参数测量的质量和测点的密度有了显著的提高,测量仪器的智能化和数字化功能得到了充分的体现,其理论和技术的创新性,获得了一项国家发明专利和一项实用新型专利。

2. 地下水渗流数字化动态可视系统,是集成航空定向技术、压力传感技术、核探测技术、数字采集与处理技术、水文地质测量和多媒体技术的多学科与多专业相互融合的软硬件成果。探头的数据采集、能量法测量、计算机功能界面显示、水文地质参数计算等一整套动态数字化分析体系,具有技术上的先进性和应用上的广泛性。

3. 在地下水渗流测量中,首次提出了渗流能量测量法。在测点上,同时动态地显示出地下水渗流的位能、压能、动能、容重等物理量的消长量值。

4. 开创性地将这一技术引入到地下铁道、公路桥基和高层建筑等水文地质勘测中,并成功地应用于32项省内外各类重大水文地质工程,创造了巨大的社会效益。该技术拥有自己的知识产权,为我国测井技术的理论研究与应用水平跨入国际先进行列,提高我国在该领域的国际竞争力和科技实力做出了贡献。

5. 地下水渗流数字化动态可视系统是一项创新能力和市场应用价值都很高的科技研究成果,其整体技术达到国际先进水平,智能化地下水动态参数测量仪达到国际领先水平。

(杜国平)