



移动阅读

宋朝阳,纪洪广,刘志强,等. 饱和水弱胶结砂岩剪切断裂面形貌特征及破坏机理[J]. 煤炭学报,2018,43(9): 2444-2451. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.1767

SONG Zhaoyang,JI Hongguang,LIU Zhiqiang, et al. Morphology and failure mechanism of the shear fracture surface of weakly cemented sandstone with water saturation[J]. Journal of China Coal Society,2018,43(9):2444-2451. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2017.1767

饱和水弱胶结砂岩剪切断裂面形貌特征及破坏机理

宋朝阳^{1,2,3},纪洪广²,刘志强^{1,3},谭杰^{1,3}

(1. 煤炭科学研究总院 建井研究分院,北京 100013; 2. 北京科技大学 土木与资源工程学院,北京 100083; 3. 北京中煤矿山工程有限公司,北京 100013)

摘要:剪切破坏断面是弱胶结砂岩在破坏过程中断裂后所形成相匹配的表面,断面形貌特征根据受力方式和饱水条件的不同形成差异显著。利用3D激光扫描对剪切破坏断面进行精确测量,结合地理信息系统(GIS)技术对不同受力方式和饱水条件下的破坏断面形貌进行三维可视化处理和定量分析,并采用扫描电镜从细观角度对产生的断面形貌特征差异及其破坏机理进行研究。试验结果表明:随夹具角度的增加,破裂面法向力降低,法向力的减小是导致破裂面扰动较大以及剪切断裂面粗糙度和起伏度增加的主要原因之一;通过饱水岩样细观结构的分析发现,弱胶结砂岩骨架颗粒自身吸水膨胀软化,骨架颗粒之间的黏连性变差,胶结程度降低,直接导致试件抗剪强度降低,同时,水对剪切破坏面扰动影响也降低,致使在相同受力条件下饱水试件断裂面粗糙度和起伏度相对较小;胶结物质的遇水软化的特性是决定弱胶结砂岩剪切破坏断面形貌的关键因素,为进一步研究弱胶结砂岩损伤演化过程及破坏机理提供可靠的试验依据。

关键词:弱胶结砂岩;软化过程;断面形貌;地理信息系统

中图分类号:TU452

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2018)09-2444-08

Morphology and failure mechanism of the shear fracture surface of weakly cemented sandstone with water saturation

SONG Zhaoyang^{1,2,3},JI Hongguang²,LIU Zhiqiang^{1,3},TAN Jie^{1,3}

(1. Mine Construction Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 3. Beijing China Coal Mine Engineering Co., Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract: The shear failure surface is formed by the fracture of weakly cemented sandstone during the damage process. The features of such surface are vastly different depending on different forces and water saturation conditions. During this study, the researcher uses 3D laser scanning to accurately measure the shear fracture surface, leverages the Geographic Information System (GIS) technology to conduct the three-dimensional visualization and quantitative analysis of the surface caused by different forces and water saturation conditions, and utilizes the scanning electron microscopy (SEM) to explore the morphology of the surface as well as its failure mechanism in a micro-level. The results show that with the increase of the angle of the fixture, the normal forces of the fracture surface decrease, which leads to the disturbances of the fracture surface and the increase of the roughness and fluctuation degree of the shear fracture surface. With the interactions of water and the sandstone, the grains of the weakly cemented sandstone skeleton swell

收稿日期:2017-12-13 修回日期:2018-04-15 责任编辑:许书阁

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0600801);国家自然科学基金重点资助项目(51534002)

作者简介:宋朝阳(1986—),男,山东邹平人,博士。Tel:010-84263078, E-mail:szhaoyang123@126.com

通讯作者:纪洪广(1963—),男,山东青州人,教授,博士生导师,博士。E-mail:jihongguang@ces.ustb.edu.cn

and soften with water, and the adhesion of the skeleton particles deteriorate, while the cementation decreases. This directly leads to the decrease of the anti-shear capability of the specimen. At the same time, the impact of disturbances on the shear failure surface is reduced, thus the roughness and the fluctuation degree of the fracture surface with water saturation under the same force stress conditions are relatively small. The mechanical properties of the cemented material are the key to the morphology of the shear fracture surface of the weakly cemented sandstone, which provides an experimental foundation to further study on the damage evolution process and failure mechanism.

Key words: weakly cemented sandstone; softening process; fracture surface; geographic information system (GIS)

断面形貌分析是一门研究材料破坏后断裂表面特征的学科^[1]。通过研究弱胶结砂岩剪切断面形貌、性质,进而分析弱胶结砂岩的断裂原因、断裂路径、断裂过程和断裂机理等。岩石断裂面记录了其在荷载和环境作用下断裂前的不可逆变形,以及裂纹萌生和扩展直至断裂的全过程。弱胶结砂岩的断面形貌、粗糙度、起伏度和裂纹扩展途径等受断裂时的应力状态、环境介质及弱胶结砂岩的细观结构的制约,并与时间相关^[1]。弱胶结砂岩胶结能力差,对扰动异常敏感的特性,也造成了弱胶结砂岩在不同受力方式和饱水条件下剪切破坏断面形貌特征的差异性^[2]。通过弱胶结砂岩细观结构特征分析,寻找断裂表面形貌特征差异性的原因,评定断裂性质。因此,研究弱胶结砂岩断裂表面形貌特征在工程实践和理论研究中有重要的作用,为进一步研究弱胶结砂岩损伤演化过程及破坏机制提供可靠的试验依据。

从细观尺度上研究弱胶结砂岩断面形貌特征为进一步揭示弱胶结砂岩材料损伤演化规律以及破裂机理提供试验依据,是建立弱胶结砂岩微观与宏观力学性质之间的耦合关系的有效手段。因此,国内外许多学者通过岩石类材料断口的形貌特征进行了部分相关研究,并取得了一定的进展。王金安等^[3]运用分形理论分析岩石断裂表面的尺度效应;谢和平等^[4]进行岩石断裂和破碎的分形研究;易顺民等^[5]对岩石脆性断裂断口的分形特征进行研究;陈翔等^[6]基于GIS三维统计的膏溶角砾岩断口几何特性研究,提出分维可以作为岩石断口几何形态定量描述的参数之一。但是,弱胶结地层作为成熟度较低具有遇水软化膨胀崩解、强度较低、软化泥化以及胶结能力差等物理力学性质,且扰动异常敏感的特性^[7-8],与前人研究的普通硬岩有很大不同。西部弱胶结地层主要以弱胶结砂岩为主,主要以颗粒物组成骨架结构和黏土作为胶结物质胶结压实作用而成,为典型的二元结构体^[2]。弱胶结砂岩峰值强度具有很强的离散性,并且胶结程度对弱胶结砂岩的力学性质影响显著,与常规硬岩不同,与一般软岩力学性质具有显著差异,而胶结作用的存在使其与一般意义上的离散

介质差别较大。同时,水对弱胶结砂岩的化学腐蚀和应力腐蚀作用致使其细观结构强度弱化,最终导致其力学性质大幅度降低^[9-11],因此,饱水弱胶结砂岩的剪切破裂形貌对研究其软化的微观机制已成为关键岩石力学问题之一。

笔者对鄂尔多斯红庆河矿区的弱胶结砂岩利用3D激光扫描分别对干燥和饱水条件下剪切破坏断面进行精确测量,结合地理信息系统(GIS)技术对不同受力方式和饱水时间条件下的破坏断面形貌进行三维可视化处理和定量分析,得到了相应断裂表面形貌的粗糙度和起伏度,并采用SEM扫描电镜和QEM-SCAN扫描电镜从细观矿物成分和细观结构角度对产生的断面形貌特征差异性,以及弱胶结砂岩断裂原因、断裂路径及其断裂机理进行了研究。

1 弱胶结砂岩断面形貌信息的提取

1.1 试样的选取和制备

试验所用岩样选自鄂尔多斯红庆河煤矿,埋深平均380 m,属于白垩纪下统志丹群伊金霍洛组(K_1zh)粗粒砂岩,主要成分为石英、长石,呈暗红色,岩石平均密度约 2.620 kg/m^3 ,平均孔隙率约21.97%,平均普氏系数约1.56,平均软化系数约0.50,如图1所示。



图1 试验所用岩样

Fig. 1 Weakly cemented sandstone sample test

实验共有6组岩石,每组岩石3块,岩样进行干燥和饱和两大类,岩样尺寸为 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$,且两两面平行,为了加载时岩样受力均匀,将岩样受力面磨平。岩样加工完成后,采用万能实验机对岩样进行变角压剪试验,试验选用 $20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ 变角剪夹具。为消除夹具和垫板之间的摩擦力,在变角剪夹具和铸铁垫板之间放滚轴,加载速度控制在

0.5 ~ 1.0 MPa/s,直到试件破坏,实验如图 2 所示。



图 2 变角剪切实验

Fig. 2 Variation angle shear test of weakly cemented sandstone

1.2 岩样饱水处理

岩样煮沸饱水时,高温会对岩样造成一定程度的损伤,进而影响其力学性质,而抽真空法饱水,抽真空的过程需要数千小时,且认为此种条件下的饱水为特殊状态。因此,考虑到工程实际,采用《水利水电工程岩石试验规程》(SL264—2001)中自由吸水法对岩样进行饱水,首先注水至试样的 1/3 高处,12 h 后,再浸入试样的 2/3 长,再过 12 h,浸入试样的全部长度,浸泡 30 d 后制成饱水试样。

1.3 断裂面形貌信息提取

为了获得弱胶结砂岩真实剪切破坏断裂表面形貌,采用 LSD-2010 双目激光扫描仪扫描来获取断裂表面特征信息。将不同条件下剪切断裂的试样放置在激光扫描仪的电控位移台平板上,设置为双目扫描过程,考虑到数据点的间距及数量用激光扫描仪对断裂岩石在剪切破坏后的两翼表面进行激光扫描,扫描步距为 0.18 mm,数据采集过程如图 3 所示。

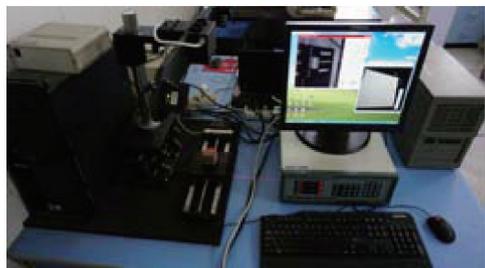


图 3 双目激光扫描仪

Fig. 3 Binocular laser scanner

1.4 断裂表面形貌空间分析

为分析弱胶结砂岩断裂表面形貌的空间几何特性,利用 LSD-2010 双目激光扫描仪扫描后,得到弱胶结砂岩断口表面粗糙形态精确测定值,并将实测得到的断面三维数据进行数字化表达后导入 Arcgis 软件,对激光扫描得到的表面数据换算重新整合,并基于 Arcgis 软件进行三维可视化分析,并进一步分析破坏断口的形貌特征。Arcgis 能够对空间分布数据进行采集、存储、运算、分析、显示的技术系统。通过 Arcgis 的空间分析模块、三维分析模块可以得到弱胶

结砂岩剪切断裂面在 Arcgis 中的三维表面模型,如图 4 所示,然后利用交互式的三维透视功能对断裂表面进行分析、建模、可视化、提取断面方面等方面的分析处理^[12-13]。

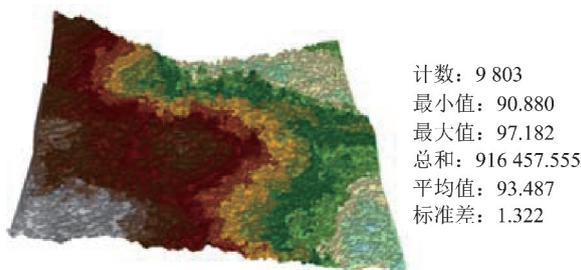


图 4 弱胶结砂岩剪切断裂表面断面在 Arcgis 中三维视图
Fig. 4 3D view for fracture surface in weakly cemented sandstone

2 弱胶结砂岩抗剪强度特征

不同夹角下干燥和饱和砂岩剪切强度曲线,如图 5 所示。随角度的增加,剪切破坏面的法向力减小,断裂岩石的剪切强度总体呈增长趋势。饱和状态的内摩擦角与干燥状态下的内摩擦角相比明显减小。

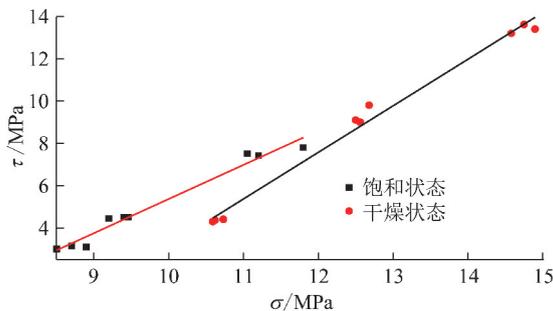


图 5 弱胶结砂岩剪切应力与法向应力关系曲线

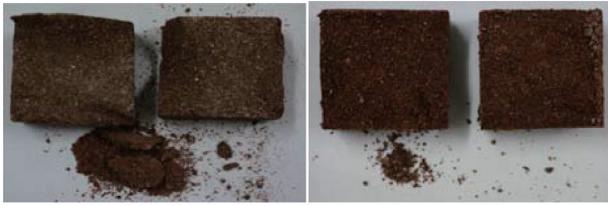
Fig. 5 Shear stress and normal stress relation curve of weakly cemented sandstone

3 弱胶结砂岩剪切断裂形貌特征

弱胶结砂岩受力方式和饱水条件对剪切断裂表面形貌特征有重要的影响,不同受力破坏和饱水时间条件下,弱胶结砂岩剪切破坏断裂表面粗糙度和起伏度差异较大,剪切断裂表面形貌差异也具有一定的随机性^[14-16]。如图 6 所示,不同条件下弱胶结砂岩剪切断面表面形貌试验特征图。

为了进一步分析水对剪切断裂表面形貌特征影响的研究,将从粗糙度和起伏度两方面进行研究。

粗糙度是断裂面上单个或多组矿物颗粒组成的高低起伏特征,粗糙度是由断裂面上随机不规则微凹凸体组成,能够从细观结构尺度上来表征断裂面粗糙度^[17]。岩石剪切断裂表面断面上较大的起伏不平可



(a) 干燥状态 (b) 饱和和转态

图6 弱胶结砂岩剪切断面表面形貌试验特征

Fig. 6 Characteristics of the surface profile of shear section of weakly cemented sandstone

以通过起伏度来表征,相对粗糙度来讲是对断面形貌相对宏观粗糙性的描述,是从较宏观尺度上来描述岩石剪切断裂表面平整程度的量词,起伏度其按几何形

态主要分为:成台阶形、波浪形和平面形H类^[17],如图7所示。采用LSD-2010 双目激光扫描仪扫描来获取断裂表面特征信息,得到弱胶结砂岩在不同剪切角度下干燥和饱和水剪切破坏断面形貌特征图,如图8所示。

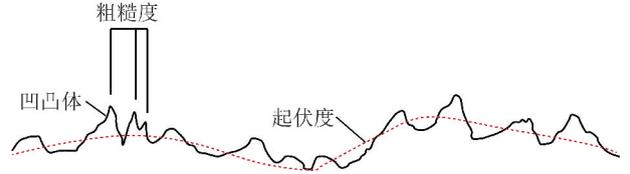


图7 弱胶结砂岩断面粗糙性示意^[17]

Fig. 7 Rough schematic diagram of cemented sandstone section

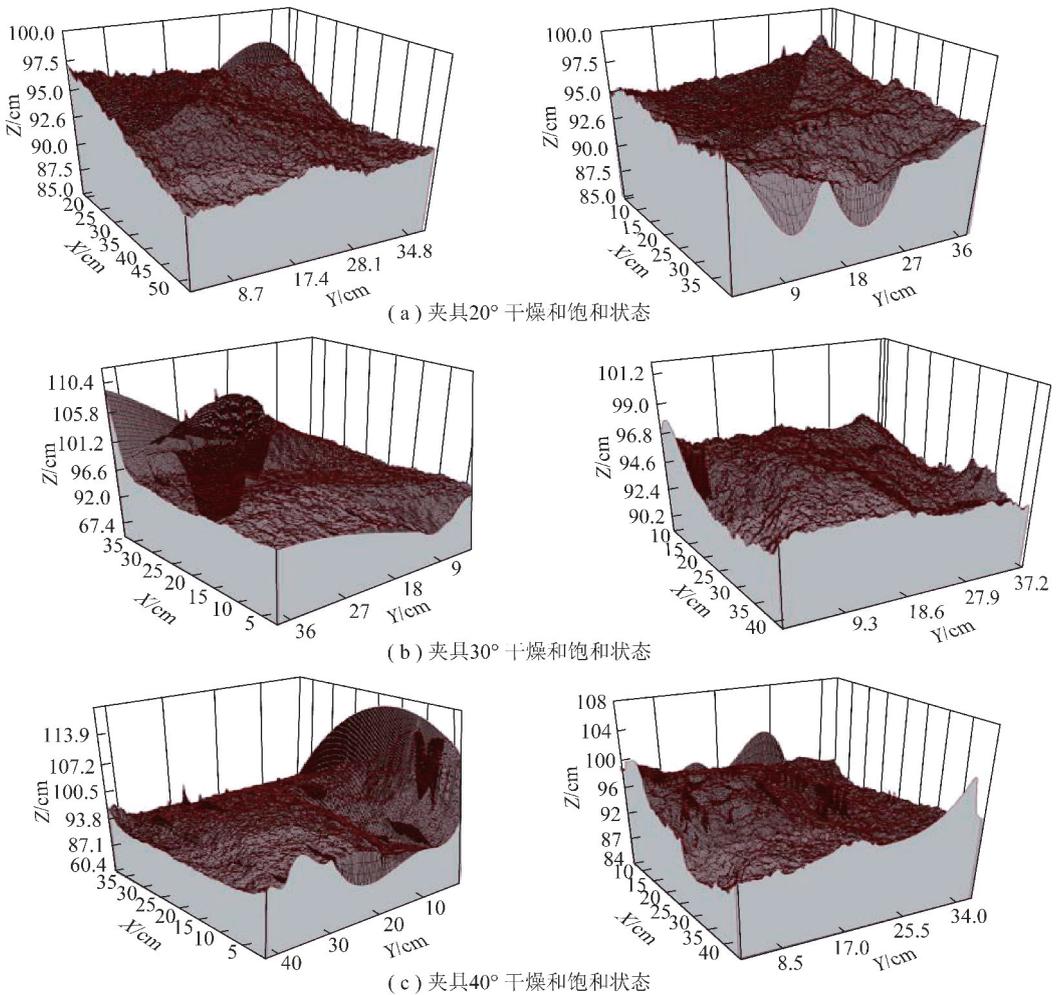


图8 不同条件下弱胶结砂岩断面形貌特征

Fig. 8 Characteristics of the profile of weakly consolidated sandstone in different conditions

4 弱胶结砂岩断裂面粗糙度分析

岩石剪切断裂表面粗糙度是反映断裂面起伏变化与粗糙程度的指标,即剪切断裂表面凹凸不平的程度,一般定义为剪切断裂表面单元曲面面积与投影面积之比^[17]。粗糙度可以反映剪切断裂表面断裂面形貌特

征及断裂面摩擦力大小的作用,粗糙度的大小取决于弱胶结砂岩颗粒形态、大小、胶结程度及含水状态。

笔者利用 ArcMap 中空间分析的栅格计算器通过坡度值求得,由于 ArcMap 计算得到的坡度值是角度值,而计算粗糙度是需要转换成弧度,计算表达式如式(1)所示:

$$R = \frac{1}{\cos(\text{slope} \times \pi/180)} \quad (1)$$

笔者根据激光扫描仪分辨率、高程误差,并考虑砂岩主要矿物颗粒尺寸,将粗糙度分为 31 区段,分别求得各粗糙度区段所占比例,具体分类和结果见表 1。不同饱水条件下断裂面上各粗糙度区段所占百分比图,如图 9 所示。分析可知,无论干燥状态还是饱

和状态下随夹角角度的增加,剪切断裂面粗糙度越大,表明断裂面矿物颗粒分布越不均匀,断裂表面越不光滑。不同夹具角度下干燥和饱水断裂面上各粗糙度区段所占百分比图,如图 10 所示。分析可知,在相同夹角下饱和状态岩样粗糙度值较小区段所占比例大于干燥状态,粗糙度的值越大表示断裂面起伏越剧烈,扰动敏感程度更高,破坏越严重。

表 1 断面粗糙度分类统计

Table 1 Classification of section roughness

序号	粗糙度分类	夹具 20°干燥	夹具 20°饱和	夹具 30°干燥	夹具 30°饱和	夹具 40°干燥	夹具 40°饱和
1	1 ~ 1.019	0.164 796	0.189 006	0.160 012	0.154 842	0.109 671	0.164 796
2	1.02 ~ 1.039	0.099 725	0.107 502	0.105 627	0.121 285	0.079 436	0.099 725
3	1.04 ~ 1.059	0.103 886	0.090 803	0.116 131	0.141 902	0.007 570	0.103 886
...
31	1.60 ~ 2	0.027 708	0.017 727	0.026 171	0.020 834	0.051 290	0.027 708

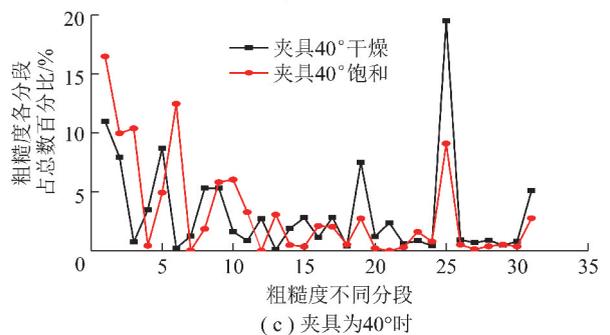
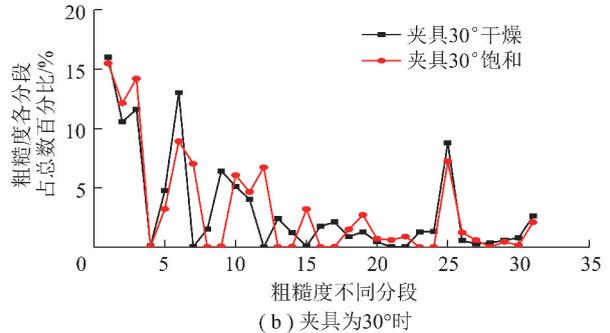
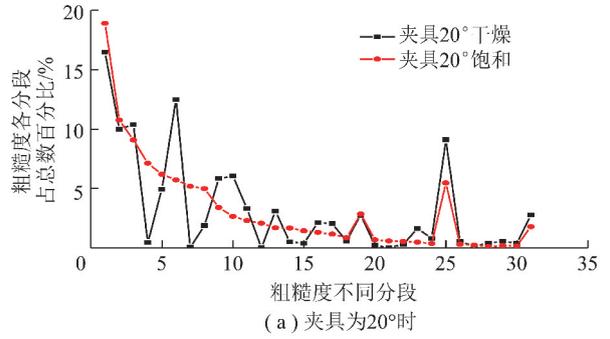
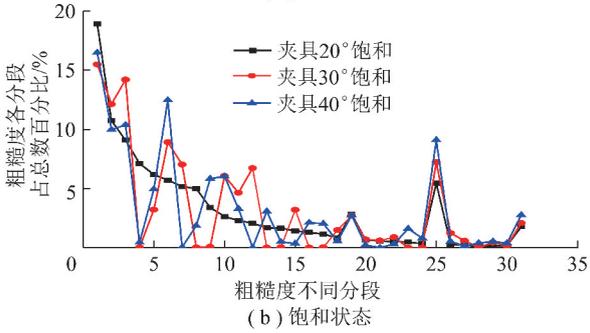
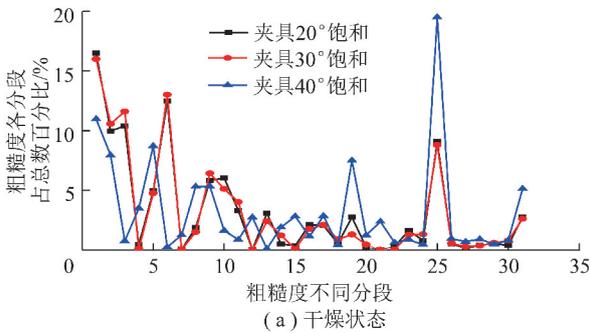


图 9 不同饱水条件下断裂面上各粗糙度区段所占百分比

Fig. 9 Percentage of the roughness section of the fracture surface under the condition of filling water

5 弱胶结砂岩剪切断裂面起伏度分析

剪切断裂面起伏度就是一个描述断裂面形貌特征的重要因子,它表示在一个特定的范围内,最高点的高度与最低点的高度差值。在 ArcMap 中可以通过空间分析模块的焦点统计功能,先计算出在不同窗口尺寸的基础上,从 DEM 计算出高程最大值与最小值。再通过栅格计算器功能,通过最大值与最小值之间的差值,计算出最大高程差。因此,局部窗口的尺寸直接决定了剪切断裂表面起伏度的获取精度,剪切

图 10 不同夹具角度下干燥和饱水断裂面上各粗糙度区段所占百分比

Fig. 10 Percentage of the roughness section of the fracture surface of the fracture surface of the different clamping angle is different

断裂表面起伏度最佳的窗口尺寸与激光扫描网格步进、DEM精度和剪切断裂表面形貌特征有直接关系。

笔者将起伏度分为10类,分别求得各起伏度区段所占比例,具体分类和结果见表2,得到断面起伏度分类统计表。不同饱水条件下断裂面上各起伏度区段所占百分比,如图11所示。分析可知,无论干燥

状态还是饱和状态下随夹角角度的增加,剪切断裂面起伏度越大,表明断裂面矿物颗粒分布越不均匀,断裂表面越不光滑。不同夹具角度下干燥和饱水断裂面上各起伏度区段所占百分比图,如图12所示。分析可知,在相同夹角下饱和状态岩样起伏度值较大区段所占比例大于干燥状态,起伏度的值越大表示断裂面起伏越剧烈,扰动敏感程度更高,破坏越严重。

表2 断面起伏度分类统计

Table 2 Statistical tables of sectional undulations

序号	粗糙度分类	夹具20°干燥	夹具20°饱和	夹具30°干燥	夹具30°饱和	夹具40°干燥	夹具40°饱和
1	0~0.099	0.006 693	0.015 197	0.019 791	0.013 927	0.003 273	0.016 010
2	0.1~0.199	0.183 442	0.250 391	0.217 815	0.241 404	0.059 588	0.203 300
3	0.2~0.299	0.000 685	0.000 380	0.000 149	0.000 947	4.31×10^{-5}	0.000 372
...
10	0.9	0.005 211	0.051 076	0.072 666	0.050 054	0.264 061	0.108 472

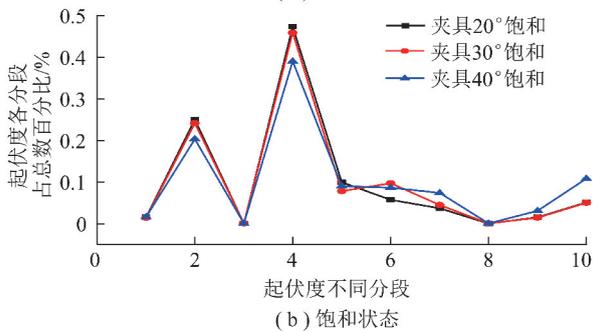
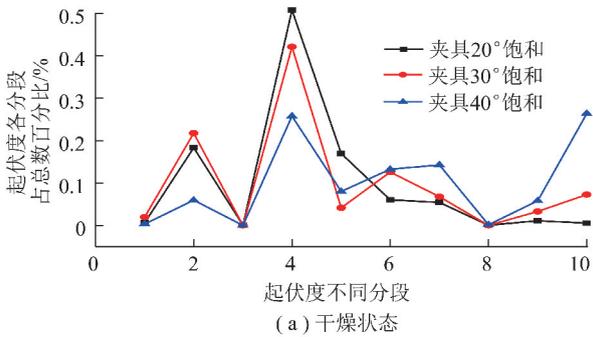


图11 不同饱水条件下断裂面上各起伏度区段所占百分比

Fig. 11 Percentage of the undulating section of the fracture surface under different filling conditions

6 弱胶结砂岩饱水前后细观尺度分析

通过 QEMSCAN 扫描电镜对弱胶结砂岩饱水 30 d 后对其矿物进行定性和定量分析,得到弱胶结砂岩干燥状态与饱水 30 d 后矿物成分的对比如图 13 所示。弱胶结砂岩各矿物在饱水前后相对含量变化明显。弱胶结砂岩中不溶于水的矿物质如石英、云母等,其他矿物含量相对减少导致其含量占比相应增加,而饱水后钾长石、钠长石、伊利石的含量减少。主要原因在于弱胶结砂岩饱水过程中部分矿物颗粒

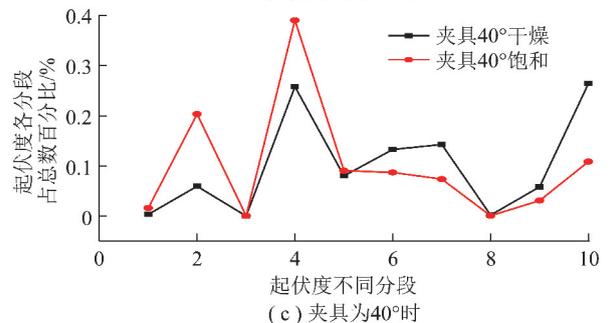
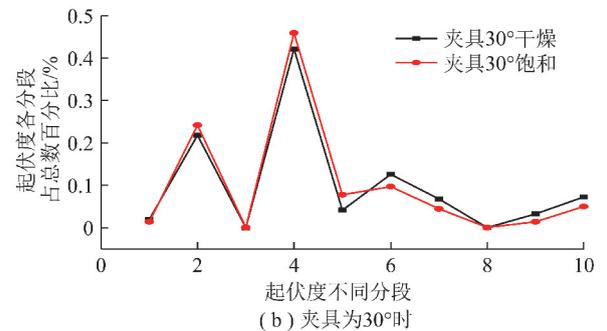
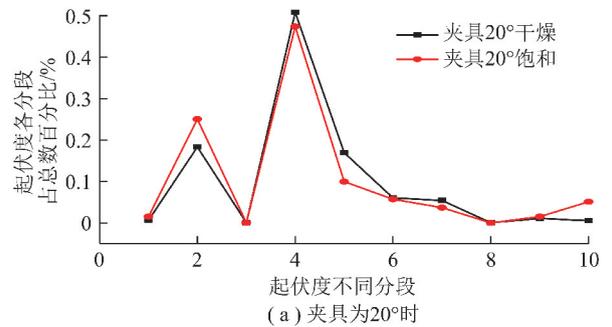


图12 不同夹具角度下干燥和饱水断裂面上各起伏度区段所占百分比

Fig. 12 Percentage of each undulating section of the dry and full water fracture surface under different clamping angles

在水的作用下产生矿物溶蚀,致使矿物颗粒溶蚀,构成细观结构的矿物集合体被破坏,进而导致弱胶结砂岩内部微观结构发生变化。

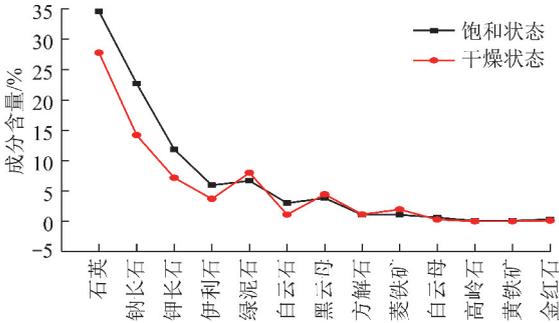


图 13 弱胶结砂岩饱水前后矿物成分对比

Fig. 13 Mineral composition contrast of weakly cemented sandstone

QEMSCAN 扫描电镜能够通过沿预先设定的光栅扫描模式加速的高能电子束对样品表面进行扫描,并得出矿物集合体嵌布特征的彩图,如图 14 所示。在水-岩物理、化学作用等因素腐蚀作用下,原本胶结紧密的弱胶结砂岩试件结构变得松散,新生裂隙主要发生在颗粒间的胶结物质内,颗粒自身的溶解腐蚀导致其边界模糊,松散颗粒间变得更加松散,水分子进入颗粒间孔隙,对孔隙物质进行溶蚀作用导致大孔隙之间连通性变好,孔隙增加,导致水分子更容易进入细小的孔隙导致微裂隙增加,且孔隙分布趋向均匀,最终导致细观结构趋向疏松,岩石的黏聚力和内摩擦角下降,最终导致岩石的力学强度降低。

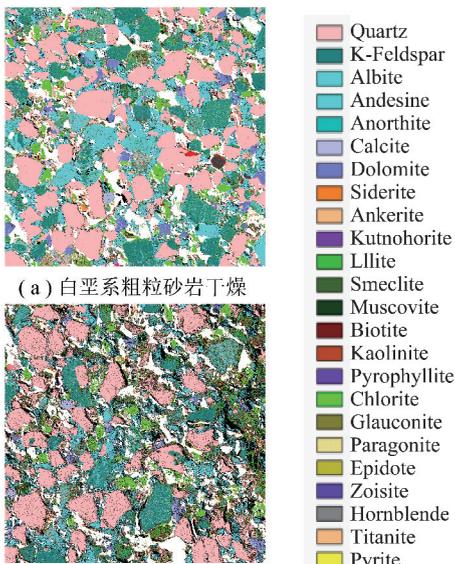


图 14 弱胶结砂岩细观结构

Fig. 14 Mesoscopic structure of weakly cemented sandstone

弱胶结砂岩干燥和饱和状态细观结构典型对比图,如图 15 所示。弱胶结砂岩矿物颗粒与水作用,发

生矿物溶蚀和次生,颗粒间的胶结物质破坏,致使水分子进入颗粒之间,并于内部颗粒间的胶结物质及矿物颗粒自身发生反应,进而产生大量的微孔隙和局部的应力集中,导致组成骨架结构的颗粒物质发生剥落,内部结构体系发生破坏,致使宏观力学特性发生改变。胶结物质表现出一定的卷曲、泥化、碎散以及出现多孔特征。经过饱水后的弱胶结砂岩细观结构与干燥状态下发生明显的不同。

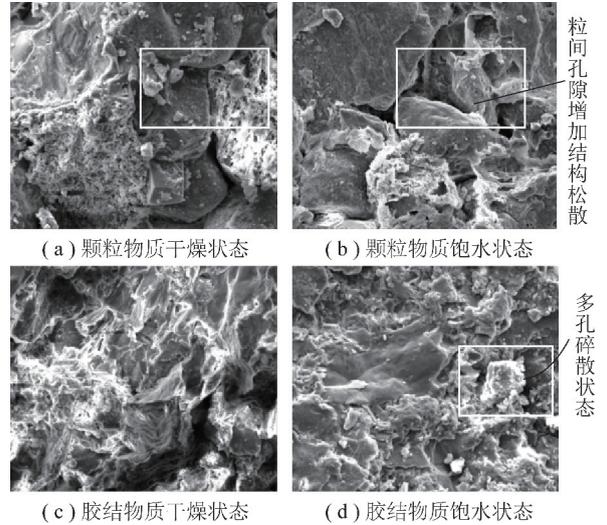


图 15 弱胶结砂岩干燥和饱和状态细观结构典型对比
Fig. 15 Typical contrast diagram of sandstone drying and saturation state of weakly cemented sandstone

综合分析,弱胶结砂岩饱水后颗粒间的胶结物质首先发生破坏,颗粒间的联通性较好,导致颗粒间的摩擦力降低,在剪切破坏过程中,裂纹扩展路径主要沿颗粒边界在胶结物质中发生,由于胶结物质在饱水后强度弱化明显,脆性向延性转化,剪切破坏过程中扰动敏感度程度降低,因此,对弱胶结砂岩来讲,胶结物质的力学特性是决定弱胶结砂岩剪切破坏断面形貌的关键因素,饱水后岩样剪切断面粗糙度和起伏度明显降低。

7 结 论

(1) 剪切断面形貌特征的差异,反映了岩石内部颗粒接触和胶结特性,随夹具角度的增加,破坏时,破裂面法向力减小,法向力的减小是导致破裂面扰动较大以及断裂面粗糙度和起伏度增加的主要原因之一。

(2) 水岩相互作用下,颗粒之间的胶结性与干燥条件下更差,颗粒自身吸水膨胀软化,导致局部应力集中程度降低,因此,试件抗剪强度降低,内摩擦角减小,且剪切破坏扰动影响也降低,致使在相同夹具角度下饱水试件断裂面粗糙度和起伏度降低。

(3) 弱胶结砂岩在荷载作用下,砂岩内颗粒胶结

性能是影响饱水砂岩强度和断裂形貌的关键因素。弱胶结砂岩饱水后颗粒间的胶结物质首先发生破坏,颗粒间的联通性较好,导致颗粒间的摩擦力降低,在剪切破坏过程中,裂纹扩展路径主要沿颗粒边界在胶结物质中发生。

(4)胶结物质在饱水后强度弱化明显,脆性向延性转化,剪切破坏过程中扰动敏感度程度降低,因此在饱水后岩样剪切断面粗糙度和起伏度明显降低。

参考文献(References):

- [1] 钟群鹏,赵子华. 断口学[M]. 北京:高等教育出版社,2014.
- [2] 宋朝阳. 弱胶结砂岩细观结构特征与变形破坏机理研究及应用[D]. 北京:北京科技大学,2017.
SONG Zhaoyang. The analysis and application of mesoscopic structure characteristic and Deformation and failure mechanism of weak cemented sandstone[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing,2017.
- [3] 王金安,谢和平,田晓燕,等. 岩石断裂表面分形测量的尺度效应[J]. 岩石力学与工程学报,2000,19(1):11-17.
WANG Jin'an, XIE Heping, TIAN Xiaoyan, et al. Scale effect on fractal measurement of rock fracture surface[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2000,19(1):11-17.
- [4] 谢和平,高峰,周宏伟,等. 岩石断裂和破碎的分形研究[J]. 防灾减灾工程学报,2003,23(4):1-9.
XIE Heping, GAO Feng, ZHOU Hongwei, et al. Fractal fracture and fragmentation in rocks[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering,2003,23(4):1-9.
- [5] 易顺民,赵文谦,蔡善武. 岩石脆性破裂断口的分形特征[J]. 长春科技大学学报,1999,29(1):37-41.
YI Shunmin, ZHAO Wenqian, CAI Shanwu. Fractal characteristics of brittle fracture appearance in rocks[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology,1999,29(1):37-41.
- [6] 陈翔,李尤嘉,黄醒春,等. 基于GIS三维统计的高溶角砾岩断口几何特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(S2):3541-3546.
CHEN Xiang, LI Youjia, HUANG Xingchun, et al. Study on geometrical properties of fracture appearance in gypsum breccia base on 3D GIS statistic[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2008,27(S2):3541-3546.
- [7] 宋朝阳,纪洪广,张月征,等. 主应力对弱胶结软岩马头门围岩稳定性影响[J]. 采矿与安全工程学报,2016,33(6):965-971.
SONG Zhaoyang, JI Hongguang, ZHANG Yuezheng, et al. Influence of principal stress on the stability of surrounding rock of ingate in extremely weak cementation stratum[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2016,33(6):965-971.
- [8] 宋朝阳,纪洪广,刘阳军,等. 弱胶结围岩条件下邻近巷道掘进扰动影响因素[J]. 采矿与安全工程学报,2016,33(5):806-812.
SONG Zhaoyang, JI Hongguang, LIU Yangjun, et al. Influencing factors of excavation disturbance on neighboring roadways in weakly cemented rock[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2016,33(5):806-812.
- [9] 周翠英,谭祥韶,邓毅梅,等. 特殊软岩软化的微观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(3):394-400.
ZHOU Cuiying, TAN Xiangshao, DENG Yimei, et al. Research on softening micro-mechanism of special soft rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(3):394-400.
- [10] 周翠英,朱凤贤,张磊. 软岩饱水试验与软化临界现象研究[J]. 岩石力学,2010,31(6):1709-1715.
ZHOU Cuiying, ZHU Fengxian, ZHANG Lei. Research on saturation test and softening critical phenomena of soft rocks[J]. Rock and Soil Mechanics,2010,31(6):1709-1715.
- [11] 刘镇,周翠英,朱凤贤,等. 软岩饱水软化过程微观结构演化的临界判据[J]. 岩石力学,2011,32(3):661-666.
LIU Zhen, ZHOU Cuiying, ZHU Fengxian, et al. Critical criterion for microstructure evolution of soft rocks in softening process[J]. Rock and Soil Mechanics,2011,32(3):661-666.
- [12] Environment System Research Institute. ArcView Spatial Analyst[R]. [S. l.]:[s. n.],1996.
- [13] LI X B, ZHOU Z L, LOK T S, et al. Innovative testing technique of rock subjected to coupled static and dynamic loads[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2008,45(5):739-748.
- [14] 周枝华,杜守继. 岩石节理表面几何特性的三维统计分析[J]. 岩石力学,2005,26(8):1227-1232.
ZHOU Zhihua, DU Shouji. 3D statistic analysis of geometrical properties of a rock joint[J]. Rock and Soil Mechanics,2005,26(8):1227-1232.
- [15] 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,1999,27(4):379-383.
DU Shouji, SUN Jun, TETSUROE, et al. Relation of surface roughness and shear strength of rock joints[J]. Journal of Tongji University,1999,27(4):379-383.
- [16] 谢海峰,饶秋华,王志. 反平面剪切(III型)加载下脆性岩石的断口分析[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(9):1832-1839.
XIE Haifeng, RAO Qiu-hua, WANG Zhi. Fracture morphology analysis of brittle rock under anti-plane shear(mode III) loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2007,26(9):1832-1839.
- [17] 王煜曦. 岩石断裂表面细观接触演化与剪切力学模型研究[D]. 北京:北京科技大学,2016.
WANG Yuxi. Study on micro-contact evolution and shear mechanical model of fractured rock surfaces[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing,2016.
- [18] 姜德义,何怡,欧阳振华,等. 砂岩单轴蠕变声发射能量统计与断面形貌分析[J]. 煤炭学报,2017,42(6):1436-1442.
JIANG Deyi, HE Yi, OUYANG Zhenhua, et al. Acoustic emission energy statistical properties of sandstone during uniaxial creep and its fracture surfaces morphology[J]. Journal of China Coal Society,2017,42(6):1436-1442.