

文章编号: 1001-1986(2015)04-0063-06

不同围压下砂岩的变形力学特性与损伤机制

王云飞, 王立平, 焦华喆, 赵洪波

(河南理工大学土木工程学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 开展不同围压下砂岩的强度、变形和损伤演化研究, 对岩体工程的结构设计和稳定性评价具有重要意义。对赵固一矿二₁煤层顶板砂岩进行试验获得其力学参数, 并采用颗粒流程序获得砂岩细观力学参数, 结合编制的fish语言程序进行试验, 研究砂岩在不同围压的强度、变形和损伤演化机制, 得到如下结论: 随着围压增加砂岩的屈服段变长, 围压小于40 MPa时峰值强度随围压变化敏感, 大于40 MPa时敏感性降低, 随着围压增加砂岩由脆性破坏逐步转变为延性破坏; 砂岩的扩容经历线性体缩、线性扩容和非线性扩容3个阶段, 围压增大线性扩容阶段缩短而非线性扩容阶段增加, 扩容指数和扩容起始点轴向应变与围压存在指数变化规律; 砂岩的损伤破坏经历损伤弥散分布、聚集成核、形成局部裂隙和主控破裂面形成4个阶段, 低围压下砂岩沿单一主控破裂面发生压剪破坏, 高围压下主控破裂面呈X型交叉破坏岩体, 为X型共轭斜面剪切破坏形式。

关键词: 砂岩; 不同围压; 强度; 变形特性; 损伤演化

中图分类号: TU452 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2015.04.014

Mechanical characteristics of deformation and damage mechanism of sandstone under different confining pressure

WANG Yunfei, WANG Liping, JIAO Huazhe, ZHAO Hongbo

(School of Civil Engineering Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: The sandstone of the roof of coal seam 2₁ in Zhaogu mine was tested under uniaxial compression to obtain its mechanical parameters. The meso-mechanical parameters were got by Particle Flow Code(PFC), in combination with fish program, the test was conducted to study sandstone strength, deformation characteristics and damage mechanism under different confining pressures. It is concluded that the sandstone yield stage increases with the increase of confining pressure, the variation of peak strength with confining pressure is more sensitive under 40 MPa confining pressure, the sensitivity is reduced when confining pressure is greater than 40 MPa. As the confining pressure increases, sandstone failure mode gradually changes from brittle model into ductile failure; sandstone volumetric strain experiences three stages: linear compression, linear expansion and nonlinear expansion. The linear expansion stage shortens and the nonlinear expansion stage lengthens with confining pressure. There is a exponential variation among dilatation index, the axial strain of initial point and confining pressure. Sandstone damage evolution in failure process is divided into four stages: dispersion distribution, damage gathered in some zone, formation of local fractures and formation of rupture surface. Sandstone is destroyed in compression and shear mode along the single rupture surface under lower confining pressure, and destroyed in X shearing failure mode under higher confining pressure.

Key words: sandstone; different confining pressure; strength; deformation characteristics; damage evolution

岩石全应力应变曲线是研究岩石力学变形特性的基础, 在解决实际岩土工程稳定性问题时, 只有岩石的变形力学特性参数是远远不够的, 还

需要掌握岩石在不同应力路径下的损伤机制和破坏模式。因此, 开展砂岩不同围压下的强度、变形和损伤演化方面的综合研究, 对岩体工程的

收稿日期: 2014-05-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51104057); 河南省教育厅重点资助项目(13A440323); 河南省高校科技创新团队支持计划资助(15IRTSTHN029); 河南理工大学博士基金项目(2012-075)

作者简介: 王云飞(1978—), 男, 内蒙古乌蒙人, 博士, 从事岩体损伤与稳定性方面的研究. E-mail: wfy_ustb@126.com

引用格式: 王云飞, 王立平, 焦华喆, 等. 不同围压下砂岩的变形力学特性与损伤机制[J]. 煤田地质与勘探, 2015,

43(4): 63–68.

结构设计和岩体工程稳定性评价具有重要的工程意义。

国内外学者对岩石进行了大量试验研究，并取得了一定的有益成果。苏承东等^[1]提出了单一试样确定岩石强度参数的方法，对大理岩采用逐级提高围压的方法，砂岩采用恒定轴向变形降低围压的方法。和卢斌等^[2]研究指出，岩石点荷载强度与单轴抗压强度存在线性关系。刘泉声等^[3]提出三维体变应变本构方程和破坏准则。吴刚等^[4]指出了不同温度段砂岩的声发射和破坏特征。宋战平等^[5]研究了石灰岩的声发射和损伤演化规律。韩铁林等^[6]研究指出加载速率对砂岩的强度和变形影响不明显，受初始轴压和初始围压的影响较大。刘晓明等^[7]通过分析红砂岩崩解传递不同能量类型及计算方法，基于能量耗散原理建立了砂岩崩解能量耗散模型。王德新^[8]研究指出，砂岩强度与声波时差均呈负指数关系。郭臣业等^[9]利用破裂比反映破坏岩样相对完整岩样的破裂程度，指出破裂比与轴向应变、割线模量和应变能之间为线性关系。邓华锋等^[10-11]指出饱水—风干循环过程中，砂岩试样的抗压强度、凝聚力和内摩擦角均逐渐劣化，变化趋势基本一致，以及对纵波波速的影响。左建平等^[12]指出 150℃左右是砂岩断裂韧性变化的临界温度，随着温度升高断裂机制由脆性向延性转化，抵抗和协调变形能力增强。

从国内外砂岩的研究可见成果很多，然而，对不同围压下砂岩的剪胀扩容特性，扩容初始点轴向应变与围压的关系，以及无法由室内试验获得的砂岩损伤破坏的内部演化机制等有必要开展深入研究。鉴于此，本文采用试验和颗粒离散元程序进行了不同围压下砂岩的力学变形特性和损伤演化机制研究，弥补了室内试验在岩样内部损伤演化研究方面的不足。所得成果对岩土工程设计和施工有一定的参考和指导意义。

1 颗粒流理论与模型

P. A. Cundall 和 O. D. Strack 在离散元法的基础上，引入分子动力学思想创建了颗粒流理论，着重从细观力学的角度解释材料的损伤断裂机制，分析线弹性阶段直至断裂破坏的大变形过程，能直观处理裂纹的萌生、扩展过程。主要用于岩石类等材料的力学和工程特性研究。构建的颗粒模型无需事先定义材料的本构关系，只是通过设定颗粒间的接触模型和细观力学参数，便能够表现出材料复杂的非线性应力应变关系。从细观角度分析，岩石是由

微小矿物颗粒及颗粒间的粘结组成，岩石内部并不是密实体，而颗粒流模型也是由微小颗粒和颗粒间的粘结所组成；岩石的破坏是在外荷载作用下矿物颗粒间发生相对滑移形成贯通裂隙所致，而颗粒流模型在外荷载作用下的破坏同样是颗粒粘结断裂发生相对滑移所致，因而从细观方面分析采用颗粒流模拟岩石也是合理可行的。

在 PFC 中提供的颗粒间常用接触模型有：接触刚度模型，滑动模型，粘结模型等，其中粘结模型有接触粘结和平行粘结两种。接触粘结模型中颗粒与颗粒间是点接触，点接触只能传递力而不能传递弯矩。而平行粘结发生在接触颗粒间半径为 \bar{R} 的圆形或方形范围内，因而可以同时传递力和弯矩。作用在平行粘结上的法向应力 σ 和切向应力 τ 可按式(1)和式(2)计算：

$$\sigma = \frac{-\bar{F}_i^n}{A} + \frac{|\bar{M}_3|}{I} \bar{R} \quad (1)$$

$$\tau = \frac{|\bar{F}_i^s|}{A} \quad (2)$$

式中 \bar{F}_i^n 、 \bar{F}_i^s 和 \bar{M}_3 为平行粘结的法向、切向力和弯矩， A 、 I 为平行粘结截面面积和转动惯量， \bar{R} 为粘结半径。

当平行粘结受到的应力超过其粘结强度时，粘结发生断裂，法向和切向应力超过其对应的粘结强度分别产生张拉型和剪切型微裂纹^[13]。

2 砂岩特性与细观力学参数

2.1 砂岩特性与力学参数

砂岩采自位于河南省辉县的赵固一矿二₁煤层顶板，二₁煤层属二叠系下统山西组，埋深 600 m 左右，煤层厚度 1.21~7.10 m，平均厚度为 6 m，结构简单。二₁煤层直接顶为砂质泥岩，间接顶为细—粗粒砂岩，砂质泥岩为黑色，局部为砂岩泥岩互层，层厚小，含有云母碎片和黄铁矿结核，细—粗粒砂岩为深灰色，以石英为主，分选中等，分层厚度小，层间夹有泥质成分，纵向裂隙节理发育。

该矿运输大巷和轨道大巷沿煤层顶板布置，为了分析巷道稳定性和合理选择支护方案，对顶板砂岩进行了力学特性测定。将采集的顶板砂岩加工为 50 mm×100 mm 的试样，最大不平行度为 0.03 mm，满足测定方法要求，测得 2 个砂岩试样(图 1)，取其平均值，得到相应的单轴抗压强度为 122 MPa，弹性模量为 20 GPa。



图 1 砂岩试样破坏图

Fig.1 Destruction of sandstone samples

2.2 砂岩细观力学参数

砂岩单轴压缩数值试样尺寸采用 $50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$,

试样由大小不同且服从正态分布的 12 092 个颗粒单元组成 , 最大粒径与最小粒径之比为 1.66 , 最小粒径为 0.16 mm , 通过在指定半径范围内随机生成微小颗粒 , 扩张半径的过程形成颗粒间紧密接触的砂岩单轴试样。颗粒间摩擦因数为 0.5 , 采用平行粘结模型。

颗粒流软件通过赋予的细观力学参数表征砂岩的宏观力学行为 , 试样形成后通过墙体施加压力 , 进行砂岩单轴压缩试验 , 经过调整细观力学参数使砂岩单轴压缩的宏观力学行为与物理试验结果基本吻合为止。从而获得砂岩的具体细观力学参数(表 1)。

表 1 砂岩的细观力学参数
Table 1 Meso-mechanical parameters of sandstone

颗粒弹性模量 E_c/GPa	颗粒法向与切向刚度比 k_n/k_s	平行粘结半径系数 $\bar{\lambda}$	平行粘结弹性模量 \bar{E}_c/GPa
20	3.0	1.0	20
平行粘结法向与切向刚度比			平行粘结切向强度/MPa
\bar{k}_n/\bar{k}_s	平均值 $\sigma_{n-\text{mean}}$	标准差 $\sigma_{n-\text{dev}}$	平均值 $\tau_{n-\text{mean}}$
3.0	120	36	120
			标准差 $\tau_{n-\text{dev}}$
			36

根据建立的砂岩数值试样模型 , 分别进行不同围压的砂岩试验 , 研究砂岩不同围压的强度、变形和损伤演变机理。

3 砂岩应力应变特性

3.1 砂岩强度

由图 2 可见 , 砂岩不同围压的应力-应变曲线经历压密、弹性、屈服和破坏 4 个阶段。围压对砂岩的压密阶段影响很小 , 弹性阶段随着围压的增大弹性模量略有增加。随着荷载的增加 , 应力-应变曲线偏离直线进入屈服阶段 , 屈服阶段长度随着围压的增大而增长 , 表现为砂岩的脆性降低而延性增强。围压增加 , 砂岩的峰值强度提高 , 在 40 MPa 之前峰值强度随围压提高明显 , 40 MPa 之后峰值强度随围压提高程度降低 , 主要原因在于低围压下砂岩内部裂隙压密度小 , 外力作用下易在裂尖形成应力高度集中区导致裂隙快速发展 , 砂岩容易破坏 , 强度低 , 高围压下微裂隙闭合程度大 , 应力集中程度小裂隙扩展困难 , 强度相应提高 , 当围压超过 40 MPa 裂隙基本压密 , 继续增大围压对裂隙闭合程度的贡献很小 , 故围压对强度提高程度有所降低。在峰后阶段 , 砂岩进入应变软化 , 随着围压的增加峰值后应力减小 , 砂岩由脆性破坏逐渐转变为延性破坏。随着围压提高砂岩的均质性增加。

根据不同围压下砂岩破坏在主应力空间 σ_1 和 σ_3 的关系 , 可以获得由 σ_1 和 σ_3 表示的强度准则 :

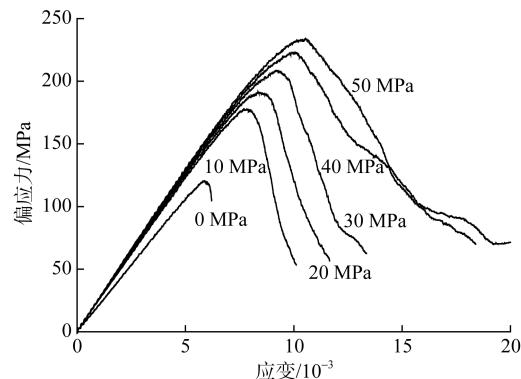


图 2 不同围压砂岩的应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curves of sandstone under different confining pressure

$$\sigma_1 = k\sigma_3 + m \quad (3)$$

式中 k 、 m 为与岩石相关的拟合系数 , m 的力学意义为砂岩的单轴强度 , k 为围压对强度的影响系数。

苏承东等^[14]通过大量试验研究指出 , 岩石在单轴压缩作用下发生剪胀为主的破坏 , 强度明显偏低 , 不能真实反映围压对强度的影响 , 建议单轴强度不参与强度准则回归。图 3 同样很好的反映了这一点 , 并在单轴强度参与与否两种情况下对 σ_1 和 σ_3 进行拟合 , 屏蔽单轴强度拟合得到的 m 值 163.8 , k 值 2.438 8 , 相关系数为 0.997 3 , 单轴强度参与拟合的 m 值 141.2 , k 值 3.056 3 , 相关系数为 0.934 8 , 可以看出 , 如将单轴强度参与拟合 , 关系曲线变陡 , 扩大了围压对砂岩强度的影响程度。

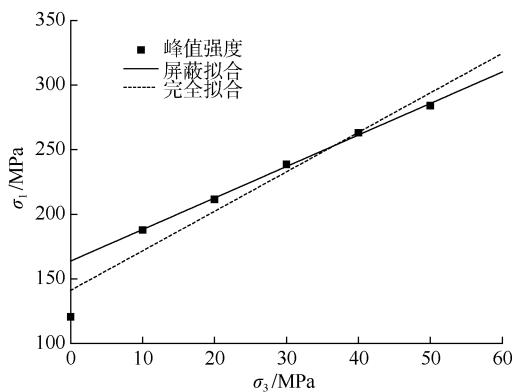


图 3 砂岩峰值强度与围压曲线

Fig.3 The relationship between peak strength of sandstone and confining pressures

3.2 砂岩体变特性

对于二维试验模型，砂岩的体积应变 ε_v 等于 x 向应变 ε_x 和 y 向应变 ε_y 之和。将砂岩不同围压下的体积应变与轴向应变绘于图 4。

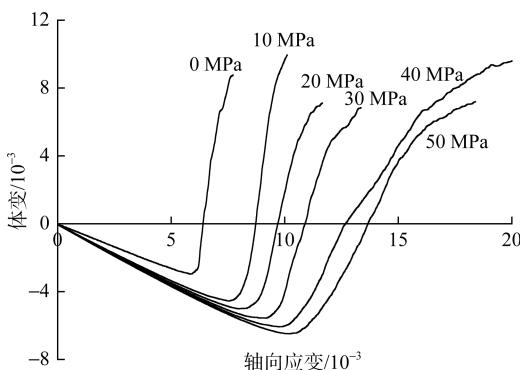


图 4 砂岩的体变-轴向应变曲线

Fig.4 Volumetric strain-axial strain curves of sandstone

图 4 可见，在压缩初始阶段，砂岩产生弹性体缩并使内部裂隙不断压密，体变呈现线性减小趋势。当弹性体缩达到某一值时，体变又进入了线性增长阶段，随着轴向应变的增加，体变由线性增长转变为非线性扩容。体变曲线最低点的切线斜率为零，该点即为扩容起始点，随着围压的增加，砂岩扩容初始点对应的轴向应变逐渐增大。

体变压缩阶段，除了单轴压缩的体变应变率有所减小外，不同围压下的体变应变率基本为一定值。过扩容起始点之后，低围压下对应的线性扩容阶段较长，相应的体积应变率也较大，高围压下的线性扩容阶段较短，体积应变率也相应较小。低围压下的非线性扩容阶段不明显，而高围压下的非线性扩容阶段很明显。40 MPa 之前体变对围压的敏感性较大，40 MPa 之后敏感性减弱。

图 4 结合砂岩应力-应变曲线图 2 可见，砂岩的扩容起始点出现在应变硬化阶段，最大扩容率出现

在峰后的应变软化阶段，即体积扩容主要出现在峰后的应变软化阶段。主要原因在于砂岩在应变硬化阶段，内部出现多处微损伤和局部裂隙，虽有扩容但扩容率较小；当砂岩越过峰值进入到峰后软化阶段时，岩体内部的局部裂隙贯通形成了主控破裂面，在轴向力作用下岩块沿主控破裂面滑移，表现为明显的体积扩容行为。

对砂岩的体变行为，当采用简化的双折线模型，如图 5 所示。根据文献[15-16]提出的扩容指数概念，利用简化体变双折线模型分析砂岩在不同围压下的体变特征。

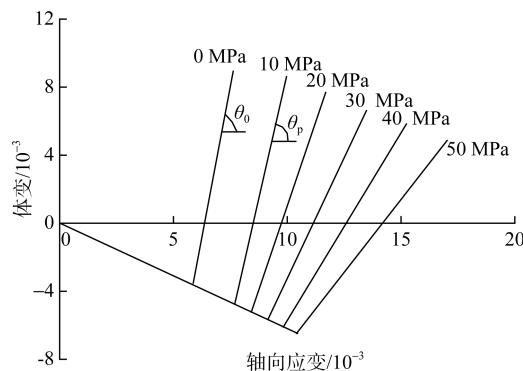


图 5 砂岩轴向应变-体变简化模型

Fig.5 Simplified model of volumetric-axial strain of sandstone

$$I_d = \frac{\theta_p}{\theta_0} = \frac{\arctan(\Delta\varepsilon_{vp}/\Delta\varepsilon_{lp})_p}{\arctan(\Delta\varepsilon_{vp}/\Delta\varepsilon_{lp})_0} \quad (4)$$

式中 I_d 为扩容指数，由式(4)的定义可知单轴压缩时 $I_d = 1$ ，扩容指数最大；图 5 显示围压增加， θ 角逐渐减小，对应的扩容指数 $I_d \rightarrow 0$ ，即没有扩容发生塑性流动。 $\Delta\varepsilon_{vp}$ 和 $\Delta\varepsilon_{lp}$ 分别为体积塑性应变增量(扩容为正)和轴向塑性应变增量(压缩为正)。

根据式(4)计算赵固一矿顶板砂岩的扩容指数(表 2、图 6)。研究表明，砂岩的扩容指数和围压满足指数变化规律，如式(5)，扩容起始点轴向应变和围压之间也满足指数变化规律，如式(6)。

$$I_d = -0.2263 \exp(\sigma_3/61.6646) + 1.2355 \quad (5)$$

$$\varepsilon_{ini} = -5.8040 \exp(-\sigma_3/22.9684) + 11.0324 \quad (6)$$

式中 ε_{ini} 为扩容起始点轴向应变， σ_3 为围压。

表 2 不同围压砂岩的扩容指数

Table 2 Dilatation index of sandstone under various confining pressures

围压/MPa	$\Delta\varepsilon_{vp}$	$\Delta\varepsilon_{lp}$	$\theta_p/(^\circ)$	I_d
0	4.9965	0.7233	81.7627	1.0000
10	4.9993	0.8278	80.5976	0.9857
20	4.5808	1.2041	75.2721	0.9206
30	3.6540	1.3066	70.3242	0.8601
40	4.2578	1.9275	65.6444	0.8028
50	3.9798	2.3414	59.5309	0.7281

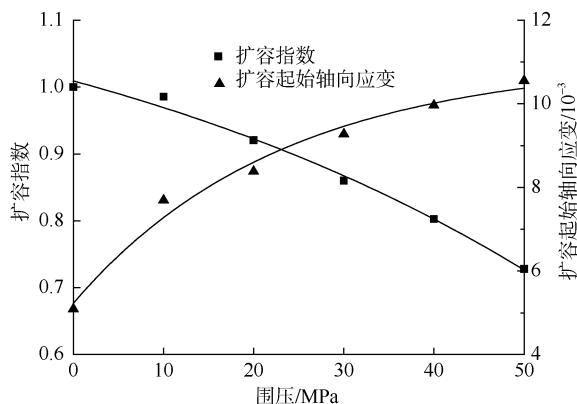


图6 砂岩扩容指数和扩容起始轴向应变与围压关系
Fig.6 Relation between dilatation index, and axial strain of dilatation initial point and confining pressure

砂岩的体变-轴向应变简化双折线模型能够从整体上反映砂岩变形特性以及围压对其的影响，扩容指数越大岩石的剪胀效应越明显，扩容指数越小，剪胀效应越不明显。扩容起始点轴向应变随着围压增加也在增大，与围压之间满足指数变化规律。

4 砂岩破坏的损伤演化机制

砂岩压缩破坏过程经历4个阶段：损伤弥散分布阶段；损伤聚集成核阶段；微裂纹扩展形成局部裂隙阶段；裂隙贯通砂岩破坏阶段(图7)。加载的初始阶段，砂岩由压密状态逐步过渡到微损伤产生阶段，初始损伤的形成具有随机性，因而在砂岩内部呈现弥散分布状态(图7a(i))；随着荷载增加，砂岩内部损伤增多并积聚成核形成裂纹源

(图7a(ii))；压力继续增加，在首批裂纹源附近微损伤集聚程度增强并形成明显的裂纹扩展方向，同时形成第二批裂纹源(图7a(iii))；压力继续增加砂岩已进入屈服后期，裂纹扩展速度增快，并沿微裂纹的裂尖方向迅速贯通形成主控裂隙导致砂岩破坏(图7a(iv))。

围压对砂岩损伤演化在各阶段的影响为：**a.** 微损伤的弥散分布阶段基本没有影响；**b.** 低围压下损伤成核形成的首批裂纹源主要出现在砂岩的两侧，高围压下首批裂纹源在两侧和中间部位都有分布，主要原因在于低围压对砂岩岩样两侧岩体的约束力较小，因而岩样外部岩体易于形成损伤集聚区。**c.** 裂纹源扩展形成局部裂隙阶段，低围压下首批裂纹源扩展较为迅速且后期裂纹源的数量较少，高围压下首批裂纹源扩展缓慢，外力做功更多的用于形成后期裂纹源；原因在于裂纹扩展方向大多都与竖直方向成锐角，高围压作用使得裂纹的裂尖闭合压力增大因而沿裂尖的扩展相对困难，外力做功更多的用于后期微损伤的形成，低围压微裂纹的闭合压力较小，扩展较为容易。**d.** 主控裂隙形成砂岩破坏阶段，处在主控破裂面位置处的裂纹源裂纹扩展速度较快且在扩展过程中扩展方向逐渐趋于一致，在非主控破裂面位置处的裂纹源裂纹扩展困难且方向随机性较大，常常是由附近几个随机扩展的裂纹源形成很难明确辨别延伸方向的局部裂隙。低围压下主控裂隙和砂岩破坏块度少，沿着破裂面发生压剪破坏使砂岩一分为二；高围压下主控裂隙增多且主控裂隙呈X型交叉分布将砂岩切割为数块。随着围压增加主控裂隙与水平方向的夹角减小，且由低围压下的破裂面逐步过渡为高围压下的破碎带。

5 结论

a. 随着围压增加砂岩屈服段变长，围压小于40 MPa时峰值强度随围压变化敏感，大于40 MPa时敏感性降低。在峰后阶段，随着围压的增加峰值后应力降减小，砂岩由脆性破坏逐渐转变为延性破坏，且随着围压提高，砂岩的均质性增加。

b. 砂岩扩容经历线性体缩、线性扩容和非线性扩容3个阶段。随着围压的增大，线性扩容阶段逐渐缩短而非线性扩容阶段增大。扩容起始点出现在应变硬化阶段，最大扩容率在蜂后应变软化阶段。

c. 砂岩的扩容指数和扩容起始点轴向应变与围压之间存在指数变化规律，扩容指数越大，砂岩剪胀效应越明显，扩容指数越小，剪胀越不明显。

d. 砂岩压缩破坏过程经历4个阶段：损伤弥散

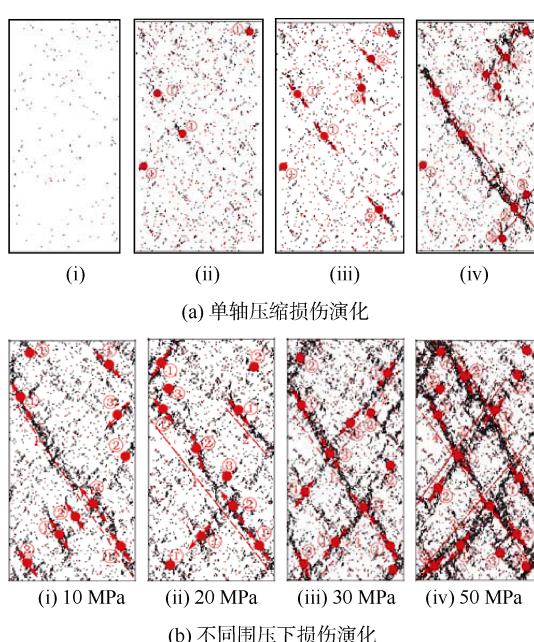


图7 砂岩破坏的损伤演化机制

Fig.7 Damage evolution mechanism in process of sandstone failure

分布阶段；损伤聚集成核阶段；微裂纹扩展形成局部裂隙阶段；裂隙贯通砂岩破坏阶段。

e. 单轴压缩和低围压范围砂岩沿单一主控破裂面发生压剪破坏使砂岩一分为二，高围压下主控破裂面呈现 X 型交叉分布，将砂岩切割为数块，为典型 X 型共轭斜面剪切破坏形式，且破裂面附近岩体呈现粉碎状破坏。

参考文献

- [1] 苏承东, 尤明庆. 单一试样确定大理岩和砂岩强度参数的方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(18): 55-58.
- [2] 和卢斌, 付志亮, 王强, 等. 岩石点荷载强度与单轴抗压强度线性关系试验[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(3): 68-73.
- [3] 刘泉声, 朱维申. 粉砂岩的强度特性和变形特性[J]. 岩土力学, 1989, 10(3): 70-76.
- [4] 吴刚, 王德咏, 翟松韬. 单轴压缩下高温后砂岩的声发射特征[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3237-3242.
- [5] 宋战平, 刘京, 谢强, 等. 石灰岩声发射特性及其演化规律试验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2013, 41(4): 61-65.
- [6] 韩铁林, 陈蕴生, 宋勇军, 等. 不同应力路径下砂岩力学特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 2): 3959-3966.
- [7] 刘晓明, 熊力, 刘建华, 等. 基于能量耗散原理的红砂岩崩解机

(上接第 62 页)

4 结 论

a. 导水裂隙带是煤层顶板突水的主要导水通道, 但其发育高度是否波及煤层上覆主要充水含水层并非突水是否发生的唯一判据, 而是要综合分析工作面所处的地质和水文地质条件。

b. 煤层顶板突水是在特定地质、采矿条件下发生的, 随着导水通道的形成过程不断变化。以导水裂隙带为主体的复合导水通道是突水最终发生的原因。

c. 有效隔水层是阻止煤层顶板突水的关键, 其岩性及其组合关系、岩石力学参数决定隔水性能, 顶板含水层水压与有效隔水层之间的相互作用使其隔水能力逐渐弱化, 水压与有效隔水层厚度之间的关系需进一步研究。

参考文献

- [1] 武强, 赵苏启, 董书宁, 等. 煤矿防治水规定释义[M]. 中国矿业大学出版社, 2009: 117.
- [2] 刘腾飞. 煤矿开采导水裂隙发育高度及影响因素分析[J]. 煤田地质与勘探, 2013, 41(3): 34-37.
- [3] 白利民, 尹尚先, 李文. 综采一次采全高顶板导水裂隙带发育高度的计算公式及适用性分析[J]. 煤田地质与勘探, 2013, 41(5): 36-39.
- [4] 王广军, 杨本水, 阎昌银. 333 工作面突水灾害成因与治理技

制研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2011, 42(10): 3143-3149.

- [8] 王德新. 砂岩抗压强度与声波时差关系的实验研究[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2001, 25(4): 37-39.
- [9] 郭臣业, 鲜学福, 姜永东, 等. 砂岩加载试验峰后变形、破坏与应变能特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊 2): 3892-3998.
- [10] 邓华锋, 李建林, 朱敏, 等. 饱水—风干循环作用下砂岩强度劣化规律试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3306-3312.
- [11] 邓华锋, 原先凡, 李建林, 等. 饱水度对砂岩纵波波速及强度影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(8): 1625-1631.
- [12] 左建平, 谢和平, 周宏伟, 等. 温度影响下砂岩的细观破坏及变形场的 DSCM 表征[J]. 力学学报, 2008, 40(6): 786-794.
- [13] Itasca Consulting Group. PFC2D(particle flow code in 2 dimensions) fish in PFC2D[R]. Minneapolis, USA: Itasca Consulting Group. 2008.
- [14] 苏承东, 翟新献, 李永明, 等. 煤样三轴压缩下变形和强度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 1): 2963-2968.
- [15] 张春会, 赵全胜, 于永江. 考虑围压影响的非均质岩石剪胀扩容模型[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(3): 436-440.
- [16] YUAN S C, HARRISON J P. An empirical dilatancy index for the dilatant deformation of rock[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004, 41: 679-686.

(责任编辑 张宏)

术[J]. 中国煤田地质, 2002, 14(4): 52-54.

- [5] 王新. 煤矿顶板突水机理探讨[J]. 煤矿开采, 2007, 12(5): 74-76.
- [6] 天地科技股份有限公司开采设计事业部. 老公营子煤矿第四系含水层下多煤层安全开采技术研究[R]. 北京: 天地科技股份有限公司, 2010.
- [7] 中煤科工集团西安研究院有限公司. 老公营子矿井水文地质条件评价[R]. 西安: 中煤科工集团西安研究院有限公司, 2013.
- [8] 汪华君. 覆岩导水裂隙带井下微地震监测研究[J]. 矿业快报, 2006, 44(3): 27-29.
- [9] 于师健, 程久龙. 覆岩裂隙带电阻率响应特征[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 336-339.
- [10] 康永华, 王济忠, 孔凡铭, 等. 覆岩破坏的钻孔观测方法[J]. 煤炭科学技术, 2002, 30(12): 26-28.
- [11] 朱国维, 王怀秀. 利用超声成像技术辅助判定覆岩破坏钻孔的导水裂隙带高度[J]. 淮南工业学院学报, 1999, 19(3): 5-10.
- [12] 高延法, 曲祖俊, 刑飞, 等. 龙口北皂矿海域下 H2106 综放面井下导高观测[J]. 煤田地质与勘探, 2009, 37(6): 35-38.
- [13] 王双美. 导水裂隙带高度研究方法概述[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(5): 126-128.
- [14] 任奋华, 蔡美峰, 来兴平, 等. 大采空区覆岩破坏高度测控试验分析[J]. 西安科技大学学报, 2004, 24(3): 9-11.
- [15] 何满潮, 景海河, 孙晓明. 软岩工程力学[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 20-45.

(责任编辑 张宏)