

# 单轴压缩下高含石量胶凝堆石料的力学特性

张宇宁<sup>1</sup>, 陈宇龙<sup>2</sup>  
(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400030; 2. 东京大学 土木工程系, 日本 东京 113-8656)

**摘 要:** 通过高含石量(70%, 80%, 90%)的不同尺寸的胶凝堆石料重塑样的单轴压缩试验,研究了含石量和尺寸效应对破坏形态和力学特性的影响. 并结合数值模拟解释了试验现象. 结果表明: 随着含石量的升高,压应力区与拉应力区相互交错分布,最终破坏时,受张拉破坏和剪切破坏共同作用. 破坏形式从张拉劈裂破坏的一条曲折延伸的裂纹,逐渐转变为多条裂纹的剪切-张拉复合破坏模式,并伴随着局部区域颗粒的崩落. 尺寸效应对重塑样的破坏形态影响不明显,而对力学性质有显著的影响,大尺寸试样的力学性质较差.  
**关 键 词:** 胶凝堆石料;高含石量;单轴压缩;尺寸效应  
**中图分类号:** TU 411      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2016)11-1630-05

## Mechanical Characteristics of Cemented Rockfill Materials with High Rock Block Proportions Under Uniaxial Compression

ZHANG Yu-ning<sup>1</sup>, CHEN Yu-long<sup>2</sup>  
(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. Department of Civil Engineering, University of Tokyo, Tokyo 113-8656, Japan.  
Corresponding author: ZHANG Yu-ning, E-mail: 743139009@qq.com)

**Abstract:** Artificial specimens of cemented rockfill materials with high rock block proportions (70%, 80%, 90%) were fabricated for uniaxial compression to understand the effects of rock block proportion and size effect on the failure modes and mechanical characteristics. The observed experimental phenomena were explained by numerical simulation. Results show that with the increase of rock block proportion, zones of both tensile stress and compressive stress develop as staggered distribution so that failure mode is dependent on the splitting failure and the shear failure. Increasing rock block proportion changes a tortuous failure surface contributed by splitting failure to multiple failure surfaces and detachment of rock particles along the periphery of specimens to form the compound failure mode combining splitting failure and shear failure. The size effect does not play any role in failure modes, but do play prominent role in mechanical characteristics. Mechanical properties of bigger samples are worse than those of smaller samples.  
**Key words:** cemented rockfill materials; high rock block proportion; uniaxial compression; size effect

胶凝堆石料是一种复杂的非连续、非均质和非线性地质介质材料,是由具有一定尺寸且强度较高的岩块和强度相对较低的胶凝添加剂以及孔隙等组成的多相体系. 胶凝堆石料是一种非常复杂的新材料,其材料特性介于碾压堆石和混凝土之间,受胶凝含量、骨料级配、含砂率等诸多因素影响<sup>[1]</sup>.  
胶凝堆石料的变形模量是碾压堆石料的10~100倍<sup>[2]</sup>. 利用胶凝堆石料筑坝能在很大程度上减小相应坝型的坝体变形,有利于改善面板和周边缝的工作性态,上游防渗体系能正常工作<sup>[3-4]</sup>. 要了解胶凝堆石料的变形演化特征与力学行为,从而更好地服务于工程实践,仍有许多工作要做.  
含石量是影响胶凝堆石料力学特性的重要参数之一. 当含石量较高时,堆石料逐渐形成骨架作

用,受力也从胶凝填充物转为主要由堆石料承担,更多地显现堆石料的性质.而不同尺寸的样本常表现出力学性质的差异.鉴于此,本文以高含石量胶凝堆石料为研究对象,即含石量大于或等于 70%,制备了两种尺寸的重塑样,研究其力学特性及其破坏特征,并结合数值模拟解释试验观察到的现象,进一步揭示含石量和尺寸效应对胶凝变形与破坏机制的影响,以期胶凝堆石坝工程实践提供借鉴.

## 1 试样制备及试验方法

本文所用的试样为胶凝堆石料的重塑样.含石量分别为 70%,80%,90%.堆石料密度  $2.53\text{ g/cm}^3$ ,表面光滑,球度差异大,粒径正态分布,级配曲线如图 1 所示.点荷载试验测得其抗压强度为  $35\text{ MPa}$ .为便于制备重塑样,胶凝材料为硅酸盐水泥/水 = 0.3 的混合料.硅酸盐水泥的抗压强度为  $16\text{ MPa}$ .制备胶凝堆石料前,先在模具内壁抹上一层油脂,以利于脱模.按质量比例将堆石料和水泥均匀混合,倒入不同尺寸的模具,分 3 层夯实,加工成  $\Phi 100\text{ mm}\times 200\text{ mm}$  和  $\Phi 150\text{ mm}\times 300\text{ mm}$  的圆柱体试件,每个类型的试样制备 3 个.试件在模具中静置 24 h 后取出,并适当养护.为满足标准<sup>[5]</sup>,在试件两端填补少许石膏找平.试验采用 MTS815.03 型岩石三轴试验机,其加载方式选用加载速率为  $0.04\text{ mm/s}$  的位移控制加载,直到试样最终破坏.

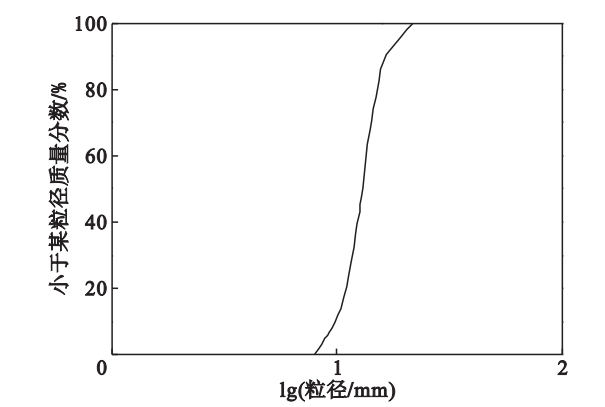


图 1 堆石料试样堆石料粒径级配曲线  
Fig. 1 Grain size distribution curve of rockfill materials

## 2 结果与讨论

### 2.1 破坏形态

图 2 给出了  $\phi 100\text{ mm}\times 200\text{ mm}$  和  $\phi 150\text{ mm}\times 300\text{ mm}$  不同含石量的试样典型的破坏形态.总体

呈现出一定的均质性和脆性特点.随着含石量的变化,破坏面的形态不尽相同,这也与胶凝堆石料自身的非均匀性有关.

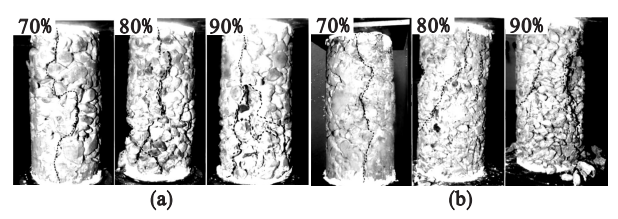


图 2 不同尺寸、不同含石量条件下试件的破坏形态  
Fig. 2 Failure modes of specimens with different sizes and rock block proportions by weight  
(a)— $\Phi 100\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ ; (b)— $\Phi 150\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ .

如图 2a 所示,含石量 70% 的试件的破坏形式近似于拉伸劈裂破坏,呈现一条贯通轴向的曲折的裂纹.随着加载的进行,裂纹宽度逐渐增大,快速发育形成主裂纹.而含石量 80% 和 90% 的试件呈现出多组破坏面,局部形成多条剪切带.裂纹的相对位置取决于堆石料的空间分布与排列方式.局部剪切破坏的发生与无侧限的加载条件有关.含石量 90% 的试件有多条剪切破坏面产生,同时局部区域的颗粒发生崩落.含石量 90% 的试件中崩落的颗粒多于含石量 80% 的试件.

通过与图 2b 比较可以看出,不同尺寸下相同含石量的试样破坏形式几乎相同.均随着含石量的增加,内部结构不均匀性突出,拉应力区和压应力区相互交错分布,最终破坏时受劈拉破坏和剪切破坏共同作用.破坏形式从张拉劈裂破坏的一条曲折延伸的裂纹,逐渐转变为多条裂纹的剪切—张拉复合破坏模式,并伴随着局部区域颗粒的崩落.含石量的增加,导致更多的接触面.不同材料的接触面影响着许多工程地质结构的力学性质<sup>[6-7]</sup>.接触面张开滑移破坏,内部形成更多的剪切带与劈裂带.含石量越高,堆石料间的接触和相互咬合越剧烈,导致堆石料的移动、旋转等将增加,最终引起裂纹的扩展和多裂纹的产生.

随着加载的进行,胶凝堆石料发生压密作用,内部结构更加密实,在堆石料周围发生应力集中.胶凝堆石料在变形过程中由于内部堆石料间的相互咬合及摩擦作用使得其不断地发生移动或旋转,以调整其在胶凝堆石料内部的排列状态,咬合力传递发生改变,校正传递力至荷载方向.如此形成力链发展—断裂—再发展的循环变化.内部结构重新排列导致堆石料甚至会越过剪切面另一侧的堆石料,使得堆石料不但发生相对破坏面的位移及旋转运动,而且在垂直于破坏面的方向也会

发生相应的位移,从而使得胶凝堆石料在试验过程中发生剪胀变形.当堆石料四周的应力高于水泥的强度时,在应力集中区萌生出裂纹,裂纹的萌生扩展为堆石料的运移提供了空间.随着载荷的增大,裂纹逐渐贯通,试样内部的局部堆石料发生较大的位移.

从位错的力学性质角度看,在裂纹尖端,位错繁殖源起重要作用,这些繁殖源在裂纹端部的变形区内产生高密度的滑移带,它们在微结构障碍物处依次塞积,并在主裂纹的前缘产生大量次生裂纹,这些次生裂纹逐渐发育,并与主裂纹交汇直至破坏,导致试样存在多个破坏面.Fakhimi 等<sup>[8]</sup>认为沿着轴向裂纹方向的位错将产生横向应力.横向应力的产生使试件发生张拉劈裂破坏.

从图 2 中不难看出,裂纹的开裂扩展多绕过堆石料,沿着堆石料边界和胶结物扩展.在破坏形式的研究结果中,未发现尺寸效应的影响.这是由于两种尺寸的长径比相同,虽然尺寸有所不同,但长度与直径的比例依然统一.而且胶结材料为均质的水泥浆体所代替,试样均匀性相对较好,不同尺寸的重塑样的内部结构更为相似.

## 2.2 力学特征

图 3 为两种尺寸的试件不同含石量条件下的全应力-应变曲线.可以看出,应力-应变的总体规律基本一致.且各曲线均表现出应变软化特征,随着含石量的降低,此特征更明显.曲线大体经历了压密、弹性、屈服、破坏 4 个阶段.压密阶段,堆石料与水泥浆体内的微裂隙或孔隙被压密实,曲线微向上弯曲.弹性阶段,曲线近似于直线,在该阶段中,试样内部某些微单元的最小主应力大于抗拉强度,产生了一定的细观损伤,导致裂纹附近颗粒间产生微小错动导致应力瞬间下降.屈服阶段,在剪切带和劈裂带出现局部的开裂,若剪切带或劈裂带上的某一些堆石料分布较为密集,将造成压缩变形过程中堆石料间咬合力急剧上升,迅速向峰值强度发展,表现为曲线的斜率较大.峰值点后进入破坏阶段,原本处于咬合状态的某些堆石料,由于发生了错动,而引起相互间因咬合而储蓄的应变能快速释放,使得应力急剧下降.含石量越高,应力值下降速度越慢,最终降至残余强度,只有破坏面之间的摩擦力在起作用.

图 4 为两种尺寸的试件的抗压强度与弹性模量随含石量的变化曲线.每条曲线均是计算得到的平均值,每个数据点均给出误差范围.可以看出,大尺寸试件的离散性更大.试件尺寸越大,胶凝堆石料内堆石料的数量逐渐增加,各向异性与

空间变异性更为显著,变异系数必然越大.大尺寸试件的抗压强度与弹性模量在各含石量条件下均小于小尺寸试件的抗压强度与弹性模量.两种尺寸下的抗压强度与弹性模量都随着含石量的增加而减小,且降幅呈减小趋势.只有尺寸为  $\Phi 150\text{ mm} \times 300\text{ mm}$  的弹性模量随含石量增加而加速减小.

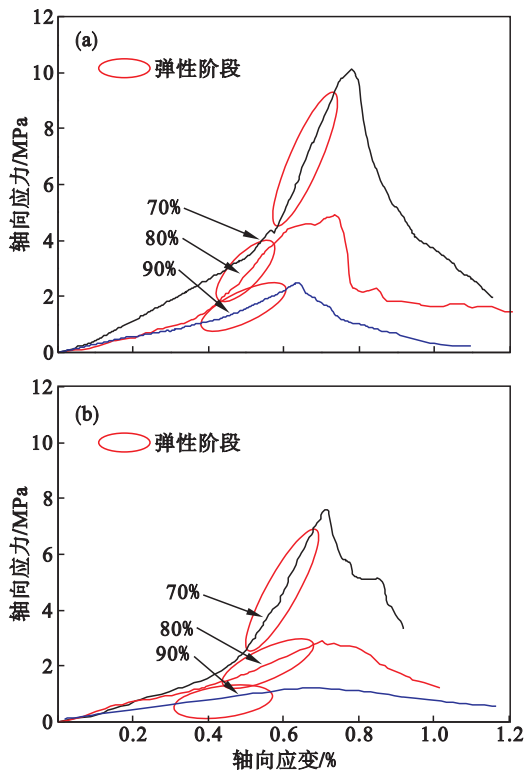


图 3 单轴压缩全应力-应变曲线  
Fig. 3 Complete uniaxial compressive stress-strain curves  
(a)— $\Phi 100\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ ; (b)— $\Phi 150\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ .

随着含石量的增加,胶凝堆石料的力学性质发生劣化.作者认为这是出于如下 3 方面的原因:①高含石量时,由于水泥浆体在堆石料的嵌锁作用而形成的空隙中填充不均匀,甚至可能出现有些空隙中浆料很少甚至几乎没有的情况.胶凝堆石料的压缩分为堆石料的压缩、堆石料间水泥浆体的压缩、接触面的压缩与堆石料嵌锁空隙压缩的综合作用.空隙的存在导致内部的咬合和嵌挤作用减小,颗粒之间的有效滑动和滚动摩擦面减少.胶凝堆石料在外载荷的扰动下,极易发生嵌锁裂缝崩塌,发生沉陷,造成强度指标下降.②含石量的增加造成更多的接触面,当内部应力超过颗粒之间接触力时,接触面张开滑移破坏,裂隙开始发育,扩展加宽后变形增大,导致力学性质劣化,力学参数降低.这也与破坏形态的不同有关.③堆石料之间无黏结力的存在,故胶凝堆石料的成型



是由于水泥的胶凝作用. 含石量越高, 水泥的比例就越小. 水泥黏结作用的作用面积就越小, 使得胶凝堆石料内部的结合力越小. 如上述原因①, 若堆石料间还存在空隙, 则胶凝堆石料内部某些堆石料还处于孤立状态, 对胶凝堆石料的稳定性不利. 以上 3 方面的因素综合作用, 使得胶凝堆石料的力学性质降低.

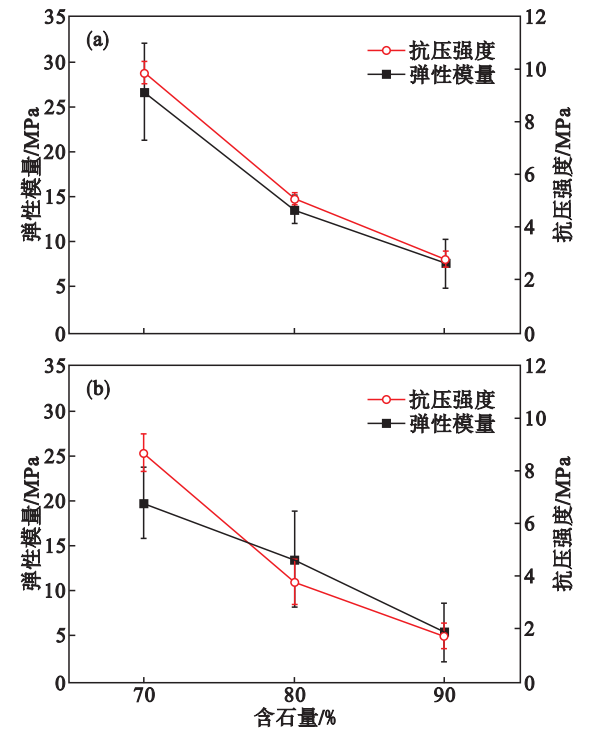


图 4 弹性模量与抗压强度随含石量的变化曲线  
Fig. 4 Curves of elastic modulus and compressive strength with rock block proportions  
(a)— $\Phi 100\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ ; (b)— $\Phi 150\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ .

### 3 数值分析

Zhang 等<sup>[9]</sup>通过数值模拟分析了均质和非均质材料的破坏形态. 对于均质材料, 破坏形态呈 X 状共轭斜面剪切破坏. 对于非均质材料, 破坏面的形成受到阻碍, 破坏形态发生了一定的变化, 如图 5a 所示. 为进一步分析含石量对胶凝堆石料破坏模式的影响, 本文利用有限元计算软件 Plaxis 进行分析. 基于统计分析层次上采用蒙特卡罗法计算随机生成符合堆石料级配的细观结构模型, 堆石料在试件中随机分布. 利用前处理功能, 将生成的胶凝堆石料几何模型导入 Plaxis 转换形成有限元模型, 建立接触面并划分网格即可进行力学分析. 根据复合岩体力学特性, 选用摩尔 - 库仑 (Mohr - Coulomb) 弹塑性模型准则. 堆石料和水泥的特性参数分别由点载荷和单轴压缩试验获得, 计算需用的物理力学参数见表 1. 以试件尺寸

$\Phi 150\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ , 含石量 70% 为例, 试件在轴向应变  $\varepsilon = 5\%$  时的应变云图见图 5b. 从图中可以看出, 本文的结果与 Zhang 等<sup>[9]</sup>的结果一致, 应变集中出现在堆石料表面及接触面附近, 裂纹的扩展受阻于堆石料的出现, 曲折扩展贯通最终形成破坏面, 且破坏面呈多个.

表 1 胶凝堆石料物理力学参数		
Table 1 Physical and mechanical parameters of cemented rockfill materials		
材料名称	水泥	堆石料
弹性模量 $E/\text{MPa}$	60	1040
泊松比 $\mu$	0.3	0.2
容重 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	19	24
黏结力 $c/\text{MPa}$	0.1	1.0
内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	26	39

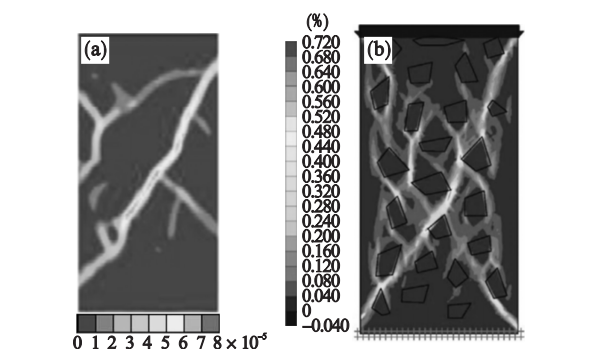


图 5 试件剪切应变云图  
Fig. 5 Shear strain rate nephograms of specimens  
(a)—文献<sup>[9]</sup>; (b)—本文.

### 4 讨 论

胶凝堆石料的破坏模式和形态与堆石料的含量、大小、形状及其空间分布等关系密切. 裂纹开裂扩展过程可划分为: 开裂、扩展以及贯通. 裂纹开裂位置与扩展模式受接触面影响较大, 决定了最终的破坏模式. 两种材料力学响应的不同使得在接触面附近的应力状态更加复杂.

胶凝堆石料由于自身的非均质性, 应力在堆石料周围局部化, 导致其破坏面不规则. 破坏面发生在堆石料表面及接触面附近, 破坏面的萌发扩展分岔多绕过堆石料, 沿着堆石料边界和胶结物扩展, 出现多滑面现象. 这是因为接触面和水泥的强度 (16 MPa) 低于堆石料的强度 (35 MPa), 裂纹更易绕过堆石料发展, 沿着堆石料的边界及胶结物的断裂消耗较少的能量, 因此裂纹的这种演化方式更容易发生<sup>[10]</sup>. 破坏形态 (图 2) 和剪切应变云图 (图 5) 的观察也证实这样的观点. 若堆石料

的强度较低,随着应力水平的增加,裂纹也可能形成穿过堆石料的破裂方式. 伴随着主裂纹的不断延伸,也将萌生次一级微裂纹,使得裂纹的扩展过程更为复杂. 同时,开裂扩展方向具有一定的不规则性.

## 5 结 论

1) 随着含石量的升高,压应力区和拉应力区相互交错分布,最终破坏时受劈拉破坏和剪切破坏共同作用. 破坏形式从张拉劈裂破坏的一条曲折延伸的裂纹,逐渐转变为多条裂纹的剪切 – 张拉复合破坏模式,并伴随着局部区域颗粒的崩落.

2) 大尺寸试件的数据离散性较大. 试件尺寸越大,胶凝堆石料内堆石料的数量增加,各向异性与空间变异性更为显著,变异系数必然越大. 大尺寸试件的抗压强度与弹性模量在各含石量条件下均小于小尺寸试件的抗压强度与弹性模量. 两种尺寸下的抗压强度与弹性模量都随着含石量的增加而减小.

3) 尺寸效应对重塑样的破坏形态影响不明显,而对力学性质有显著的影响. 大尺寸试样的力学性质较差.

4) 裂纹多在堆石料的边缘产生,交界面是相对薄弱的环节,最利于裂纹的生长. 随着应力水平的增加,裂纹也会形成穿过堆石料的破裂方式.

### 参考文献:

[1] Kesimal A, Yilmaz E, Ercikdi B, et al. Effect of properties of tailings and binder on the short and long-term strength and stability of cemented paste backfill [J]. *Materials Letters*, 2005, 59(28): 3703 – 3709.

[2] 陆述远,唐新军. 一种新坝型——面板胶结堆石坝简介 [J]. 长江科学院院报, 1998, 15(2): 54 – 56.  
(Lu Shu-yuan, Tang Xin-jun. Brief introduction to a new type of dam called face-plate-cementing rockfill dam [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 1998, 15(2): 54 – 56.)

[3] Benzaazoua M, Fall M, Belem T. A contribution to understanding the hardening process of cemented pastefill [J]. *Minerals Engineering*, 2004, 17(2): 141 – 152.

[4] Emad M Z, Mitri H, Kelly C. State-of-the-art review of backfill practices for sublevel stoping system [J]. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2015, 29(6): 544 – 556.

[5] American Society for Testing and Materials, ASTM C4294. Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens [S]. Annual Book of ASTM Standards 04.02. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1995.

[6] Frost J D, Dejong J T, Recalde M. Shear failure behavior of granular-continuum interfaces [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2002, 69(17): 2029 – 2048.

[7] 陈宇龙,张宇宁. 单轴压缩下横观各向同性岩石破裂过程的声发射特性离散元模拟 [J]. 煤炭学报, 2016, 41(sup1): 88 – 92.  
(Chen Yu-long, Zhang Yu-ning. Distinct element numerical simulation of acoustic emission characteristics during failure process of transversely isotropic rock subjected to uniaxial compression [J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(sup1): 88 – 92.)

[8] Fakhimi A, Hemami B. Axial splitting of rocks under uniaxial compression [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, 79(10): 124 – 134.

[9] Zhang S, Tang H, Zhan H, et al. Investigation of scale effect of numerical unconfined compression strengths of virtual colluvial-deluvial soil-rock mixture [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, 77(7): 208 – 219.

[10] 谢和平,陈至达. 分形几何与岩石断裂 [J]. 力学学报, 1988, 20(3): 264 – 275.  
(Xie He-ping, Chen Zhi-da. Fractal geometry and fracture of rock [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 1988, 20(3): 264 – 275.)