

文章编号:1001-4888(2010)03-0365-07

## 水—岩作用对岩石抗压强度效应 及形貌指标的实验研究<sup>\*</sup>

彭曙光<sup>1</sup>, 裴世聪<sup>2</sup>

(1. 安徽建筑工业学院 土木工程系, 安徽 合肥 230601; 2. 北京中华建规划设计研究院, 北京 100000)

**摘要:** 通过测定金川岩样的含水率以及水对岩石抗压强度, 采用精度高达  $0.5\mu\text{m}$  的 Talysurf CLI 2000 三维表面激光形貌仪, 对经过矿井深部地下水作用前后的四种不同岩性的岩石试件进行形貌扫描, 结合八个形貌参数作出定量分析对比。实验表明: 矿岩遇水软化, 岩石抗压强度降低, 破坏时不属于脆性破坏, 其原因可能就在于由于其中的粘土矿物吸水, 当受力压缩时, 水受压排出产生压密现象。水—岩作用后岩石表面形貌高度的离散性、粗糙程度变大, 高度的分布概率更为集中, 由负偏态变为正偏态且高度分布的对称性好于作用前。峰点算术平均曲度  $S_a$  都有规律地降至 0.62 附近, 更具协调性。

**关键词:** 水—岩作用; 含水率; 形貌参数; 岩石力学

**中图分类号:** TU452      **文献标识码:** A

### 0 引言

金川矿区岩体较为破碎, 受工程影响, 岩体松弛、结构面滑移张开现象突出, 为地下水的渗流提供了通道; 工程用水(施工用水、充填析出水)沿这些因松弛而张开的结构面逐级下渗, 直至工程范围内的所有围岩, 从而使其受到地下水的影响。断层岩以及结构面内的充填物质等均是水敏感性岩石。一旦遇水, 将会发生强烈膨胀, 从而成为影响硐室的稳定性。地质调查表明, 矿区巷道的片冒、底鼓等现象突出, 均与地下水活动有关<sup>[1]</sup>。因此, 研究水—岩作用对金川矿区岩石的力学性质影响是非常必要的。

国内外学者在相关领域进行了大量研究, B. Vásárhelyi 等人<sup>[2]</sup>对含水岩石的抗压强度进行了研究, 王泳嘉, 冯夏庭等<sup>[3]</sup>则指出水对岩石的变形特性是具有时间效应的。陈钢林, 周仁德等<sup>[4]</sup>对水对岩石的弹性模量、单轴抗压强度的影响程度进行了实验研究, 而李鹏, 刘建等<sup>[5]</sup>分析了含水率对砂岩软弱结构面剪切蠕变特性的影响。在形貌描述领域, 夏才初, 孙宗颀等<sup>[6]</sup>基于二维粗糙线统计出描述岩体表面形貌的方法; 夏才初等<sup>[7,8]</sup>在此基础上研制了 RSP - I 型智能岩石表面形貌仪和 TJXW - 3D 型便携式岩石三维表面形貌仪, 可对测试结果进行采集、处理、显示和记录; N. Rengers 等<sup>[9]</sup>利用立体显微镜对节理表面形貌进行了测量, 并与图像分析系统连接, 以分析表面形貌特征。

本文对采自金川矿区的四种不同岩性的试样进行自由膨胀, 饱水单轴抗压以及水—岩作用前后形貌扫描试验。其中, 利用英国 Taylor Hobson 公司生产的 Talysurf CLI 2000 三维表面激光形貌仪, 通过高精度激光扫描, 配合 Talymap Gold 分析软件, 对岩石表面形貌作出恰当的数学描述, 选择合理的形貌参数, 建立形貌参数和相应物理量之间合理的定量关系。

\* 收稿日期: 2009-12-03; 修订日期: 2010-01-08

基金项目: 2009 年建设部科学技术计划项目(2009-K4-33); 安徽省级自然科学研究重点项目(KJ2009A101)

通讯作者: 彭曙光(1972-), 男, 硕士, 讲师, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: peng\_s\_g@aia.edu.cn

## 1 水-岩作用机理

水-岩作用,一般是指水溶液与岩石(体)之间的相互作用,对于岩石力学,则是指水溶液与岩石(体)在岩石固相线下的温度、压力范围内进行的所有化学反应和物理化学作用<sup>[10]</sup>。

水-岩作用不仅导致化学元素在岩石与水之间重新分配,而且导致岩石细观结构的改变,这二者的变化都将导致岩石力学性质的改变<sup>[11]</sup>。水-岩作用对岩石的力学效应是相当复杂的,是一个广阔的研究领域,其未知问题非常多,有待进一步的研究。

## 2 水-岩作用下抗压强度力学效应

水-岩作用对于岩石的软化作用,一般用弹性模量、抗压强度、抗碱强度等参数来定量表示。本实验利用 RYL-600 微机控制岩石试验机对经取自金川二矿区矿井深部的地下水(pH=7.1)充分软化的岩石试样进行单轴压缩。图1为部分实验试样,图2所示为四种不同岩性试样实验所得数据。通过相关性分析,得出含水率与单轴抗压强度的线性拟合关系式:

$$\text{大理岩: } y = 87.564 - 181.87x \quad R=0.9716$$

$$\text{二辉橄榄岩: } y = 225.77 - 285.97x \quad R=0.9446$$

$$\text{斜长角闪岩: } y = 176.59 - 236.90x \quad R=0.9758$$

$$\text{混合岩: } y = 106.62 - 106.01x \quad R=0.9783$$



图1 部分岩石试样

Fig.1 The specimens of rock

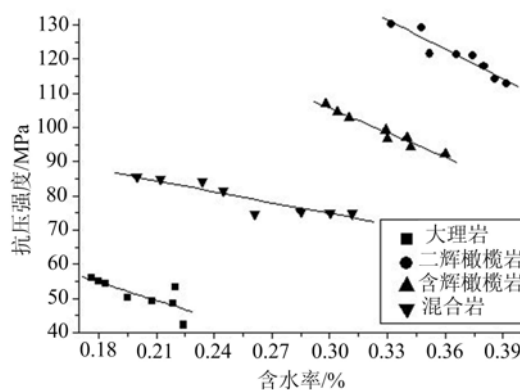


图2 岩石含水率和抗压强度曲线

Fig.2 Rate of water content-compressive strength curve for rock

综合归纳得出含水率对岩石单轴抗压强度的影响关系式为:

$$\sigma_c = a - bW_c$$

其中:  $\sigma_c$  为单轴抗压强度,MPa;  $W_c$  为含水率,而  $a$ 、 $b$  值的确定则由岩石性质决定,其中包括了岩石矿物与胶结物的成分、亲水性、孔隙度、裂隙裂纹的发育情况及透水性等。

在水岩作用之后,金川矿岩会显现出一个很明显的效应:含水率越大,试样的抗压强度峰值越低。水-岩相互作用后,宏观上岩石单轴抗压强度的降低与水化学作用的微观机制是密切相关的<sup>[12]</sup>,岩石抗压强度软化效应与水岩作用反应的剧烈程度成正比,含水率的大小可以从一个侧面体现出剧烈的程度。水-岩相互作用后,宏观上岩石单轴抗压强度的降低与水化学作用的微观机制是密切相关的。这主要是因为水溶液分子或离子对岩石矿物的侵蚀、溶解、交换等作用,改变了岩石的组成、结构,磨蚀了矿物晶格,使岩石强度降低。

图3为同类干燥与饱水岩石的应力应变曲线对比图。在干燥状态下,最初阶段可以出现压密现象,应力应变曲线表现为下凹;而饱水试样进行压缩实验时,曲线上均出现了下凹现象。其原因可能由于试样中的粘土矿物吸水,当受力压缩时,还有相当一部分吸附在层理面附近矿物颗粒上,水受压排出产生压密。在试样接近破坏时,干燥状态下曲线基本上为线性变化,破坏时为剪切脆性破坏;饱水曲线表现

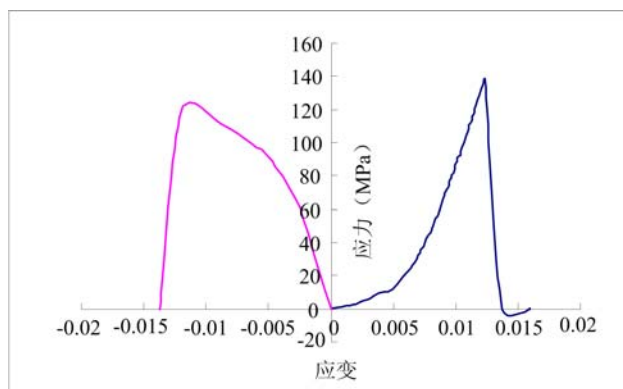


图 3 干燥岩石与同类饱水岩石的单轴应力应变对照图

Fig. 3 The comparison between the rock with the dry and saturated situations

为向下弯曲,不属脆性破坏。其原因可能与矿物晶格内的水含量变化有关,这还有待进一步的研究<sup>[13]</sup>。

### 3 水—岩作用下岩石形貌试验研究

#### 3.1 仪器、试件与溶液的选取

本试验所用形貌仪为英国 Taylor Hobson 公司生产的 Talysurf CLI 2000 三维表面激光形貌仪。该仪器在世界上表面和形状测量领域拥有出色的技术。仪器的控制、测试及数据处理均由计算机系统及相关软件来实现,其最大特点是利用三角光学原理对试件表面形貌进行激光扫描最大面积为 200mm × 200mm × 200mm,最高分辨率为 0.5 $\mu$ m。利用软件 Talymap Gold 的数值分析能力,可以对岩石表面形貌作出恰当的数学描述,计算出合理的形貌参数。

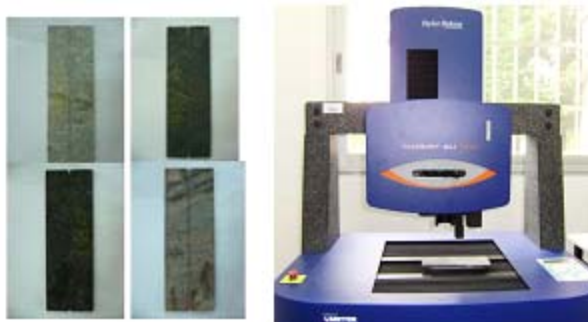


图 4 试件和形貌仪示意图

Fig4 The diagram of specimens and topography measurement instrument

试验所用岩样与前面实验相同(见表 1 和图 4)。试件加工时,先用岩石切割机将岩石锯成薄片,再在金刚砂磨石机上磨光,加工时保持试样上下表面平整。试验所用溶液同样为取自金川二矿区矿井深部的地下水,pH 值为 7.1。

表 1 干燥试样尺寸与力学参数

Tab.1 Sizes and mechanical parameters of dry specimens

组号	岩石名称	试样块数	试样尺寸(mm)	弹性模量(GPa)	泊松比
1	白云石大理岩	8	180×60×4	26.12	0.434
2	二辉橄榄岩	8	180×60×4	24.87	0.389
3	斜长角闪岩	8	180×60×4	21.09	0.312
4	混合岩	8	180×60×4	19.11	0.356

#### 3.2 试验过程与方法

试验的过程分为三步,首先将所有试件放置于 40 $^{\circ}$ C 的恒温中,经过 48 天的烘干过程后取出进行扫描。本试验选取形貌仪的最高精度 0.5 $\mu$ m,扫描的范围为试件表面轮廓,以仪器默认的坐标轴为准,x 方向为激光取点方向,y 方向为激光扫描行间距方向,z 方向为竖直方向。激光取点的原则为,每隔 0.5 $\mu$ m 取一个点,每隔 0.5 $\mu$ m 取一条扫描线,直至铺满选定的扫描区域为止。

扫描过后将试件放置于盛有本试验所用溶液的器皿中,让其充分进行水—岩反应,48 天后取出以

相同方式再次进行扫描,并保存结果于计算机中。

### 3.3 微观效果分析

发生水-岩作用的岩石,当其内部含水率较天然状态有所增加时,它的各个部分都将随着含水率的增加而产生膨胀,试验中五种岩性试件水-岩作用前后试件微观形貌如图5所示。当岩石内部某些结晶格架,含水而产生晶胞膨胀时,会使岩体表面膨胀隆起产生变形。

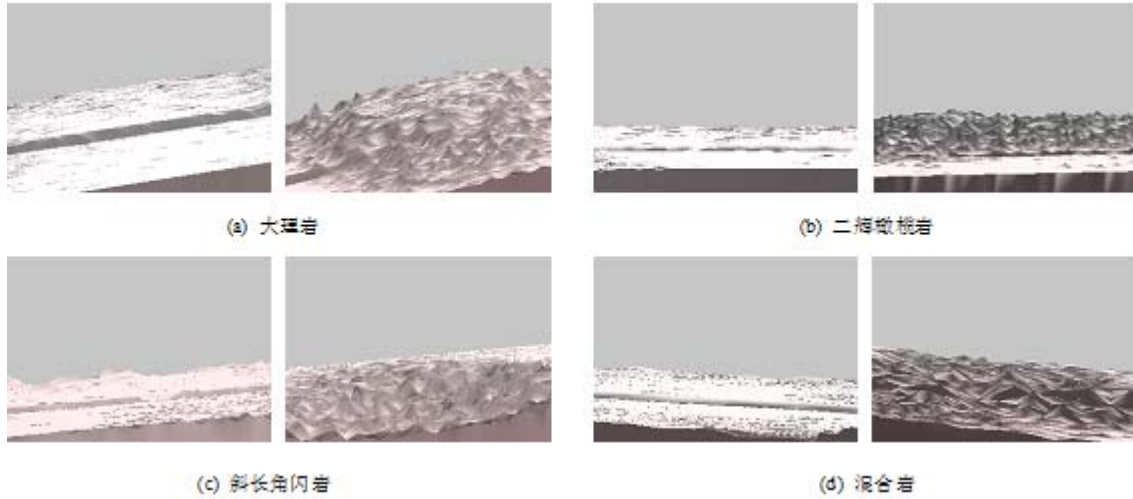


图5 水-岩作用前后试件微观形貌效果图

Fig. 5 Micro-topography diagram of specimens before and after water-rock interaction

利用 Talymap Gold 分析软件,可以将试件表面同一个部位的三维变化情况以放大效果图的形式显示出来。通过图5可以明显看出,水分子的渗透作用,造成结晶格架膨胀隆起,产生一定的膨胀变形,且在短时间内较为剧烈,形似平原中凸起的山峰与凹陷的山谷,且不同的岩性其峰形、峰高度、峰曲度及峰密度等参数各有差异。因此,通过软件定量计算和对比各参数量尤为必要。

表2 表面形貌特征参数表

Tab. 2 Parameters of surface topography

岩石名称	轮廓最大高度 $S_h$ 平均值( $\mu\text{m}$ )		算术偏差 $S_a$ 平均值( $\mu\text{m}$ )		高度均方根 $S_q$ 平均值		偏态系数 $S_s$ 平均值		峰态系数 $S_k$ 平均值		坡度均方根 $S_{dq}$		表面峰点密度 $S_{ds}$ ( $\text{mm}^2$ )		峰点算术平均曲度 $S_c$	
	干燥	饱和	干燥	饱和	干燥	饱和	干燥	饱和	干燥	饱和	干燥	饱和	干燥	饱和	干燥	饱和
大理岩	324.5	286.1	12.1	27.1	15.142	35.371	-1.346	1.272	8.182	12.867	1.964	1.051	0.673	0.306	2.697	0.613
二辉岩	207.2	199.2	33.1	36.44	38.264	47.099	-3.350	0.502	6.247	13.433	1.496	1.326	0.711	0.467	0.621	0.612
斜长岩	248.2	241.5	25.1	33.3	36.308	45.293	-2.835	1.006	3.145	4.152	1.320	1.067	0.373	0.166	0.637	0.621
混合岩	252.9	239.0	9.76	18.79	13.856	29.393	-3.372	0.733	4.923	10.393	0.893	0.613	0.187	0.077	1.258	0.639

### 3.4 表面形貌特征参数

在形貌测量过程中,基准面的选取关系到计算的精度与准确度,本试验以最小二乘面作为测量的基准面<sup>[14]</sup>。试验中四种岩性试件水-岩作用前后试件微观形貌如图5所示。利用 Talymap Gold 分析软件,可以将试件表面同一个部位的三维变化情况以放大效果图的形式显示出来,图5的微观放大倍数为10。下面提到的公式(1)~(5)均出自文<sup>[6]</sup>。

(1) 轮廓最大高度  $S_h$ : 取样面积内,表面轮廓峰顶面与谷底面之间的距离,是被测轮廓区域内最大峰谷高度的单一评定,不涉及在最大峰高与最大谷深之间的轮廓如何变化。

(2) 算术平均偏差(中心面平均高度)  $S_a$ : 被测表面轮廓上各点到轮廓基准面距离(高度  $z(x, y)$  的绝对值)的算术平均值,是反映表面粗糙程度的一个重要参数。其连续形式为:

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_{D_{xy}} |z(x, y)| dx dy \quad (1)$$

(3) 轮廓均方根偏差(高度均方根)  $S_q$ :被测表面轮廓上各点到基准面距离平方和的平均值的平方根,轮廓均方根偏差不但与每一测点相对于基准面的高度有关,而且更对其中较大和较小的高度值较为敏感,能够较好地反映表面形貌的离散性和波动性。其连续形式为:

$$S_q = \frac{1}{A} \sqrt{\iint_{D_{xy}} z^2(x, y) dx dy} \quad (2)$$

(4) 偏态系数  $S_s$ :当高度分布概率密度函数曲线偏离原点而失去对称性时,其偏离程度可用偏态系数表示,对称分布的偏态系数为零,非对称分布时,若曲线向左偏斜,则偏态系数为负,称分布是负偏态的;若曲线向右偏斜,则偏态系数为正,称分布是正偏态的。偏态系数能反映高度分布概率的特征,它的绝对值也可以反映出表面高度分布的对称性程度。表达式为:

$$S_s = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} z^3 \varphi(z) dz}{\sigma^3} \quad (3)$$

(5) 峰态系数  $S_k$ :表示高度分布曲线的凸起程度,概率的分散或集中程度,峰态系数是形貌高度分布的峰度和峭度的度量。当高度分布曲线为正态时,  $S_k = 3$ ;若  $S_k < 3$ ,则为低峰态或负峰态,表示高度分布的概率分散;若  $S_k > 3$ ,则为高峰态或正峰态,表示高度分布的概率集中。其概率形式的表达式为:

$$S_s = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} z^4 \varphi(z) dz}{\sigma^4} \quad (4)$$

(6) 坡度均方根  $S_{dq}$ :在取样面积内轮廓曲面一阶导数的均方根,坡度均方根与表面轮廓的形状有关,对较大的坡度值较为敏感,综合了表面幅值和波长特性,与轮廓处的倾斜状态有关。节理的一些性质如剪胀和渗流阻力等与坡度均方根有关。表达式为:

$$S_{dq} = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_{D_{xy}} \left[ \left( \frac{\partial z}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial z}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy} \quad (5)$$

(7) 表面峰点密度  $S_{ds}$ :当形貌仪扫描所得的表面上任意一个点的高度大于其相邻8个点的高度时,被软件视为一个峰点。通过统计每平方毫米内的峰点数,可以得出试件表面峰点的密度。

(8) 表面峰点算术平均曲度  $S_{sc}$ :激光扫描到任意一个峰点时,对其作出记录,最后统计出所有峰点的平均曲度,反映试件表面峰点的整体曲度情况。

### 3.5 形貌描述指标分析

通过数据的对比分析,可得出以下有益的结论:算术平均偏差与高度均方根的增大以及轮廓高度的减小反应了水-岩作用中的水化膨胀效应,即岩石表面的离散型增大。偏态系数能很好反应出表面的高度分布情况,四种岩性的试件由水-岩作用前的负偏态到之后的正偏态,表面高度出现的频率由负变正,其中以二辉橄榄岩最为明显,变化率达到85%。坡度均方根的减小反映出表面的整体坡度值减小,这也是水化作用的体现。表面峰点密度与峰点算术平均曲度的减小,其中  $S_{sc}$  值有规律地降至0.6200左右,体现出水-岩作用中除了水化效应外,还产生了溶解和水解的效应。

通过整体的比较得出,水-岩作用前后起主导因素的除了水溶液的成分外,岩性也是不可忽视的。起伏度与粗糙度的变化随着岩性呈现出一定的规律性,本试验中四岩性的比较为:二辉橄榄岩 > 混合岩 > 斜长岩 > 大理岩。

## 4 结论

(1) 金川岩石水-岩作用效应明显,对四种不同岩性试样进行了饱水状态抗压试验。含水率越大,最大抗压强度随之降低,利用数值分析方法总结出含水率与单轴抗压强度的线性拟合关系式,其中二辉橄榄岩最为突出。饱水试样的应力应变曲线最初阶段出现了下凹现象。接近破坏时曲线表现为向下弯曲,不属脆性破坏。

(2) 以拥有  $0.5\mu\text{m}$  精度的形貌仪对四种不同岩性的试件进行水—岩作用前后的扫描,综合计算机软件统计的结果,定量分析了各参数的变化效应。

(3) 通过对坡度均方根等八个形貌参数的统计,定量分析出水—岩作用会使岩石表面的起伏度、粗糙度变大,但水化效应使得高度分布集中,溶解和水解的效应也同时产生。岩性在水—岩作用前后的影响程度比较为:二辉橄榄岩>混合岩>斜长岩>大理岩。

(4) 本实验为研究和评估岩石力学特征中水—岩作用的影响因素做提供了有效的手段。

#### 参考文献:

- [1] 赵阳升. 矿山岩石流体力学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1994: 72—75 (ZHAO Yang-sheng. Rock Fluid Mechanics in Mining [M]. Beijing: Coal Industry Press, 1994: 72—75(in Chinese))
- [2] Vászárhelyi B, Ván P. Influence of water content on the strength of rock[J]. Engineering Geology, 2006, 84(1-2): 70—74.
- [3] 王泳嘉,冯夏庭. 化学环境侵蚀下的岩石破裂特性——第二部分:时间分形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 551—556 (Wang Yongjia, Feng Xiating. Micro fracturing properties of rock affected by chemical environments—part II: temporal fractal analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(5): 551—556 (in Chinese))
- [4] 陈钢林,周仁德. 水对受力岩石变形破坏宏观力学效应的实验研究[J]. 地球物理学报, 1991, 34(3): 335—342 (CHEN Gang-lin, ZHOU Ren-de. An experimental study concerning the macroscopic effect of water on the deformation and failure of loaded rocks[J]. Chinese Journal of Sinica, 1991, 34(3): 335—342(in Chinese))
- [5] 李鹏,刘建,朱杰兵等. 软弱结构面剪切蠕变特性与含水率关系研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1865—1871 (LI Peng, LIU Jian, ZHU Jiebing, et al. Research on effects of water content on shear creep behavior of weak structural plane of sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(7): 1865—1871(in Chinese)).
- [6] 夏才初,孙宗颀. 工程岩体节理力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2002(XIA Caichu, SUN Zongqi. Joint Mechanics of Engineering Rock Mass[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2002(in Chinese))
- [7] XIA C C, YUE Z Q, THAM L G, et al. Quantifying topography and closure deformation of rock joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(2): 197—220.
- [8] 夏才初,王伟,丁增志. TJXW - 3D型便携式岩石三维表面形貌仪的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1505—1512 (XIA Caichu, WANG Wei. Development of three-dimensional tjxw-3d-typed portable rock surface topography. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1505—1512(in Chinese))
- [9] RENGERS N. Influence of surface roughness on the friction properties of rock planes[C]. Proceedings of the 2nd International Congress of Rock Mechanics. Belgrade: [s. n.], 1978: 229—235.
- [10] 王文星. 岩体力学. 长沙: 中南大学出版社, 2002 (WANG Wen-xing, Fracture Mechanics of Rock [M]. Cent Sou Univ Press, 2002(in Chinese))
- [11] 冯学敏,陈胜宏. 含复杂裂隙网络岩体渗流特性研究的复合单元法[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 918—924 (FENG Xuemin, CHEN Shenghong. Composite element method for seepage characteristics study on rock masses with complicated fracture network[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(5): 918—924(in Chinese))
- [12] 乔丽苹,刘建,冯夏庭. 砂岩水物理化学损伤机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 2117—2124 (QIAO Liping, LIU Jian, FENG Xiating. Study on damage mechanism of sandstone under hydro-physico-chemical effects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 2117—2124(in Chinese))
- [13] 赵家成,刘章军. 基于模糊概率方法的岩体稳定性评价[J]. 地质科技情报, 2009, 28(1): 109—112 (ZHAO Jia-cheng, LIU Zhang-jun. Fuzzy Probability Evaluation and Its Application to Rock Mass Stability Classification[J]. Geological Science and Technology Information, 2009, 28(1): 109—112 (in Chinese))
- [14] 王华,吴光,赵志明. 隧道岩石耐磨性与岩石物理力学指标相关性研究[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(2): 95—97 (WANG Hua, WU Guang, ZHAO ZHI-Ming. A study of the correlativity abrasivity and physical and data simulation between rock and mechanical indexes of rock[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2009, 36(2): 95—97 (in Chinese))

## Experimental Study of Compression Strength and Micro-Topography Description Index for Groundwater Saturated Rock

PENG Shu-guang<sup>1</sup>, PEI Shi-cong<sup>2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Anhui University of Architecture, Hefei, Anhui 230601, China;

2. China Construction Planning & Design Research Institute Limited, Beijing 100000, China)

**Abstract:** Four kinds of groundwater saturated rock from deep mine well were topographically scanned by three-dimensional laser surface topography apparatus Talysurf CLI 2000, the precision of which is as high as  $0.5\mu\text{m}$ . The rock water containment rate and the influence of water on the rock compressive strength were measured. Then quantitative comparison and analysis were carried out based on 8 topographical parameters. Results show that the rock is softened by water and its compression strength declines due to the water absorption of clay mineral grains. When rock is compressed by force, the water is expelled from rock resulting in compaction. The discreteness of rock's surface height and the roughness are increased after water-rock interaction. The distribution probability of highness is more concentrated, which turns from negative skewness into positive skewness and distributed more symmetrically than before. The Arithmetic mean summit curvature of the surface ( $S_{\kappa}$ ) drops regularly to about 0.62, while the highness difference of the rock surface decreases and becomes more coordinated.

**Keywords:** water-rock interaction; rate of water content; parameters of topography; rock mechanics