

像中的噪声干扰。

为减少计算量,仅取 $\theta=0, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 来计算 $\zeta^2[f(x, y)]_0$ 。当 $\theta=45^\circ$ 和 135° 时, $f(x+k\cos\theta, y+k\sin\theta)$ 为亚像素点,则按相邻点线性插值算出其值。

图 4 表示对某 PCB 的原图像中的第 y 行进行增强的操作过程。图 4(b) 为第 y 行的灰度波形,图 4(c) 为仅按 $\theta=0$ 对图 4(b) 进行变换的波形;图 4(d) 为用图 4(b) 对图 4(c) 进行增强得到的波形,增强系数 β 取 0.25,并作了限幅处理。对比图 4(b) 和图 4(d) 可以看出,增强后的灰度值在边缘处的上升和下降速度大大增加,因此有利于边缘的精确定位;原图像中较窄的导线上的灰度值不够低,较窄的非敷铜区的灰度值不够高,给准确分割带来困难。增强后,其灰度值分别达到位图图像的最小灰度值 0 和最大灰度值 255,大大降低了分割阈值的准确性要求。在大多数情况下,分割阈值直接取 128 即可。

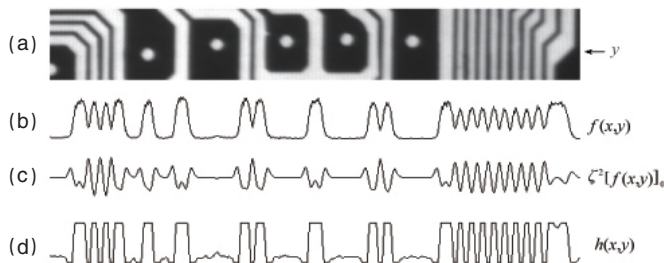


图 4 第 y 行图像增强处理过程

Fig. 4 Image enhancing process of y th line

图 5 是根据式(6)对图 1 进行增强的结果。可见,细密的布线变得很清晰,突出了缺陷部位。图 6 是对另一幅 PCB 图像进行增强前后的结果。

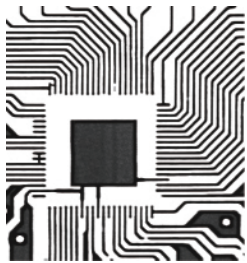
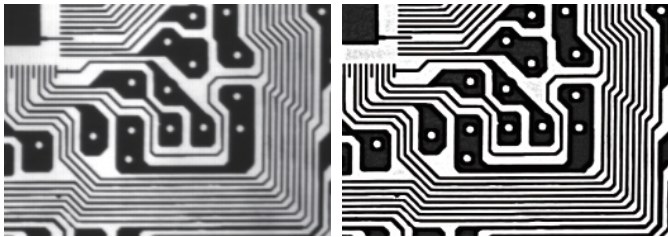


图 5 对图 1 进行增强的结果

Fig. 5 Results of enhanced Fig.1



(a) 原图像

(b) 增强后图像

(a) Original image

(b) Enhanced image

图 6 PCB 图像

Fig. 6 PCB image

3 结论

本文针对 PCB 图像的特点,提出了一种新的图像变换方法——双重 Sigmoid 变换。试验表明,采用该变换对 PCB 图像进行增强,在使边缘尽可能锐化的同时,还有效地抑制了噪声,尤其是靠近边缘的噪声。从而有利于精确定位边缘,对检测边缘上发生的缺陷极为有利;本方法对原图像的清晰度及其均匀性要求不高,对细密的布线区域增强效果很好。为便于编程实现,还导出了 Sigmoid 算子。本方法已在某 PCB 缺陷检测系统中得到应用。

参考文献 (References)

- [1] Gonzalez R C, Woods R E. Digital image processing[M]. 2nd ed. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 2002.
- [2] 刘兴森, 王仕成, 赵静. 基于小波变换与模糊理论的图像增强算法研究[J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(4): 183-186.
Liu Xingmiao, Wang Shicheng, Zhao Jing. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2010, 30(4): 183-186.
- [3] Ibrahim Z, Al-Attas S A R. Wavelet-based printed circuit board inspection system [J]. Integrated Computer-Aided Engineering, 2005, 12 (2): 201-213.
- [4] 张波, 李锐华, 彭年才, 等. 基于小波变换的 PCB 缺陷视觉检测技术研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(8): 1864-1866.
Zhang Bo, Li Ruihua, Peng Niancai, et al. Journal of System Simulation, 2004, 16(8): 1864-1866.
- [5] 万睿, 李志敏, 林越伟, 等. 一种 PCB 走线质量检测的预处理方法[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2007, 30(6): 15-17.
Wan Rui, Li Zhimin, Lin Yuewei, et al. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2007, 30(6): 15-17.

(责任编辑 孙秀云)

剪切作用下节理表面形貌变化

曹平¹, 周罕^{1,2}, 范祥¹, 黄雪姣¹, 陈瑜^{1,3}

1. 中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083
2. 云南铜业(集团)有限公司, 昆明 650051
3. 挪威科技大学地质与矿产资源工程系, 挪威特隆赫姆 N-7491

摘要 岩石不连续面的粗糙度对节理岩体的剪切力学性质有重要影响。为研究剪切作用下节理表面形貌变化, 对5组节理试样进行了2次剪切试验, 借助三维非接触式高精度激光形貌仪(Talysurf CLI 2000)对每次剪切前后节理表面进行扫描测试, 从微观和宏观方面分析了节理表面形貌在剪切作用下的变化, 得出如下结论: (1) 节理峰值抗剪强度与节理表面形貌有较大关系; (2) 经过2次剪切试验, 节理表面较高高度范围内峰点数量减少, 较低高度范围内峰点数量增加; (3) 经过2次剪切试验, 节理表面最大高度降低, 凸起体高度普遍下降, 中间高度凸起体分布增加; (4) 经过2次剪切试验, 节理表面轮廓线的包络线呈下降趋势, 平均轮廓线也呈下降趋势, 下降高度与法向应力有关。

关键词 节理表面形貌; 剪切试验; 峰点; 高度分布; 包络线

中图分类号 TU45

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.28.007

Topography Evolution of Joint Surface Under Shear Loads

CAO Ping¹, ZHOU Han^{1,2}, FAN Xiang¹, HUANG Xuejiao¹, CHEN Yu^{1,3}

1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China
2. Yunnan Copper Industry Co. Ltd., Kunming 650051, China
3. Department of Geology and Mineral Resources Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim N-7491, Norway

Abstract It has been long recognized that the roughness of rock discontinuities could have a significant impact on the shear strength characteristics of discontinuous rock masses. In order to study topography evolution of joint surface after shear tests, five samples were sheared two times and joint surfaces were scanned before and after each shear test with the 3D non-contact high-accuracy laser topography instrument (Talysurf CLI 2000). Topography evolution of joint surface is both macroscopically and microscopically analyzed, and the following conclusions are gotten: (1) the peak shear strength is related to the topography of joint surface; (2) after two shear tests, the number of peaks for the higher height of joint surface decreases, while that for the lower height of joint surface increases; (3) after two shear tests, the maximum height of joint surface decreases, the height of most asperities drops and the number of middle-height asperities rises; (4) after two shear tests, both of the envelope and the mean profile of joint surface tend to go down, and the descending height is related to the normal stress.

Keywords topography of joint surface; shear test; peak; height distribution; envelope of profile

0 引言

岩石经历了漫长的成岩和改造过程, 其中大量岩体存在着节理, 节理的强度特性直接影响到岩体的力学特性。岩体的力学特性是岩体工程设计、施工的重要依据, 所以对节理

的力学特性研究具有工程实践意义。

影响岩石节理力学特性的因素众多, 外在条件包括竖向荷载大小、荷载形式(动荷载或静荷载)、温度、含水率、水压等; 内在条件包括节理的表面形貌特征(如起伏度、粗糙度、平

收稿日期: 2011-06-21; 修回日期: 2011-09-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(10972238); 教育部高等学校博士点科研基金项目(20090162110037); 中南大学研究生学位论文创新项目(2011ssxt275)

作者简介: 曹平(中国科协所属全国学会个人会员登记号: S032200323M), 教授, 研究方向为岩石力学与工程应用, 电子信箱: pcao_csu@sohu.com

均粗糙角等)、节理面尺寸、节理面风化程度、岩石类型、节理壁面抗压强度、充填物成分与厚度等。

夏才初等^[1-3]用理论分析和数值模拟方法研究了不同粗糙度和起伏度的节理表面形貌特征,并用数学方法描述了这些形态特征。T. Belem 等^[4]提出了 5 个典型的参数来定量描述节理表面形貌特征。周枝华和李庆松等^[5-6]用统计学的方法研究了节理表面统计参数的分布规律。F. Homand 等^[7]提出了用岩石节理表面轮廓平均角的加权平均值 $\bar{\theta}_p$ 等参数来定量描述节理表面形貌特征。曹平等^[8]研究了剪切作用下岩石节理表面轮廓平均角的加权平均值 $\bar{\theta}_p$ 的变化趋势,发现随着剪切次数增加, $\bar{\theta}_p$ 呈减小趋势。Jiang^[9]和 Grasselli^[10-12]等研究了节理表面粗糙度与抗剪强度之间的关系,并提出了节理表面粗糙度参数与抗剪强度的本构关系。杜守继等^[13]对岩石节理粗糙面的几何特性及力学特性进行了研究。

在定量描述节理表面形貌和节理表面形貌与抗剪强度之间的关系方面,上述学者已做了大量研究。本文在上述学者研究的基础上,从微观和宏观方面,采用先进的三维非接触式高精度激光形貌仪 Talysurf CLI 2000 对节理表面进行扫描测试,同时采用 TalyMap 5.0 对节理表面形貌参数进行计算分析,结合节理的抗剪强度特性,分析了节理表面形貌在剪切作用下的变化趋势及其与抗剪强度的关系。

1 试验设备与方法

1.1 岩石剪切流变仪

RYL-600 是一台由计算机和数字伺服控制器控制的高档、高精度的岩石剪切流变试验装置(如图 1 所示)。该仪器既可以完成岩石流变试验,也可以完成节理剪切试验。剪切过程中由 Test 软件控制仪器和记录数据;由法向主机控制施加恒定的法向荷载;由横向主机施加剪切荷载。横向最大剪力为 200kN,横向位移加载速率为 0.001—50mm/min,横向剪力精度约 $\pm 1\%$ 。可以采用位移或者负荷载控制剪切过程。



图 1 RYL-600 岩石剪切流变仪

Fig. 1 RYL-600 rock shear-rheological instrument

1.2 三维非接触式高精度激光形貌仪

Talysurf CLI 2000 是一台三维非接触式高精度激光形貌

仪,用于对试件表面形貌的测试分析。该仪器主要由激光发射与接收装置、专用计算机、控制单元盒、操作平台、数据采集与控制软件 Talysurf CLI、数据分析软件 TalyMap 5.0 组成。扫描范围是 200mm×200mm,扫描最高精度可达 0.05 μ m,最大承受试件的重量是 150N。扫描过程中,将激光测量装置固定在一定高度,载有试件的滑块在 x/y 方向移动。节理表面的起伏形状通过激光变位计转换成光信号,光信号由电荷耦合器 (CCD) 转换成电信号,电信号通过控制单元盒转换为数字信号,节理表面的起伏形状就由 Talysurf CLI 以数据文件的形式存储在计算机中。

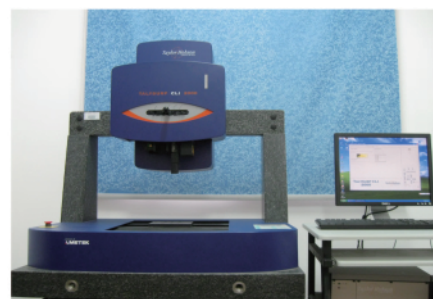


图 2 Talysurf CLI 2000 三维激光形貌仪

Fig. 2 3D topography measurement instrument of Talysurf CLI 2000

1.3 试验方法

参考岩石力学试验规范和其他学者有关节理抗剪强度测试方法设计本次试验。将水、水泥和砂按照一定体积比搅拌,将 5 组节理试样的上下表面固定,无相对位移最好,并用水泥砂浆浇筑在模子里面(模子尺寸为 250mm×200mm×150mm),在常温下养护 28d 即可,如图 3 所示。



图 3 节理试样

Fig. 3 A joint sample

在每次剪切试验前后,将试样放在滑块上面,由三维非接触式激光形貌仪 Talysurf CLI 2000 扫描节理表面,将节理表面形貌数值化,形成一个可以由 TalyMap 5.0 计算分析的特定格式文件。剪切试验在 RYL-600 岩石剪切流变试验仪上面完成,采用位移控制的方式将试件分别在 3MPa、5MPa 的法向

应力下进行剪切试验,总共进行了3次扫描测试和2次剪切试验。

2 结果与讨论

2.1 剪应力-剪位移曲线

图4是节理试样分别在3MPa和5MPa的法向应力下的抗剪强度曲线。从图中可以看出,在3MPa的法向应力下,节理的抗剪强度曲线有明显的峰值抗剪强度,且有稳定的残余抗剪强度;在5MPa的法向应力下,节理的抗剪强度曲线没有明显的峰值抗剪强度。尽管第2次剪切的法向应力(5MPa)大于第1次剪切的法向应力(3MPa),但是峰值强度几乎没有增加,这与节理表面形貌有较大关系。经过第1次剪切后,节理表面的大量凸起体被剪断或磨碎。因此,第2次能够提供抗剪强度的凸起体减少,抗剪强度曲线表现出平缓的态势。这表明节理的峰值抗剪强度与节理表面的形貌有直接关系。下面定量分析节理表面形貌在剪切作用下的变化。

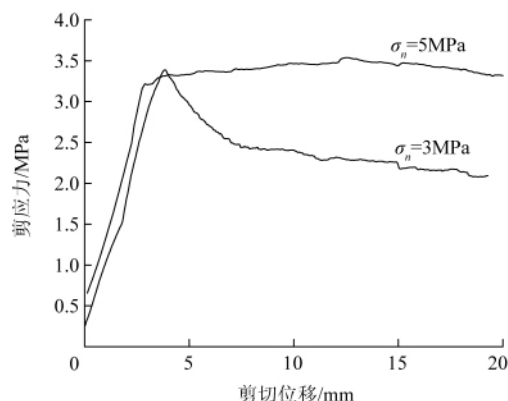


图4 不同法向应力下节理的剪应力-剪位移曲线
Fig. 4 Relationship between shear stress and shear displacement under different normal stresses

2.2 节理表面峰点数量统计分析

节理表面由大量的峰和谷组成,峰谷的高低交替排列构成了含有不同粗糙度和起伏度的节理表面。在用Talysurf CLI 2000对节理表面进行扫描测试后形成的数据文件中,整个节理表面由位于不同高度的点组成,点与点之间在x或y方向的距离为20μm。图5是峰和谷的二维示意图,凸出的点为峰,凹处的点为谷。图6为宏观节理表面三维图。

图7是从图6中截取的峰和谷三维微观示意图,在图中能够清晰看出峰和谷,由于所取单元段很小,峰已经不再表现出尖顶形状。图7中的微型单元在x、y方向上的尺寸均为500μm,在z方向的高度为533μm。由大量如图7所示的微型单元组成了如图6所示的宏观节理表面三维图(在z方向放大了5倍),能够从中看到清晰的节理表面的峰谷高低起伏状态。

从节理表面最低谷点开始,沿节理面垂直高度向上每隔

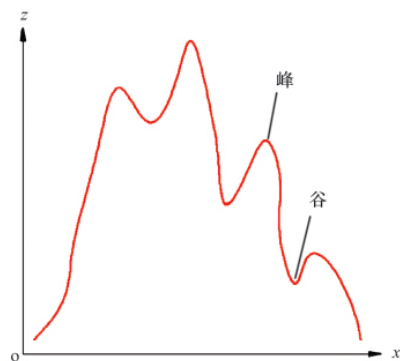


图5 节理表面峰和谷的二维示意
Fig. 5 2D schematic plot of joint surface peaks and valleys

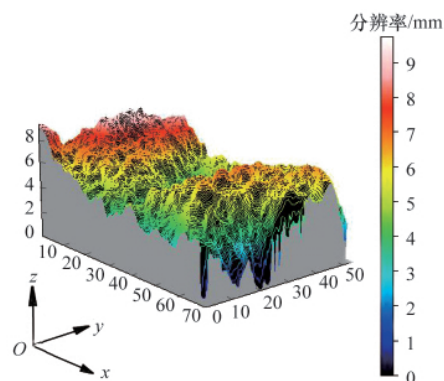


图6 节理表面某微观单元示意图
Fig. 6 Schematic plot of a micro unit from joint surface

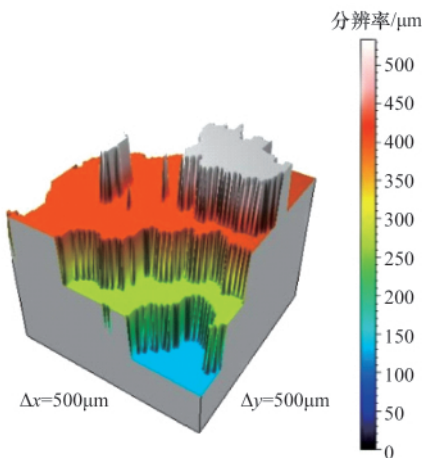


图7 节理表面三维图
Fig. 7 3D image of joint surface

0.46mm分段统计各段内峰点数量。以峰点数量为纵坐标,以节理高度为横坐标,绘制了如图8所示的节理表面峰点数量分布的柱状图。对比分析发现,峰点主要集中分布在节理高度的中间范围,在3mm以下的高度范围内少有峰点分布。从图7和图8中均能看出,节理面大部分凸起体的高度大于

3mm。

节理经过 2 次剪切作用之后,其峰点的分布发生了一些变化。第 1 次剪切前,峰点在 6—6.5mm 高度范围内的分布最多;第 1 次剪切后,峰点在 4.4—4.9mm 高度范围内分布最多;第 2 次剪切后,峰点在 3.7—4.4mm 高度范围内分布最多,这与试验观察现象一致。在对 5 组节理试样进行剪切试验的过程中,只有少量较高的凸起体被剪断,节理表面较少部分对剪切中的摩擦起作用,还有部分节理表面并没有受到

磨损。这是因为在一定的法向应力下,岩石节理表面相互咬合程度高,随着剪应力的增加,节理表面部分凸起体被剪断或磨平,在 5 个试样中均发现这种现象,节理的抗剪强度就是由这些峰点变化引起的。在节理表面较高高度范围内,峰点数量变化较大,因为较高的凸起体更加容易被剪断,所以在节理表面较低高度范围内的峰点数量会随着剪切次数的增加而增加。节理表面磨损越厉害,较低范围内峰点的数量增加越多。

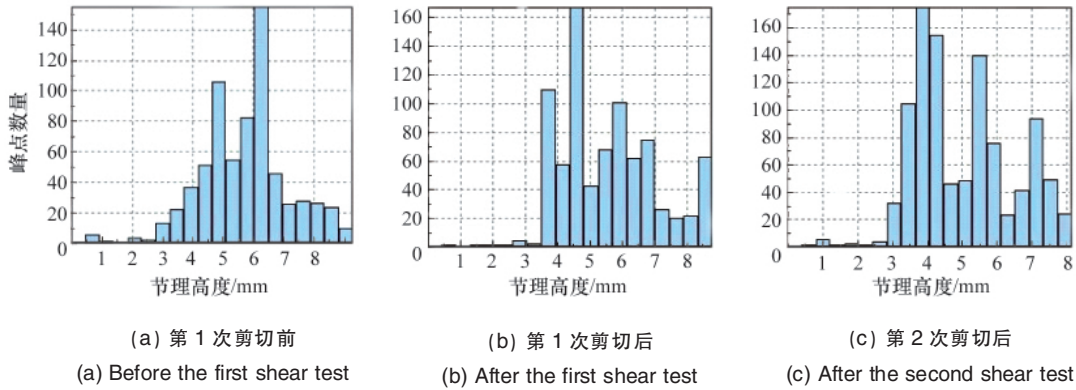


图 8 节理表面峰点数量的分布
Fig. 8 Distribution of peaks count of joint surface

2.3 节理表面高度分布分析

概率密度函数为

$$f(\xi)=P_1(\xi)=\int_h^{h+dh} f(h)dh \quad (1)$$

式中, P_1 表示节理表面高度随机变量 ξ 落入 $(h, h+dh]$ 中的概率; h 表示节理表面高度。

分布函数为

$$F(\xi)=P_2(\xi)=\int_0^h f(h)dh \quad (2)$$

式中, P_2 表示节理表面高度在 $[0, h]$ 内的概率分布; h 表示节理表面高度。

图 8 是由式(1)和式(2)得出的节理表面高度统计分布图。对比分析可知,节理表面的最大高度发生了变化。图 9(a)和 9(b)中,9mm 以上部分还存在,但图 9(c)中最大高度只有 8.5mm,这表明最大高度在剪切作用下变小;同时,节理表面中低于 2mm 的高度范围基本上没有变化。这表明在剪切作用下,节理表面较高部分比较低部分更加容易受到磨损,节理表面高度分布与峰点分布规律相似,表现出中间高度范围多,两端少。

第 1 次剪切前,3.5—6.5mm 高度占整个节理高度分布的比例最大,其中 5.5—6mm 达到 15.8%;第 1 次剪切后,3.5—4mm 高度所占比例增加;第 2 次剪切后,3.5—4mm 高度占整个节理高度分布的概率再次增加。这是因为剪切作用使凸起

体被剪断,凸起体高度普遍下降,引起较低高度范围内节理表面高度分布的概率增加。

图 9(a)—9(c)中的曲线是节理表面高度的 F 分布,其分布趋势大致相似,即在曲线两端增长较缓,在中间段增长较快。增长较缓表明在该节理高度范围内凸起体分布较少,增长较快表明在该节理高度范围内的凸起体分布较多。对比分析可知,在 3.5—6mm 段, $\theta_1 < \theta_2 < \theta_3$, 3 条曲线倾角逐渐减小,这表明随着剪切次数的增加,3.5—6mm 高度范围内的节理表面高度减少。

2.4 节理表面高度包络线分析

以垂直于剪切方向、0.5mm 间距提取节理表面的二维轮廓线,以最小二乘面(在取样面积内表面上各点到该平面距离的平方和最小的面)为基准面,获得这些二维轮廓线的包络线(如图 10 所示)。从图 10 中能够明显观察到,随着剪切作用的增加,节理表面二维轮廓线的最高包络线呈下降趋势。

第 1 次剪切试验前,节理表面的包络线高度较大且凸起明显,最高顶点在 40mm 处(图 10(a))。当节理面在 $\sigma_n=3\text{MPa}$ 的法向应力下进行剪切试验后,在 10—15mm 和 35—45mm 区段内节理表面凸点高度下降明显,尖角被剪断,节理表面包络线高度下降的同时变得平滑(图 10(b))。在图 4 所示的剪应力—剪位移曲线中, $\sigma_n=3\text{MPa}$ 时有明显峰值强度,而后出现稳定的残余抗剪强度。从节理表面包络线方面分析,这是因为有部分较高的凸起被剪断。当节理在 $\sigma_n=5\text{MPa}$ 的法向应力下进行剪切试验后,节理表面包络线高度再次下降,这表

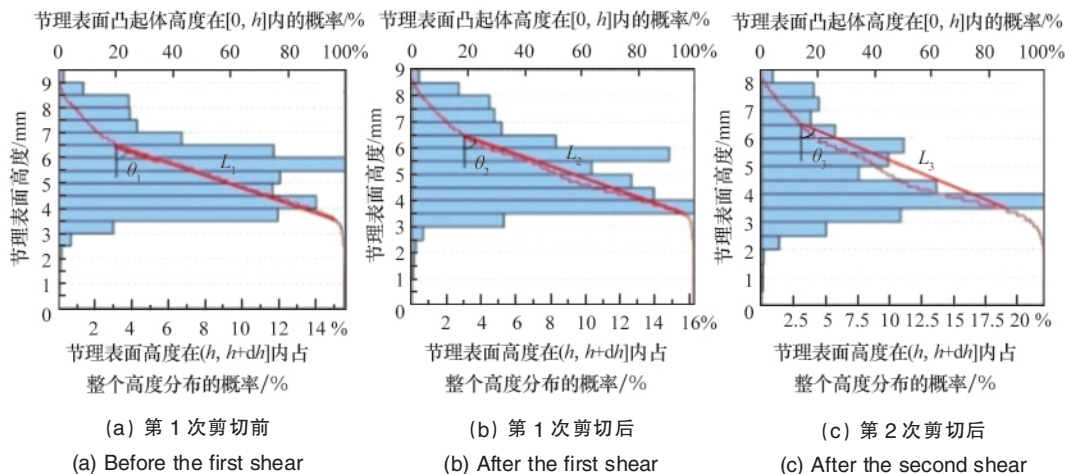


图9 节理表面高度分布
Fig. 9 Height distribution of joint surface

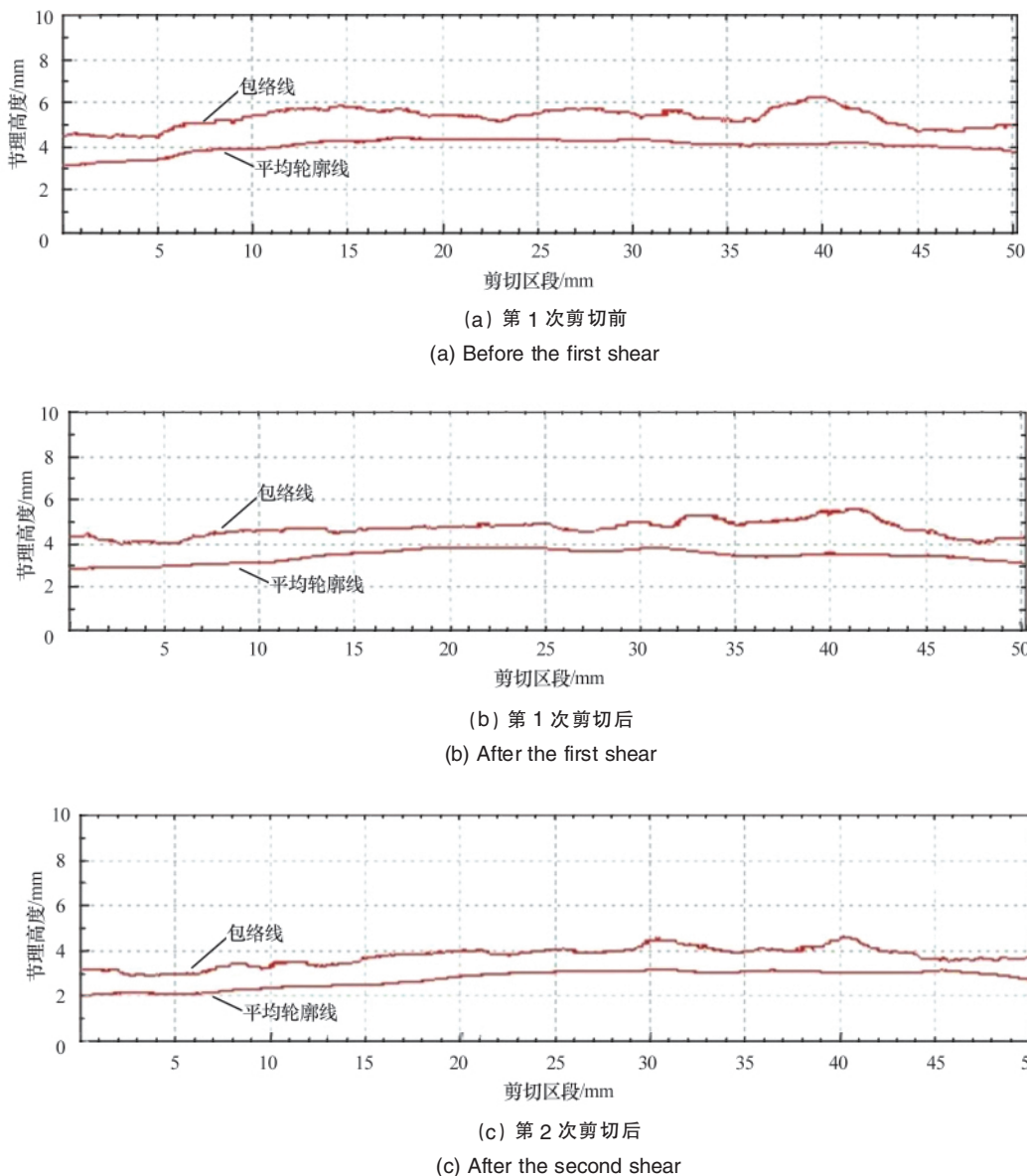


图10 节理表面包络线和平均轮廓线
Fig.10 Envelope and mean profile of joint surface

明大量较低的尖角被剪断、磨平。由图 10 可知,在较小法向应力下,大量尖角被剪断,在较大法向应力下,表面起伏度虽减小,但节理面相互咬合程度高,也能提供较大的抗剪强度。

图 10 中节理表面平均轮廓线起伏度变化不大,但是随着剪切力的增加,整体高度呈下降趋势,这说明节理表面经历多次剪切后平均高度下降。

3 结论

经过对 5 组节理进行 3 次扫描测试和 2 次剪切试验,分析得出以下结论。

(1) 节理峰值抗剪强度与节理表面形貌有较大关系。

(2) 经过 2 次剪切试验,节理表面较高高度范围内峰点数量减少,较低高度范围内峰点数量增加;同时,节理表面磨损越厉害,较低高度范围内峰点数量增加越多。

(3) 经过 2 次剪切试验,节理表面最大高度降低,凸起体高度普遍下降,中间高度凸起体分布增加。

(4) 经过 2 次剪切试验,节理表面轮廓线的最高包络线和平均轮廓线呈下降趋势,下降高度与法向应力有关。

参考文献 (References)

- [1] 夏才初. 岩石结构面的表面形态特征研究[J]. 工程地质学报, 1996, 4(3): 71-77.
Xia Caichu. *Journal of Engineering Geology*, 1996, 4(3): 71-77.
- [2] 夏才初, 孙宗硕, 潘长良. 不同形貌节理的剪切强度和闭合变形研究[J]. 水利学报, 1996, 27(11): 28-32.
Xia Caichu, Sun Zongqi, Pan Changliang. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1996, 27(11): 28-32.
- [3] 夏才初, 孙宗硕, 潘长良. 表面形貌含波纹度的节理闭合模型[J]. 工程地质学报, 1994, 2(2): 38-47.
Xia Caichu, Sun Zongqi, Pan Changliang. *Journal of Engineering Geology*, 1994, 2(2): 38-47.
- [4] Belem T, Homand F, Souley M. Quantitative parameters for rock joint surface roughness[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2000, 33(4): 217-242.
- [5] 周枝华, 杜守继. 岩石节理表面几何特性的三维统计分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1227-1232.
Zhou Zhihua, Du Shouji. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(8): 1227-1232.
- [6] 李庆松, 杜守继. 岩石节理表面三维粗糙特性参数的定量研究[C]//中国岩石力学与工程学会. 中国岩石力学与工程学会第七次学术大会论文集. 北京: 中国科学技术出版社, 2002: 91-93.
Li Qingsong, Du Shouji. Quantitative research of three-dimensional parameters for rock joint surface roughness[C]//Chinese Society for Rock Mechanics and Engineering. Proceedings of the 7th Academic Congress of Chinese Society for Rock Mechanics and Engineering Beijing: China Science and Technology Press, 2002: 91-93.
- [7] Homand F, Belem T, Souley M. Friction and degradation of rock joint surfaces under shear loads[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2001, 25(10): 973-999.
- [8] 曹平, 范祥, 蒲成志, 等. 节理剪切试验及其表面形貌特征变化分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(3): 480-485.
Cao Ping, Fan Xiang, Pu Chengzhi, et al. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(3): 480-485.
- [9] Jiang Y J, Li B, Tanabashi Y. Estimating the relation between surface roughness and mechanical properties of rock joints [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2006, 43(6): 837-846.
- [10] Grasselli G, Egger P. Constitutive law for the shear strength of rock joints based on three-dimensional surface parameters [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2003, 40(1): 24-40.
- [11] Grasselli G. Shear strength of rock joints based on quantified surface description [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2006, 39(4): 295-314.
- [12] Grasselli G, Wirth J, Egger P. Quantitative three-dimensional description of a rough surface and parameter evolution with shearing[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2002, 39(6): 789-800.
- [13] 杜守继, 孙钧, 江崎哲郎, 等. 岩体不连续面的几何特性与剪切强度的关系[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 1999, 27(4): 379-383.
Du Shouji, Sun Jun, Tetsuro E, et al. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 1999, 27(4): 379-383. (责任编辑 孙秀云)

·学术动态·

“第十七届全国小儿心血管病学术会议”征文



由中华医学会儿科学分会心血管学组主办的“第十七届全国小儿心血管病学术会议”计划于 2012 年 6 月 1 日在广州举行。

征文范围: 先天性心脏病、心律失常、心肌炎、心肌病、心包疾病、感染性心内膜炎、川崎病、功能性心血管疾病、晕厥、肺动脉高压、高血压、血脂紊乱、心力衰竭、风湿性心脏病等。

全文截止日期: 2011 年 12 月 31 日。

联系电话: 010-83573209。

电子信箱: pedcardiology@126.com。

通信地址: 北京市西城区西安门大街 1 号北京大学第一医院儿科办公室 (100034)。

会议网站: http://www.cma.org.cn/index/indexxshd/index_zwtz/2011922/1316660618117_1.html。