

红层软岩夹层的物质组成与结构特征 对其力学性质影响的定量研究

——以崑山世界自然遗产地雷劈石为例*

陈智¹, 彭华¹, GREIF Vladimir², 闫罗彬¹, SIMONSON Scott¹, 马茹¹

(1. 中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510275;

2. 夸美纽斯大学自然科学学院, 斯洛伐克 布拉迪斯拉发)

摘要: 影响红层软岩力学性质的主要因素包括物质组成与结构特征。使用压力试验机测试获取了红层软岩的两种力学性质参数; 利用偏光显微镜测定了红层软岩的物质组成成分、颗粒粒度结构特征; 结合数学统计方法定量分析了红层软岩物质组成成分、颗粒粒度结构特征分别对其力学性质的影响。其研究分析表明: ① 崑山丹霞红层软岩夹层的物质组成成分、颗粒粒径结构特征对其力学性质产生一定的影响, 整体趋势是随着硬性物质成分(如石英、长石等)含量的增加和颗粒平均粒径的增大, 其力学性质得到相应增强, 表现为抗压强度、弹性模量等力学参数的增大。② 当颗粒平均粒径到达一定数值时(粒径约为0.25 mm时), 抗压强度与弹性模量会同时发生一次较明显的跃变, 由跃变可推测: 物质组成成分对红层软岩力学性质的影响要大于颗粒平均粒径对红层软岩力学性质的影响。

关键词: 红层软岩; 丹霞地貌; 物质组成; 力学性质; 定量研究

中图分类号: P93 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579(2015)04-0139-11

Analysis of Mineralogical Composition and Texture to Quantify the Mechanical Properties of Red Bed Soft Rock

——A Case Study of Leipi Rock at World Heritage Site,
Mt. Langshan in Hunan Province

CHEN Zhi¹, PENG Hua², GREIF Vladimir¹, YAN Luobin¹, SIMONSON Scott¹, MA Ru¹

(1. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Faculty of Natural Sciences, Comenius University, Bratislava, Slovakia)

Abstract: This study focuses on the mineralogical composition and texture of red-bed soft rock. On the basis of the statistical analysis of the red-bed soft rock characteristics, such as the composition, grain size observed under polarized light microscope, the effects of composition and texture on the mechanical properties were discussed respectively. The study on rock samples has shown that: ① the compressive strength and modulus of elasticity show a rising trend with the increase of mineralogy content and grain size; ② as average grain size increases, its compressive strength and modulus of elasticity become stronger accordingly. When the average grain size reaches a numerical range (diameter is about 0.25 mm), the compressive strength and modulus of elasticity would bump up at the same time, according to which we can speculate that mineralogical composition has a bigger effect on the mechanical properties than the

* 收稿日期: 2014-11-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41171013); 国家科技基础性工作专项重点资助项目(2013FY111900)

作者简介: 陈智(1985年生), 男; 研究方向: 丹霞地貌及资源环境; 通讯作者: 彭华; E-mail: eesph@mail.sysu.edu.cn

grain size.

Key words: red bed soft rock; Danxia landform; mineralogical composition; mechanical properties; quantitative analysis

丹霞地貌区红层中包含软岩夹层是一种普遍现象,其岩性一般由细砂岩、粉砂岩及泥质岩构成,坚硬的砂砾岩红层中含有软岩夹层时,常成为坡面快速风化和流水侵蚀的先锋层^[1-2],是控制和影响丹霞地貌坡面形态发育和岩崩的重要因素。研究红层软岩对丹霞地貌形态发育的影响,重点是使用实验室检测方法分析其沉积特征和岩性特征(如物质组成与结构特征、含水率、孔隙率等),分析其岩性与破坏作用之间的定性定量关系。曾昭璇和黄少敏^[3-4]最早注意到红层岩性与丹霞地貌发育之间的关系,在中国东南部红层地貌的研究中将红层划分为粗、细 2 大岩系,指出由坚硬的砾岩、砂岩发育的“丹霞地形”多分布于红层盆地边缘,而软弱岩系一般形成和缓的红层丘陵,分布于红层盆地的中部;文献[5]发现,在西北甘肃地区发育的典型“类丹霞地貌”中,疏松的泥质砂岩亦可在坚硬的砂砾岩层保护下以夹层、甚至是互层状产出,经差异性风化后形成“窗棂状宫殿式丹霞地貌”;文献[6-7]则根据红层软岩中方解石、白云石的含量探讨两种红层岩溶形成机制,分析红层岩溶地貌与丹霞地貌的关系;彭华等^[2,8]在上述研究成果基础上,指出红层粗碎屑岩中大都含有软岩夹层,它们快速风化凹进,常形成顺层洞穴、凹槽等负地貌类型,进而可能导致上部的丹霞陡崖坡崩塌,成为崩塌发生的先决条件;并在后续的研究中,通过对丹霞山顺层洞穴中红层软岩夹层的试验分析,取得一系列有关红层软岩理化性质及其对丹霞地貌发育的影响等相关成果。朱诚等^[9-14]亦开展了丹霞地貌区不同岩性特征对红层岩体稳定性影响的量化研究,通过 X 射线荧光光谱分析、偏光显微镜鉴定等实验手段获取各岩样的矿物成分、百分含量来进行量化对比,或结合抗压强度值将相应岩样的矿物成分、百分含量与之相关联进行定量综合分析,得出因红层软岩特殊的物质组成而易受外力侵蚀使岩石结构稳定性受到影响的结论。

从上述的研究状况看,对于丹霞地貌中的红层软岩夹层,学者更多注重研究其物质成分与力学性质之间的关系,而对其微观结构特征与力学性质之

间关系的研究开展得较少;且目前的研究仍只停留在将其矿物成分、百分含量与力学性质参数进行简单的关联分析上,并没有进一步建立起两者间的数学关系式并对其相关性进行深入探讨,因此上述研究实际上仍属于定性半定量的研究。基于此,本文以世界自然遗产地崑山-八角寨雷劈石崩塌点为案例,通过实验方法与数理方法相结合,对该案例地引起崩塌的红层软岩夹层的物质组成成分、结构等沉积特征进行定量统计,建立起沉积特征与力学性质之间的定量关系,揭示红层软岩沉积特征对丹霞岩体力学稳定性的影响,同时也为进一步研究雷劈石崩塌的机制提供一些可参考的基础数据。

1 案例地概况

雷劈石位于湖南-广西边界的崑山-八角寨丹霞地貌区内(图 1),地理坐标为:北纬 26°16'50.7",东经 110°43'56"E,海拔为 524 m,曾是其著名的景点,于 2009 年 11 月 2 日凌晨发生崩塌,崩塌体经测算约为 48 200 m³(图 2,3)。构成雷劈石的岩层为白垩系栏垅组(K₁l)下部一套紫红色巨厚层砾岩、砂砾岩,夹含砾砂岩及少量含砾泥质粉砂岩、长石砂岩。该套地层岩相属山麓洪积、冲洪积相,富含钙质砾石,岩性坚硬,是形成丹霞地貌的重要地层;同时该套地层中普遍含有不稳定矿物,如方解石和长石,其中方解石含量为 2%~25%^[15],而长石含量最高可达 30%以上^[16]。

据现场的初步勘察,雷劈石北部石峰保存完好,未受崩塌影响。其悬崖底部基座上是一层软岩夹层,厚度变化在 0.3~1.5 m 之间,平均厚度约为 1 m,其底部夹有约 1~3 cm 最软弱的泥质砂岩。岩层倾向 181°,倾角 10~12°,即向着其东南侧的沟谷倾斜。经分析判断为导致雷劈石崩塌的同一层软岩夹层。该软岩夹层大部分已风化凹进形成一系列不连续的浅洞穴,深度 1~3 m 不等。有流水从软岩层形成的洞穴底部流出,经考察,水从另一侧峡谷中切入并已穿透该岩体。可见软岩风化及流水切入已经危及该岩体(图 4)。

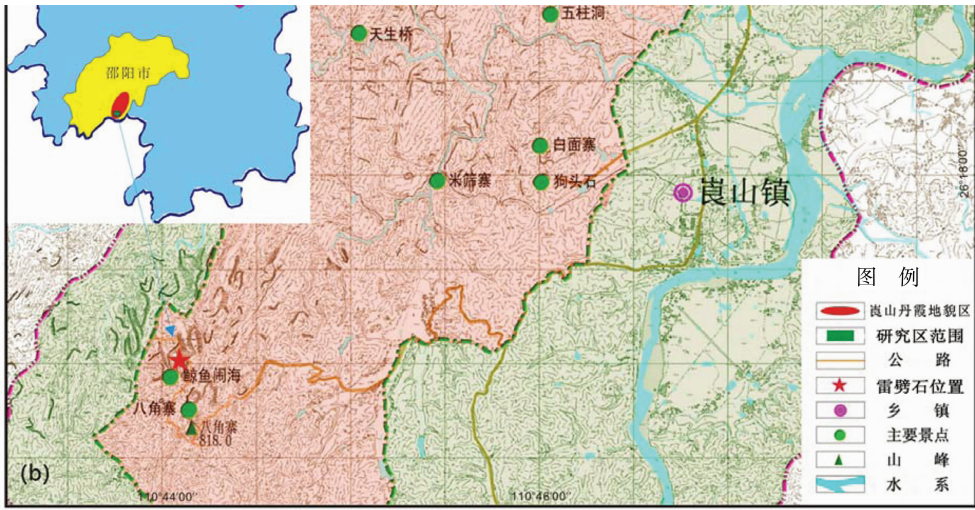


图 1 案例地理位置示意图

Fig. 1 Location of study area

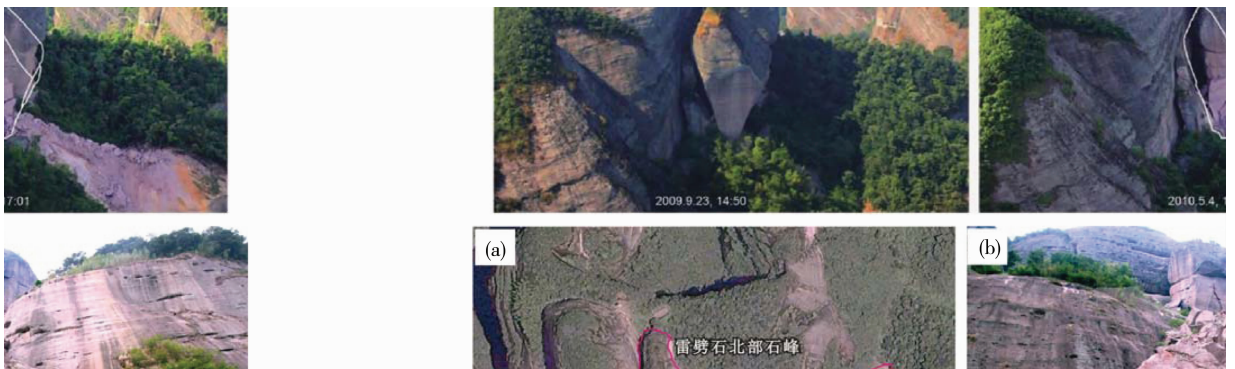


图 2 雷劈石发生崩塌前后对比：(a) 崩塌前；(b) 崩塌后（引自文献 [2]）

Fig. 2 Comparison of before and after the collapse of Leipi Rock



图 3 雷劈石崩塌体分布：(a) 卫星影像图；(b) 雷劈石崩塌体由东往西平视图

Fig. 3 The distribution of landslide

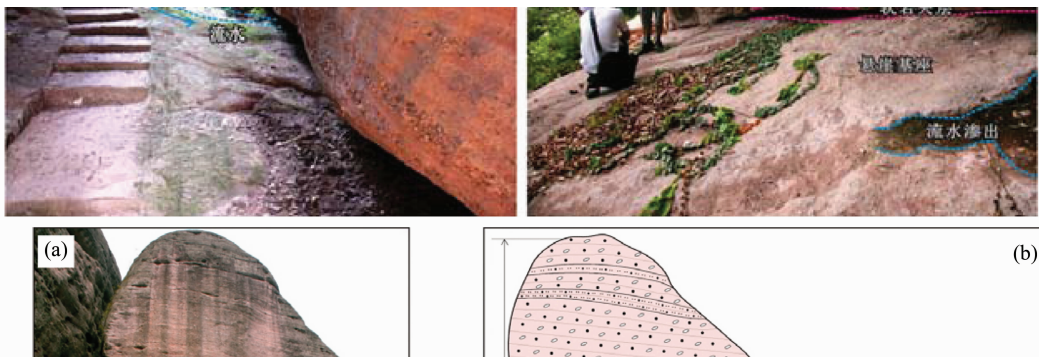


图 4 流水沿裂隙入渗岩体 (a) 和雷劈石北部岩体悬崖基座上的红层软岩夹层 (b)

Fig. 4 Water flowing into the rock (a) and Soft interlaid rock layer on the bottom of north Leipi Rock's stone peak (b)

2 样品及测试方法

2.1 样品的采集及制备

采样的目的是为获取红层软岩的力学性质、物质组成及结构特征提供试验样品。本次对导致雷劈石崩塌的红层软岩夹层及上下岩层进行采样, 共采

集 16 个岩样, 其中包括 6 个砂砾岩、5 个砂岩和 5 个粉砂岩, 因为泥质岩和泥质粉砂岩的微节理特别发育, 加上岩层太薄, 无法打制合格的样品。软岩采样位置位于雷劈石北部石峰的悬崖底部洞穴中, 采样点的产状为 $181^{\circ} \angle 12^{\circ}$; 砂砾岩采自于雷劈石崩塌岩块。采样部位的岩性剖面示意图如图 5 所示。

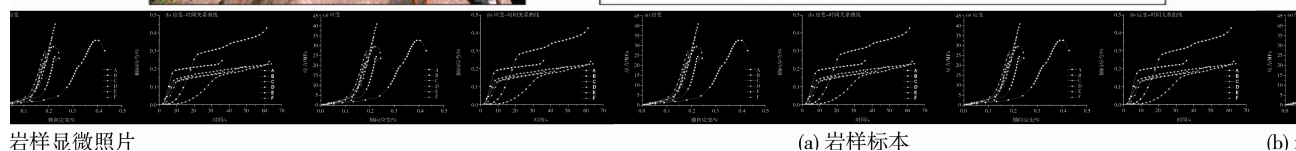
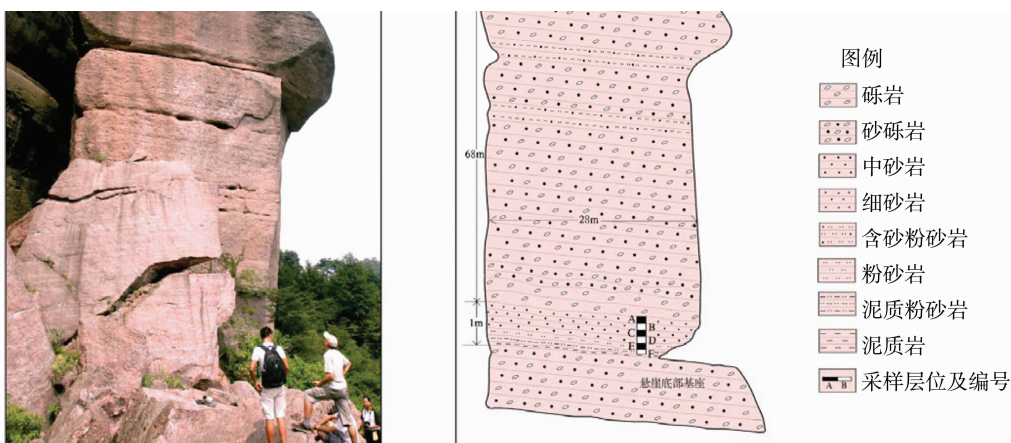


图 5 雷劈石北部石峰 (由南往北平视) 及其采样部位岩性剖面示意图

Fig. 5 North Leipi Rock's stone peak and lithologic section of sampling sites

所采集的岩样均为不规则形状, 其中 6 个岩样由合作单位斯洛伐克夸美纽斯大学自然科学学院带去分析, 其余 10 个样本除 4 个因为微节理发育而无法加工外, 依据中华人民共和国国家标准《工程岩土试验实验方法标准》(GB/T50266-99) 要求, 在中山大学工学院岩石力学实验室进行磨制与加工成 6 个标准化圆柱体试件, 直径约为 5 cm, 高度约为 10 cm; 另在中国科学院广州地球化学研究所制备 6 个岩石薄片。

2.2 试验测试方法

本次研究对岩样进行的试验测试包括单轴抗压强度测试和岩矿薄片鉴定。岩石的单轴抗压强度测试在中山大学工学院的岩石力学实验室进行, 所用的设备为 YAW-42061 型微机控制电液伺服压力试验机, 加载速度为每秒 0.65 MPa, 相关的测试步骤按照国家标准《工程岩体实验方法标准》(GB/T50266-99) 及行业标准《水利水电工程岩石实验规程》(SL264-2001) 进行。

岩矿薄片鉴定在中山大学地球科学与地质工程学院的岩矿鉴定实验室进行，所用的设备为 BX51 型 Olympus 透反偏光显微镜，主要通过单偏光和正交偏光两个系统，在偏光显微镜下对碎屑组分、填隙物成分、胶结类型和结构进行观察鉴定与定量统计。其中，在对碎屑颗粒粒径进行统计时，将欲测矿物颗粒的直径与目镜刻度尺比齐，数出所占格数，再乘刻度尺每格值，即得粒径大小，不等轴颗粒则取其最长径为粒径，每次均按相等的间距沿水平、垂直方向移动物台，并对视野范围内的颗粒进行粒径测定，每个薄片统计的颗粒数为 200 颗。

3 实验结果与分析

3.1 红层软岩的力学性质参数测试

红层软岩的力学性质主要指其强度与变形特

性，而单轴抗压强度与弹性模量是表征红层软岩变形力学特征的主要参数^[17]。利用岩石压力试验机对圆柱形试件进行单轴抗压试验获取其力学性质参数，有助于研究红层软岩强度和变形特性及其发生破裂的发展过程。本次试验共对 6 个岩样进行单轴抗压强度测试，表 1 为各岩样岩石力学参数的试验结果，图 6 为各个岩样单轴抗压强度试验的应力 - 应变、应变 - 时间关系曲线。其中，单轴抗压强度值可通过试验直接测出；弹性模量则根据应力 - 应变曲线求取，计算公式如下^[18]

$$E_{50} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\varepsilon_{h50}}$$

式中， E_{50} 为弹性模量 (MPa)； $(\sigma_1 - \sigma_3)_{50}$ 相当于 50% 主应力差的应力值 (MPa)； ε_{h50} 为应力为抗压强度 50% 时的轴向应变值。

表 1 单轴抗压强度的试验结果

Table 1 The test results of uniaxial compressive strength

岩样	岩石名称	受力方向	试验状态	平均直径	高度	横截面积	破坏载荷	单轴抗压强度	弹性模量
				mm		mm ²	kN	MPa	GPa
A	长石砂岩			49.36	81.65	1 912.19	46.63	24.37	6.12
B	长石砂岩	轴		49.26	96.52	1 904.45	62.13	32.59	5.28
C	含砾砂岩	向	干燥	49.30	91.21	1 907.94	68.36	35.74	11.01
D	长石砂岩	受		49.25	96.56	1 904.07	78.03	40.96	10.90
E	长石砂岩	力		49.35	95.89	1 909.87	56.41	29.53	8.90
F	含砂细粉砂岩			49.15	92.77	1 896.35	39.84	21.01	6.87



图 6 各岩样应力 - 应变 (a), 应变 - 时间关系曲线图 (b)

Fig. 6 The uniaxial stress-axial strain and the axial strain-time curve of rock samples

据图 6 分析可知,各个岩样在力学行为上具有一定的共性,表现如下:

1)在试验前期,随着时间和应力的增加,各岩样的应变值变化较为明显,表明各岩样在前期均发生了较大的压密变形作用,可推断岩样可能具有较大的孔隙。该阶段可看作是岩样的塑性变形阶段,从图 6(b)可判断出大部分岩样塑性变形过程持续的时长约为 10 s;

2)在试验后期,大部分岩样压密已逐渐趋于极限,应变值亦逐渐趋于稳定到达峰值,不再随时间和应力值的增加而发生明显变化,岩样的变形进入弹性变形阶段;

3)由上述两点可知,各岩样均经历两次变形阶

段,按先后顺序分别为塑性变形与弹性变形阶段。两阶段组合形成的的应力-应变曲线亦称塑弹性曲线,形态上表现出来的典型特征为上凹形^[19](图 6(a))。两阶段的时间分界节点大概出现在第 10 秒以后(图 6(b)),各岩样的弹性阶段均较显著,应变峰值多集中在 0.18~0.24 之间。

3.2 红层软岩物质组成对其力学性质的影响

3.2.1 红层软岩物质组成 对红层软岩 6 个岩样进行岩矿薄片鉴定,测得相应岩样中的矿物成分及相对含量(表 2、图 7)。鉴定结果表明,岩样中的主要矿物成分为石英和长石,次要矿物成分为方解石,含少量岩屑和云母。

表 2 岩样矿物成分统计表

Table 2 Statistics of the mineralogical compositions of rock samples

岩样编号	矿物				岩屑	其他
	石英	长石	方解石	云母		
A	35	29	20	3	8	5
B	42	36	10	1	9	2
C	55	27	7	2	6	3
D	52	38	3	3	2	2
E	45	32	10	3	5	5
F	40	27	13	7	7	6

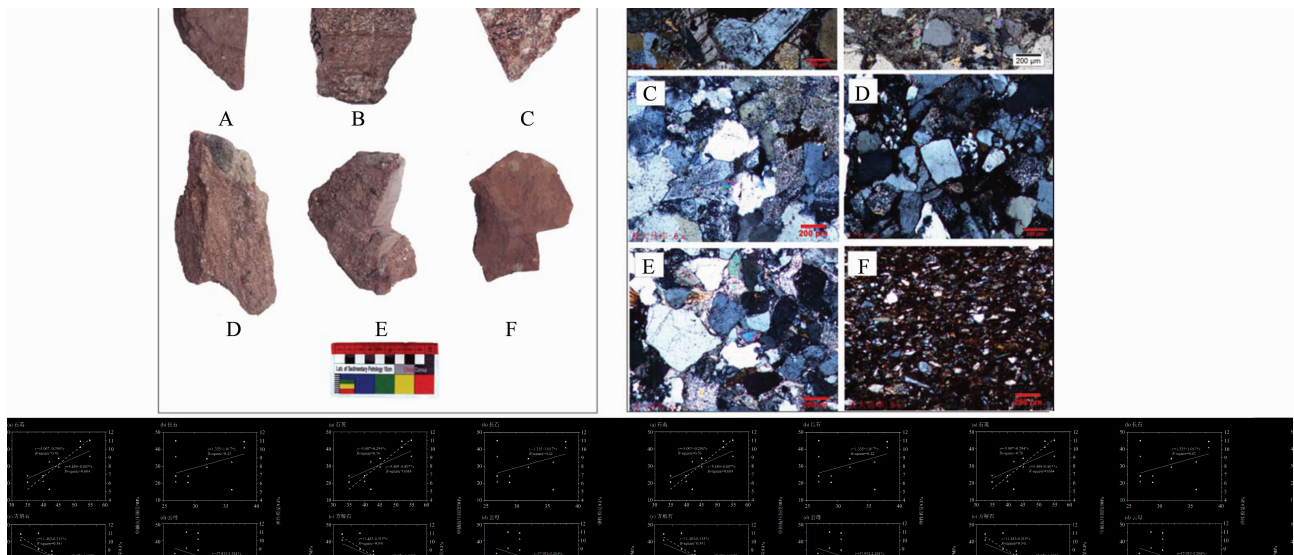


图 7 各岩样标本照片和偏光显微镜下的岩样薄片图像

Fig. 7 Photos of hand specimen and thin sections under polarized light microscope

3.2.2 红层软岩物质组成对其力学性质的影响 为研究红层软岩物质组成对其力学性质影响的情况,本文采用数学相关性分析方法,根据表 1 和 2 建

立起岩样矿物成分与力学性质的对应关系,并分别给出了每一种矿物成分的相对含量与单轴抗压强度、弹性模量之间对应关系的散点图(图 8)。

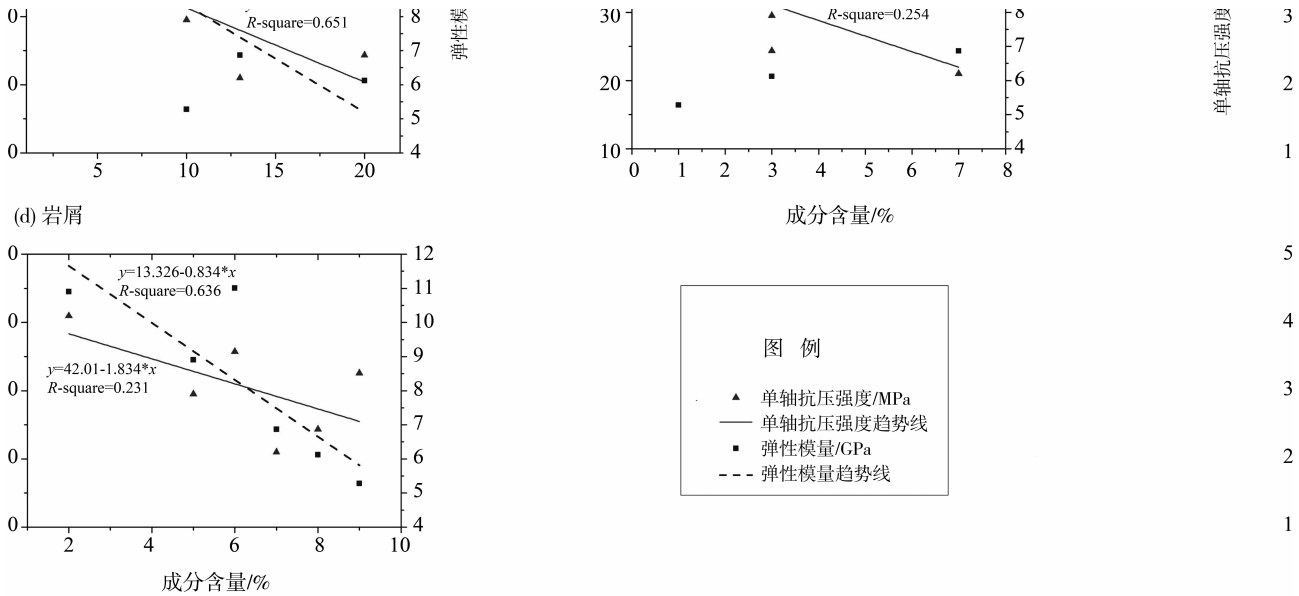


图 8 岩屑矿物成分含量与力学参数之间的关系图

Fig. 8 The relationship between mineral composition and the mechanical properties of rock

从图 8 可以看出：

1) 石英、长石含量与抗压强度值呈正相关关系,该两种矿物含量的增加均使得抗压强度呈上升的趋势(图 8(a) - (b));从判定系数 R^2 来看,该两种矿物与抗压强度的 R^2 分别为 0.42 和 0.654,表明岩样中石英、长石的含量与抗压强度之间存在较好的相关性。结合薄片鉴定实验,从岩石矿物学角度来分析,由于石英化学成分为 SiO_2 ,为刚性矿物,摩氏硬度为 7,硬度较大且不易风化,无解理发育,因此其含量越高,岩样的抗压强度与弹性模量值自然就越大,此分析在图 8(a)上有很直观的数学关系体现:石英含量和岩样的抗压强度、弹性模量呈现出显著的正相关关系,其判定系数 R^2 分别为 0.654 和 0.76。相比较而言,长石类矿物虽硬度也较大,但易

风化,且发育多组解理,故随其含量的变化而表现出来的岩样力学特性不如石英稳定,如图 8(b)所示,长石含量与岩样抗压强度的相关性判定系数 R^2 为 0.42,而石英的 R^2 为 0.654,明显比石英与岩样抗压强度的相关性要弱;而由图 8(b)中长石含量对应的岩样弹性模量散点分布图则几乎看得出来长石含量与岩样弹性模量的相关性。

2) 方解石的含量与抗压强度、弹性模量呈负相关关系,随着方解石含量的升高,岩样的抗压强度与弹性模量均呈下降趋势(图 8(c)),其相关性判定系数 R^2 分别为 0.651 和 0.541,表现出显著的线性相关。镜下薄片实验对方解石矿物的观察分析显示,方解石具两组明显的菱形解理,解理交角约为 77 度,一般呈不规则粒状、块状或斑点状不均匀分

布于孔隙中,见有溶蚀现象。方解石的这些细观结构特征(具解理、有溶蚀现象等)和本身较低的硬度特性(摩氏硬度仅为 3),使其对岩样的力学性质产生了较大的影响,试验结果及数学相关性分析表明,方解石含量越高,红层软岩岩样的力学性能就越差。

3) 云母、岩屑的含量与抗压强度亦呈负相关关系(图 8(d) - (e)),但相关性判定系数 R^2 均小于 0.3,为微弱的负线性相关,说明该两种矿物对岩样抗压强度的影响较小;而岩屑的含量与岩样弹性模量之间存在着较强的相关性, R^2 为 0.636。

由上述分析可知,影响红层软岩力学性质的矿物成分主要是石英、长石和方解石。石英和长石含量的多少对红层软岩力学性质的强弱起着关键的影响,但方解石含量变化亦是影响红层软岩力学性质的重要因素。文献[2,8,11]的研究表明,由于软岩中方解石的存在,使岩石具有一定可溶性,遇酸后易被溶蚀分解,甚至会导致胶结物的解体,极大地降低软岩内部颗粒间的粘结力,从而削弱软岩的力学性质,使之易发生崩解。

需要注意的是,矿物成分与力学性质之间虽存在一定相关性,但同时其离散性亦大,如图 8 所示,相关性系数 R^2 值为 0.2 ~ 0.7 之间,均低于 0.8。这

是由于上述研究仅选取物质组成因素进行分析造成的结果。实际上影响红层软岩力学性质的内在因素除了物质组成外还包括结构特征,离散性的存在也正好说明了这一点。因此,有必要进一步开展红层软岩结构特征对力学性质影响的深入研究。

3.3 红层软岩结构特征对其力学性质的影响

沉积岩石的结构特征是对岩石力学性质起着决定性影响作用的另一个内在因素^[17]。红层软岩的结构特征包括碎屑颗粒粒径、胶结物的结构和胶结类型;其中,颗粒粒径是控制岩石强度变化的主要微观结构因素^[20]。因此,本文主要从微观的颗粒粒径着手,采用薄片实验和数理统计分析相结合的方法来研究其对红层软岩力学性质的影响。

3.3.1 红层软岩颗粒粒度分析 基于 1934 年克鲁宾(Krumbein)的 Φ 值粒级分类标准^[21],利用偏光显微镜对 6 个岩样薄片进行颗粒粒径(d)测量统计,取其 2 的负对数($\lg 2d$)得到 Φ 值,每个薄片统计 200 颗,将其结果列于表 3;根据表 3 的统计结果依次作出 Φ 值的频率直方图、频率曲线图及累积频率曲线图(图 9),从而直观地显示出各个岩样的粒级分布特征和平均粒度大小。

表 3 红层软岩颗粒粒度统计表

Table 3 Statistics of the grain diameter of red bed soft rock

粒度	粒级 d/mm	巨砂 2 ~ 1	粗砂 1 ~ 0.5	中砂 0.5 ~ 0.25	细砂 0.25 ~ 0.125	微砂 0.125 ~ 0.0625	粗粉砂 0.0625 ~ 0.03125	细粉砂 0.03125 ~ 0.01563
	Φ 值 ($-\lg 2d$)	-1 ~ 0	0 ~ 1	1.00 ~ 2.00	2.00 ~ 3.00	3.00 ~ 4.00	4.00 ~ 5.00	5.00 ~ 6.00
A	颗粒数	1	13	53	71	48	10	4
	频率/%	0.5	6.5	26.5	35.5	24	5	2
	累计频率/%	0.5	7	33.5	69	93	98	100
B	颗粒数	8	25	36	59	48	23	1
	频率/%	4	12.5	18	29.5	24	11.5	0.5
	累计频率/%	4	16.5	34.5	64	88	99.5	100
C	颗粒数	4	50	63	44	30	9	0
	频率/%	2	25	31.5	22	15	4.5	0
	累计频率/%	2	27	58.5	80.5	95.5	100	100
D	颗粒数	9	20	63	54	31	19	4
	频率/%	4.5	10	31.5	27	15.5	9.5	2
	累计频率/%	4.5	14.5	46	73	88.5	98	100
E	颗粒数	0	5	22	77	49	37	10
	频率/%	0	2.5	11	38.5	24.5	18.5	5
	累计频率/%	0	2.5	13.5	52	76.5	95	100
F	颗粒数	0	1	6	25	50	79	39
	频率/%	0	0.5	3	12.5	25	39.8	19.8
	累计频率/%	0	0.5	3.5	16	41	80.5	100

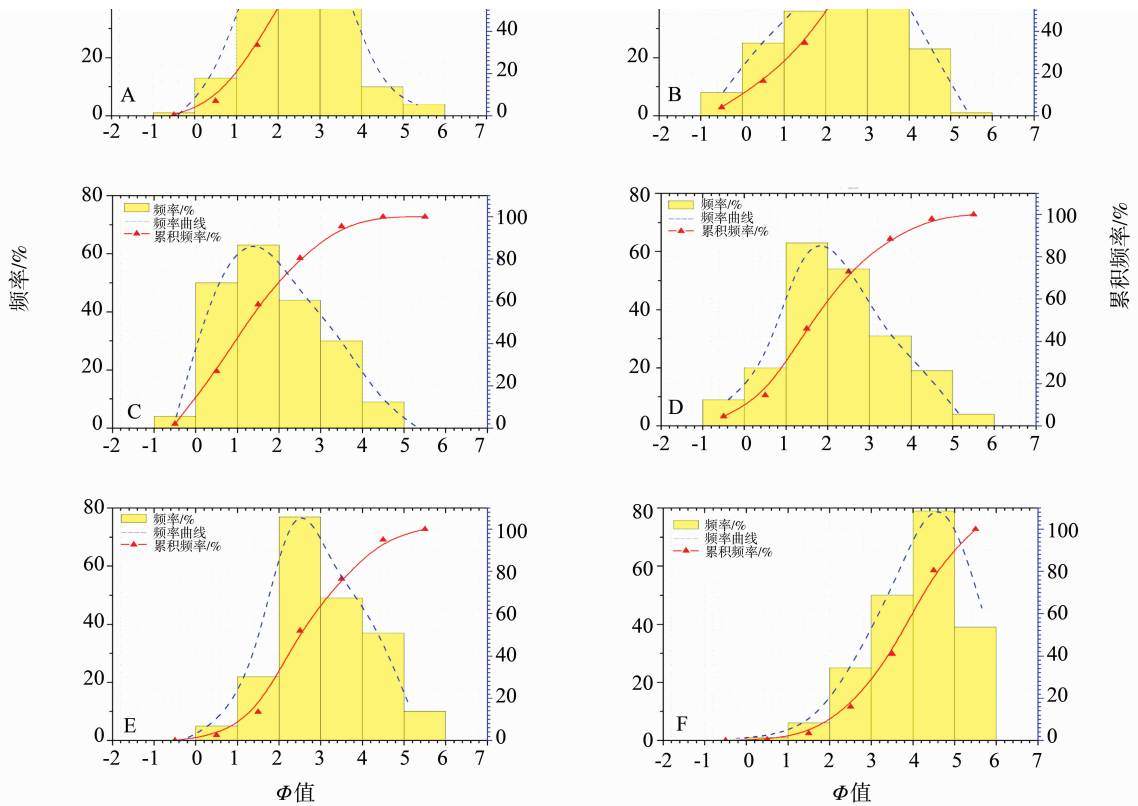


图 9 各岩样颗粒粒度统计的频率分布、频率曲线和累积频率曲线

Fig. 9 Frequency distribution, frequency curve and cumulative frequency curve of grain diameter

以各岩样的颗粒粒径累积频率曲线图为基础，按 Fork 和 Ward 图解法参数计算公式求得各岩样的

平均粒径 (M_z)、中值 (M_d)、标准偏差 (σ)、偏度 (SK_1) 和峰度 (K_C) 等粒度参数 (表 4)。

表 4 红层软岩粒度参数统计 (Φ 值)

Table 4 Statistics of the grain size parameters of red bed soft rock

粒度参数岩样编号	最小 Φ	最大 Φ	M_z	M_d	σ	SK_1	K_C
A	-1	5.718	1.976	1.966	1.180	0.027	0.980
B	-0.683	5.158	1.950	2.035	1.439	-0.079	0.918
C	-0.77	4.673	1.361	1.253	1.290	0.158	0.882
D	-2.000	5.397	1.772	1.674	1.425	0.100	1.019
E	0.444	5.958	2.614	2.503	1.242	0.110	0.963
F	0.321	5.99	3.610	3.69	1.161	-0.137	0.955

从图 9 及表 4 可知,红层软岩的颗粒粒度主要以中粒为主,次为细粒,而粗粒和粉砂较少,平均粒径值 Φ 值范围基本在 1 ~ 3 之间,呈现出中间高两头低的对称特征,该特征表现在粒径分布上即为正态分布,可从图 9 的频率曲线上较为直观地看出来。从表 4 中 6 个岩样的偏度值亦可知,其值均落在 -0.1 ~ 0.16 范围内,粒度分布表现出很好的对称程

度。

表 4 的统计结果还显示,岩样的颗粒粒径最大为 4 mm ($\Phi = -2$),最小为 0.015 mm ($\Phi = 6$),其标准偏差值在 1 ~ 1.5 之间,表明岩样的分选性普遍较差;同时得知,经公式计算得到的平均粒径值与直接从累积频率曲线上读取的中值结果很接近,在难以获取更多 Φ 值的情况下可直接用中值替代平

均粒径值。

平均粒径是一个重要的粒度参数,从沉积学角度看,它代表了整个岩石的粒度水平,可反映当时的沉积环境下搬运介质的平均动能;从岩石力学角度看,其大小亦会对岩石本身的力学性质产生影响,因此,红层软岩平均粒径的研究也是本文关注的一个重点内容。经图 9、表 3 和表 4 分析,得出红层软岩

6 个岩样的平均粒径关系是: $C > D > B > A > E > F$ 。

3.3.2 红层软岩颗粒粒径对其力学性质的影响
重点研究红层软岩各岩样平均粒径与力学性质参数之间的关系。根据前述统计分析结果,建立起红层软岩颗粒平均粒径(Φ 值)与抗压强度、弹性模量的对应关系分布图(图 10(a),(b)),并分别研究平均粒径对抗压强度、弹性模量的影响情况。

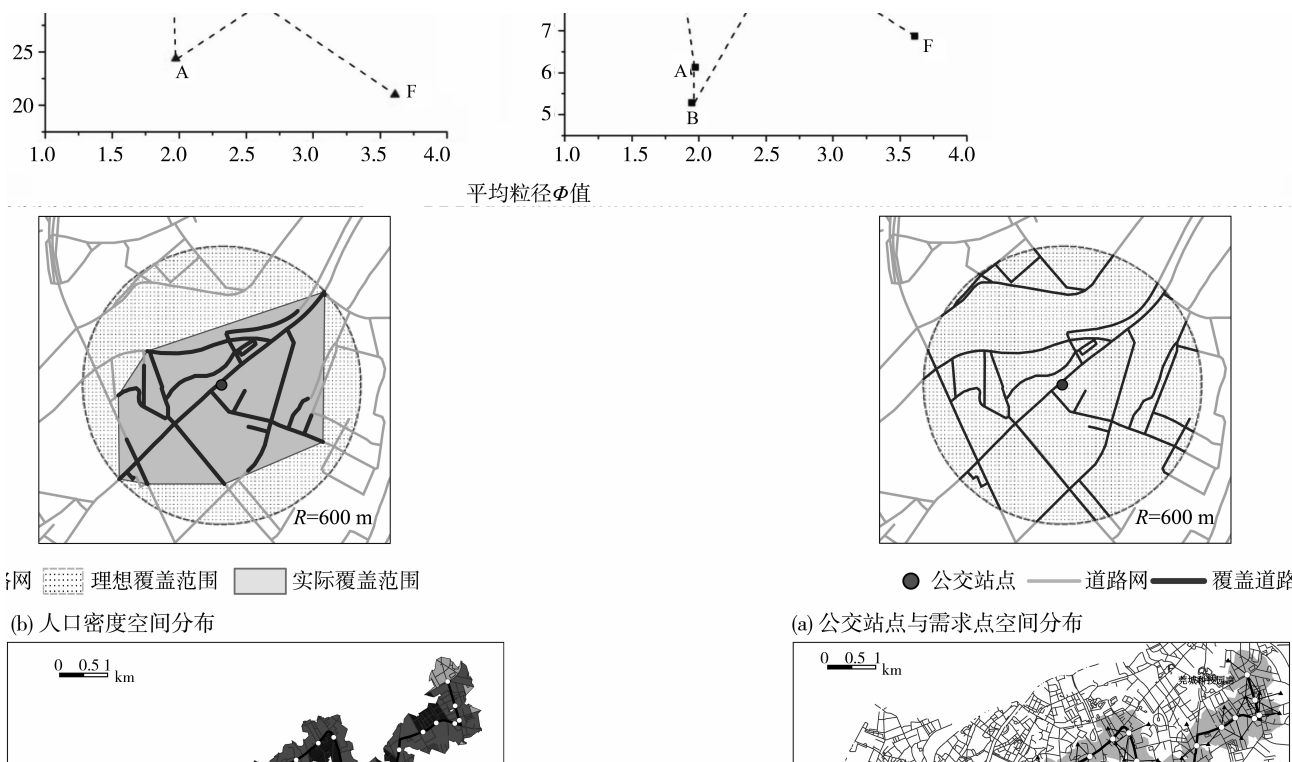


图 10 平均粒径 (Φ 值) 与力学参数之间的关系图

Fig. 10 Relationship between the grain diameter and the mechanical properties of rock

图 10(a) 的散点分布关系与趋势线表明,平均粒径 Φ 值与岩样抗压强度存在一定的相关性,随着 Φ 值的逐渐减小,抗压强度呈现上升的趋势,其判定系数 R^2 为 0.559 3,有较好的相关性。由此可判断,组成红层软岩内部颗粒平均粒径的大小对其抗压强度的影响是显著的,平均粒径越大(或平均粒径 Φ 值越小),其抗压强度越高。与之对比,图 10(b) 中弹性模量与平均粒径 Φ 值的相关关系却并不明显,其判定系数 R^2 仅为 0.159 2,两者之间基本不相关。

的离散性则是导致此问题出现的重要原因。但同时,数据离散并不说明两者之间毫无关系,离散的数据分布在某些情况下也存在规律性,可借用其他手段及方法对其进行讨论与分析,从而揭示出两者之间隐藏的内在关系。

颗粒的平均粒径对两个力学性质参数的影响程度,一个表现出较强的相关性,影响较显著;另一个却完全不相关,两者之间无任何关系。此差异性结果说明,仅用简单的线性相关趋势线并不能完全衡量得出来平均粒径与力学性质的真正关系,而数据

通过对散点图(图 10(a),(b))的进一步研究,在散点图中将各点标记上对应的岩样编号,并按岩样平均粒径从小到大的顺序依次用折线相连(图 10(c),(d)),发现平均粒径与抗压强度、弹性模量的关系具有如下共同特征:

- 1) 随着 Φ 值的降低,折线整体上有向上走的趋势,说明平均粒径的增大不仅会使抗压强度变大,弹性模量也相应变大,这种变化在岩样 F、E、D 上表现得尤为明显;
- 2) 当 Φ 值降低到一定程度,抗压强度与弹性模

量均同时发生明显的跃变,平均粒径 $\Phi = 2.0$ ($d = 0.25$ mm) 处是岩石力学性质发生跃变的节点(图 10(c),(d))。

经研究分析,认为造成跃变的主要原因有两个:其一,节点上发生跃变的岩样主要是 A 和 B,物质组成上均含有较多的方解石,尤其是 A 岩样,方解石的含量达 20%,为 6 个岩样中最高。前文已分析过,方解石的大量存在会极大地削弱红层软岩的力学性质,故在研究红层软岩岩样颗粒平均粒径对其抗压强度、弹性模量的影响时,A 岩样的平均粒径为 $\Phi = 1.976$ ($d = 0.28$ mm),虽比 E、F 岩样的平均粒径大,但软性物质成分方解石的大量存在使其对力学性质的影响远远盖过本身的颗粒平均粒径,其抗压强度比 E 岩样小,弹性模量比 F 岩样小,因此产生跃变。该跃变现象亦表明,红层软岩中颗粒平均粒径对其力学性质的影响要小于物质组成对其力学性质的影响。其二,影响红层软岩力学性质的结构特征参数除颗粒粒径外还有颗粒间的胶结作用和胶结类型等,本研究由于没有考虑到红层软岩胶结作用与胶结类型的影响,导致平均粒径与力学性质之间离散性较大,因此出现了所谓的数据上的“跃变”。

4 结 论

通过单轴岩石力学试验,研究了崑山丹霞红层软岩夹层的力学性质;在此基础上进一步分析影响红层软岩力学性质的主要控制因素,建立红层软岩物质组成成分、平均粒径结构特征等与宏观力学性质之间的相互关系,得出如下主要结论:

1) 崑山丹霞红层软岩夹层的物质组成成分、颗粒粒径结构特征对其力学性质产生一定的影响,整体趋势是随着硬性物质成分(如石英、长石等)含量的增加和颗粒平均粒径的增大,其力学性质得到相应增强,表现为抗压强度、弹性模量等力学参数的增大。

2) 当平均粒径增大(或 Φ 值减少)到一定值时(该粒径值经分析约为 $d = 0.25$ mm),会使岩石力学性质发生一次较明显的跃变,此时抗压强度与弹性模量均明显下降。由此跃变可推导出如下结论:崑山丹霞红层软岩夹层的物质组成成分对其力学性质的影响要大于颗粒平均粒径对其力学性质的影响。

参考文献:

[1] 彭华,吴志才. 关于红层特点及分布规律的初步探讨[J]. 中山大学学报:自然科学版,2003,42(5):109 -

113.

- [2] 彭华. 中国南方湿润区红层地貌及相关问题探讨[J]. 地理研究,2011,30(10):1739 - 1752.
- [3] 曾昭璇,黄少敏. 中国东南部红层地貌[J]. 华南师院学报:自然科学版,1978(1):56 - 73.
- [4] 曾昭璇,黄少敏. 中国东南部红层地貌(续)[J]. 华南师院学报:自然科学版,1978(2):40 - 54.
- [5] 陈致均,黄可光. 甘肃丹霞地貌初探[J]. 西北师范大学学报:自然科学版,1989(4):68 - 71.
- [6] 刘尚仁,黄瑞红. 广东红层岩溶地貌与丹霞地貌[J]. 中国岩溶,1991,10(3):16 - 22.
- [7] 刘尚仁. 广东的红层岩溶及其机制[J]. 中国岩溶,1994,13(4):395 - 403.
- [8] 彭华,邱卓伟,潘志新. 丹霞山顺层洞穴风化特征的试验研究[J]. 地理科学,2014,34(4):454 - 463.
- [9] 朱诚,彭华,欧阳杰,等. 浙江方岩丹霞地貌发育的年代、成因与特色研究[J]. 地理科学,2009,29(2):229 - 237.
- [10] 欧阳杰,朱诚,彭华,等. 浙江方岩丹霞地貌类型及其空间组合[J]. 地理学报,2009,64(3):349 - 356.
- [11] 朱诚,彭华,李中轩,等. 浙江江郎山丹霞地貌发育的年代与成因[J]. 地理学报,2009,64(1):21 - 32.
- [12] 陈姝,朱诚,彭华,等. 广东丹霞山洞穴景观岩体稳定性的抗压实验研究[J]. 安徽师范大学学报:自然科学版,2010,33(2):170 - 174.
- [13] ZHU C, PENG H, OUYANG J, et al. Rock resistance and the development of horizontal grooves on Danxia slopes[J]. *Geomorphology*,2010,123(1):84 - 96.
- [14] 欧阳杰,朱诚,彭华,等. 湖南崑山丹霞地貌岩体抗酸侵蚀脆弱性的实验研究[J]. 地球科学进展,2011,26(9):965 - 970.
- [15] 肖自心,汤国雄,邹文发. 崑山的形成与地貌发育特征[J]. 湘潭师范学院学报:社会科学版,1997(03):65 - 71.
- [16] 邓美成,王光明. 崑山丹霞地貌风景的分析与评价[J]. 经济地理,1996,16(增刊):4 - 20.
- [17] 孟召平,苏永华. 沉积岩体力学理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2006:39 - 70.
- [18] 付志亮. 岩石力学试验教程[M]. 北京:化学工业出版社,2001:59 - 60.
- [19] 沈明荣,陈建峰. 岩体力学[M]. 上海:同济大学出版社,2006:24 - 25.
- [20] POKRYL R. Some microstructural aspects of strength variation in rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*,2001,38(5):671 - 682.
- [21] KRUMBEIN W C. Size frequency distributions of sediments[J]. *Journal of Sedimentary Research*,1934,4(2):65 - 77.