

doi:10.3969/j.issn.1005-3026.2016.07.026

剪切荷载作用下砂岩断裂面粗糙度三维统计分析

许江^{1,2}, 刘义鑫^{1,2}, 谭虎^{1,2}, 张海龙^{1,3}

- (1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044;
2. 重庆大学 复杂煤层瓦斯抽采国家地方联合工程实验室, 重庆 400044;
3. 重庆文理学院 建筑工程学院, 重庆 402160)

摘 要: 利用自主研发煤岩剪切-渗流耦合实验装置与三维立体扫描仪对剪切荷载作用下砂岩断裂面粗糙度三维统计信息进行了实验研究, 从其断裂面扫描直观图、断裂面等高线分布图、断裂面剖面轮廓线等方面探讨了剪切荷载作用下砂岩断裂面三维粗糙度分布特性。结果表明: 砂岩在剪切荷载作用下发生断裂破坏时, 其变形特性曲线变化趋势一致, 断裂面直观特征存在个体差异, 但断裂面粗糙高度分布均近似于正态分布, 沿剪切方向与垂直于剪切方向剖面轮廓线特征不同, 不能反映断裂面整体特征; 分析了粗糙度参数 JRC, R_L 与 R_S 之间关系, JRC 值与 R_L 值之间呈近似线性关系, R_S 值与 JRC 平均值线性拟合度相对于 JRC 与 R_L 值线性拟合度更好, JRC 平均值更能反映断裂面整体三维特征。

关键词: 剪切荷载; 断裂面; 粗糙度; 三维; 砂岩

中图分类号: TU 45 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2016)07-1034-06

Three Dimensional Statistical Analysis of Fracture Roughness of Sandstone Under Shear Loading

XU Jiang^{1,2}, LIU Yi-xin^{1,2}, TAN Hu^{1,2}, ZHANG Hai-long^{1,2}

- (1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2. State and Local Joint Engineering Laboratory of Methane Drainage in Complex Coal Gas Seam, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
3. Faculty of Architecture Engineering, Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing 402160, China. Corresponding author: LIU Yi-xin, E-mail: yxliu@cqu.edu.cn)

Abstract: The characteristics of fracture roughness of sandstone under shear loading were specifically discussed through the fracture surface scanning visual map, contour map of the distribution of the fracture surface and the fracture surface profile contour, according to the 3D information of fracture roughness of sandstone under shear loading collected by self-developed coal or rock shear-flow coupling test device and 3D scanners. It is showed that the deformation characteristic curves generally were in good agreement, the visual features of fracture surface were different from each other, and the distribution of roughness heights was approximately accorded with normal distribution. Characteristics of profile along the shear direction and perpendicular to the shear direction are different, and cannot reflect the whole fracture surface features. The analysis of roughness parameters relationship among R_L , R_S and JRC suggests that there was a linear correlation between JRC and R_L , and the linearity of R_S and the average value of JRC was better than that of JRC and R_L . So the average value of JRC is more suitable to reflect the 3D characteristics of fracture surface.

Key words: shear load; fracture surface; roughness; 3D; sandstone

在岩体内存在各种地质界面, 它包括物质分异面和不连续面, 各种地质界面的存在很大程度

上影响岩体的稳定性特征、强度特征和变形特征^[1]。因此, 对岩体结构面粗糙度进行精确的评

收稿日期: 2015-04-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51474040); 国家自然科学基金青年基金资助项目(51304255); 重庆市基础与前沿研究一般项目(cstc2014jcyjA0994)。

作者简介: 许江(1960-)男, 湖南永兴人, 重庆大学教授, 博士生导师。

价分析尤为必要。目前国内外学者在量化结构面粗糙度方面取得了较多成果,其中 Barton^[2]提出的节理粗糙性系数(JRC)最具代表性,并被广泛应用于工程实践;Andrade 等^[3]采用图形化与数值化方法估计 JRC 值,并将图形值与计算值进行对比分析,将 JRC 值与单条节理最大幅值进行了修正;Roko 等^[4]采用基台值、域值、坡度等地质统计学参数对结构面的形态进行描述,并将其分析结果进一步应用于分析水力渗流实验中水的流动线路;自 El-Soudani^[5]首次提出表面粗糙性系数 R_s 。近年来三维立体扫描仪的出现使得在完整结构面的粗糙性分析取得了突破性进展^[6-7];周枝华等^[8]利用三维非接触式高精度激光表面形状测定仪,在精确测量岩石节理的表面粗糙形状并进行数值化表达的基础上,应用地理信息系统(GIS)技术,实现了岩石节理粗糙面的三维可视化;夏才初等^[9]研制便携式岩石三维表面形貌仪,为岩石表面形貌学、节理力学性质和渗流特性等的有关理论和应用研究提供了重要的技术装备。

在采矿、地质边坡等工程领域中,岩体在剪切荷载作用下发生破坏失稳是主要破坏方式之一,而目前关于岩石在剪切荷载作用下发生断裂破坏后断裂面的特征分析尤其是剪切荷载作用下岩石破坏断裂面三维特性的分析较为匮乏,本文基于三维扫描技术,对剪切荷载作用下砂岩破坏断裂面进行三维立体扫描,并通过数值方法对岩石断裂面进行再现与统计分析,分析断裂面几何分布特征与参数关系,为研究剪切荷载作用下断裂面参数奠定基础。

1 实验准备方法

1.1 实验内容及方法

本实验主要研究砂岩在剪切荷载作用下发生断裂破坏后其断裂面粗糙度分布特征以及断裂面在重复剪切过程中粗糙度演化特征。具体实验方法如下:砂岩试件预加法向应力为 1.0 MPa,剪切加载方式选用加载速率为 0.1 mm/min 的位移控制加载直至试件发生断裂破坏;将断裂后两部分复位后进行重复剪切实验,其预加法向应力仍为 1.0 MPa,重复剪切最大位移量为 4 mm。每次实验结束后,利用三维立体扫描仪对砂岩试件下断裂面进行扫描,以进一步定量分析断裂面粗糙度演化特性。其中完整剪切实验条件下包含 3 个试件,分别编号为 1[#]、2[#]、3[#],并对 2[#]试件进行重复剪切实验。

1.2 岩样采集与制备

实验用砂岩取自重庆地区,属陆源细粒碎屑沉积岩,粒径为 0.1~0.5 mm,主要成分有石英、长石、白云母和燧石等,砂岩的基本物理力学参数见表 1。采用湿式加工法将所选取的岩样加工成 100 mm × 100 mm × 100 mm 的正方体试件。

表 1 砂岩的主要物理力学参数

Table 1 Main physico-mechanical parameters of sandstone

E	ν	σ_c	w_a	φ	C	ρ
GPa		MPa	%	(°)	MPa	$g \cdot cm^{-3}$
11.89	0.37	55.97	4.80	61.42	12.82	2.33

表中 E 表示所用砂岩弹性模量; ν 表示泊松比; σ_c 表示单轴抗压强度; w_a 表示饱和水系数; φ 表示内摩擦角; C 表示黏聚力; ρ 表示密度。

1.3 实验装置

实验采用自主研发煤岩剪切-渗流耦合实验装置^[10],其主体装置分别为伺服控制加载系统与煤岩断面三维扫描系统。通过伺服控制加载系统将砂岩试件剪断后,利用煤岩结构面三维扫描系统对砂岩试件断裂面进行扫描。

2 剪切破坏特性分析

2.1 变形特性

完整砂岩在法向应力为 1.0 MPa 条件下其变形特性曲线如图 1a 所示,从图中可以看出,砂岩试件在加载初期,其法向变形曲线呈上凹型,随剪切变形增加,剪应力呈现一定的线性变化,当剪应力达到 2/3 峰值强度时,剪应力随剪切变形呈非线性不规则变化,说明本阶段试件内出现微裂纹并不断发展,直至试件破坏;由其法向变形随剪切变形变化曲线可以得到,剪应力达到 2/3 峰值强度后,法向变形(本文中法向变形为试件整体法向变形,未考虑试件弹性应变与裂隙闭合变形)随剪切变形呈非线性变化,伴随剪切变形或法向变形瞬增现象,说明试件内部出现了较明显的裂纹扩展或微裂纹贯通。图 1b、1c 给出了 2[#]砂岩试件在剪切断裂破坏后,对其上下两部分进行复位重复剪切 3 次的变形特性曲线,由图 1b 可以得到,首次重复剪切其剪应力随剪切变形明显高于第二次与第三次,说明首次重复剪切过程中,断裂面粗糙度较高;由图 1c 得到,第三次重复剪切其法向变形随剪切变形明显高于前两次,说明通过两次重复剪切后,上、下断裂面接触面微凸体被磨平,上、下断裂面更好地啮合,但断裂面起伏程度未改变,造成重复剪切后法向变形增大。

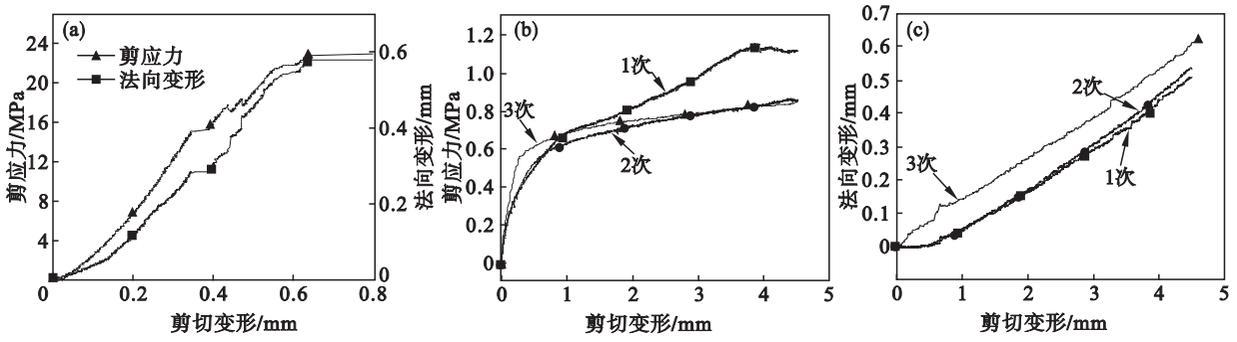


图 1 变形特性对比曲线

Fig. 1 Correlation curves of deformation properties

(a)—2[#]试件剪应力与法向变形随剪切变形对比曲线 ; (b)—2[#]试件重复剪切 1~3 次剪应力随剪切变形对比曲线 ; (c)—2[#]试件重复剪切 1~3 次法向变形随剪切变形对比曲线.

2.2 断裂面扫描分析

图 2a~图 2c 为 1[#]~3[#]试件在剪切破坏后的下半部断裂面三维扫描图,从图中可以直观地看出,断裂面形态各异,断裂面均有粗糙起伏;虽然其变形曲线较为一致,但其断裂面特征差异较大,由色度范围可以看出 1[#]试件断裂面起伏最大,3[#]试件起伏最小,说明岩石个体差异特性明显;图

2d~图 2f 分别为图 2a~图 2c 的断裂面粗糙高度频数分布直方图,可以看出,粗糙高度分布频数最大值均为 50 mm 高度处,这与预剪切破坏面位于 50 mm 高度处相吻合,其中 1[#]试件粗糙高度较低,3[#]试件粗糙高度较高,由拟合度确定系数 R^2 可得其粗糙高度分布近似于正态分布.

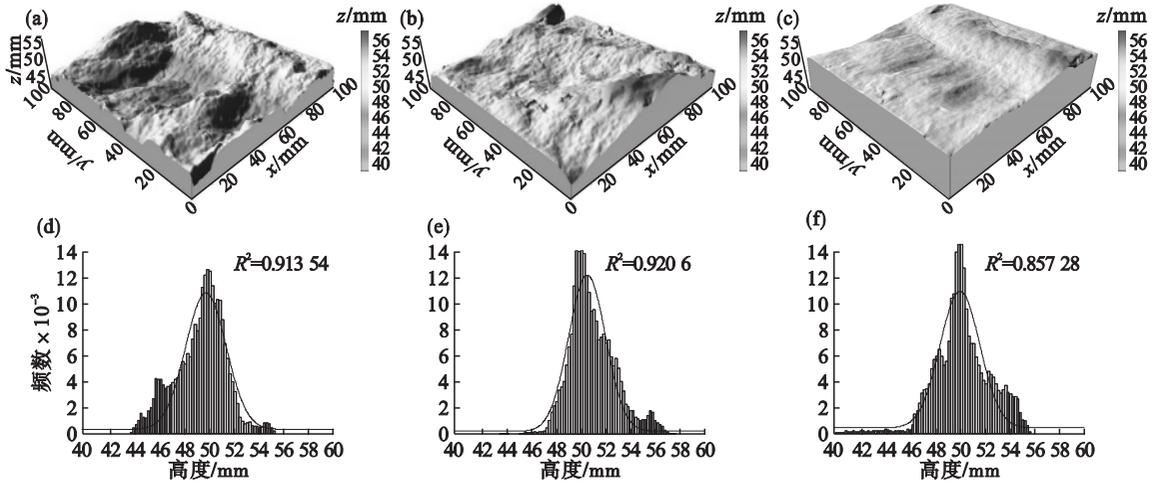


图 2 完整砂岩断裂面扫描图及粗糙高度分布直方图

Fig. 2 Scanning map and roughness height-distribution histograms of fracture of intact sandstone

(a)—1[#]试件断裂面扫描图 ; (b)—2[#]试件断裂面扫描图 ; (c)—3[#]试件断裂面扫描图 ; (d)—1[#]试件粗糙高度分布 ; (e)—2[#]试件粗糙高度分布 ; (f)—3[#]试件粗糙高度分布.

图 3a~图 3c 给出了 2[#]试件在重复剪切 1~3 次后下半部断裂面三维扫描图,随重复剪切次数增加,断裂面色差梯度渐缓,说明随重复剪切次数增加,结构面起伏程度呈降低趋势,同时由断裂面粗糙高度频数分布直方图(见图 3d~图 3f)可知,随重复剪切次数增加,断裂面粗糙高度分布呈降低趋势,高度为 56 mm 左右最为显著,同时随重复剪切次数增加,试件边缘出现部分开裂脱落

(见图 3c),断裂面粗糙高度分布呈降低趋势.

箱型图 4 进一步阐释了断裂面粗糙高度分布的直观特性,由图 4a 可知,断裂面粗糙高度 z 分布在 50 mm 上下波动,且结构面波动局限于 50 ± 10 mm 范围内,这与断裂面粗糙高度频数分布直方图所得结果相一致;由图 4b 可得,随重复剪切次数增加,断裂面波动范围呈缩减趋势,断裂面粗糙高度整体呈降低趋势.

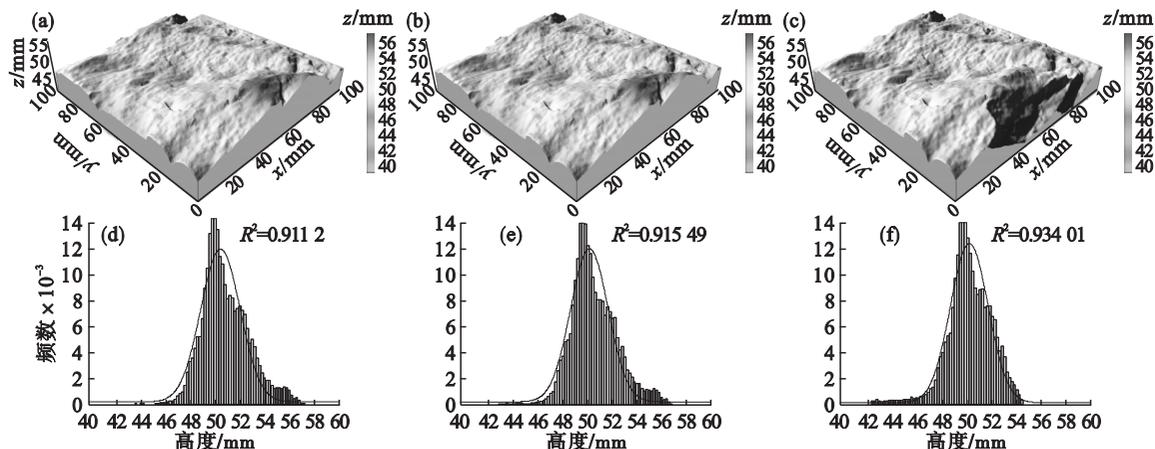


图 3 断裂砂岩重复剪切后断裂面扫描图及粗糙高度分布直方图

Fig. 3 Scanning map and roughness height-distribution histogram of fracture after repeated shear

(a)—重复剪切 1 次断裂扫描图；(b)—重复剪切 2 次断裂扫描图；(c)—重复剪切 3 次断裂扫描图；
(d)—重复剪切 1 次粗糙高度分布图；(e)—重复剪切 2 次粗糙高度分布图；(f)—重复剪切 3 次粗糙高度分布图。

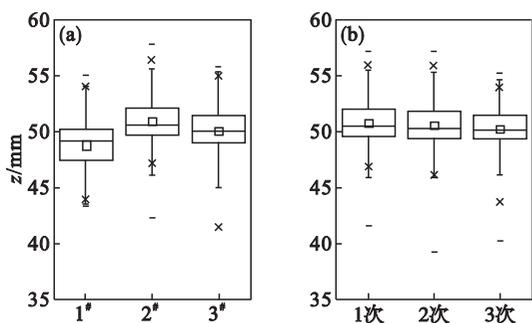


图 4 断裂面粗糙高度分布箱形图

Fig. 4 Box chart of the fracture surface roughness height distribution

(a)—1[#]~3[#]试件下断裂面；

(b)—2[#]试件重复剪切 3 次后下断裂面。

波动相差较大,且不同方向的剖面轮廓线整体变化趋势存在差异,说明单一方向或单一剖面轮廓线只能反映局部特征,不能反映断裂面整体特征,体现了二维分析的局限性.图 6a~图 6c 为 2[#]试件在重复剪切 1~3 次断裂面等高线分布图及其分别在 $x=20, 50, 80$ mm 与 $y=20, 50, 80$ mm 处断裂面剖面轮廓线.由等高线分布图可以看出,在重复剪切过程中,结构面非受力两边出现碎裂脱落,等值线分布趋于密集,由轮廓线可以看出,结构面大部分在重复剪切过程中磨损较少或未发生磨损,但粗糙高度较高部分磨损较为明显,如 $x=80$ mm $y=20$ mm 处,在重复剪切过程中, $x=80$ mm 在(0, 20)区域内与第三次重复剪切后发生碎裂脱落, $y=20$ mm 在(40, 45)区域内粗糙凸起发生摩擦损伤.

3 断裂面粗糙度分布特性

3.1 剖面轮廓线特性

图 5a~图 5c 分别为 1[#]~3[#]试件在剪切破坏后的下半部断裂面等高线分布图及其分别在 $x=20, 50, 80$ mm 与 $y=20, 50, 80$ mm 处断裂面剖面轮廓线.由等高线分布图可以看出,在加载方式一致的情况下,同种岩样剪切破坏形式不同,1[#]试件等高线分布图更密集,说明断裂面粗糙高度梯度大,3[#]试件等高线分布图最疏松,说明断裂面粗糙高度梯度小,这与图 2 得到断裂面起伏程度变化结果一致;由轮廓线可以看出,垂直于剪切方向($x=20, 50, 80$ mm)的剖面线大部分相对平缓,两端起伏较大,而平行于剪切方向($y=20, 50, 80$ mm)的剖面轮廓线起伏波动较大,同时由各剖面轮廓线可得,同一方向上 3 个位置轮廓线起伏

3.2 粗糙度参数分析

断裂面三维粗糙度系数 R_s 首次由 El-Soudani 提出: $R_s = A_t/A_n$ (A_t 为结构面真实表面积, A_n 为断裂面投影面积),也曾有学者提出断裂面二维粗糙度系数 R_L , $R_L = L_t/L_n$ (L_t 为结构面剖面轮廓线实际长度, L_n 为投影长度).本文将分析 R_s , R_L 与 JRC 之间的关系.图 7a, 7b 分别给出了垂直于剪切方向和平行于剪切方向的断裂剖面轮廓线 JRC 与 R_L 值之间的关系,可以得到 JRC 与 R_L 值之间呈近似线性相关,由 R^2 值可知,垂直于剪切方向(即 $x=20, 50, 80$ mm)线性相关性较平行于剪切方向(即 $y=20, 50, 80$ mm)更好.图 7c 为 JRC 平均值与 R_s 值之间的线性关系,由 $R^2 = 0.6082$ 可得,断裂面三维粗糙度系数 R_s 与 JRC 平均值相对于单条断裂面剖面轮廓线 JRC 与其 R_L 值线性相关性更好,同样可由图 7d 得出 R_s 与

R_{LM} 线性相关性较好,这是由于 R_{LM} 为6条断裂面轮廓线更接近节理整体分布特征.剖面轮廓线 R_L 平均值,相对于单条断裂面剖面

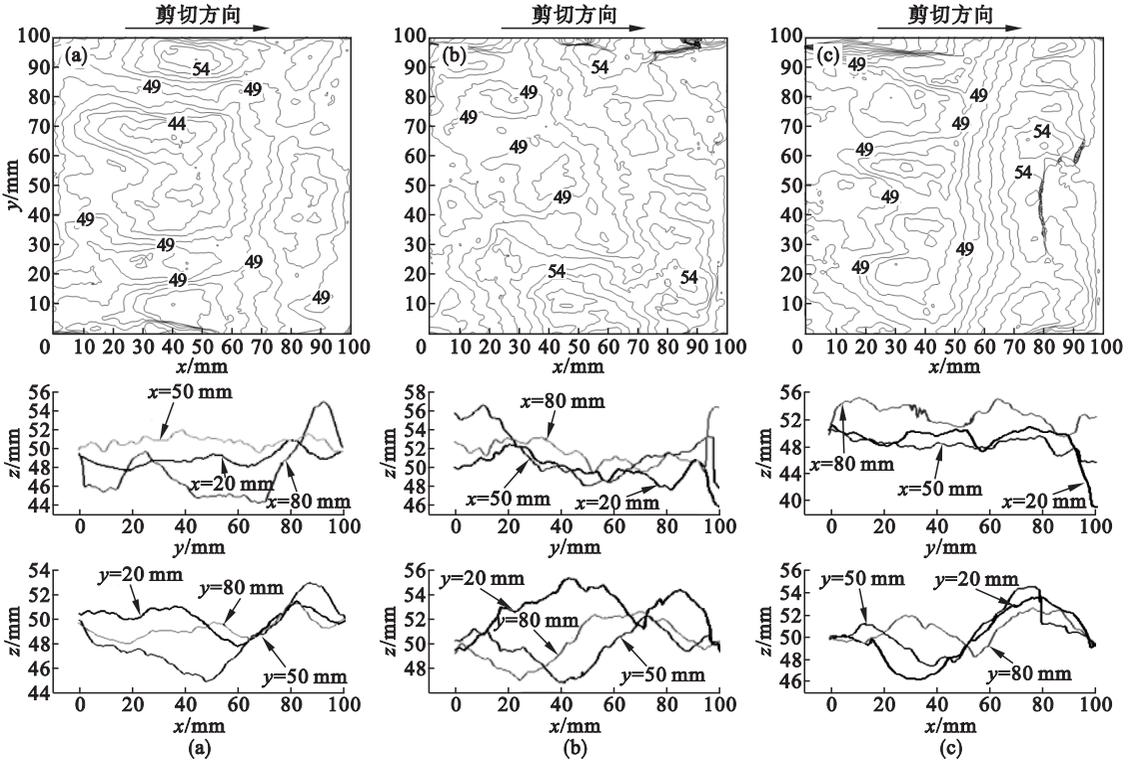


图5 完整砂岩断裂面等高线分布图及断裂面剖面轮廓线

Fig. 5 Fracture surface contour distribution map and the fracture surface profile of intact sandstone

(a)—1#试件;(b)—2#试件;(c)—3#试件.

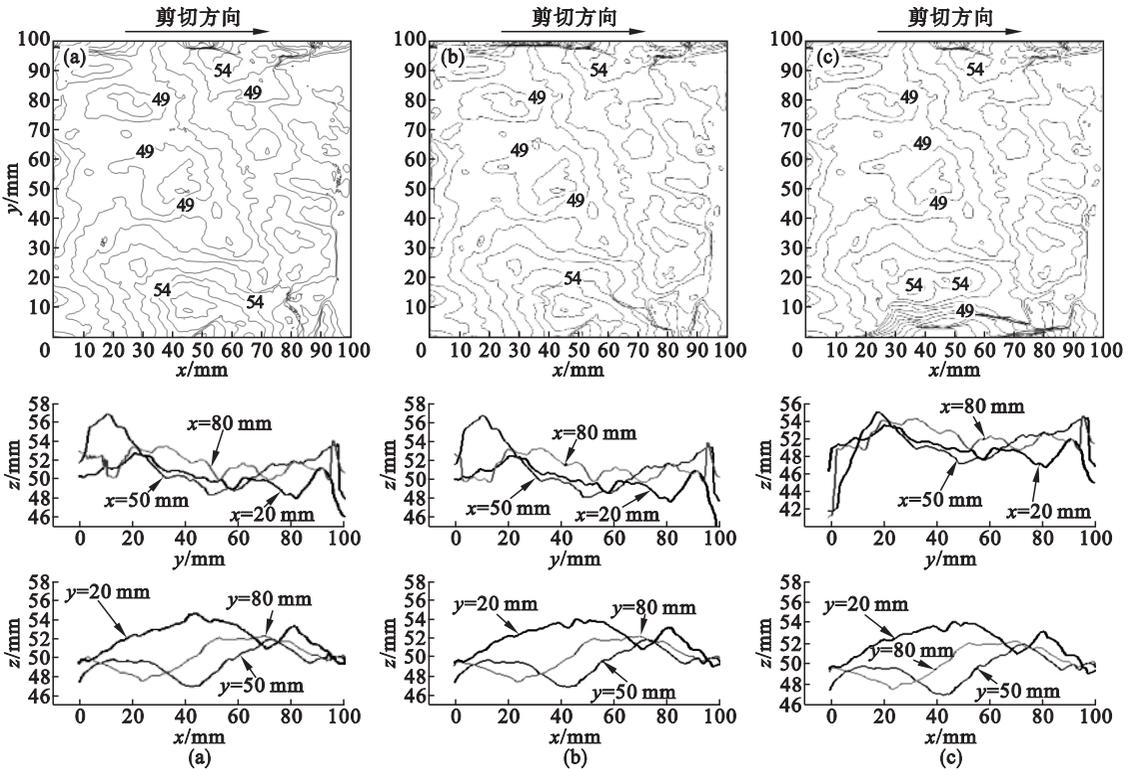
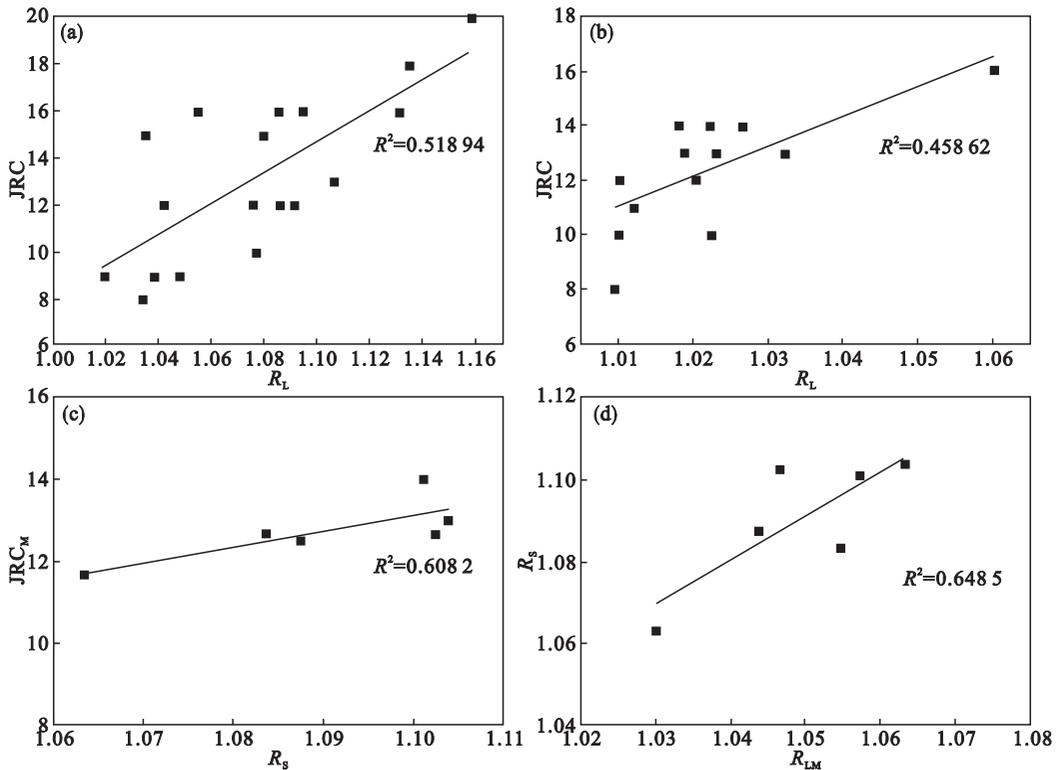


图6 断裂砂岩重复剪切后断裂面等高线分布图及断裂面剖面轮廓线

Fig. 6 Fracture surface contour distribution map and the fracture surface profile after repeated shear

(a)—重复剪切1次;(b)—重复剪切2次;(c)—重复剪切3次.

图 7 R_s 、 R_L 与 JRC 相关关系曲线Fig. 7 Correlation curve of R_s , R_L and JRC

(a)—JRC 与 R_L 关系曲线 (R_L 为 $x=20, 50, 80$ mm 断裂面剖面轮廓线相关值); (b)—JRC 与 R_L 关系曲线 (R_L 为 $y=20, 50, 80$ mm 断裂面剖面轮廓线相关值); (c)— JRC_M 与 R_s 关系曲线 (JRC_M 为断裂面 6 条剖面轮廓线 JRC 平均值); (d)— R_s 与 R_{LM} 关系曲线 (R_{LM} 为断裂面 6 条剖面轮廓线 R_L 平均值)。

4 结 论

1) 同种砂岩岩样在受相同剪切荷载作用下发生断裂破坏时,其变形特性曲线变化趋势一致,粗糙高度分布均近似于正态分布,但试件断裂面起伏度等直观特征各异。

2) 同一砂岩试件断裂面随重复剪切次数增加,其断裂面起伏程度呈降低趋势,断裂面粗糙高度整体呈降低趋势。

3) 砂岩在剪切荷载作用下发生断裂破坏,由断裂面剖面轮廓线可知,断裂面沿剪切方向的起伏波动较大,垂直于剪切方向大都相对平缓,说明单一方向或单一剖面轮廓线只能反映局部特征,不能反映断裂面整体特征,体现了二维分析的局限性。

4) 通过分析粗糙度参数 JRC、 R_L 与 R_s 之间关系,得到 JRC 值与 R_L 值之间呈近似线性关系,且垂直于剪切方向线性关系较平行于剪切方向拟合度更高, R_s 值与 JRC 平均值线性拟合度相对于 JRC 与 R_L 值线性拟合度更好,在工程领域中,取 JRC 平均值更能反映断裂面整体三维特征。

参考文献:

[1] 蔡美峰. 岩石力学与工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.

(Cai Mei-feng. Rock mechanics and engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002.)

- [2] Barton N. Review of a new shear-strength criterion for rock joints [J]. *Engineering Geology*, 1973, 7(4): 287–332.
- [3] Andrade P S, Saraiva A A. Estimating the joint roughness coefficient of discontinuities found in metamorphic rocks [J]. *Bulletin of Engineering Geology & the Environment*, 2008, 67(3): 425–434.
- [4] Roko R O, Daemen J J K, Myers D E. Variogram characterization of joint surface morphology and asperity deformation during shearing [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 1997, 34(1): 71–84.
- [5] El-Soudani S M. Profilometric analysis of fractures [J]. *Metallography*, 1978, 11(3): 247–336.
- [6] Bizjak K F. Determining the surface roughness coefficient by 3D scanner [J]. *Geologija*, 2010, 53(2): 147–152.
- [7] Gentier S, Riss J, Archambault G. Influence of fracture geometry on shear behavior [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2000, 37(1): 161–174.
- [8] 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 Zhi-hua, Du Shou-ji. 3D statistic analysis of geometrical properties of a rock joint [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(8): 1227–1232.)
- [9] 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 Cai-chu, Wang Wei, Ding Zeng-zhi. Development of three-dimensional TJXW-3D-typed portable rock surface topography [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(7): 1505–1512.)
- [10] 许江, 刘义鑫, 尹光志, 等. 煤岩剪切-渗流耦合实验装置研制 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2015(sup1): 2987–2995.
(Xu Jiang, Liu Yi-xin, Yin Guang-zhi, et al. Development of shear-flow coupling test device for coal rock [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015(sup1): 2987–2995.)