

基于灰度 CT 图像的岩石孔隙分形维数计算

彭瑞东^①, 杨彦从^②, 鞠杨^①, 毛灵涛^①, 杨永明^①

① 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083;

② 中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院, 北京 100083

E-mail: prd@cumtb.edu.cn

2011-04-11 收稿, 2011-07-20 接受

国家自然科学基金青年科学基金(10802092, 50974125)、国家重点基础研究发展计划(2009CB724602, 2010CB226804)、教育部高等学校博士学科点新教师基金(20070290011)和中央高校基本科研业务费专项基金(2009QM03)资助项目

摘要 研究刻画岩石类材料中的孔隙结构特征对于揭示岩石的各种力学行为具有重要意义, 为此将分形理论与数字图像处理技术相结合, 针对工业 CT 扫描得到的岩石切片图像进行了分析, 从中提取研究了岩石的孔隙结构特点, 讨论了孔隙率和分形维数之间的关系. 岩石 CT 图像中各像元的灰度值是对应岩石微元中各物质衰减系数的综合反映, 可以反映出岩石中各种尺度孔隙的影响. 结合实验测定的孔隙率, 采用逆分析的方法可以确定出分割阈值的大小, 从而得到岩石孔隙结构的二值化图像, 为进一步研究孔隙拓扑结构提供基础. 随着孔隙率的增大, 孔隙结构的分形维数也变大. 而且在孔隙率相同的情况下, 孔隙结构的分形维数也不尽相同. 孔隙结构越复杂, 其分形维数越大. 实验证实, 基于灰度 CT 图像的岩石孔隙分形维数是岩石孔隙率等参数的有效补充, 可以更好地表征岩石孔隙结构的分形特征.

关键词

岩石
孔隙
CT
分形维数
图像处理

作为一种复杂的地质材料, 岩石具有非均质的不连续的多相复合结构, 其内部大量存在不同尺度的不规则的孔隙, 从而影响到岩石类材料的物理、力学和化学性质, 如强度、弹性模量、渗透性、电导率、波速、颗粒表面吸附力、岩石储层产能等等, 认识和定量刻画岩石类材料中的孔隙结构特征及其演化特性, 对于解决石油、采矿、冶金、土木和水利工程中的实际问题具有十分重要的意义. 围绕孔隙结构的描述问题, 迄今为止已经提出 30 多种描述参数^[1,2], 其中应用较多的包括孔的密度或体积百分数(孔隙率)、孔径及其分布、比表面积等等, 这些参数主要是从宏观平均的角度出发来描述孔隙结构. 孔隙率是最易获得的基本参量, 而且其影响权重超出所有的其它影响因素, 因此相关研究也最为丰富. 孔隙率的测定方法包括显微图像分析法、称重法、浸泡法、压汞法等等, 许多文献对此进行了详细讨论^[1,3]. 岩石类材料中的孔隙结构十分复杂^[4-6], 为了从不同尺

度上给出孔隙结构的精确描述, 一些先进的分析测试手段被逐渐引入^[7]. 岩石类材料的孔隙形貌和微结构可用不同放大倍数的光学显微镜或扫描电子显微镜来观察分析, 还可通过 X 射线透视检查法获取, 更为有效的方法是借助计算机断层扫描技术 (computerized tomography, CT) 得到材料内部的密度分布形态. 此外, 也有研究者提出通过超声波或核磁共振来检测. 不同的实验测试方法, 所得结果也存在一定差异, 但这些具有差异的结果之间应该存在某种内在联系, 它们是对某一具体孔隙结构从不同角度给出的描述.

自从 X 射线医用 CT 发明以后, 材料科学实验就很快利用 CT 技术检测材料的缺陷和内部结构. 20 世纪 80 年代中后期医用 CT 和工业 CT 已被用来探测岩石内部结构, Raynaud 等人^[8]采用医用 CT 扫描得到均质石膏、花岗岩、砂岩、白云岩等几种岩石试件的断面 CT 图像, 可以看到清晰的岩石内部裂隙. Buyu-

kozturk^[9]采用 CT 扫描得到混凝土试件中骨料、砂浆、孔洞清晰的 CT 图像。20 世纪 90 年代初国内采用医用 CT 探测冻土的内部结构,分析冻土蠕变的细观机制^[10]。杨更社等人^[11,12]在国内首次采用该 CT 机对岩石进行了压缩过程中的细观结构变化的观测,有了初步的实时 CT 观测思路。1999 年,葛修润等人^[13,14]设计与医用 CT 配套的专用静态加载设备,明确提出加载过程中的 CT 实时扫描问题并成功解决,称之为动态的 CT 实验。此后还有学者^[13-19]借助 XCT 对岩土材料在不同荷载作用下的细观力学行为进行了研究,探讨了 CT 数的大小及分布规律与岩石材料损伤状态之间的关系,从而在缺陷或裂纹等的演化机理和损伤本构关系两大领域取得了一系列进展。鞠杨等人^[20-22]通过砂岩及泡沫混凝土的 CT 扫描实验研究了岩石孔隙的几何特征与分布规律,建立了岩石孔隙结构的统计模型并结合有限元软件进行了数值模拟研究。这些研究成果显示了 CT 技术在细观损伤研究领域的重要作用,但随着研究的深入,现有技术的一些不足也逐渐显现出来。一方面,如何提高 CT 图像的分辨率和成像速度成为大家关注的焦点,岩石类材料中的大量微细缺陷有赖于高分辨率的 CT 设备来捕捉,为此需要利用微米甚至纳米精度的 CT 设备进行快速扫描和重构,同时需要不断优化改进重构算法或加强对 CT 图像的后处理以减小伪影及噪声的影响;另一方面,能否从大量实验中提取出共性的问题,从被动地描述岩石类材料的损伤行为发展到建立具有一定可控性的损伤模型来预测材料的损伤行为,这成为今后研究的重点,为此迫切需要加强对 CT 图像的识别和统计分析,以便藉此构筑岩石类材料的孔隙结构模型,并探讨影响孔隙结构特征的控制参数。

Mandelbrot 创建的分形几何理论为描述孔隙分布的不规则性提供了科学的手段。国内谢和平最早将分形理论引入到岩石力学的研究中,提出了分形岩石力学的研究思路^[23,24]。此后许多学者对岩石类材料中孔隙结构的分形特征进行了研究,指出孔隙分布具有统计意义上的自相似性,并引入分形维数描述了孔隙的分布特征。杨培岭等人^[25]用粒径的重量分布取代粒径的数量分布来描述土壤分形特征的模型。贺承祖等人^[26]提出根据毛管压力曲线和 J 函数曲线的分形几何公式计算储层岩石孔隙的分维数。李廷芥等人^[27]采用盒维数法计算了岩石破坏过程中的裂纹分形维数,并讨论了分形维数值与岩石组成

及应力状态之间的关系。连建发等人^[28]提出用分维数来评价岩体质量,以弥补岩石质量指标 RQD 在评价岩体质量中的某些不足。薛茹等人^[29]根据压汞实验数据对土中孔隙分布的多重分形特征进行了研究。方红卫等人^[30]通过氮气吸附-脱附实验利用不同模型计算得到了泥沙颗粒的分形维数。周宏伟等人^[31]引入边界形貌的分形维数来定量描述渗流边界复杂程度。张季如和陶高粱等人^[32,33]以 Sierpinski 垫片和 Menger 海绵模型为基础,提出了孔隙体积分形模型、颗粒体积分形模型及孔径或粒径分布分形模型,并结合土体 SEM 实验进行了验证。分形维数的计算也被用于岩石 CT 图像的分析中,但目前几乎都是先将灰度 CT 图像转化为黑白位图再分析计算其分形维数^[34-39]。对于具有较大孔隙率和简单孔隙结构的岩石,容易借助阈值分割、边缘检测等方法得到黑白位图,这一转化过程带来的误差也可忽略。但对于许多具有复杂孔隙结构的岩石,在转化为黑白位图的过程中,一些孔隙结构的细节特征被忽略,无法在后续的分形维数分析计算中加以考虑。如能直接基于灰度 CT 图像分析计算岩石孔隙结构的分形维数,不仅可以避免在对图像进行二值化的过程中引入的干扰及误差,而且也有利于简化分析流程。本文将针对岩石灰度 CT 图像的本质特点及岩石孔隙结构的分形特征展开研究,探讨直接计算岩石灰度 CT 图像分形维数的方法,并藉此刻画岩石孔隙结构的分形特征。

1 CT 扫描原理与实验结果

1.1 实验设备与样品制备

CT 是电子计算机断层扫描的简称,通常是利用 X 射线穿透物体断面进行旋转扫描。系统通过特定的探测器测量 X 射线穿透被检物体以后的射线强度,同时完成 X 射线机、探测器与被检物体之间的扫描运动,从而获得重建 CT 图像所需的完整数据,最后按照一定的算法利用这些数据重建出物体的断面图像。图 1 所示为典型的 CT 系统组成,从扫描到图像重建都是由计算机来控制 and 完成计算,因此常被称作计算机层析成像。按照扫描运动方式的不同,先后出现五代 CT 系统,扫描速度日渐提高。目前在工业 CT 系统中主要采用的是第三代(平移旋转 TR)及第四代(只旋转 RO)扫描方式,相应地采用平行束重建或扇形束重建算法。

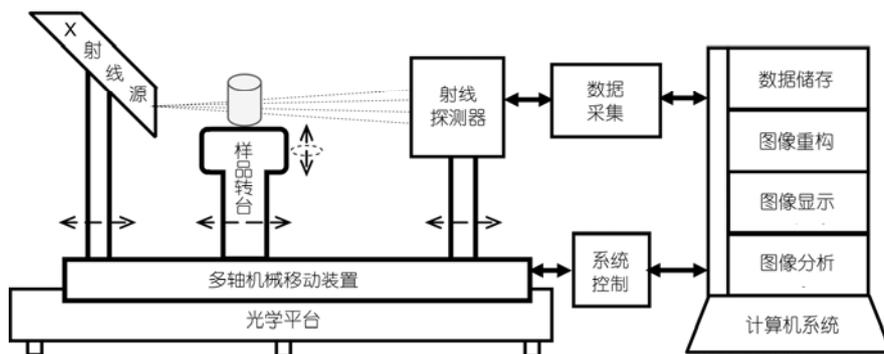


图1 CT系统组成示意图

20世纪90年代以来,国内围绕岩石的CT扫描研究主要在兰州的中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室进行,所用设备为德国西门子的Somaton-plus螺旋CT机,其空间分辨率为0.35 mm×0.35 mm,层析厚度最小为1 mm.为了进一步提高CT扫描精度,胜利石油管理局地质科学研究所引进了ACTIS微焦点X射线计算机层析系统,太原理工大学与中国工程物理研究院应用电子研究所合作研制了μCT225kVFCB型高精度显微CT实验系统,可以分辨微米级的裂隙和孔隙.中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室与美国BIR公司合作研发了ACTIS300-320/225CT/DR高分辨率工业CT实时成像系统(如图2所示),可以快速扫描得到微米量级分辨率的16位CT切片图像.该系统在样品直径为25 mm时,耗时50 s左右可以完成扫描重建基于1440视图的1024×1024像素大小16位灰度图像,切片图像水平分辨率和厚度分辨率均达到10 μm左右.本文实验即在此实验系统上完成.

在给定的CT系统上,CT扫描的分辨率与样品大小有着重要关系,尽可能减小样品尺寸有助于提高最终扫描图像的分辨率.通过对该系统性能的分析,结合目前实验室岩石测试样品的规格,确定采用直

径25 mm,高50 mm的圆柱岩样进行研究.为了分析比较不同孔隙率下岩石孔隙结构的分形特征,选取玄武岩、岩盐、煤、泥岩、砂岩、膏岩、油页岩、人工砂岩、泡沫混凝土九种岩性的岩样进行了测试.样品取芯后将上下断面磨平,以保证垂直放置在CT样品台上并得到一系列同心圆切片.

1.2 CT扫描与成像原理

当一定能量的射线穿越物体时,由于产生光电效应、康普顿效应、电子对效应及瑞利散射等复杂的物理过程,射线部分被反射、散射以及被物质吸收,使得射线强度发生衰减.在均匀材料两边入射和出射的单能窄束X射线强度服从Lambert-Beer's定律,即

$$I = I_0 e^{-\mu \Delta x}, \quad (1)$$

式中 I_0 为入射X射线的强度, I 为出射X射线的强度, Δx 为厚度, μ 称为材料的线衰减系数,这是一个随着X射线能量 E 和材料物质属性而改变的物理量.在电压低于200 kV时,线性衰减系数主要取决于康普顿散射和光电吸收,可由下式确定^[40]:

$$\mu = \rho \left(a + b \frac{Z^{3.8}}{E^{3.2}} \right), \quad (2)$$

式中 ρ 为物质密度, Z 为原子序数, a 为Kline-Nishina系数, b 为 9.8×10^{-24} , E 为X射线粒子能量(keV).若材料在XY平面内不均匀,则衰减系数可表示为 $\mu(x, y, E, Z, \rho)$,反映了X射线与材料产生的一系列相互作用的综合结果.于是可得在某一方向上沿某一路径 L 的总衰减为

$$p = \ln(I_0 / I) = \int_L \mu dl \approx \sum_{i=1}^N \mu \Delta x. \quad (3)$$

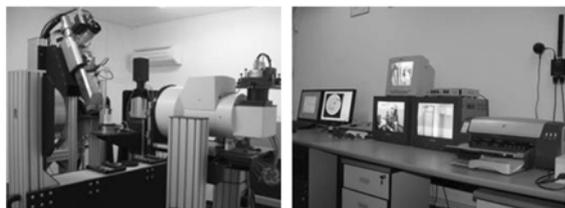


图2 高分辨率工业CT实时成像系统 (ACTIS300-320/225CT/DR)

此式即 X 射线的投影公式, p 称为 X 射线穿透物体后的投影. 因此, 根据一系列的投影值 p 就可求出被积函数 μ , 即得到衰减系数在 XY 平面上的分布, 这也就是 CT 重构图像的原理. 当材料在 XY 平面上被分割为 $N \times N$ 个小单元时, 通过 N^2 次独立测量就可以唯一地求出各个单元的衰减系数, 这也近似对应到各个单元的密度.

在医用 CT 中, 引入 CT 数的定义来描述人体组织的衰减系数相对于水的衰减系数的大小. CT 数也称为 Hounsfield 数, 其定义为

$$\text{CT 数} = \frac{\mu - \mu_w}{\mu_w} \times 1000, \quad (4)$$

式中 μ_w 为水的线衰减系数.

将材料微元的衰减系数或 CT 数按一定的比例转换为灰度值, 就可得到相应的 CT 图像. 由于量子统计规律、部分体积效应、射线多色性和硬化等因素的影响, 还需加以校正以确保 CT 重构图像的像元与材料微元的密度相对应. 由于岩石中的矿物组成、结构、构造不均一, 造成各部位密度的不同, 这反映在 CT 图像中就是各部位灰度值不同. 一般 CT 图像中, 黑色表示物质密度较低, 白色表示物质密度较高, 由黑到白变化表示岩石密度变化.

1.3 岩石样品 CT 扫描切片图像

考虑到试样切片数据的统计性, 扫取了试样中部 10 mm 的区域. 扫描视场为 27 mm, 切片图像大小为 1024×1024 像素, 分辨率为每像素 26 μm , 沿试样高度每隔 1 mm 扫描 1 层, 每个样品得到 10 幅切片图像. 图 3 所示为各个样品其中一层切片的图像. CT 切片图像中各像素点的灰度值反映了该点对应位置的密度大小, 得到的原始 CT 切片图像是 16 位 Tiff 图像, 具有较高的分辨率. 但由于所测样品的密度范围有限, 相对集中在中低密度区域, 因此图像的主观感觉是亮度偏低、对比度偏小.

为了分析 CT 切片数据中像元灰度值的分布情况, 可借助直方图对图像进行分析. 考虑到原始图像四角的颜色是重建图像时直接赋以的黑色或白色, 与扫描对象无关, 只有图像中部的圆形区域才是有意义的数据区域, 因此在统计图像直方图时需将圆形区域外的数据剔除. 另外, 为便于后续的图像分析处理, 考虑到切片数据的统计性, 可以将试样边缘区域裁掉, 只对岩心柱中央的矩形区域进行统计分析, 这

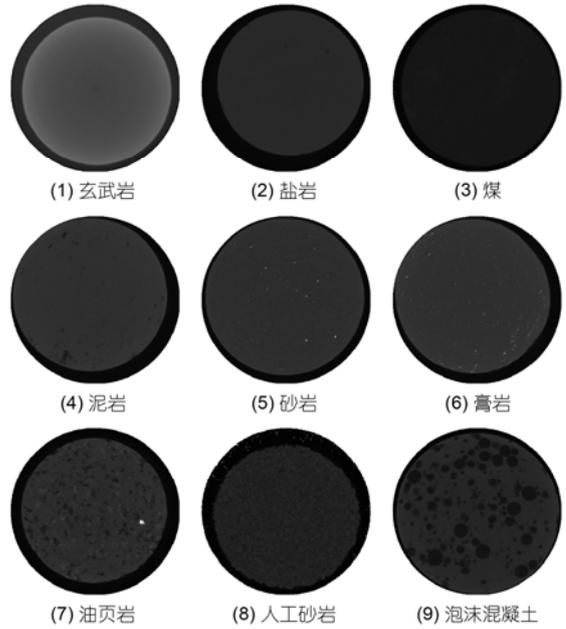


图 3 不同岩石试样的原始 CT 切片图像

也有助于消除扫描时产生的试样边缘伪像的影响. 图 4(a), 4(c)所示为基于 16 位原始 Tiff 图像中央 512×512 像素大小区域计算得到的原始 CT 切片数据灰度直方图, 其他切片的结果与此类似, 灰度值集中在很窄的一个范围内. 因为当前计算机系统在显示图像时只能分辨 8 位灰度图像, 需将试样的灰度分布从 16 位灰度区域映射到 8 位灰度区域. 直接采用通常的线性映射(图 5(a)所示)时不能有效反映原始数据的灰度变化, 为了便于观测, 可采用图 5(b)所示的分段灰度映射, 以提高图像的对比度. 图 4(b), 4(d)所示为采用分段灰度映射后得到的 8 位 CT 图像的灰度直方图, 相应的 CT 图像如图 6 所示. 对比图 3 可以看出, 经过分段灰度映射处理, 图像对比度被有效提升, 各种岩石内部的孔隙结构被形象的展示出来.

2 基于二值化 CT 切片图像的岩石孔隙率分析

岩石中的孔隙使得岩石的密度降低, 因此包含孔隙的岩石微元在 CT 图像中显示为具有较深颜色的像元. 但如前所述, 与 CT 像元相对应的衰减系数并不仅仅取决于岩石微元的密度等物质属性, 而是 X 射线与岩石产生的一系列相互作用的综合结果. 尤其在工业 CT 扫描中, X 射线源的电压电流要根据试样的密度、尺寸不同而加以调节, 探测结果也通常不

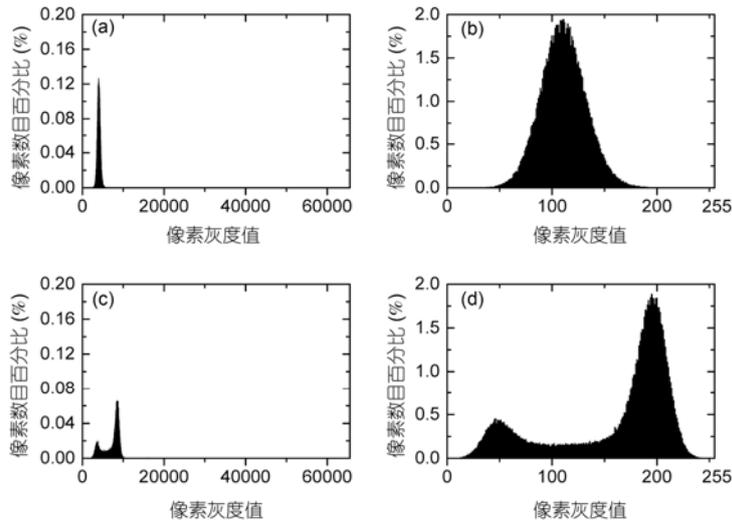


图4 原始16位CT切片数据及映射后8位CT图像的灰度直方图
 (a) 原始16位煤直方图; (b) 映射后8位煤直方图; (c) 原始16位泡沫混凝土直方图; (d) 映射后8位泡沫混凝土直方图

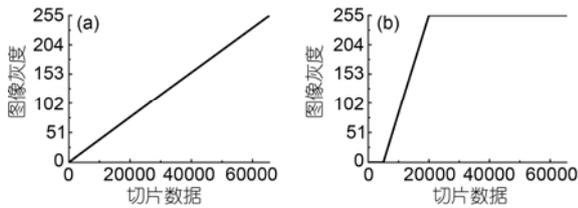


图5 从16位灰度到8位灰度的映射
 (a) 线性灰度映射; (b) 分段灰度映射

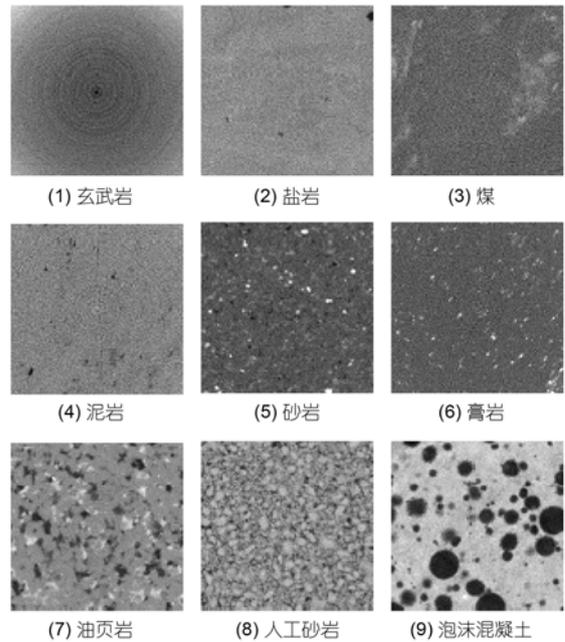


图6 对比度提升后不同岩石试样的CT图像

进行严格地标定, 因此CT切片数据中的灰度值只能相对反映岩石密度的差异, 灰度值绝对大小没有严格的物理意义. 这就意味着不能简单通过比较CT切片数据的灰度值大小来确定像元所表征的是何种物质. 此外, 当像元分辨率较大时, 对应岩石微元中可能含有多种矿物以及孔隙, 此时该像元对应的衰减系数是岩石微元中各种物质的衰减系数的综合反映, 因而像元灰度值也是微元中各物质密度的平均化反映. 为了分析研究岩石中的孔隙结构, 基于图像分析处理的各种方法被加以利用, 如阈值分割、边缘检测、形态学运算(开、闭、腐蚀、膨胀等)、频谱识别等, 进而提取得到了描述岩石孔隙结构的二值化图像.

在二值化岩石孔隙图像的基础上, 可以计算得到岩石的孔隙率, 并定量表征岩石孔隙的拓扑结构. 事实上, CT扫描的优势在于揭示了岩石内部的孔隙拓扑结构, 如孔隙大小、孔隙位置分布、孔隙连通性等, 而传统实验只能确定特定测试条件下的孔隙率

大小. 将CT实验与传统的孔隙率测定实验结合起来, 可以更为有效地分析研究岩石的孔隙结构特点, 有助于从繁复的图像处理中简化出来. 联系二者的一个桥梁就是孔隙率. 基于CT图像计算得到的孔隙率应该与通过传统实验测得的孔隙率是相等的或相当的.

在提取二值化孔隙结构图像的诸多方法中, 阈

值分割是一种简单有效的方法. 在 CT 图像中, 孔隙的灰度值总是最小的. 考虑到低于像元分辨率的孔隙的存在, 以及扫描重建中的噪声影响, 阈值的确定往往十分困难. 有的岩石 CT 图像具有类似图 4(c) 的灰度直方图, 即表现出双峰特性, 此时可采用特定的算法进行阈值分割, 效果较好. 但这种情况往往是在岩石中存在大量较大尺寸的孔隙时才出现的, 此时微元密度主要围绕孔隙和基体两种物质的密度分布, 所以有双峰性. 绝大多数情况下, 岩石内部的孔隙结构十分复杂, 岩石 CT 图像的灰度直方图类似图 4(a) 所示, 没有表现出双峰性, 因此分割阈值的确定难以直接根据灰度直方图得到.

图 7 所示为几种岩石在不同分割阈值下计算得到的孔隙率, 相应的在图 8 中给出了几种阈值下分割得到的二值化孔隙图像. 阈值选得较低时, 孔隙没有被完全提取出来, 计算得到的孔隙率偏低. 阈值选得

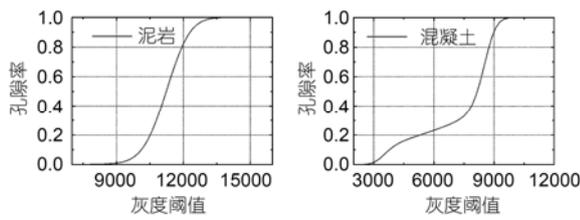


图 7 不同分割阈值下的岩石孔隙率

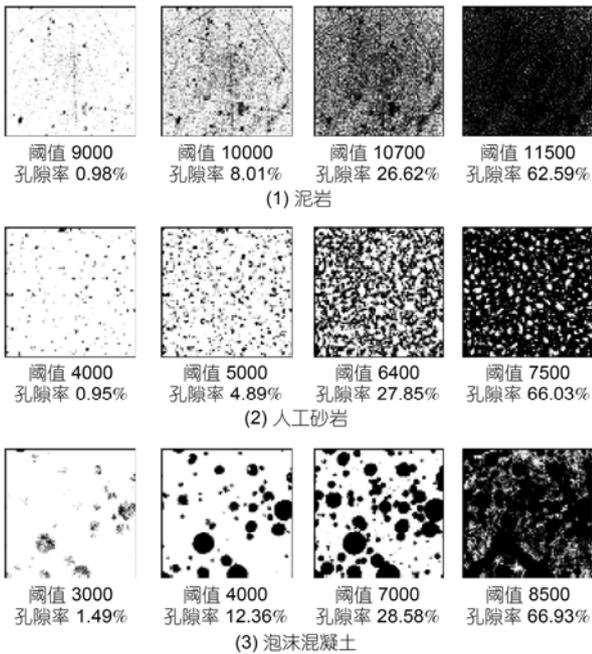


图 8 不同阈值下分割得到的二值化岩石孔隙图像

较高时, 部分基体也被提取出来, 计算得到的孔隙率偏高. 通过孔渗实验测得孔隙率为: 泥岩 26%, 人工砂岩 27%, 泡沫混凝土 28%. 对照图 8 可以看出, 相应于这些孔隙率的阈值分割结果比较理想. 因此在提取二值化孔隙图像时可结合实验测定的孔隙率采用逆分析法确定出分割阈值, 然后分割得到二值化孔隙图像, 如图 9 所示. 为了进一步提高精度, 可以将多层切片数据一起统计, 即计算所有各层切片中小于给定阈值的像元个数.

3 岩石孔隙结构的分形特征与分形维数计算

大量研究表明, 岩石中的孔隙结构具有分形特征, 表现出一定的自相似特性. 在不同放大倍率下观察岩石的孔隙结构, 孔隙相对大小的分布和位置的分布在统计上一致. 而且岩石中孔隙率的计算与孔隙尺寸的范围有密切关系. 当越来越多的微细孔隙被考虑时, 计算得到的孔隙率也将增加. 当只考虑大于某一尺寸的孔隙时, 计算得到的孔隙率就会减小. 因此, 单纯依靠孔隙率和孔隙分布还不足以完全表征岩石的孔隙结构特点. 岩石孔隙结构的分形维数可以有效的反应岩石孔隙结构的分形特征, 基于 CT 图像可以采用计盒维数来表征岩石孔隙结构的分形维数. 目前关于数字图像的分形维数计算还主要集中在对黑白图像的分析处理上, 这就需要通过特定的二值化方法对图像进行预处理后再进行分形维数的计算, 其好处是可以事先将孔隙结构从 CT 图像中提取出来, 但二值化方法的选取会对图像的分析处理产生影响, 有时可能会丢失部分图像细节的信息. 如前所述, CT 图像中各阶灰度值都蕴含着特定的信息, 不同的二值化提取方法会得到不同的孔洞、裂纹等微观形态结构, 然后计算得到的分形维数也就不尽相同了. 下面先讨论一下 CT 图像分形维数的计算方法, 然后分别研究基于二值化图像的分形维数计算以及直接基于灰度图像的分形维数计算.

3.1 基于数字图像的分形维数计算方法

如何描述研究对象的分形维数, 这取决于研究对象的特征以及研究的目的. 而且存在于自然界中的物理分形往往表现出某种随机性和尺度性, 即仅在特定尺度范围内从统计角度上表现出分形特征.

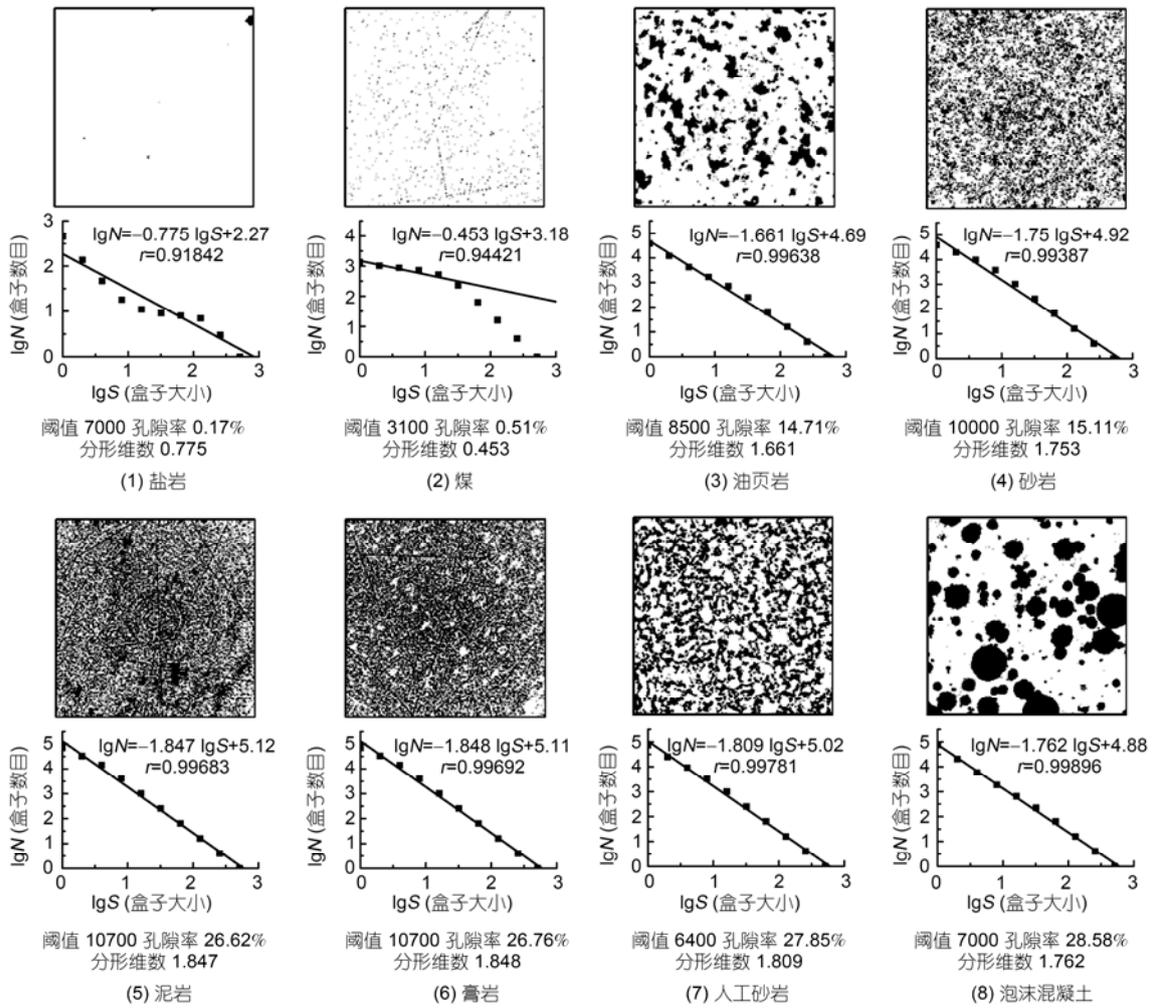


图9 二值化CT图像的分形维数

因此分形维数也有不同的定义方式^[24], 包括 Hausdorff 维数 D_H 、信息维数 D_i 、相似维数 D_s 、关联维数 D_g 、容量维数 D_c 、谱维数、Lyapunov 维数 D_l 等等. 针对不同的研究对象, 可以采用不同的描述方法计算其分形维数. 由于计盒维数(CBD)在数学计算上比较简单, 物理含义也比较直观, 因此得到了广泛应用, 是各个分形研究领域普遍采用的分形维数.

在计算图像的分形维数时, 需要结合图像的色彩模式考虑具体算法^[41,42]. 对于二值化 CT 图像, 颜色值只有两种情况, 因此维数计算可在二维平面空间内实现. 对于灰度 CT 图像, 可把图像看作三维空间 $\{(x,y,z)\}$, 其中 x,y 表示像元在图像平面内的位置, z 表示像元的灰度值, 图像灰度值就形成了凹凸不平的曲面, 于是可基于立体盒覆盖法在三维空间计算图像的分形维数.

考虑一副 $M \times M$ 像素的二值化 CT 图像, 黑色像素表示孔隙. 将图像划分为边长是 δ_k 的网格, 统计有黑色像素的网格的数目 N_{δ_k} , 则当 $\delta_k \rightarrow 0$ 时, $\lg N_{\delta_k} / \lg(1/\delta) \rightarrow D_B$. 因此对于某递减序列 $\{\delta_k\}$, 可以在双对数坐标系中用最小二乘法拟合数据点 $(-\lg \delta_k, \lg N_{\delta_k})$, 当相关系数较大时斜率即是分形维数的近似值. 通常递减序列 $\{\delta_k\}$ 按二等分法选取, 即 $\{M, M/2, M/4, M/8, M/16, \dots\}$.

对于一副 $M \times M$ 像素的灰度 CT 图像, 灰度位数为 16, 即灰度变化范围从 0 到 65535. 则覆盖图像的立方体为一系列底边为 $\delta_k \times \delta_k$ 、高度为 H_k 的盒子. 通常递减序列 $\{\delta_k\}$ 仍按二等分法选取, 相应的盒子高度通过图像的灰度变化范围计算, 即

$$H_k = I_{\max} \cdot \frac{\delta_k}{M} \quad (5)$$

对于不同大小的盒子 $\delta_k \times \delta_k \times H_k$, 覆盖图像区域所需的盒子数 N_{δ_k} 是不同的. 考虑到 CT 图像灰度值的相对特性, 只需用盒子去覆盖像素灰度对应的空间曲面, 即

$$N_{\delta_k} = \sum_{n=1}^{2^{2k}} \left(\frac{\max(I(i, j)) - \min(I(i, j))}{H_k} \right), \quad (6)$$

式中 $I(i, j)$ 为对应 δ_k 大小网格中第 n 个方格的所有像素的灰度值的集合. 利用最小二乘法对标度无关性区域的数据点 $(-\lg \delta_k, \lg N_{\delta_k})$ 进行线性拟合可求出直线方程:

$$\lg N_{\delta_k} = a \cdot (-\lg \delta_k) + b, \quad (7)$$

式中斜率 a 即为孔隙图像的计盒维数 D_{CB} .

3.2 基于二值化 CT 切片图像的岩石孔隙结构分形维数

针对二值化 CT 切片图像计算的分形维数如图 9 所示. 从图中计算结果可以看出, 相关系数基本都在 0.99 以上, 因此计算得到的分形维数是有效的. 玄武岩孔隙率接近于 0, 得到的二值化图像为一纯白图像, 因此分形维数也为 0, 故未在图 9 中列出.

岩盐和煤中的孔隙率也较低, 不到 1%, 计算得到的分形维数均小于 1, 这表明岩盐和煤中的孔隙表现为彼此孤立的微细孔隙.

砂岩和油页岩的孔隙率基本相同, 约为 15%, 但二者的分形维数差异较大, 砂岩为 1.75, 油页岩为 1.66. 因此砂岩的孔隙结构要比油页岩复杂, 这从图 6 和图 9 的图像中也可看出. 油页岩中存在大量的孔隙, 微细孔隙较少; 而砂岩中大孔隙很少, 主要是大量微细孔隙.

泥岩、膏岩、人工砂岩和泡沫混凝土的孔隙率基本相同, 约为 27%, 但它们的分形维数也不同, 泥岩和膏岩为 1.85, 人工砂岩为 1.81, 泡沫混凝土为 1.76. 结合图像可以证实泥岩和膏岩的孔隙要比人工砂岩的孔隙复杂, 人工砂岩的孔隙要比泡沫混凝土的孔隙复杂.

针对二值化 CT 切片图像计算的分形维数有效刻

画了孔隙图像的分形维数, 但计算结果在很大程度上取决于二值化的分割阈值. 以图 8 为例, 采用不同阈值进行分割时, 得到的二值化图像不同, 因而计算得到的孔隙率不同, 分形维数也不同, 如表 1 所示.

以上结果表明, 随着孔隙率的增大, 孔隙结构的分形维数也变大. 而且在孔隙率相同的情况下, 孔隙结构的分形维数也不尽相同, 孔隙结构越复杂, 其分形维数越大. 因此, 孔隙结构的分形维数可以更好地刻画岩石孔隙结构的特点. 尤其是在孔隙率接近时, 分形维数可以有效地表征出不同孔隙结构的复杂程度.

3.3 基于灰度 CT 切片图像的岩石孔隙结构分形维数

为了消除二值化对分形维数计算结果的影响, 直接针对灰度 CT 图像计算了分形维数, 如图 10 所示. 从图中计算结果可以看出, 相关系数都在 0.99 以上, 因此计算得到的分形维数是有效的.

从灰度图像的计算结果发现, 玄武岩、盐岩和煤的分形维数较大, 这不同于二值图像的计算结果. 其原因在于二值化过程中大量像素未被提取, 只有极少的孔隙被考虑, 这在不考虑微米量级以下的孔隙时是合适的. 但这些岩石中实际上还存在大量微米量级以下的微细孔隙, 传统实验方法难以测得这些孔隙, 因而测出的孔隙率很低. 这些孔隙的存在使得岩石微元的密度发生变化, 孔隙分布的不同带来的密度变化也不同, 而这些变化在岩石的灰度 CT 图像中是可以体现出来的. 因此基于灰度 CT 图像计算得到的分形维数较大, 这也反映了玄武岩、盐岩和煤中具有复杂的微细孔隙结构. 当然, CT 扫描重建过程中的噪声也会影响到计算结果. 当图像表现平坦, 但伴随大量随机噪声时也会导致计算结果偏大. 因此在计算前对 CT 图像进行了降噪处理. 计算结果表明, 煤的分形维数比盐岩的大, 盐岩的分形维数比玄武岩的大, 这表明煤和盐岩中的微细孔隙要比玄武岩中的更为复杂, 此结果也可通过其他实验得到验证.

表 1 不同阈值下分割得到的岩石孔隙率和分形维数

泥岩		人工砂岩		泡沫混凝土	
孔隙率	分形维数	孔隙率	分形维数	孔隙率	分形维数
0.98%	1.350	0.95%	1.167	1.49%	1.287
8.01%	1.775	4.89%	1.489	12.36%	1.602
26.62%	1.847	27.85%	1.809	28.58%	1.762
62.59%	1.954	66.03%	1.944	66.93%	1.953

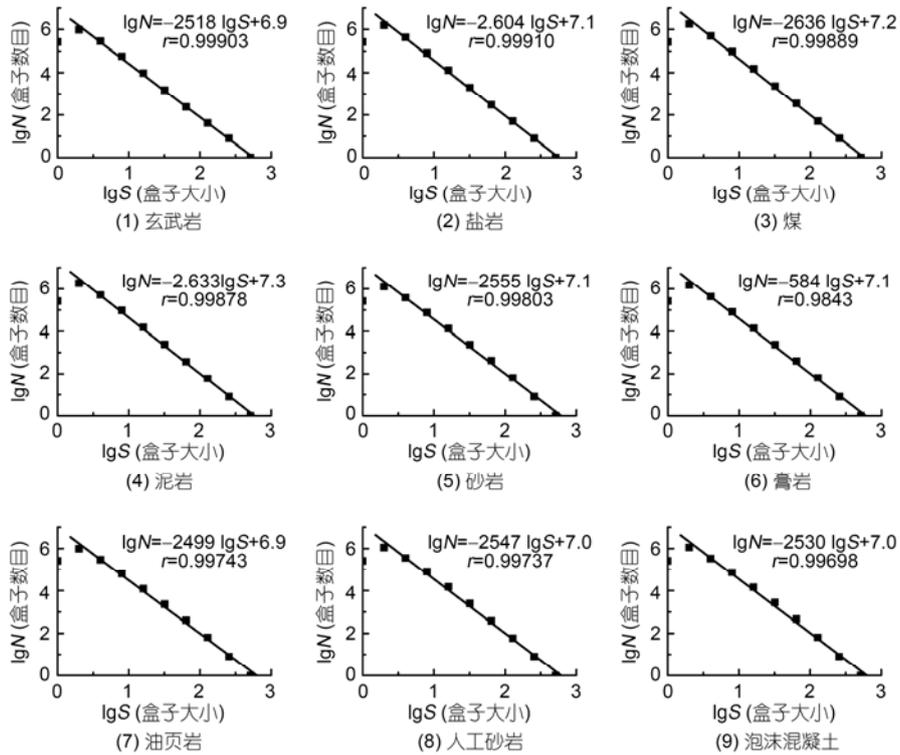


图 10 灰度 CT 图像的分形维数

对于其他岩石试样灰度 CT 图像的计算结果, 与相应的二值图像计算结果基本一致. 膏岩和泥岩的分形维数较大, 其中孔隙结构也比较复杂, 包含大大小小各种孔隙. 砂岩、人工砂岩和泡沫混凝土的分形维数居中, 其中的孔隙结构不很复杂, 以大孔隙为主, 有少量小孔隙. 油页岩的分形维数较低, 其中孔隙结构也比较简单, 主要表现为一些较大的孔隙.

计算表明煤、盐岩及泥岩的分形维数都比较大, 这些都是沉积岩, 因此内部形成了大大小小各种复杂的孔隙. 但它们的孔隙率不同, 这与一般的孔隙率测定实验中难以测定微小孔隙有关, 因此相应的二值化图像也未能反映出这种复杂的微细孔隙结构.

不同岩石试样的孔隙率和分形维数在表 2 中列出. 图 11(a)所示为岩石孔隙率和基于二值化 CT 图像计算得到的分形维数之间的关系, 从中可以看出随着孔隙率的增大, 分形维数总体上也随之增大, 表现出指数形式变化关系. 当孔隙率较小时, 孔隙率的变化会导致分形维数的较大变化; 当孔隙率较大时, 孔隙率的变化引起的分形维数变化就不很明显了. 图 11(b)所示为岩石孔隙率和基于灰度 CT 图像计算得到的分形维数之间的关系. 尽管总体看来, 随着孔隙

率的增大, 分形维数也增大. 但分形维数的变化要比孔隙率的变化更明显, 因此能够跟更好地反映岩石的孔隙结构特点.

4 结论

本文给出了岩石 CT 扫描重建图像的本质特点, 并从中提取研究了岩石的孔隙结构特点, 讨论了孔隙率和分形维数之间的关系, 主要结论如下:

(1) 岩石 CT 图像中各像元的灰度值是对应岩石微元中各物质衰减系数的综合反映, 借助高分辨率工业 CT 实时成像系统, 扫描得到的岩石灰度 CT 图像可以反映出岩石中各种尺度孔隙的影响.

(2) 通过采用分段灰度映射处理, 将 16 位原始

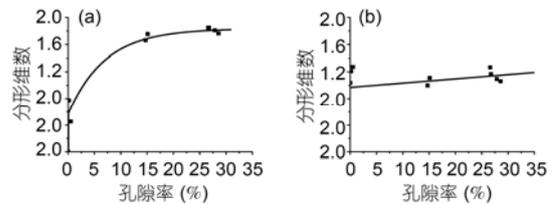


图 11 岩石孔隙率与岩石孔隙分形维数的变化
(a) 二值化图像分形维数; (b) 灰度图像分形维数

表 2 不同岩石试样的孔隙率和分形维数

岩石种类	分割阈值	孔隙率	黑白图分形维数	灰度图分形维数
玄武岩	10000	0%	0	2.518
盐岩	7000	0.17%	0.775	2.604
煤	3100	0.51%	0.453	2.636
油页岩	8500	14.71%	1.661	2.499
泡沫混凝土	6000	27.85%	1.718	2.530
砂岩	10000	15.11%	1.753	2.555
人工砂岩	6400	27.85%	1.809	2.547
膏岩	10700	26.76%	1.848	2.584
泥岩	10700	26.62%	1.847	2.633

数据转化为 8 位灰度图像,可以有效提升图像对比度,直观地展示出岩石内部的各种孔隙结构。

(3) 结合实验测定的孔隙率,采用逆分析的方法可以确定出分割阈值的大小,从而得到岩石孔隙结构的二值化图像,为进一步研究孔隙拓扑结构提供基础。

(4) 随着孔隙率的增大,孔隙结构的分形维数也变大。而且在孔隙率相同的情况下,孔隙结构的分形维数也不尽相同,孔隙结构越复杂,其分形维数越大。因此,孔隙结构的分形维数可以更好地刻画岩石孔

隙结构的特点。尤其是在孔隙率接近时,分形维数可以有效地表征出不同孔隙结构的复杂程度。

(5) 实验证实,直接基于灰度 CT 图像计算岩石孔隙结构的分形维数是可行的,这不仅避免了二值化过程及其带来的干扰和误差,简化了分析计算流程,而且能够反映出微细孔隙结构的影响。因此基于灰度 CT 图像的岩石孔隙分形维数是岩石孔隙率等参数的有效补充,可以更好地表征岩石孔隙结构的分形特征。

参考文献

- 刘培生. 多孔材料引论. 北京: 清华大学出版社, 2004
- Boer R. Reflections on the development of the theory of porous media. *Appl Mech Rev*, 2003, 56: R27-R42
- Tsakiroglou C D, Payatakes A C. Characterization of the pore structure of reservoir rocks with the aid of serial sectioning analysis, mercury porosimetry and network simulation. *Adv Water Resour*, 2000, 23: 773-789
- Song Y Q, Ryu S G, Sen P N. Determining multiple length scales in rocks. *Nature*, 2000, 406: 178-181
- Chen Q, Song Y Q. What is the shape of pores in natural rocks. *J Chem Phys*, 2002, 116: 8247-8250
- Radlinski A P, Ioannidis M A, Hinde A L, et al. Angstrom to millimeter characterization of sedimentary rock microstructure. *J Colloid Interf Sci*, 2004, 274: 607-612
- 谢强, 姜崇喜, 凌建明. 岩石细观力学试验与分析. 成都: 西南交通大学出版社, 1997
- Raynaud S, Fabre D, Mazerolle F, et al. Analysis of the internal structure of rocks and characterization of mechanical deformation by a non-destructive method: X-ray tomodensitometry. *Tectonophysics*, 1989, 159: 49-59
- Buyukozturk O. Imaging of concrete structures. *NDT and E Int*, 1998, 31: 233-243
- 蒲毅彬. 用于冻土实验研究中的使用方法介绍. *冰川冻土*, 1993, 15: 196-198
- 杨更社, 谢定义, 张长庆, 等. 岩石损伤特性的 CT 识别. *岩石力学与工程学报*, 1996, 15: 48-54
- 杨更社, 谢定义, 张长庆, 等. 煤岩体损伤特性的 CT 检测. *力学与实践*, 1996, 17: 14-16
- 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: 技术科学*, 2000, 30: 104-111
- 葛修润, 任建喜, 蒲毅彬, 等. 岩土损伤力学宏细观试验研究. 北京: 科学出版社, 2004
- 丁卫华, 仵彦卿, 蒲毅彬, 等. X 射线岩石 CT 的历史与现状. *地震地质*, 2003, 25: 467-476
- Cnudde V, Masschaele B, Dierick M, et al. Recent progress in X-ray CT as a geosciences tool. *Appl Geochem*, 2006, 21: 826-832
- Appoloni C R, Fernandes C P, Rodrigues C R O. X-ray microtomography study of a sandstone reservoir rock. *Nucl Instrum Meth A*, 2007, 580: 629-632
- 杨更社, 刘慧. 基于 CT 图像处理技术的岩石损伤特性研究. *煤炭学报*, 2007, 32: 463-468

- 19 尹小涛, 党发宁, 丁卫华, 等. 基于图像处理技术和 CT 试验的裂纹量化描述. 实验力学, 2005, 20: 448-454
- 20 鞠杨, 杨永明, 宋振铎, 等. 岩石孔隙结构的统计模型. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2008, 38: 1026-1041
- 21 鞠杨, 杨永明, 毛彦喆, 等. 孔隙介质中应力波传播机制的实验研究. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2009, 39: 904-918
- 22 鞠杨, 王会杰, 杨永明, 等. 应力波作用下岩石类孔隙介质变形破坏与能量耗散机制的数值模拟研究. 中国科学: 技术科学, 2010, 40: 711-726
- 23 谢和平. 分形几何及其在岩土力学中的应用. 岩土工程学报, 1992, 14: 14-24
- 24 谢和平. 分形—岩石力学导论. 北京: 科学出版社, 1996
- 25 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征. 科学通报, 1993, 38: 1896-1899
- 26 贺承祖, 华明琪. 储层孔隙结构的分形几何描述. 石油与天然气地质, 1998, 19: 15-23
- 27 李廷芥, 王耀辉, 张梅英, 等. 岩石裂纹的分形特性及岩爆机理研究. 岩石力学与工程学报, 2000, 19: 6-10.
- 28 连建发, 慎乃齐, 张杰坤. 分形理论在岩体质量评价中的应用研究. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增刊): 1695-1698
- 29 薛茹, 胡瑞林, 毛灵涛. 软土加固过程中微结构变化的分形研究. 土木工程学报, 2006, 39: 87-91
- 30 方红卫, 陈明洪, 陈志和. 泥沙颗粒污染前后表面孔隙力学特征分析. 中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学, 2008, 6: 714-720
- 31 周宏伟, 张亚衡, 李爱民等. 孔隙介质中流体渗流边界演化过程的实验研究. 科学通报, 2008, 53: 351-358
- 32 张季如, 陶高梁, 黄丽等. 表征孔隙孔径分布的岩土体孔隙率模型及其应用. 科学通报, 2010, 55: 2761-2770
- 33 陶高梁, 张季如. 表征孔隙及颗粒体积与尺度分布的两类岩土体分形模型. 科学通报, 2009, 54: 838-846
- 34 冯杰, 于纪玉. 利用 CT 扫描技术确定土壤大孔隙分形维数. 灌溉排水学报, 2005, 24: 26-28
- 35 周尚志, 党发宁, 陈厚群等. 基于单轴压缩 CT 实验条件下混凝土破裂分形特性分析. 水力发电学报, 2006, 25: 112-117
- 36 陈学松, 吴爱祥, 杨保华等. 基于 CT 图象法的矿岩散体孔隙结构分形特征研究. 金属矿山, 2007, 385: 75-77
- 37 何娟, 刘建立, 吕菲. 基于 CT 数字图像的土壤孔隙分形特征研究. 土壤, 2008, 40: 662-666
- 38 尹小涛, 王水林, 党发宁, 等. CT 实验条件下砂岩破裂分形特性研究. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊): 2721-2726
- 39 郭东明, 左建平, 张慧等. 高强混凝土裂纹扩展规律的 CT 观察. 硅酸盐学报, 2009, 37: 1607-1612
- 40 张朝宗, 郭志平, 张朋等. 工业 CT 技术和原理. 北京: 科学出版社, 2009
- 41 彭瑞东, 谢和平, 鞠杨. 二维数字图像分形维数的计算方法. 中国矿业大学学报, 2004, 33: 19-24
- 42 杨彦从, 彭瑞东, 周宏伟. 三维空间数字图像的分形维数计算方法. 中国矿业大学学报, 2009, 38: 251-258