

砂岩加载过程中的细观损伤试验研究

唐海, 易帅, 袁超, 王建龙, 丁安松, 赵志伟

(湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 为研究砂岩在加载过程中的细观损伤特征, 采用三轴压缩试验设备, 对砂岩进行特定高围压下不同轴向应力加载试验。利用扫描电镜、能谱分析仪对加载后的完整岩样进行细观观测, 运用图像处理程序对砂岩的细观损伤信息进行统计分析。研究表明: 在 30 MPa 围压和未超过单轴抗压的轴应力下, 砂岩的应力-应变曲线未见明显屈服点, 而随轴向应力增加, 其塑性变形程度与细观损伤因子不断增加, 砂岩强度渐进劣化; 试件细观损伤因子基本服从 Gauss 函数分布, 其细观损伤随轴向应力的增加由观测面边缘逐渐向中心延展。砂岩内部的 3 种细观结构在加载后仅表现为砂粒、胶结体 2 种细观形貌, 且随轴向应力的增加, 试件损伤细观上首先从胶结体开始, 然后逐步转移到砂粒。砂岩主要由氧、硅、铝 3 种元素组成, 氧元素遍布整个试件, 硅元素主要分布在试件的高强度区, 铝元素主要分布在试件的低强度区。

关键词: 岩石力学; 塑性变形; 细观损伤; 损伤因子; 微裂纹; 元素分析

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2019)03-0487-12

Experimental study on meso-damage of sandstone during loading process

TANG Hai, YI Shuai, YUAN Chao, WANG Jianlong, DING Ansong, ZHAO Zhiwei

(School of Resources and Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China)

Abstract: To study the meso-damage characteristics of sedimentary rocks, compression tests were carried out on sandstones under specific high confining pressures using the triaxial compression equipment. Scanning electron microscopy and energy spectrum analyzer were used to investigate micro behaviours of samples after compression, and the image-processing technique was adopted to analyze the meso-damage information of sandstones. The results indicate that, in the case of 30 MPa of the confining pressure, the stress-strain curves exhibit no evident yielding, and the plastic deformation and the meso-damage factor continue to increase and the sandstone strength gradually deteriorates with increasing the axial stress prior to exceeding the uniaxial compressive strength. The meso-damage factor obeys the Gauss function distribution, and the meso-damage gradually propagates from the edge of the surface to the center with increasing the axial stress. The three meso-structures within sandstone samples mainly exhibit as two forms of meso-morphology, e.g. sand and cement, and the damage of the sample begins from the cement and then transfers to the sand. Three components of sandstone including oxygen, silicon and aluminum respectively distribute throughout the sample, in the high-strength area and in the low-strength area.

Key words: rock mechanics; plastic deformation; meso-damage; damage factor; micro-crack; elemental analysis

收稿日期: 2018-09-11; **修回日期:** 2018-12-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51434006)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51434006)

作者简介: 唐海(1970-), 男, 博士, 1997年毕业于湘潭工学院采矿工程专业, 现任副教授, 主要从事采矿与岩石力学方面的教学与研究工作。E-mail: tanghai707298@163.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.1087

1 引言

岩体变形、破坏的过程,一直以来都是岩体研究的热点。自20世纪以来,伴随着损伤力学、断裂力学的提出、发展,研究设备的更新,蒋宇等^[1-3]对岩体破坏的细观损伤规律进行了研究,结果表明:岩体作为一种天然介质,包含有多尺度损伤缺陷,其宏观尺度的破坏失稳过程实质上是其细观结构累积变形破坏的宏观反映。

近年来,为探究岩石宏观力学性质的细观力学机制,国内外学者开展了许多关于岩石细观损伤规律的研究。蔡美峰等^[4]通过对单轴压缩下的砂岩进行CT动态观测,得到了砂岩单轴压缩条件下的细观损伤—破裂演化规律。陈新等^[5]利用数值图像处理技术,研究了预制裂纹的岩体在单轴压缩条件下裂纹的发育、扩展机制。袁超等^[6]运用RFPA^{2D}软件,分析发现了压缩条件下岩石单一微裂纹的扩展机制。张国凯等^[7]运用数值模拟软件研究了岩石细观特征与宏观破坏的影响。朱珍德等^[8]利用岩石变形破坏全过程细观力学试验系统,得到了单轴压缩过程中大理岩内部微裂纹的基本几何数据,分析了微裂纹不同阶段的演化规律。随着细观研究的深入,人们逐步开始从细观层面进一步分析岩石的内部物质组成、结构对其力学性质影响的规律。宋朝阳^[9]以弱胶结砂岩为研究对象,采用细观结构试验、宏观岩石力学试验、理论分析和数值模拟等技术手段,得到了弱胶结砂岩的矿物成分和细观结构特征及其对静力学和动力学性能的影响。郑克洪^[10]基于X-Ray,CT研究煤矸颗粒细观结构及破损特性,发现了煤与矸石颗粒内部不同部位受损程度不同。

目前,采用三轴加载试验机与SEM细观观测手段,研究岩石细观损伤规律的成果较多。李晓娟等^[11]利用SEM与RMT-150B试验机,研究得到了不同围压三轴压缩条件下粉砂岩微裂纹的方位角、长度和宽度基本服从广义极限分布。倪晓慧等^[12]利用SEM与RMT-150B试验机,对不同荷载频率下花岗岩的微裂纹特征进行了量化分析。但对加载至岩石破坏前的完整试件,进行不同轴向应力加载的细观损伤观测研究还相对较少。SEM观测过程中,为了便于获取试件内部损伤信息,常需将试件加工成小体积块体^[3],加载至破坏后的试件处于碎胀状态,容易受切割破坏形成二次损伤,从而影响观测

结论。加载后的完整试件保留了一定强度,一定程度上可降低切割的影响;同时,完整试件的两端可认为是原始观测面,通过对比分析切割面的细观损伤数据,探究切割对试件的影响规律,能辅助校准SEM试验结论。

在煤矿开采过程,工作面上、下顺槽一直是灾害多发区域,随着煤层采出、推进步距的推移,临近开采面的顺槽围岩不断地受支承应力作用,顺槽顶板处于不停地加载过程中,可能会引发顶板灾害^[13-14]。为此,本文采用MTS 815多功能电液伺服控制刚性试验机,对砂岩试件进行三轴加载试验,模拟地下工程顶板岩体在应力增加时的力学性能劣化特征;利用SU3500扫描电镜、Model 550i能谱分析仪对加载后的完整试件进行细观损伤观测,通过图像处理软件统计细观损伤信息,研究特定高围压下不同轴向应力加载下砂岩细观损伤特征,为预防诸如煤矿巷道等岩体工程灾害做一些前期理论探讨工作。

2 试验方案

选用砂岩试件作为试验对象,试验分三轴加载试验、SEM观测试件细观损伤与能谱分析仪分析试件元素3个部分。

2.1 三轴加载试验

试验所取砂岩来自湖南郴州煤矿井下,取样巷道区域岩石所受原始水平应力为30 MPa,取样后制成规格 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的标准圆柱体试件,两端研磨抛光。煤矿巷道围岩是沉积岩,岩石取样是沿沉积岩方向,且取样范围较小,可假设岩石试件在出现宏观裂纹前具有各向同性。为了保证试验结果的可靠性和可比性,试件加工成型后,对试件外观进行仔细检查,将表面有明显宏观特征差异的试件剔除。试验采用美国MTS公司生产的MTS 815多功能电液伺服控制刚性试验机,为模拟矿井围压环境,试验围压设定为30 MPa。试验前期经单轴压缩试件可知,其单轴抗压强度32 MPa,为确保试件完整性,分别采用10/15/20/25 MPa应力对试件进行轴向应力加载,模拟砂岩受支承应力影响(试验机加卸载速率均为0.1 MPa/s),荷载加载如表1所示。

具体试验方案如下:

第一步,取编号T01试件,预加轴力1.5 MPa使其稳固在试验机电物台;

第二步,加载围压至30 MPa;

表 1 试验方案
Table 1 Test scheme

| 试验类型 | 试件编号 | 预加轴力/MPa | 轴力/MPa | 围压/MPa |
|---------|------|----------|--------|--------|
| 三轴加卸载试验 | T01 | 1.5 | 10 | 30 |
| | T02 | 1.5 | 15 | 30 |
| | T03 | 1.5 | 20 | 30 |
| | T04 | 1.5 | 25 | 30 |

第三步，加载轴向应力至 10 MPa，静置 15 min 后，先卸载围压，再卸载轴向应力，取出 T01 试件；

第四步，取编号 T02 试件，重复第一、二步，加载轴向应力至 15 MPa，静置 15 min 后，先卸载围压，再卸载轴向应力，取出 T02 试件；

第五步，依据步骤四，取编号 T03/T04 试件，令轴向应力加载至 20/25 MPa，静置 15 min 后，先卸载围压，再卸载轴向应力，取出试件 T03/T04。

2.2 SEM 观测试验

试验采用天美(中国)科学仪器有限公司生产的 SU3500 日立新一代超高分辨钨灯丝扫描电镜。根据试件台规格($\phi 51 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$)，采用岩石切割机将加载后的试件沿轴线均等切割为 3 个小圆柱($\phi 50 \text{ mm} \times 33 \text{ mm}$)，6 个观测面，并以一定压力氮气吹净观测面，辅以无尘布、无水乙醇清洗，放入干燥箱内干燥后待用。为探究切割对砂岩试件细观损伤的影响，将位于砂岩试件内部由切割形成的 4 个面命名为切割面；位于砂岩试件原顶、底面的 2 个面命名为原始面。观测时，利用仪器内置的坐标网格，按编号定位取点(见图 1)，图像的放大倍数，根据观测的



(a)

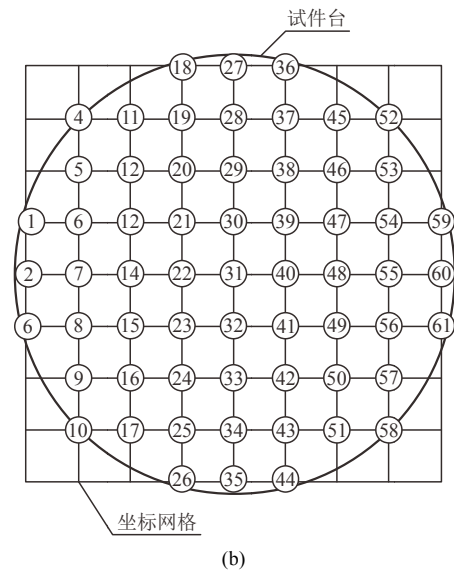


图 1 试件台与坐标网格

Fig.1 Specimen stage and coordinate grid

清晰度、采集需求，确定采用 300 倍为主、1 000~5 000 倍为辅、细观尺寸 1~100 μm 的定点定倍拍摄方式。

2.3 能谱分析仪观测试验

能谱分析仪与 SEM 联接一体，在 SEM 观测过程中可同步获取砂岩元素组成、含量与分布。为获取砂岩完整的细观结构，采用全观测面扫描分析的操作方式，对整个 SEM 图片进行元素分析。如表 2 所示，砂岩内部的主要元素为氧、硅、铝，微量元素为钾、钙等。如图 2, 3 所示，砂岩内部主要元素氧、硅、铝是以化合物或混合物的形式存在，其中氧元素含量最高，遍布整个观测面；硅、铝元素的分布具有明显的区域性，且两者分辨界限明显；钾、钙等微量元素的分布较随机。利用坐标网格与编号图片，通过硅、铝元素的分布规律，可将观测面划分为 2 个区域：铝元素区与硅元素区。

表 2 元素含量

Table 2 Elemental content

| 元素符号 | 元素名称 | 所占含量/% |
|------|------|--------|
| O | 氧 | 48.651 |
| Na | 钠 | 0.988 |
| Al | 铝 | 17.716 |
| Si | 硅 | 27.772 |
| K | 钾 | 1.309 |
| Ca | 钙 | 1.014 |
| Fe | 铁 | 2.550 |
| 合计 | | 100 |

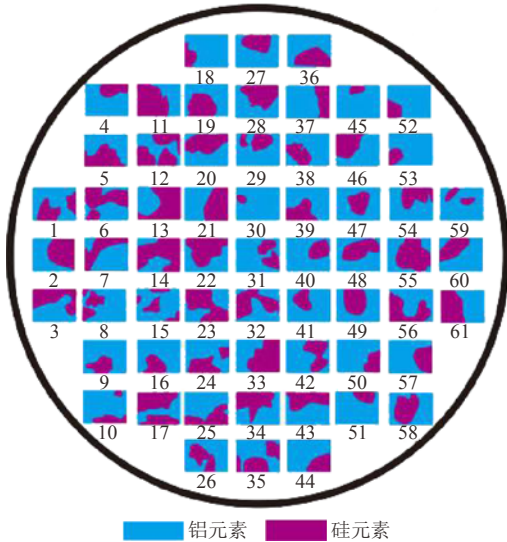


图2 观测面内硅、铝元素分区示意图

Fig.2 Schematic diagram of the division of silicon and aluminum in the observation surface

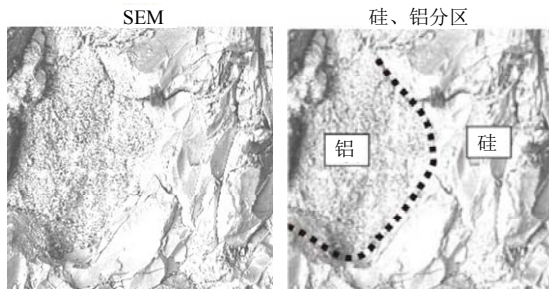


图3 观测面内 13 号图片的硅、铝元素分布

Fig.3 Distribution of silicon and aluminum in the picture No. 13 of the observation surface

3 试件的细观损伤

3.1 细观结构及其元素分布

一般认为，砂岩作为沉积岩中的碎屑岩类，是由含量大于 50%，粒径 2~0.05 mm 的碎屑胶结而成^[15]。通过对 4 组加载后试件的元素分析可知，试件含氧、硅、铝、钾、钙等元素，含矿物石英、长石、云母与粘土等。为便于统计分析，试验根据粒径、形貌、元素组成的差异，将砂岩细观结构分为 3 个部分：粒径大于 0.05 mm，主要为含硅、氧元素的石英等矿物的砂粒，形貌表现为带微裂纹的不规则大颗粒；粒径小于 0.05 mm，包括含氧、硅元素的石英等矿物颗粒的基质颗粒^[16]，形貌表现为带微裂纹的不规则小颗粒；以及填充于各颗粒间，化学元素种类复杂的胶结物^[4, 16]。根据砂岩试件内部元素分布特征可知，硅元素区内主要为石英，而铝元素区内主要为长石、岩屑等矿物。

3.2 损伤描述与表示

如图 4 所示，加载后砂岩细观结构的 3 个部分(见图 4(a))表现出 2 种细观形貌：一种为随机分布、粒径大于 0.05 mm 的大颗粒，其内部微裂纹较发育，整体完整性较好，其主要成分为石英等矿物，将其称为砂粒(见图 4(b))；一种为分布在大颗粒之间、粒径小于 0.05 mm 的小颗粒及胶结物(见图 4(c))，由于两者之间的分辨界限模糊，将其统称为胶结体(见图 4(d))。胶结体颗粒内部发育的微裂纹导致颗粒破碎严重、完整性差，进一步促进了颗粒之间形成微裂纹、微孔洞。

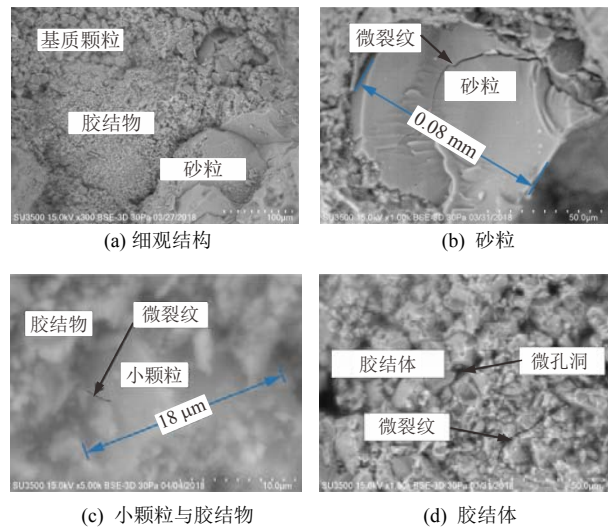


图4 损伤形貌

Fig.4 Damage morphology

为便于统计分析砂岩的细观损伤规律，将观测面各结构中微裂纹与微孔洞皆视为细观损伤，以相同拍摄倍数的图片作为取值单元^[17]，用“损伤因子”^[18]来分析试件的细观损伤规律。损伤因子公式为

$$D = \frac{A_D}{A} \tag{1}$$

式中： D 为损伤因子， A 为损伤后材料表观横截面积， A_D 为横截面上出现缺陷的总面积。

微裂纹的发育、扩展与贯通，一直以来都被认为是导致岩石宏观破坏的主因。通过 SEM 观测可知，砂粒与胶结体颗粒两者内部微裂纹皆有明显的几何特征，通过分析两者微裂纹长度、条数信息，可得到砂岩宏观破坏前不同细观结构部分的损伤规律。

3.3 损伤信息表示

如图 5(a), (b)所示，仪器拍摄图片为灰度图片，其灰度值范围为 0~255(0 代表黑色)，其中微裂纹、

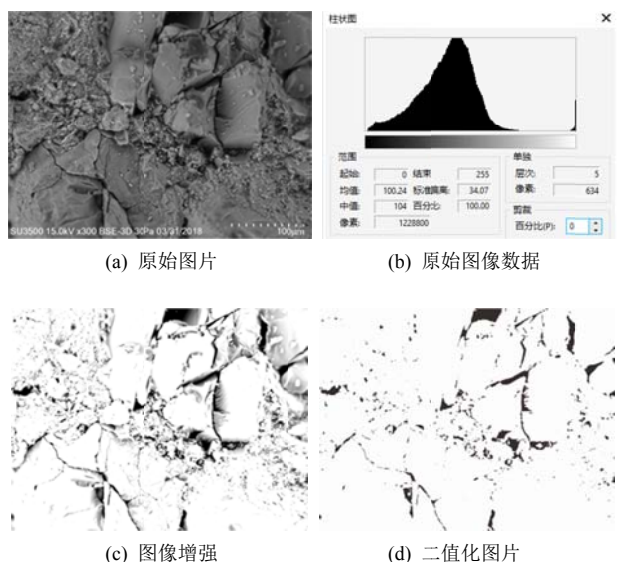


图 5 图片处理

Fig.5 Picture processing

微缺陷等细观损伤部分，表现出明显的低灰度值(色暗)特征，完整部分灰度值则较高。基于图片中损伤部分灰度值的特征，参考马天寿等^[19-20]的研究思路，试验采用 Coreldraw 图像处理工具^[21]，根据灰度最佳分割阈值对图片作二值化分割处理，默认二值化图片中 0 值(黑色)部分为损伤，1 值(白色)部分为完整面。以往的研究常采用 Matlab 图像处理程序作图片二值化处理，要求研究员设计代码或 GUI(用户操作界面)，有一定的操作难度。Coreldraw 图像处理软件是专业制图软件，能高效二值化处理扫描图片。考虑到图中个别完整面受高差影响，灰度值偏小(颜色较暗)，通过调节图片伽马值、对比度与强度，将原始图片作图像增强处理，使损伤特征更突出。如图 5(c)所示，图像中增强参数为伽马 2.0，对比 100、强度 50。

二值化处理扫描图片，最重要的是求出灰度最佳分割阈值。假设图片中像素总数为 N ，灰度最佳分割阈值为 t ，灰度值大于阈值的像素总数为 $N_{i(t < i < 255)}$ ，灰度值小于等于阈值的像素总数为 $N_{j(0 \leq j \leq t)}$ ，使用 Coreldraw 内置柱状图工具，得到 A_i ， u ， A_j ， u_i ， u_j ， N ， $N_{i(t < i < 255)}$ 与 $N_{j(0 \leq j \leq t)}$ 值，则灰度最佳分割阈值的计算公式为

$$A_i = \sum_{i=1}^{255} \frac{N_i}{N} \quad (2)$$

$$A_j = \sum_0^t \frac{N_j}{N} \quad (3)$$

$$u_i = \frac{1}{A_i} \sum_{i=1}^{255} \frac{iN_i}{N} \quad (4)$$

$$u_j = \frac{1}{A_j} \sum_0^t \frac{jN_j}{N} \quad (5)$$

$$a^2 = A_i(u_i - u)^2 + A_j(u_j - u)^2 \quad (6)$$

式中： A_i 为灰度值大于阈值的像素所占比例， A_j 为灰度值小于等于阈值的像素所占比例， u 为全图像素的灰度平均值， u_i 为灰度值大于阈值像素灰度平均值， u_j 为灰度值小于等于阈值像素灰度平均值， a^2 为被分割两部分的方差。当 a^2 取最大值时，对应的 t 值为灰度最佳分割阈值。按如上方式处理电镜扫描图片，得到图 5(d)所示的二值化，图中 t 为 97， a^2 取最大值 669.87。

3.4 损伤数据提取

为便于提取损伤因子数据，忽略损伤所处竖方向高差，将其二值化图像作为一个拍摄点横截面。则有

$$D = \frac{A_D}{A} = A_j \quad (7)$$

式(7)表明，损伤因子 D 数值等于二值化图片中 0 值所占比例 A_j 。提取微裂纹几何特征数据时，沿用过往的研究手段^[3, 5]，采用 matlab 图像处理程序中的 bwlabel, bwareaopen 函数代码，可提取其长度与数量信息。采取前述函数代码，对图 6 中原始图片进行微裂纹数据提取，得到微裂纹数量为 2 条，一条长度 385.26 μm ，一条长度 12.14 μm 。

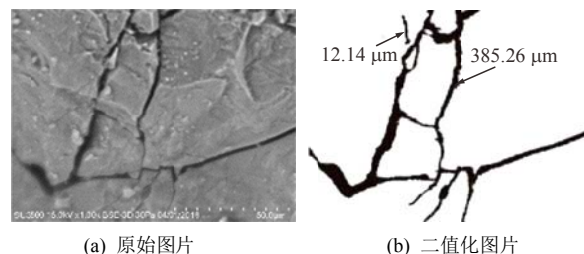


图 6 数据提取

Fig.6 Data extraction

4 宏观试验分析

在图 7 所示的砂岩轴向应力 - 应变加卸载曲线中，在试件加载围压至 30 MPa 后，随着轴向应力加载，各试件应力 - 应变加载曲线呈直线，变化趋势相同，未见明显屈服点；卸载时，先卸载围压，各应变曲线呈近似相同的水平直线；最后卸载轴压，T01~T04 曲线有残余(塑性)变形，且伴随着轴向应力的增加，残余(塑性)变形程度加大；图中各组试件加卸载曲线形状相似，表明试件宏观力学性质差异较小，可能是轴压未超过某一阈值，岩石内部裂

隙缓慢生长，处于损伤累积期。图 8 为砂岩塑性应变与塑性应变增长率曲线，由图可知，在 30 MPa 围压条件下，随轴向应力的提高，试件残余(塑性)变形渐增、增长率先升后降。

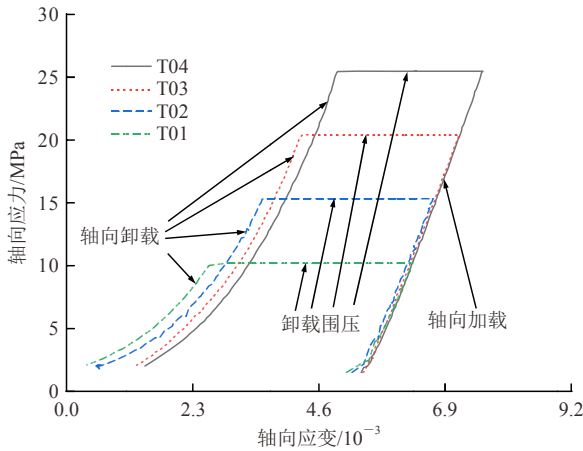


图 7 砂岩轴向应力 - 应变加载卸载曲线

Fig.7 Axial stress-strain load-unloading curves of sandstone

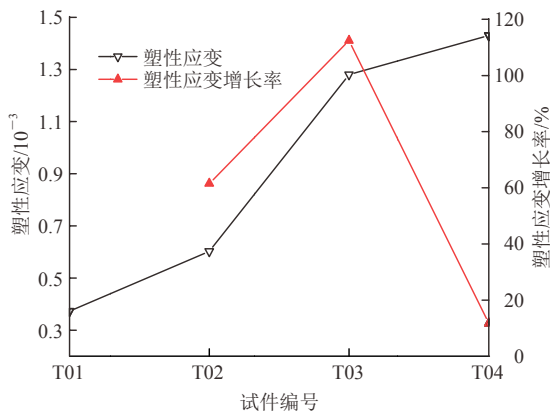


图 8 砂岩塑性应变与塑性应变增长率

Fig.8 Sandstone plastic strain and plastic strain growth rate

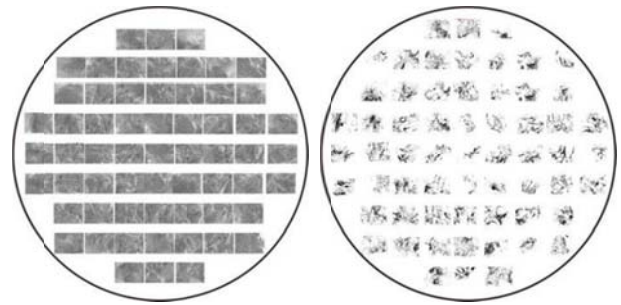
5 细观试验分析

5.1 试件细观损伤规律

(1) 原始面

如图 9 所示，采用 300 倍倍数按编号逐点拍摄，获取加载后试件顶面(原始面)全面损伤图片，通过图像二值化处理、损伤因子数据采集，得到试件原始面的损伤因子数据。

统计试件各原始面各点的损伤因子，取均值作为试件整体损伤因子，得到试件损伤因子曲线(见图 10)。如图 10 所示，T01→T04 试件，损伤因子曲线上升，且其增长率递增，分析可知，试件细观损伤受轴向应力影响较大，且增长趋势明显。结合图 7, 8 分析可知，试件在加载过程中塑性应变不断



(a) 原始面扫描图片分布 (b) 原始面二值化图片分布

图 9 原始面二值化图片

Fig.9 Original face binary images

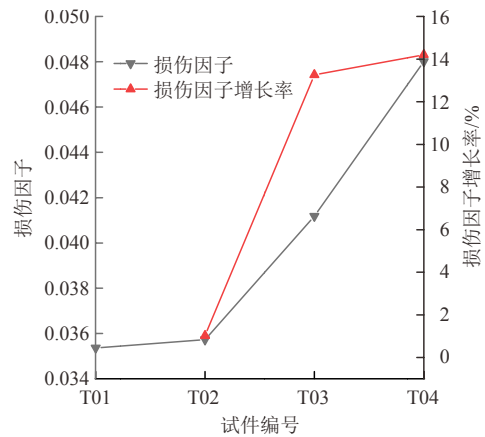


图 10 损伤因子与损伤因子增长率

Fig.10 Damage factor and damage factor growth rate

加剧，细观损伤因子亦不断加剧，表明试件在高围压轴向应力加载过程中，虽然没有发生宏观破坏，但其内部会造成一定的细观损伤累积，这种岩石强度渐进劣化作用会影响深部岩石工程的稳定性。另一方面，试验发现试件在高围压条件下，随轴向应力的加载，塑性变形的增长率由高到低，细观损伤因子增长率持续升高。这种增长率的差异表明了加载过程中影响试件塑性变形，不仅有砂岩细观结构的新形成的损伤，还应包括原有的原始损伤等其他因素。

以试件中原始面各点损伤，作为试件内部损伤因子，得到各试件的损伤因子频率直方(见图 11)。由于各组岩石试件天然非均质、初始损伤的影响，其损伤因子的分布有明显的差异，T01 的损伤因子最大值在 0.14~0.16 范围，T03 的损伤因子 0.10~0.12 区间频率为 0，采用三参数峰值函数对数据进行拟合处理，发现各试件损伤因子频率直方图基本符合 Gauss 函数分布。Gauss 函数拟合公式：

$$y = \frac{A_1}{w_1 \sqrt{\frac{2}{\pi}}} \exp \left[-2 \frac{(x - x_{c1})^2}{w_1^2} \right] \quad (8)$$

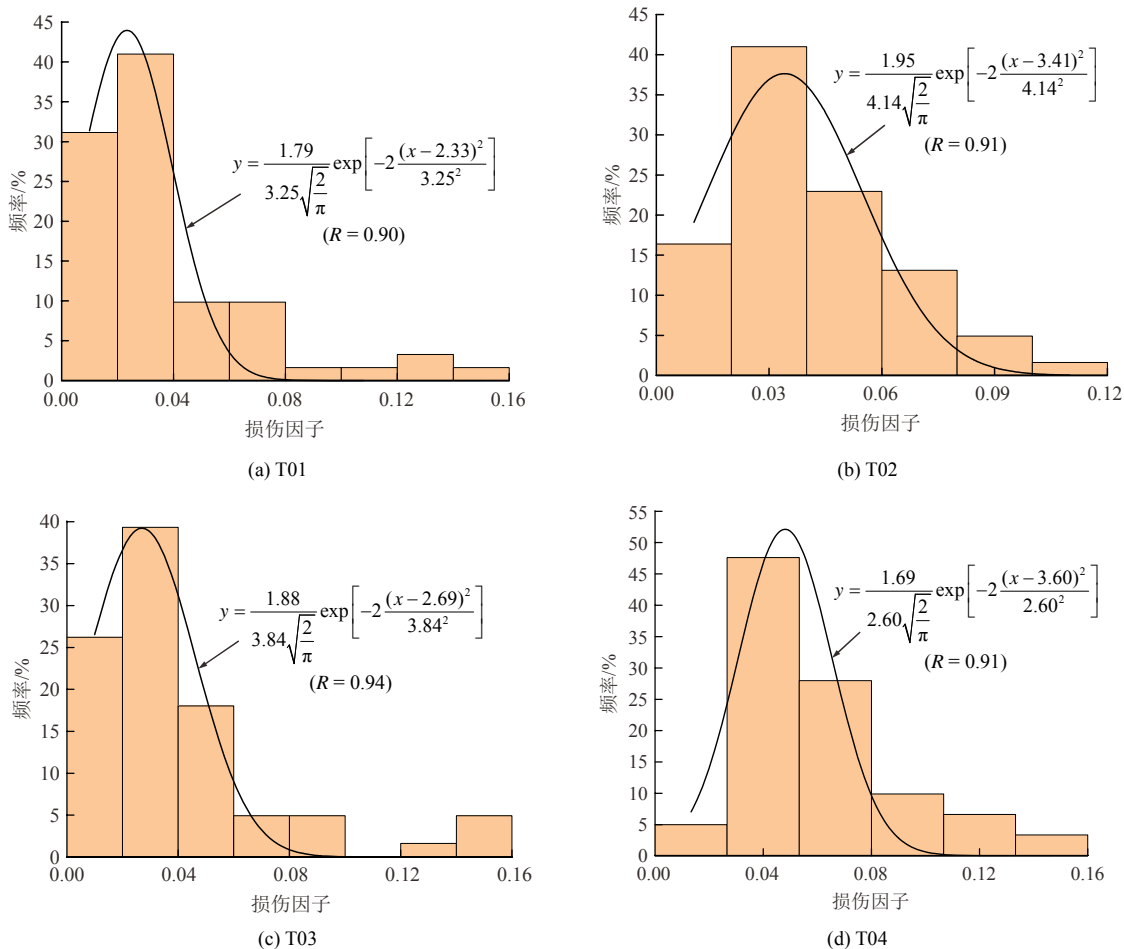


图 11 损伤因子频率直方图与拟合曲线

Fig.11 Damage factor frequency histogram and fitting curves

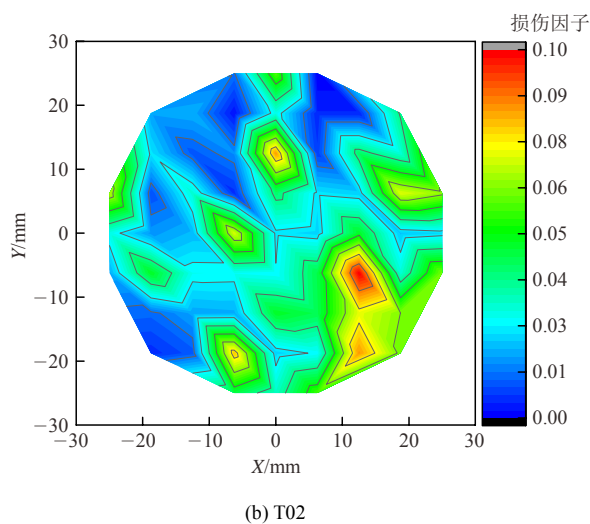
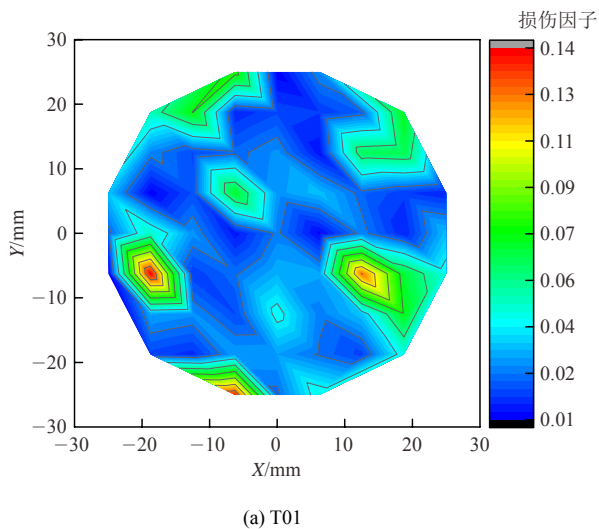
式中： A_1 为比例参数， w_1 为形状参数， x_{c1} 为位置参数。

利用坐标网格与试件编号，可得到各试件原始面损伤因子分布(见图 12)。由图 12 可知，受围压的影响，试件边缘区多见高损伤区，中心区偶见高损伤区。从 T01→T04 试件，细观损伤由边缘侧逐渐

向中心延展，其延展方式表现为单个外侧高损伤区向内扩展侵入的“损伤侵入”和多个高损伤逐步联结向内扩展侵入的“损伤联结侵入”，且损伤联结侵入是造成试件损伤增加的主因。

(2) 切割面

为方便分析试件受切割造成的二次损伤的影



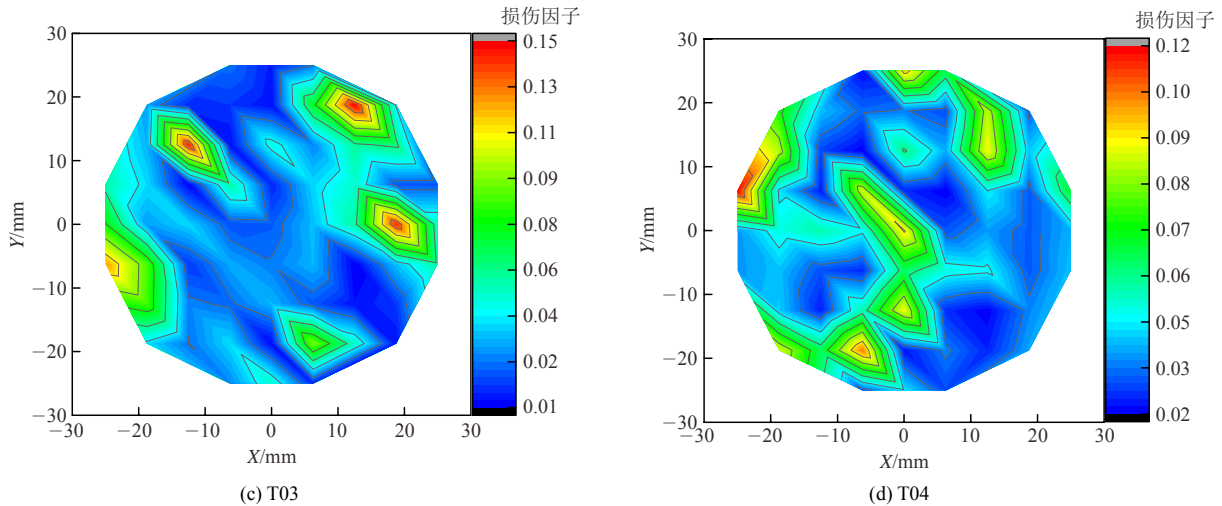


图 12 损伤因子分布图

Fig.12 Damage factor distribution images

响, 假设试件各面具有相同的物理、力学性质, 对试件切割面图片采用与原始面图片同样的数据处理方式, 得到损伤因子与损伤因子增长率曲线(见图 13)、损伤因子频率直方图与拟合曲线(见图 14)、损伤因子分布(见图 15)。

如图 13 所示, T01→T04 试件, 损伤因子曲线上升, 且其增长率递增。结合图 10 分析可知, 切割后各试件的损伤因子数值明显增加, 但其损伤因子与损伤因子增长率变化趋势与原始面基本一致, 因此采用切割方式可有效获取岩石内部的细观损伤变化趋势规律。

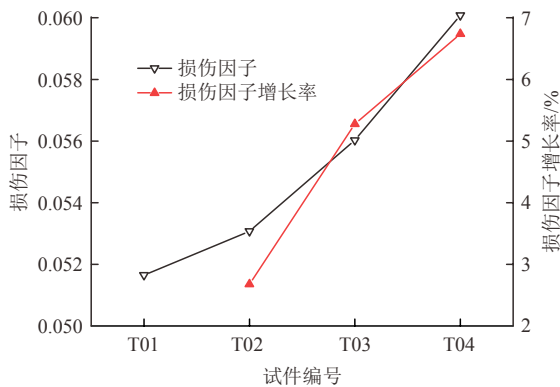


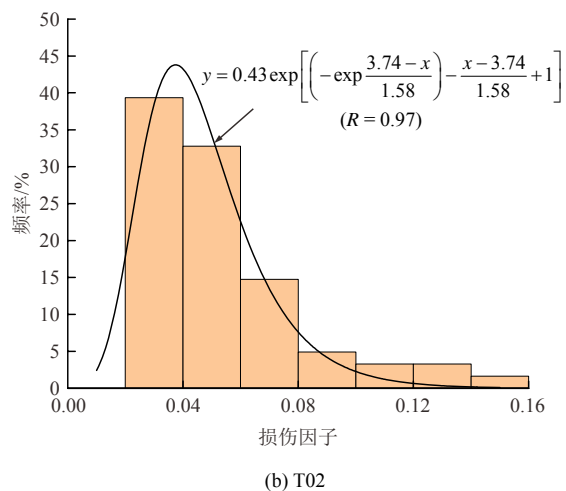
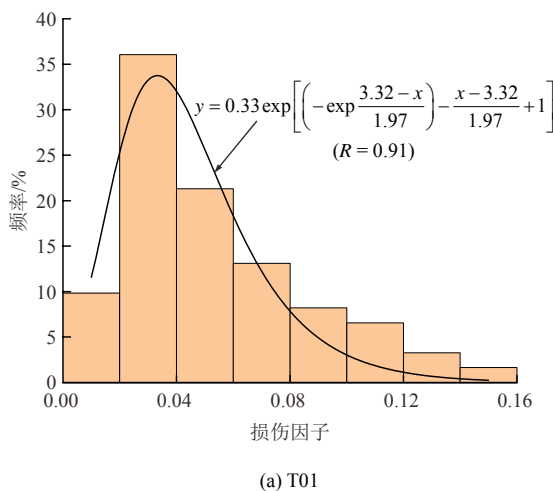
图 13 损伤因子与损伤因子增长率

Fig.13 Damage factor and damage factor growth rate

如图 14 所示, 受切割影响, 损伤因子区整体向 X 轴右侧偏移, 其中有 3 个试件中的 0.00~0.02 范围频率为 0, T04 试件中 0.12~0.14 范围频率为 0, 通过对各试件频率直方图进行数据拟合处理, 发现其损伤因子频率直方图基本符合 Extreme 函数分布, 对比图 11 分析可知, 切割不仅加剧了试件的整体损伤程度, 也改变了损伤因子的函数分布特征。Extreme 函数分布拟合公式:

$$y = A \exp \left[\left(-\exp \frac{x_c - x}{w} \right) - \frac{x - x_c}{w} + 1 \right] \quad (9)$$

式中: A 为比例参数, w 为形状参数, x_c 为位置参数。



(a) T01

(b) T02

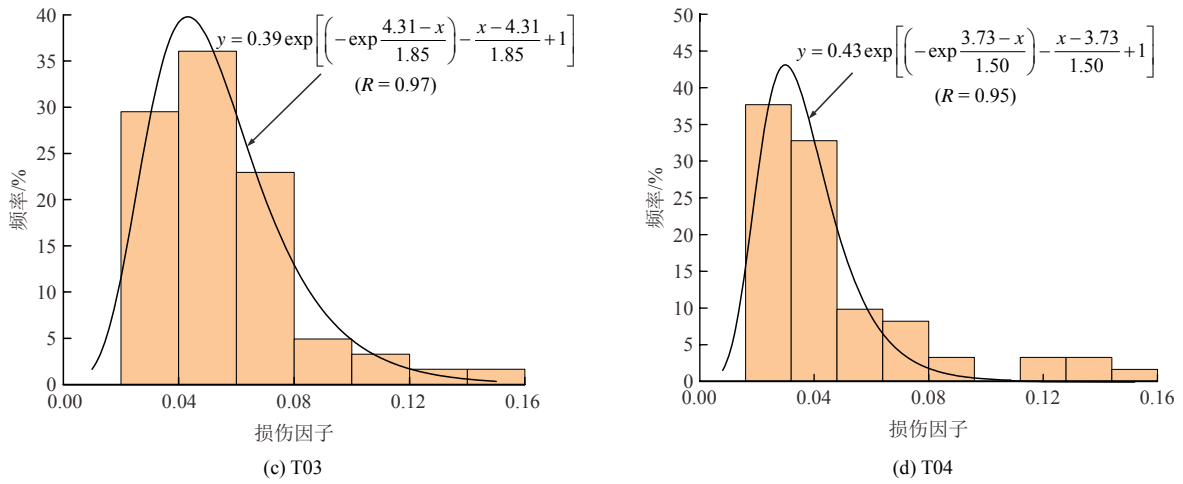


图 14 损伤因子频率直方图与拟合曲线

Fig.14 Damage factor frequency histogram and fitting curve

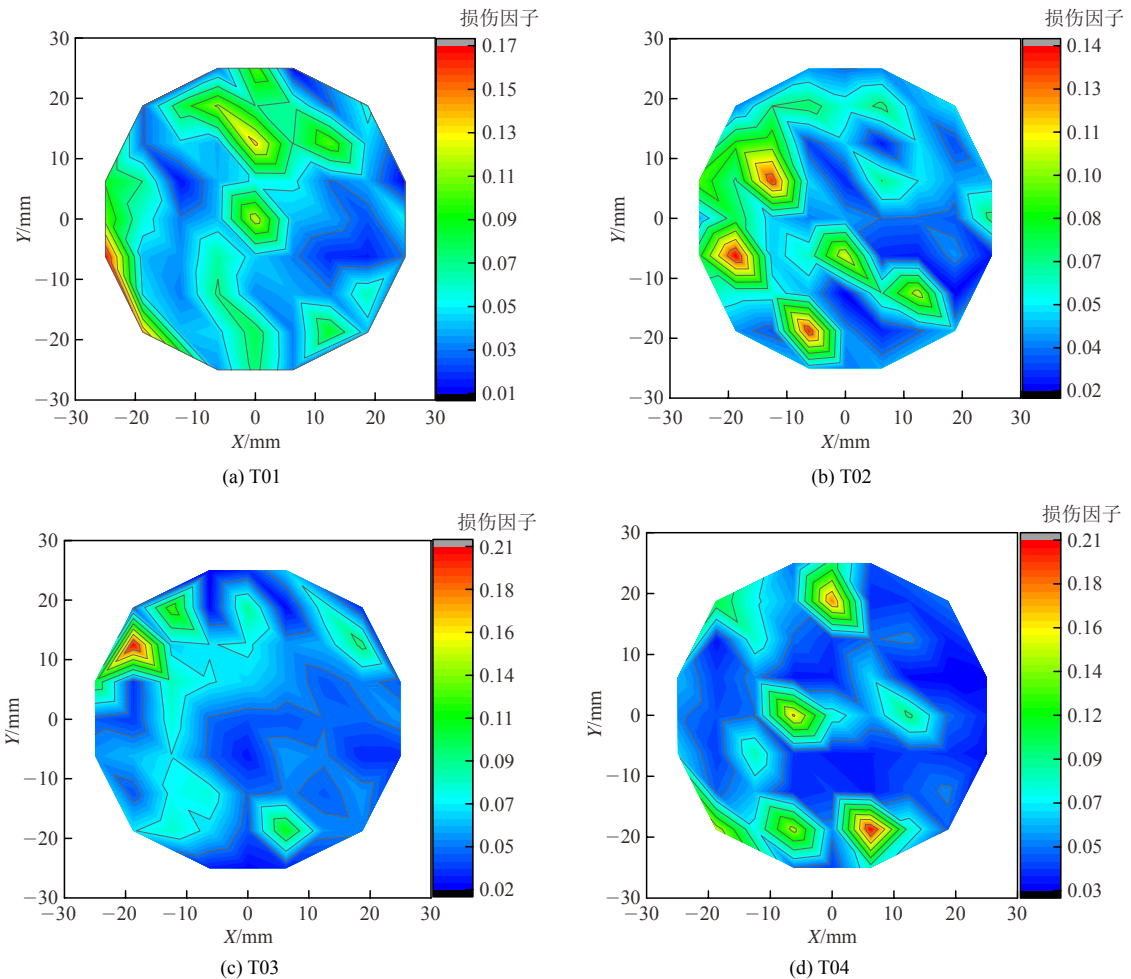


图 15 切割面损伤因子分布图

Fig 15 Damage factor distribution images

如图 15 所示，试件高损伤区多位于边缘侧，中心区也出现少许高损伤区。对比图 12 分析可知，试件观测面受切割影响，损伤因子极大值增加，损伤联结侵入现象更明显，表明切割作用是通过促进试件边缘损伤联结侵入作用，使其整体细观损伤程度

加深。

5.2 试件细观结构的细观损伤差异

(1) 损伤因子

在上文的拍摄方式基础上，提高放大倍数至 1 000 倍拍摄砂粒与胶结体，将胶结体图片中的微裂

纹、微孔洞损伤统计为胶结体损伤因子，砂粒图片中颗粒内部的微裂纹损伤统计为砂粒损伤因子，得到砂粒与胶结体的损伤因子、损伤因子增长率曲线如图 16 所示。如图所示，T01→T04 试件，砂粒与胶结体损伤因子变化趋势近似一致，但胶结体的损伤因子大于砂粒的损伤因子，损伤因子增长率小于砂粒的损伤因子增长率。

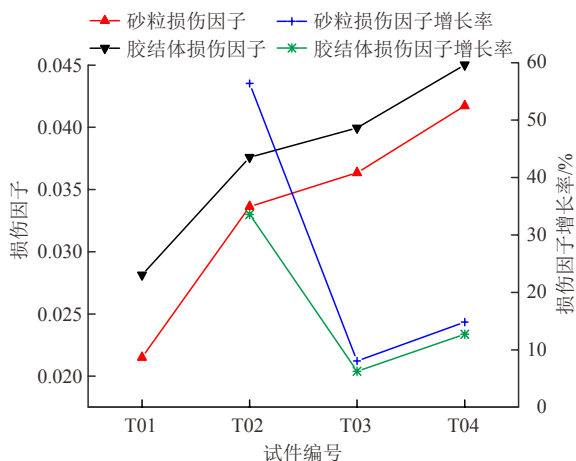


图 16 损伤因子与损伤因子增长率

Fig.16 Damage factor and damage factor growth rate

为进一步探究试件的细观结构损伤差异与宏观力学性质的关系。引入试件的表现应力 $\sigma = \frac{P}{A}$ (P 为表现压力)，有效应力 $\sigma_{ef} = \frac{P}{A_{ef}}$ ，则有

$$\sigma_{ef} = \frac{\sigma}{1 - D} \quad (10)$$

式中： σ_{ef} 为有效应力。则加载条件下，有

$$\frac{\sigma}{1 - D_1} = \sigma_{ef1} \quad (11)$$

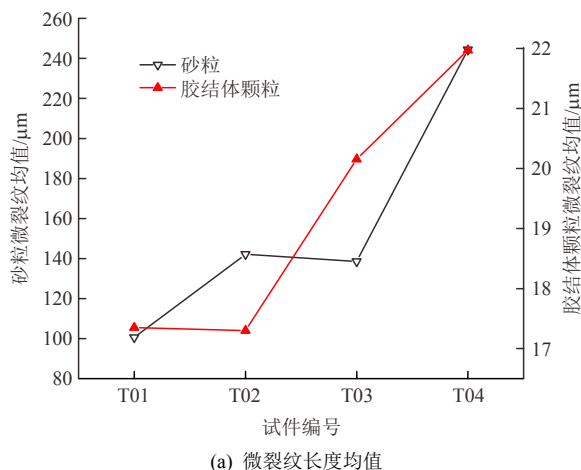
$$\frac{\sigma}{1 - D_2} = \sigma_{ef2} \quad (12)$$

式中： σ_{ef1} 、 σ_{ef2} 分别为试件损伤因子为 D_1 、 D_2 时的有效应力； D_1 为砂粒损伤因子； D_2 为胶结体损伤因子。式(11)，(12)可表述为当 σ 相同时，损伤因子越大($D_1 < D_2$)，有效应力越大($\sigma_{ef1} < \sigma_{ef2}$)。结合试验数据可知，胶结体承受的有效应力大于砂粒，但在加载过程中，有效应力逐渐向砂粒转移。

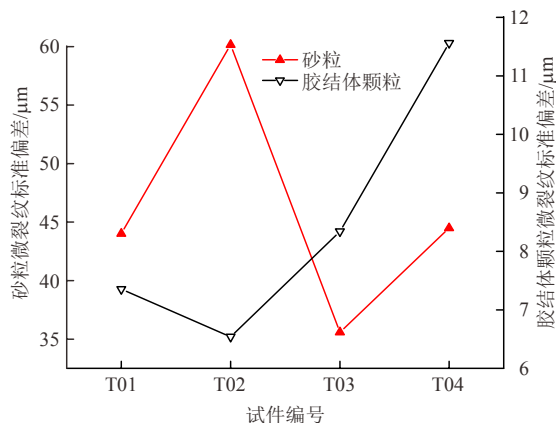
(2) 微裂纹

根据颗粒之间的尺寸大小差异，采用 1 000~5 000 倍放大砂粒与胶结体颗粒，按编号拍摄微裂纹扫描图片，提取有效的微裂纹长度、数量数据，作

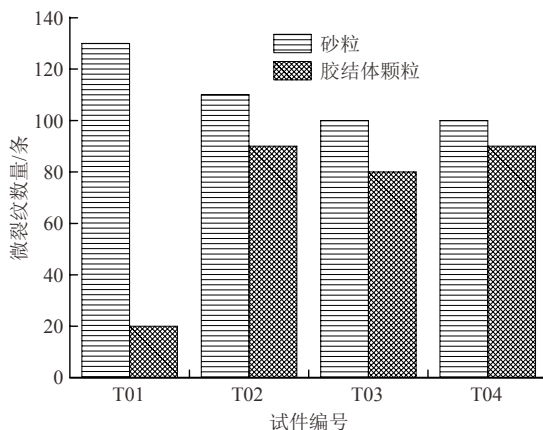
图 17 所示的微裂纹长度的均值、标准偏差曲线与微裂纹数量直方图。如图所示，T01→T04 试件，砂粒微裂纹长度均值增加、标准偏差上下浮动、裂纹数量减少；胶结体颗粒微裂纹长度均值、标准偏差先降后升，裂纹数量整体呈上升趋势。一般认为，微裂纹成长为宏观裂纹的过程，是导致岩石破坏主要原因。分析可知，砂粒微裂纹汇聚速度大于其萌发速度，微裂纹发育特征是以汇聚、贯通为主，逐步成长为大裂纹；胶结体颗粒内部的微裂纹汇聚速度



(a) 微裂纹长度均值



(b) 微裂纹长度标准偏差



(c) 微裂纹数量

图 17 微裂纹数据示意图

Fig.17 Micro-crack data diagram

小于裂纹萌发速度, 微裂纹发育特征是以萌发新裂纹为主, 加剧胶结体的破碎程度。

5.3 试件的细观损伤与元素分布

由于砂岩中氧元素遍布整个试件, 硅、铝元素分布具有明显的区域性, 且两者分辨界限明显, 钾、钙、铁等微量元素随机分布, 因此, 可利用砂岩中硅、铝元素分布规律将砂岩试件内部分为硅元素区、与铝元素区, 图 18 为各试件元素分区破坏特征图。

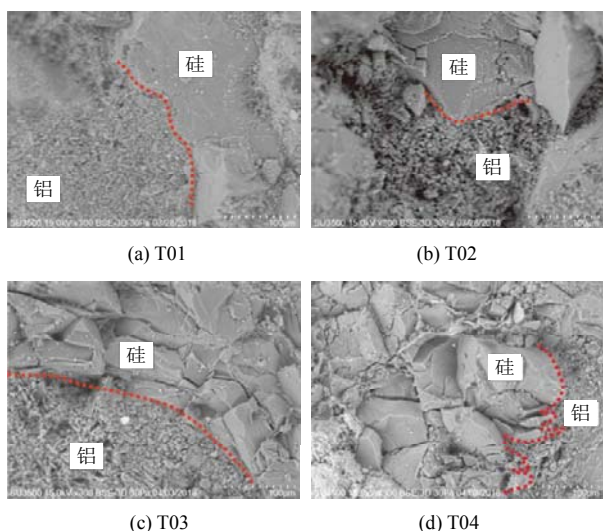


图 18 元素分区破坏示意图

Fig.18 Schematic diagram of destruction of each element

从图 18 可以看出, 在高围压、轴向应力增加过程的初期(T01, T02), 砂岩试件内铝元素区微裂纹、微孔洞、微间隙等细观损伤快速发育、扩展, 胶结结构破碎严重; 硅元素区微裂纹发育, 砂粒结构依旧保留一定完整性。随着轴向应力持续增加(T03, T04), 硅元素区微裂纹逐步扩展、贯通, 砂粒破坏严重, 同时硅、铝元素分界线相互侵入。由此可知, 砂岩试件内铝元素区强度较低(软弱), 而硅元素区强度较高(坚硬), 硅、铝元素的分布影响着砂岩内部的细观损伤规律。

5.4 试件宏观力学性质的细观机制

对比分析试件塑性变形与细观损伤因子数据可知, 在高围压条件下, 虽然加载后的砂岩未发生宏观破坏, 但在产生塑性变形的同时, 其内部依旧会产生一定的细观损伤, 这种砂岩强度的渐进劣化作用对深部岩石工程稳定性存在一定影响。基于砂岩内部细观结构各部分的分析研究表明, 在高围压条件下, 随着轴向应力的加载, 砂岩内部的胶结体最先产生细观损伤, 导致砂岩强度渐进劣化开始; 砂岩内部砂粒的承载能力较强, 当砂粒结构损伤时, 导致砂岩宏观破坏开始。根据砂岩内部的元素组成

与分布特征, 利用硅铝元素划分砂岩内部高、低强度区, 以高强度区所占比例表示强度大小, 与以往采用石英/(长石和岩屑)的比例表示为岩矿成分成熟度^[9]作为岩石强度参考, 有相似的结论, 因此可以从砂岩细观结构的组成和损伤变化来研究砂岩宏观力学强度变化规律。

6 结 论

(1) 在高围压和未超过单轴抗压的轴应力下, 当围压不变, 随轴应力增加, 砂岩残余(塑性)变形提高, 残余(塑性)变形增长率先升后降, 应力-应变曲线未见明显屈服点。

(2) 高围压下砂岩强度渐进劣化作用明显, 且随轴向应力的增加, 砂岩试件的细观损伤由试件边缘逐渐向中心延展、加剧; 切割加剧了试件细观损伤, 使其损伤因子分布函数发生了变化, 但并未改变砂岩细观损伤的增长趋势。

(3) 高围压条件下, 砂岩随轴向应力的加载, 其损伤细观上首先从胶结体损伤开始, 损伤因子增加, 破碎程度不断加剧; 然后逐步转移到砂粒, 使其微裂纹逐渐成长、贯通形成大裂纹。这种砂岩细观损伤的演化规律, 宏观上表现为岩石力学性质的逐步劣化。

(4) 砂岩内部主要含有氧、硅、铝 3 种元素, 氧元素含量最高, 分布较均匀; 铝元素主要分布在砂岩低强度区, 加载初期首先遭到破坏, 其细观损伤形貌较复杂; 硅元素主要分布在砂岩高强度区, 该区域的破坏主要发生在加载后期, 其细观损伤形貌主要表现为微裂纹。这种砂岩内部不同元素区结构细观损伤差异, 表明了元素及其分布对岩石内部细观损伤演化存在影响。

参考文献(References):

- [1] 蒋 宇, 葛修润, 任建喜. 岩石疲劳破坏过程中的变形规律及声发射特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(11): 1 810 - 1 814. (JIANG Yu, GE Xiurun, REN Jianxi. Deformation rules and acoustic emission characteristics of rocks in process of fatigue failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(11): 1 810 - 1 814.(in Chinese))
- [2] KASSNER M, NEMAT-NASSER S, SUO Z G, et al. New directions in mechanics[J]. Mechanics of Materials, 2005, 37(2/3): 231 - 259.
- [3] 倪晓慧, 李晓娟, 朱珍德. 不同频率循环荷载作用下花岗岩细观疲劳损伤特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 164 - 169.

- (NI Xiaohu, LI Xiaojuan, ZHU Zhende. Characteristics of meso-damage of granite samples subjected to dynamic uniaxial cyclic loading with different frequencies[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(1): 164 - 169.(in Chinese))
- [4] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 449 - 457.(CAI Meifeng, HE Manchao, LIU Dongyan. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002: 449 - 457.(in Chinese))
- [5] 陈新, 杨强, 李德建. 岩体裂隙网络各向异性损伤力学效应研究[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 64 - 70.(CHEN Xin, YANG Qiang, LI Dejian. Study on an-isotropic damage mechanics effect of fracture network in rock mass[M]. Beijing: Science Press, 2016: 64 - 70.(in Chinese))
- [6] 袁超, 唐海, 屈延嗣. 岩石压缩条件下微裂纹扩展机制研究及数值模拟[J]. 矿业工程研究, 2011, 26(2): 13 - 17.(YUAN Chao, TANG Hai, QU Yansi. Study and numerical simulation of crack propagation in rock under compression[J]. Mineral Engineering Research, 2011, 26(2): 13 - 17.(in Chinese))
- [7] 张国凯, 李海波, 夏祥, 等. 岩石细观结构及参数对宏观力学特性及破坏演化的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(7): 1 341 - 1 352.(ZHANG Guokai, LI Haibo, XIA Xiang, et al. Effects of microstructure and micro parameters on macro mechanical properties and failure of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(7): 1 341 - 1 352.(in Chinese))
- [8] 朱珍德, 黄强, 王剑波, 等. 岩石变形劣化全过程细观试验与细观损伤力学模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(6): 1 167 - 1 175.(ZHU Zhende, HUANG Qiang, WANG Jianbo, et al. Mesoscopic experiment on degradation evolution of rock deformation and its meso-damage mechanics model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(6): 1 167 - 1 175.(in Chinese))
- [9] 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[博士学位论文][D]. 北京: 北京科技大学, 2017.(SONG Chaoyang. The analysis and application of esoscopic structure characteristic and deformation and failure mechanism of weak cemented sandstone[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2017.(in Chinese))
- [10] 郑克洪. 基于 X-Ray CT 的煤矸颗粒细观结构及破损特性研究[博士学位论文][D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.(ZHEN Kehong. Study on meso-structure and damage characteristics for coal and gangue particles based on X-Ray CT[Ph. D. Thesis][D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016.(in Chinese))
- [11] 李晓娟, 倪晓慧, 孙斌祥, 等. 粉砂岩三轴压缩条件下细观损伤特征的定量研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(4): 590 - 595.(LI Xiaojuan, NI Xiaohui, SUN Binxiang, et al. Quantitative study on meso-damage characteristics of siltstone under triaxial compression[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(4): 590 - 595.(in Chinese))
- [12] 倪晓慧, 李晓娟, 朱珍德, 等. 不同频率循环荷载作用下花岗岩细观疲劳损伤量化试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 422 - 427.(NI Xiaojuan, LI Xiaojuan, ZHU Zhende, et al. Quantitative test study of meso-damage of granite under cyclic load with different frequencies[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 422 - 427.(in Chinese))
- [13] 惠兴田, 王博. 煤矿采空区顶板防控技术研究[J]. 中国煤炭, 2010, 36(2): 52 - 54.(HUI Xingtian, WANG Bo. On coal mine gob roof protection and control technology[J]. China Coal, 2010, 36(2): 52 - 54.(in Chinese))
- [14] 钱鸣高, 石平五, 许家林. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010: 110 - 120.(QIAN Minggao, SHI Pingwu, XU Jialin. Mine pressure and strata control[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2010: 110 - 120.(in Chinese))
- [15] 宋青青, 邱维理, 张振春. 地质学基础[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2005: 101 - 128.(SONG Qingqing, QIU Weili, ZHANG Zhenchun. Basic geology[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2005: 101 - 128.(in Chinese))
- [16] M. E. 图克尔. 沉积岩的野外描述[M]. 韩书和译. 北京: 地质出版社, 1984: 15 - 18.(TUCKER M E. Field description of sedimentary rocks[M]. Translated by HAN Shuhe. Beijing: Geological Publishing House, 1984: 15 - 18.(in Chinese))
- [17] 冯增朝, 赵阳升, 段康廉. 岩石的细胞元特性及其非均质分布对岩石全曲线性态的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(11): 1 819 - 1 823.(FENG Zengchao, ZHAO Yangsheng, DUAN Kanglian. Influence of rock cell characteristics and rock inhomogeneity parameter on complete curve of stress-strain[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(11): 1 819 - 1 823.(in Chinese))
- [18] 刘宝琛. 实验断裂、损伤力学测试技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994: 28 - 29.(LIU Baochen. Measuring technique of experimental fracture and damage mechanics[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1994: 28 - 29.(in Chinese))
- [19] 马天寿, 陈平. 基于 CT 扫描技术研究页岩水化细观损伤特性[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(2): 227 - 234.(MA Tianshou, CHEN Ping. Study of meso-damage characteristics of shale hydration based on CT scanning technology[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(2): 227 - 234.(in Chinese))
- [20] 于庆磊, 唐春安, 唐世斌. 基于数字图像的岩石非均匀性表征技术及初步应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 551 - 559.(YU Qinlei, TANG Chun'an, TANG Shibin. Digital image based characterization method of rock's heterogeneity and its primary application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 551 - 559.(in Chinese))
- [21] 王玉红. 计算机辅助设计 CoroDRAW X6[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014: 42 - 64.(WANG Yuhong. Computer aided design CoroDRAW X6[M]. Beijing: China Water and Power Press, 2014: 42 - 64.(in Chinese))