

文章编号: 1001-4888(2019)05-0873-10

基于颗粒流程序的不同加卸载条件下 泥岩蠕变破裂规律研究^{*}

王俊光, 杨鹏锦, 梁冰, 金峤

(辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 为研究平顶山 12 矿泥岩在不同加卸载围压速率下的蠕变破裂规律, 在 Burgers 蠕变模型的基础上引入非线性黏塑性体(NVPB)串联构成 Burgers-NVPB 模型, 基于颗粒流理论建立颗粒间力与位移的数值积分方案, 二次开发出适用于二维颗粒流程序(PFC^{2D})且具有加速蠕变特性的黏弹塑性蠕变模型。建立 PFC^{2D} 模型, 并进行单轴压缩和三轴分级加载蠕变的模拟, 通过与室内试验对比, 验证了 Burgers-NVPB 模型对于蠕变试验的可行性。在此基础上, 进行单轴压缩和不同加卸载围压速率下蠕变试验, 分析了不同条件下试样的破裂形态、微裂纹数量和破裂机制。结果表明: 在加卸载围压条件下, 泥岩蠕变破裂形态比单轴压缩条件下更为复杂, 且微裂纹总数更多; 随着加卸载速率的增加, 泥岩蠕变破裂形式由以剪切破坏为主, 向张拉破坏为主过渡, 微裂纹发育的局部化效应更加显著, 微裂纹总数有所减少; 在蠕变破裂阶段, 试样均产生大量的张拉裂纹, 且随着加卸载速率的减少, 试件中较少的剪切裂纹对宏观破裂形态的影响愈加显著。

关键词: 岩石力学; 颗粒流程序; NVPB 体; 加卸载速率; 蠕变破裂

中图分类号: TU452

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-18-214

0 引言

随着浅部资源的逐渐减少和枯竭, 资源开发逐步向深部发展, 我国千米级的矿井日益增多。由于深部岩体所处环境的特殊性和应力场的复杂性, 特别是深部岩体处于“三高一扰动”的环境下, 采动引起上覆岩层大范围移动和应力重分布^[1,2], 煤岩体受掘进或开采扰动影响显著, 施工进度不同, 岩体卸荷速率差异明显^[3], 岩石材料的破裂往往是由于在载荷作用下岩体内部裂纹萌生、发育汇集产生宏观裂纹, 因此研究岩体在不同加卸载条件下的蠕变破裂特性已经成为了不可忽视的问题^[4,5]。

在理论研究方面, Tan 和 Kang^[6]将岩石流变力学引入国内, 许多学者通过对粘性、弹性和塑性 3 种基本元件的不同组合, 进行了大量的深入研究, 取得了一系列丰富的研究成果。陶波等^[7]通过对 Burgers 模型和西原体模型进行对比分析, 表明 Burgers 模型具有弹性、弹性后效和流动等现象, 适用于较软弱的岩石; 杨圣奇和徐鹏^[8,9]推导了岩石蠕变损伤演化方程, 提出一个能反映岩石加速流变特性的 NVPB 模型; 蒋海飞等^[10]提出了一个新的非线性黏性元件, 并引入一个能判断是否进入加速蠕变阶段的计时器元件, 组建了一个非线性黏塑性加速蠕变启动模型。在室内试验方面, 张凯^[11]、邱士利^[12]和黄润秋^[3]等分别以锦屏大理岩为对象进行了不同卸荷速率下岩石强度特性破裂规律研究; 殷志强等^[13]对

^{*} 收稿日期: 2018-09-21; 修回日期: 2018-10-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0600704)资助, 国家自然科学基金(51404130)资助, 辽宁省自然科学基金(20180550708)资助

通讯作者: 王俊光(1980—), 男, 博士, 副教授。主要从事岩石渗流力学、岩石流变力学。Email: shenliu_303@163.com

砂岩进行了高应力条件下围压卸荷损伤与动态破碎特性研究;黄兴等^[14,15]通过对砂质泥岩进行大量的卸载围压试验,研究了卸荷速率效应下围岩变形破坏规律;刘传孝等^[16]对细砂岩进行短时分级加卸载蠕变试验,研究了应力水平对蠕变特性的影响。

由于岩石内部裂纹演化规律难以直接观测,近年来,许多学者采用颗粒流程序 PFC(particle flow code)进行岩石内部裂纹演化规律研究^[17-19]。颗粒流法是 Cundall 等^[20]提出的基于非连续介质理论的数值计算方法。孙金山等^[21]在锦屏大理岩试验的基础上利用颗粒流应力腐蚀模型(PSC),研究了岩石在蠕变损伤过程中的裂纹扩展规律,取得了良好的效果。杨振伟等^[22,23]基于 PFC3D,通过控制变量法分析了伯格斯(Burgers)模型中各参数对材料蠕变特性的影响,并且基于二维颗粒流程序开发了具有黏弹塑性特征的西原体接触本构模型,并验证了模型的可行性。

以上研究成果,主要是针对加卸载对岩石瞬时破坏的影响,而对于不同加卸载速率下的岩石蠕变破裂形态及机理的研究相对较少。因此,本文基于颗粒流程序,二次开发具有加速蠕变特性的蠕变模型,通过室内试验与数值模拟相结合,进行了不同加卸载围压速率下泥岩蠕变破裂规律研究。

1 Burgers-NVPB 蠕变模型

从前人对蠕变模型的大量研究结果可知,Burgers 蠕变模型能够精确地描述衰减蠕变和稳定蠕变阶段,但是无法描述蠕变的加速阶段。已有研究表明发生加速蠕变阶段是黏塑性高度发展的结果^[24]。因此,为了从塑性变形的角度去合理描述岩石的加速蠕变阶段,本文在 Burgers 蠕变模型的基础上引入非线性黏塑性体^[8,9](NVPB)模型,串联构成 Burgers-NVPB 蠕变模型,并对此模型进行适用于 PFC 程序的二次开发。

1.1 基于连续介质理论的 Burgers-NVPB 蠕变模型

Burgers 模型由一个 Maxwell 体和一个 Kelvin 体串联而成,NVPB 模型由一个塑性开关和非线性黏性元件并联组成,模型结构示意图如图 1 所示。

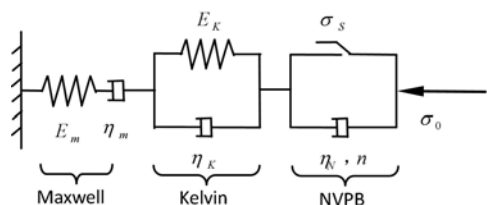


图 1 Burgers-NVPB 蠕变模型

Fig. 1 Burgers-NVPB creep model

NVPB 体在恒力 σ_0 下的蠕变方程为:

$$\epsilon(t) = \frac{H(\sigma_0 - \sigma_s)}{\eta_N} \frac{t^n}{t_0^{n-1}} = \frac{H(\sigma_0 - \sigma_s)}{\eta_N} t^n \quad (1)$$

式中, ϵ 为岩体应变; η_N 为 NVPB 体黏性系数; t 为蠕变时间; t_0 为参考时间; σ_0 为当前应力; σ_s 为应力阈值; n 为蠕变指数; H 的表达式为:

$$H(\sigma_0 - \sigma_s) = \begin{cases} 0 & \text{当 } \sigma_0 \leq \sigma_s \text{ 时} \\ \sigma_0 - \sigma_s & \text{当 } \sigma_0 > \sigma_s \text{ 时} \end{cases} \quad (2)$$

Burgers-NVPB 蠕变方程为:

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_m} + \frac{\sigma_0}{\eta_m} t + \frac{\sigma_0}{E_K} (1 - e^{-\frac{E_K}{\eta_K} t}) + \frac{H(\sigma_0 - \sigma_s)}{\eta_N} t^n \quad (3)$$

式中, $\sigma_0 = \sigma_1 - \sigma_3$; σ_1 为第一主应力; σ_3 为第三主应力; E_m 为 Maxwell 体弹性系数; η_m 为 Maxwell 体黏性系数; E_K 为 Kelvin 体弹性系数; η_K 为 Kelvin 体黏性系数。

1.2 基于离散元理论的 Burgers-NVPB 蠕变模型

在连续介质理论中,蠕变模型作用对象是连续的整体,而在离散元理论中,模型的作用对象为两个或若干个存在接触的实体,假定计算时步足够小的话,在单个时步内,实体的运动只对相邻实体产生影响,且在每一个时步内速度和加速度保持不变。由于模型中存在塑性元件,在每步计算中需求出实体间的接触力 f 是否超过塑性阈值 f_s ,其数值积分方案如下:

(1) 当 $f \leq f_s$ 时的数值积分方案

1) 对于 Maxwell 体部分:

$$\dot{u}_m = \frac{\dot{f}}{E_m} \pm \frac{f}{\eta_m} \quad (4)$$

式中, u_m 为 Maxwell 体相对位移; f 为接触力; $\pm$ 分别为法向与切向。利用有限差分法, 取 f 的平均值, 可得

$$\frac{u_m^{t+1} - u_m^t}{\Delta t} = \pm \frac{f^{t+1} - f^t}{E_m \Delta t} \pm \frac{f^{t+1} - f^t}{2\eta_m} \quad (5)$$

式中, t 代表当前时步; $t+1$ 代表下一时步; Δt 为时间步长。对式(5)整理可得 u_m 的计算公式为:

$$u_m^{t+1} = \pm \frac{f^{t+1} - f^t}{E_m} \pm \frac{\Delta t (f^{t+1} - f^t)}{2\eta_m} + u_m^t \quad (6)$$

2) 对于 Kelvin 体部分:

$$\dot{u}_K = \frac{-E_K u_K \pm f}{\eta_K} \quad (7)$$

式中, u_K 为 Kelvin 体相对位移。利用有限差分法, 取 f 的平均值, 可得

$$\frac{u_K^{t+1} - u_K^t}{\Delta t} = \frac{1}{\eta_K} \left[-\frac{E_K (u_K^{t+1} - u_K^t)}{2} \pm \frac{f^{t+1} - f^t}{2} \right] \quad (8)$$

对式(8)整理可得 u_K 的计算公式为:

$$u_K^{t+1} = \frac{1}{A} \left[B u_K^t \pm \frac{\Delta t}{2\eta_K} (f^{t+1} - f^t) \right] \quad (9)$$

式中, $A = 1 + \frac{E_K \Delta t}{2\eta_K}$, $B = 1 - \frac{E_K \Delta t}{2\eta_K}$ 。

3) 对于整个模型, 有

$$u^{t+1} - u^t = u_m^{t+1} - u_m^t + u_K^{t+1} - u_K^t \quad (10)$$

式中, u 为模型整体的相对位移, 下一时步的接触力 f^{t+1} 可由 u^{t+1} 、 u^t 、 u_K^t 、 f^t 计算求得

$$f^{t+1} = \pm \frac{1}{C} \left[u^{t+1} - u^t + \left(1 - \frac{B}{A} \right) u_K^t \mp D f^t \right] \quad (11)$$

式中, C 、 D 为系数, 其中: $C = \frac{\Delta t}{2\eta_K A} + \frac{1}{E_m} + \frac{\Delta t}{2\eta_m}$, $D = \frac{\Delta t}{2\eta_K A} - \frac{1}{E_m} + \frac{\Delta t}{2\eta_m}$ 。

(2) 当 $f \leq f_s$ 时的数值积分方案

1) 对于 NVPB 体, 可知

$$\dot{u}_N = \frac{n}{\eta_N} (f \pm f_s) t^{n-1} \quad (12)$$

式中, u_N 为 NVPB 体相对位移。利用有限差分法, 取 f 的平均值, 可得

$$\frac{u_N^{t+1} - u_N^t}{\Delta t} = \frac{n}{\eta_N} (f^{t+1} \pm f_s) (t + \Delta t)^{n-1} - \frac{n}{\eta_N} (f^t \pm f_s) t^{n-1} \quad (13)$$

对式(13)整理可得 u_N 的表达式为:

$$u_N^{t+1} = \frac{n\Delta t}{\eta_N} [(f^{t+1} \pm f_s) (t + \Delta t)^{n-1} - (f^t \pm f_s) t^{n-1}] + u_N^t \quad (14)$$

对于整个 Burgers-NVPB 模型, 可知:

$$u^{t+1} - u^t = u_m^{t+1} - u_m^t + u_K^{t+1} - u_K^t + u_N^{t+1} - u_N^t \quad (15)$$

下一时步的接触力 f^{t+1} 可由 u^{t+1} 、 u^t 、 u_K^{t+1} 、 u_K^t 、 f^t 、 u_N^{t+1} 计算求得

$$f^{t+1} = \pm \frac{1}{C_1} \left[u^{t+1} - u^t - \left(\frac{B}{A} - 1 \right) u_K^t - D_1 f^t + \frac{n\Delta t}{\eta_N} ((t + \Delta t)^{n-1} - t^{n-1}) \cdot f_s \right] \quad (16)$$

式中, $C_1 = \frac{\Delta t}{2A\eta_K} + \frac{1}{E_m} + \frac{\Delta t}{2\eta_m} + \frac{n\Delta t(t + \Delta t)^{n-1}}{\eta_K}$, $D_1 = \frac{\Delta t}{2A\eta_K} - \frac{1}{E_m} + \frac{\Delta t}{2\eta_m} + \frac{n\Delta t \cdot t^{n-1}}{\eta_K}$ 。

通过以上对 Burgers-NVPB 模型蠕变方程的显式有限差分法分析, 利用 C++ 程序进行编译并添加至动态链接库文件 BURPB.dll 中, 实现蠕变数值模拟。在连续介质理论中, Burgers 模型有 4 个参数, NVPB 体有 3 个参数, 在离散元理论中, Burgers 模型有 9 个参数, NVPB 体有 4 个参数, 如表 1 所示。

表 1 Burgers-NVPB 模型细观参数
Tab. 1 Meso parameters of Burgers-NVPB model

	Maxwell		Kelvin			NVPB		摩擦因数 f
	弹性系数	黏性系数	弹性系数	黏性系数	黏性系数	应力阈值	蠕变指数	
	E_m	η_m	E_K	η_K	η_N	σ_s	n	
法向	<i>bur_knm</i>	<i>bur_cnm</i>	<i>bur_knk</i>	<i>bur_cnk</i>	<i>nvpb_cnk</i>	<i>nvpb_str</i>	<i>nvpb_exp</i>	<i>bur_fric</i>
切向	<i>bur_ksm</i>	<i>Bur_csm</i>	<i>bur_ksk</i>	<i>bur_csk</i>	<i>nvpb_csk</i>			

2 Burgers-NVPB 模型验证与数值模型建立

室内试验所采用的泥岩试样均取自平顶山十二矿,平均埋深 1180m。选取完整性较好的岩样,并用塑料膜将其包裹好,用岩石取样机磨成国际标准 $\Phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的规格,经过超声波测试,将离散性较大的试件剔除,选取一致性较好的岩样展开试验(如图 2 所示),测定自然含水率为 0.43%,将岩样置于恒温恒湿箱中养护 2d,保证其含水率与自然含水率相等。蠕变试验在 SANS 电液伺服万能试验机上进行,试验机轴向最大施加载荷为 2000kN,刚度为 5000kN/mm,轴向变形测量范围为 0~10mm,轴向变形测量精度为 ± 0.005 ,围压加载通过气压加载装置实现,围压加载最大值可达 10MPa,试验设备如图 3 所示。



图 2 泥岩试样
Fig. 2 Mudstone sample



图 3 试验设备
Fig. 3 Testing instrument

在 PFC^{2D}中,通过 Fishtank 生成与室内试验相同尺寸(50mm $\times$ 100mm)的数值模型,最小颗粒半径为 0.45mm,最大、最小颗粒半径比为 1.67。调用 Burgers-NVPB 模型,颗粒间黏结方式为平行黏结。通过删除侧面墙体使模型实现单轴应力加载,经过反复调试细观参数,使试样数值计算结果与室内试验结果相吻合,结果对比如表 2 所示,单轴压缩状态下数值模拟与室内试验应力—应变曲线对比如图 4 所示。在此基础上进行三轴压缩蠕变试验,通过 Fish 语言进行伺服控制墙体应力,将围压设置为 3MPa,初始轴压为 5MPa,每次轴压施加梯度为 5MPa,直至试样破坏,数值模拟与室内试验蠕变曲线对比如图 5 所示。

表 2 数值模拟与室内试验基本力学参数
Tab. 2 Basic mechanical parameters of numerical simulation and laboratory test

试验类型	抗压强度/MPa	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/°
室内	25.91	4.38	0.25	6.63	36.4
模拟	25.87	4.16	0.24	6.42	35.9

通过图 4、图 5 和表 2 可以看出,数值计算结果与室内真实试验结果具有较好的一致性,所建立的 PFC^{2D}数值模型可用于模拟不同加卸载条件下泥岩三轴蠕变试验,细观参数如表 3 所示。

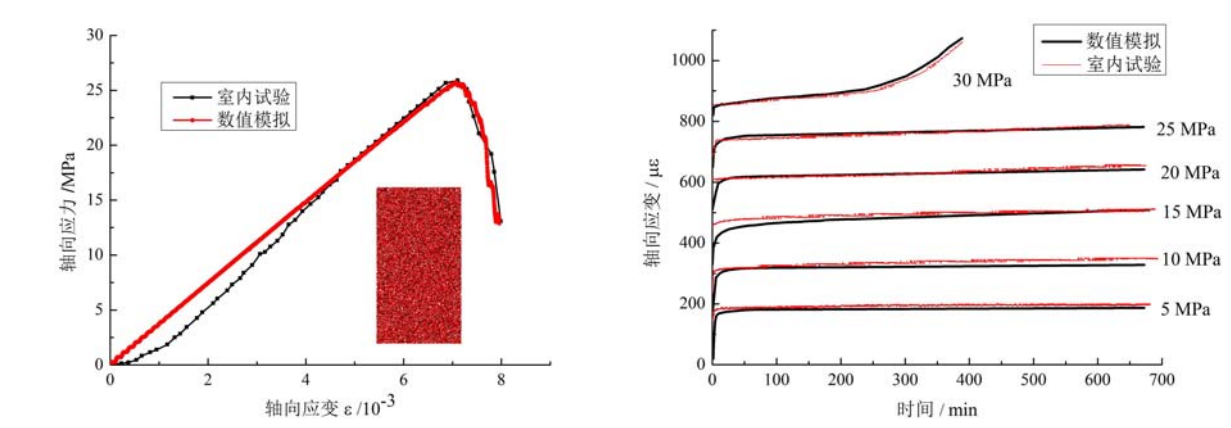


图 4 数值模拟与室内试验应力—应变曲线图

Fig. 4 Stress-strain curves of numerical simulation and laboratory test

图 5 数值模拟与室内试验蠕变曲线

Fig. 5 Creep curves of numerical simulation and laboratory test

表 3 数值模拟细观力学参数

Tab. 3 Numerical simulation of meso mechanical parameters

E_c /GPa	k_{nl}/k_{sl}	$\bar{E}_c$ /GPa	k_{n2}/k_{s2}	平行黏结		平行黏结		Maxwell 体		Kelvin 体		NVPB 体		f
				法向强度	切向强度	法向强度	切向强度	E_m	η_m	E_K	η_K	η_N	σ_s	
				σ_n /MPa	σ_{ns} /MPa	τ_n /MPa	τ_{ns} /MPa	E_m /MPa	η_m /(MPa·s)	E_K /MPa	η_K /(MPa·s)	η_N /(MPa·s)	σ_s /MPa	
15	1.8	11.5	2.3	23	±5.0	40	±5.0	40	3×10^6	40	8×10^4	8×10^4	20	2.87 0.5

注：颗粒体密度为 2644kg/m^3 ；粒间摩擦系数为 0.5； E_c 为颗粒弹性模量； k_{nl}/k_{sl} 为颗粒法向与切向刚度比； $\bar{E}_c$ 为平行黏结弹性模量； k_{n2}/k_{s2} 为平行黏结法向与切向刚度比； σ_n 、 σ_{ns} 分别为平行黏结法向强度均值与标准差； τ_n 、 τ_{ns} 分别为平行黏结切向强度均值与标准差；为减少计算量，Maxwell 体、Kelvin 体、NVPB 体中各参数法向与切向比设为 2，表中所列均为法向参数。

3 不同加卸载条件下泥岩蠕变破裂规律研究

3.1 试验方案

采用所建立的 PFC^{2D} 数值模型对平顶山十二矿泥岩进行不同加卸载围压速率下蠕变试验和宏细观破裂机制分析。为了降低轴压对试验的影响，选择轴压为 20MPa 的单轴压缩试验(编号为 C₀)和轴压为 20MPa、围压为 3MPa 的循环加卸载围压试验，其中围压加卸载速率(v_p)共设定 3 个值，分别为 1MPa/min、2MPa/min、3MPa/min，编号分别为 C₁、C₂、C₃。具体试验过程如下：首先采用伺服机制将轴压和围压分别以 2.5kN/min 和 1MPa/min 的速度同时施加至 3MPa，之后保持围压值不变，将轴压以 20MPa/min 的速度施加至 20MPa，3h 之后以速度 v_p 卸载围压至 0MPa，稳定 2h 后以同样的速度加载至 3MPa，循环加卸载围压直至试件破坏，应力加载路线如图 6。

3.2 试验结果分析

(1) 宏观破裂特征

图 7 和图 8 分别为泥岩在不同条件下室内试验和数值模拟破坏形态图，图中黑色表示张拉裂纹，红色表示剪切裂纹，从图中可以看出：

泥岩在单轴压缩条件下试样产生了显著的贯穿破裂面，主裂纹以对角线的形式将试件分为体积相当的两部分，宏观破裂面与载荷加载方向夹角约为 25°，除较为宽阔的贯穿面外有两条平行于载荷加载方向的微裂纹，裂纹分布较为集中，总体来看是典型的剪切破坏(图 7(a))；从图 8(a)可看出贯穿面两侧

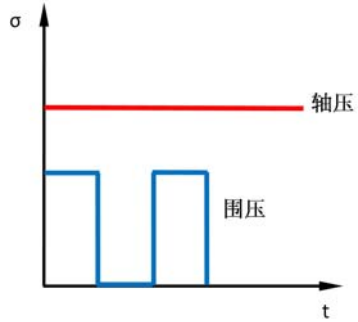


图 6 应力加载路径

Fig. 6 Stress loading path

磨损较为严重,并有少量碎屑剥落。

当加卸载围压速率 $\nu_p = 1 \text{ MPa/min}$ 时,试件表面出现三条不同程度的剪切裂纹,其中主裂纹与轴向载荷加载方向夹角约为 25° ,在裂纹交汇处以有大量的剪切裂纹(图 7(b));从图 8(b)可以看出试样上部在裂纹交汇处有部分岩块剥落。

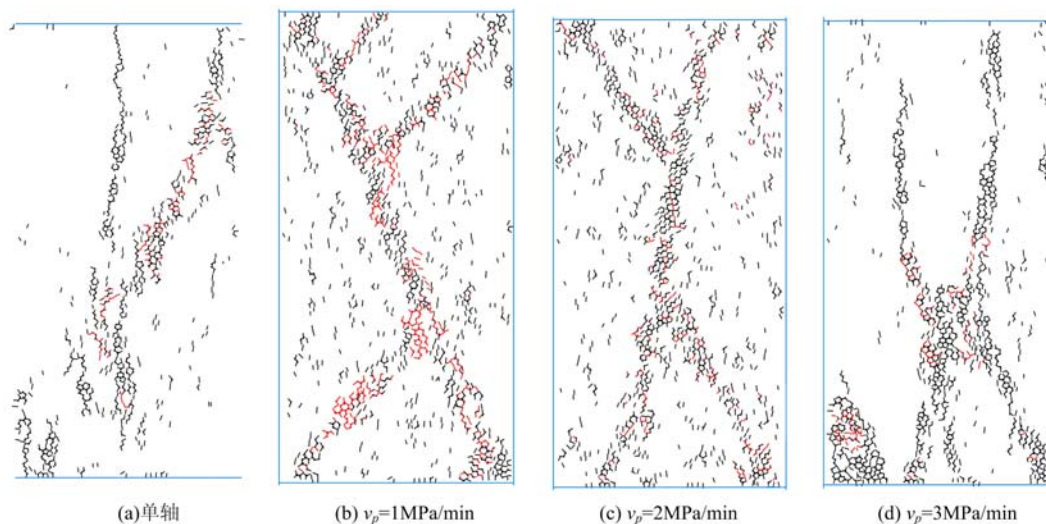


图 7 泥岩数值模拟破坏形态对比图

Fig. 7 Comparison of failure modes between numerical simulation of mudstone



图 8 泥岩室内试验破坏形态对比图

Fig. 8 Comparison of failure modes between laboratory test of mudstone

当加卸载围压速率 $\nu_p = 2 \text{ MPa/min}$ 时,试件表面出现两条夹角约为 60° 的“X”型张拉与剪切耦合裂纹,主破裂面呈复合张剪破坏特性(图 7(c)),在张拉破坏过程中仍伴有剪切破坏。此外,试件表面布满沿轴向载荷较均匀的未连贯生成的贯穿面张拉裂纹。

当加卸载围压速率 $\nu_p = 3 \text{ MPa/min}$ 时,试件表面未出现明显剪切破坏,试件表面有两条夹角约为 30° 的“X”型贯穿面,其形式均为典型的张拉破裂(图 7(d));从图 8(d)可以看出试件表面贯穿裂纹平直光滑、无夹杂。

总体而言:不同加卸载条件下的数值模拟表现出的蠕变破裂特性与室内试验结果保持一致,进一步验证了 Burgers-NVPB 模型对于泥岩蠕变破裂特性试验的适用性;与无加卸载条件对比,加卸载条件下泥岩蠕变破裂形态更为复杂;随着加卸载速率的增加,泥岩主破裂面由以剪切破坏为主向张拉破坏为主过渡,主破裂面与轴向夹角减小;当加卸载速率较高($\nu_p = 3 \text{ MPa/min}$)时,出现垂直于加卸载方向的张拉裂纹;随着加卸载速率的增加,微裂纹发育的局部化效应更加显著。

(2) 微裂纹数量变化

数值模拟结果表明,不同加卸载围压速率下试样破裂所产生的微裂纹在数量上有显著的差异。表 4 给出了数值模拟试验结果,不同加卸载条件下微裂纹总数对比如图 9 所示。

单轴压缩蠕变试验中,在 $0 \sim 0.1t_f$ (t_f 为试样破裂所需时间)内微裂纹总数随时间呈抛物线增长,且增长速率逐渐减少;随后微裂纹数目增长进入稳定阶段,在 $0.9t_f$ 后微裂纹数目增长速率逐渐增加,表明试件已进入加速蠕变阶段,直至发生破坏。

在不同加卸载条件下的数值模拟试验中,各个试件在 $0 \sim 0.1t_f$ 内的微裂纹数量变化规律与单轴压缩蠕变试样时规律大致相同,在加卸载围压和破坏阶段,模拟结果所呈现的规律有所不同。其中,当 $\nu_p = 1\text{MPa/min}$ 时,试样经历第三次卸载围压后微裂纹总数加速增长,并经过 1.69h 后发生破坏;当 $\nu_p = 2\text{MPa/min}$ 时,试样经历第二次卸载围压 1.74h 后发生破坏;当 $\nu_p = 3\text{MPa/min}$ 时,试件在第二次围压卸载后,微裂纹总数急剧增加,结合图 7(d)、图 8(d)可知此时试样发生劈裂破坏。

表 4 数值模拟试验结果表
Tab. 4 Results of numerical simulation test results

	加卸载次数	破坏时间 t_f/h	微裂纹总数
单轴蠕变	—	28.37	530
$\nu_p = 1\text{MPa/min}$	2	8.11	1058
$\nu_p = 2\text{MPa/min}$	2	9.74	810
$\nu_p = 3\text{MPa/min}$	3	14.69	662

从图 9 可以看出:每次卸载围压时,微裂纹总数急剧增加,不同加卸载速率对其影响甚微;在围压卸载至 0MPa 后,微裂纹数目增长速率趋于平缓,且略高于未卸载之前的三轴压缩状态;当围压从 0MPa 加载至 3MPa,微裂纹数目有所减少,但与卸载之前相比,裂纹数仍有所增加,这是由于在围压卸载过程中试样内部颗粒之间为达到新的应力平衡,会有不同方向、大小的裂纹产生,但是在围压加载过程时,有部分颗粒难以恢复至卸载之前的相对位置,致使有些裂纹无法闭合。

从模拟结果还可以看出,蠕变在加卸载和单轴压缩条件下所产生的微裂纹总数分别为 1058、810、662 和 530,其比值约为 2.0、1.5、1.2,由此可知在加卸载条件下试样蠕变破裂所产生的微裂纹总数远大于单轴压缩蠕变。

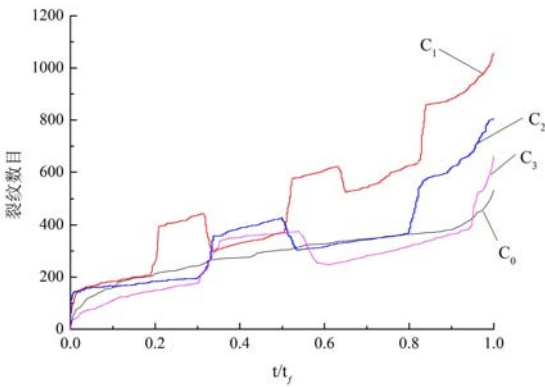


图 9 不同加卸载条件下微裂纹总数对比图
Fig. 9 Comparison of the total number of microcracks under different loading and unloading conditions

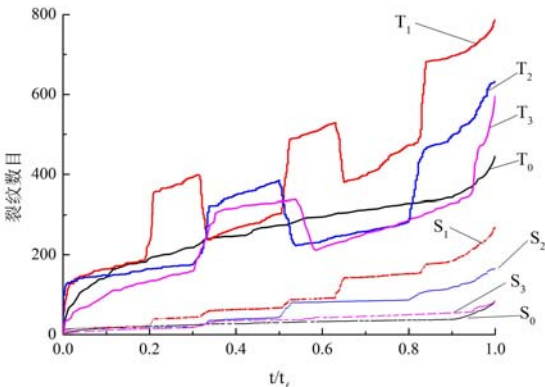


图 10 不同加卸载条件下张拉和剪切裂纹对比图
Fig. 10 Comparison of tensile and shear cracks under different loading and unloading conditions

(3) 微裂纹演化细观机制

不同加卸载条件下张拉和剪切裂纹对比如图 10 所示,其中 C_0 、 C_1 、 C_2 、 C_3 的张拉裂纹分别为 T_0 、 T_1 、 T_2 、 T_3 ,剪切裂纹分别为 S_0 、 S_1 、 S_2 、 S_3 。从整体来看,单轴压缩和加卸载条件下,蠕变所产生的张拉

裂纹占绝大多数;在卸载围压过程中,各个试件均迅速产生大量张拉裂纹,同时剪切裂纹也有所增加;当继续加载围压时,由于在围压的约束力下,顺轴产生的张拉裂纹绝大部分闭合,而此时剪切裂纹依然有所增加。

试件在 $0.8t_f \sim 0.9t_f$ 时,进入蠕变破裂阶段,从图 10 可以看出:在单轴压缩条件下,张拉裂纹和剪切裂纹均有明显的加速增长阶段,蠕变破裂是张拉和剪切共同控制作用的结果;当 $\nu_p = 1 \text{ MPa/min}$ 和 $\nu_p = 2 \text{ MPa/min}$ 时,在围压卸载产生大量张拉裂纹后,张拉裂纹和剪切裂纹加速增长,可以认为蠕变破裂是先产生张拉破坏,其次受张拉与剪切破坏共同控制的结果,此时宏观破坏上表现为:以剪切破坏为主,贯穿面两次磨损严重,并伴有岩块剥落;当加卸载速率较高时,蠕变破裂阶段剪切裂纹数量无明显增加,说明在环向约束快速卸载时迅速产生大量张拉裂纹而表现出脆性破坏特征,试样宏观破坏表现为脆性张拉破坏为主,裂纹更为平直光滑。

4 结论

(1) 将 Buggers 模型与黏塑性体非线性 NVPB 串联,并基于二维颗粒流程序 PFC^{2D}对模型进行二次开发,通过单轴压缩和三轴分级加载蠕变室内试验与数值模拟结果的对比,验证了 Buggers-NVPB 模型的可行性和适用性。

(2) 通过对平顶山十二矿泥岩进行不同加卸载条件下室内蠕变试验和数值模拟,从破裂形态的角度对比分析进一步验证了 Buggers-NVPB 模型对于研究泥岩蠕变破裂机制的可行性。在加卸载围压条件下,泥岩破裂形态比单轴压缩条件下更为复杂;随着加卸载速率的增加,泥岩破裂形式由以剪切破坏为主向张拉破坏为主过渡,微裂纹发育的局部化效应更加显著。

(3) 加卸载条件下泥岩蠕变破裂产生的微裂纹总数远大于单轴压缩蠕变条件下所产生的微裂纹数量。在蠕变破裂阶段,各个试样均产生大量的张拉裂纹,当加卸载速率较小时,试件中剪切裂纹对试件宏观破裂的影响显著。

参考文献:

- [1] 谢和平, 高峰, 鞠杨. 深部岩体力学研究探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11):2161—2178 (XIE Heping, GAO Feng, JU Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11):2161—2178 (in Chinese))
- [2] 谢和平, 周宏伟, 刘建峰, 等. 不同开采条件下采动力学行为研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(7):1067—1074 (XIE Heping, ZHOU Hongwei, LIU Jianfeng, et al. Mining-induced mechanical behavior in coal seams under different mining layouts[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(7): 1067—1074 (in Chinese))
- [3] 黄润秋, 黄达. 高地应力条件下卸荷速率对锦屏大理岩力学特性影响规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1):21—33 (HUANG Runqiu, HUANG Da. Experimental research on affection laws of unloading rates on mechanical properties of jinpingshan marble under high geostress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(1):21—33 (in Chinese))
- [4] 陆银龙, 王连国. 基于微裂纹演化的岩石蠕变损伤与破裂过程的数值模拟[J]. 煤炭学报, 2015, 40(6):1276—1283 (LU Yinlong, WANG Lianguo. Numerical modeling of time-dependent damage and failure process of rocks based on micro-crack propagation[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(6):1276—1283 (in Chinese))
- [5] 田文岭, 杨圣奇, 方刚. 煤样三轴循环加卸载力学特征颗粒流模拟[J]. 煤炭学报, 2016, 41(3):603—610 (TIAN Wenling, YANG Shengqi, FANG Gang. Particle flow simulation on mechanical behavior of coal specimen under triaxial cyclic loading and unloading[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 40(3): 603—610 (in Chinese))
- [6] Tan T K, Kang W F. Lock in stress, creep and dilatancy of rocks and constitutive equation[J]. Rock Mechanics, 1980, 13(9):5—22.
- [7] 陶波, 伍法权, 郭改梅, 等. 西原模型对岩石流变特性的适应性及其参数确定[J]. 岩石力学与工程学报, 2005 (17):3165—3171 (TAO Bo, WU Faquan, GUO Gaimei. Flexibility of visco-elastoplastic model to rheological characteristics of rock and solution of rheological parameter[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and

- Engineering, 2005, 24(17):3165—3171 (in Chinese))
- [8] 杨圣奇. 岩石流变力学特性的研究及其工程应用[D]. 河海大学, 2006 (YANG Shengqi. Study on rheological mechanical properties of rock and its engineering applications [D]. Nanjing: Hohai University, 2006 (in Chinese))
- [9] 徐鹏, 杨圣奇. 循环加卸载下煤的黏弹塑性蠕变本构关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(3):537—545 (XU Peng, YANG Shengqi. Study of visco-elasto-plastic constitutive model of coal under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(3):537—545 (in Chinese))
- [10] 蒋海飞, 刘东燕, 赵宝云, 等. 高应力高水压下砂岩三轴蠕变特性试验研究[J]. 实验力学, 2014, 29(5):556—564 (JIANG Haifei, LIU Dong, ZHAO Baoyun, et al. Experimental study of sandstone triaxial creep behavior under high stress and high water pressure[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(5):556—564 (in Chinese))
- [11] 张凯, 周辉, 潘鹏志, 等. 不同卸荷速率下岩石强度特性研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(7):2072—2078 (ZHANG Kai, ZHOU Hui, PAN Pengzhi, et al. Characteristics of strength of rocks under different unloading rates[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(7):2072—2078 (in Chinese))
- [12] 邱士利, 冯夏庭, 张传庆, 等. 不同卸围压速率下深埋大理岩卸荷力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(9):1807—1817 (QIU Shili, FENG Xiating, ZHANG Chuanqing, et al. Experimental research on mechanical properties of deep-buried marble under different unloading rates of confining pressures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(9):1807—1817 (in Chinese))
- [13] 殷志强, 李夕兵. 围压卸荷条件下砂岩损伤与动态破碎特性研究[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(1):90—94 (YIN Zhiqiang, LI Xibing. Research on damage and dynamic fragmentation characteristics of sandstone under unloading with confining pressures[J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(1):90—94 (in Chinese))
- [14] 黄兴, 刘泉声, 刘恺德, 等. 深部软弱地层 TBM 掘进围岩变形破坏特性室内试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(1):76—92 (HUANG Xing, LIU Quansheng, LIU Kaide, et al. Laboratory study of deformation and failure of soft rock for deep ground tunnelling with TBM[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(1):76—92 (in Chinese))
- [15] 黄兴, 刘泉声, 康永水, 等. 砂质泥岩三轴卸荷蠕变试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(S1):2653—2662 (HUANG Xing, LIU Quansheng, KANG Yongshui, et al. Triaxial unloading creep experimental study of sandy mudstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(S1):2653—2662 (in Chinese))
- [16] 刘传孝, 张加旺, 张美政, 等. 分级加卸载硬岩短时蠕变特性实验研究[J]. 实验力学, 2009, 24(5):459—466 (LIU Chuanxiao, ZHANG Jiawang, ZHANG Meizheng, et al. Experimental study of short-term creep characteristics base on step loading-unloading method for hard rock[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2009, 24(5):459—466 (in Chinese))
- [17] 李夕兵, 陈正红, 曹文卓, 等. 不同卸荷速率下大理岩破裂时效特性与机理研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(9):1565—1574 (LI Xibing, CHEN Zhenghong, CAO Wenzhuo, et al. Time-effect properties and mechanisms of marble failure under different unloading rates[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(9):1565—1574 (in Chinese))
- [18] 丛宇, 王在泉, 郑颖人, 等. 基于颗粒流原理的岩石类材料细观参数的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(6):1031—1040 (CONG Yu, WANG Zaiquan, ZHENG Yingren, et al. Experimental study on microscopic parameters of brittle materials based on particle flow theory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(6):1031—1040 (in Chinese))
- [19] 张学朋, 蒋宇静, 王刚, 等. 基于颗粒离散元模型的岩石蠕变模拟试验[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(10):3914—3921 (ZHANG Xuepeng, JIANG Yujing, WANG Gang, et al. Creep simulation test of rock based on particle discrete element method[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(10):3914—3921 (in Chinese))
- [20] Cundall P A, Strack O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Géotechnique, 1979, 30(30):331—336.
- [21] 孙金山, 陈明, 姜清辉, 等. 锦屏大理岩蠕变损伤演化细观力学特征的数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2013, 34

- (12):3601—3608 (SUN Jinshan, CHEN Ming, JIANG Qinghui, et al. Numerical simulation of mesomechanical characteristics of creep damage evolution for Jingping marble[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(12):3601—3608 (in Chinese))
- [22] 杨振伟, 金爱兵, 周喻, 等. 伯格模型参数调试与岩石蠕变特性颗粒流分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(1):240—248 (YANG Zhenwei, JIN Aibing, ZHOU Yu, et al. Parametric analysis of Burgers model and creep properties of rock with particle flow code[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(1):240—248 (in Chinese))
- [23] 杨振伟, 金爱兵, 王凯, 等. 基于颗粒流程序的黏弹塑性本构模型开发与应用[J]. 岩土力学, 2015, 36(9):2708—2715 (YANG Zhenwei, JIN Aibing, WANG Kai, et al. Development and application of a visco-elastoplastic constitutive model in particle flow code[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(9):2708—2715 (in Chinese))
- [24] 唐佳, 彭振斌, 何忠明. 基于岩体蠕变试验的 Burgers 改进模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(9):2414—2424 (TANG Jia, PENG Zhenbin, HE Zhongming. Research on improved Burgers model based on rock mass creep test[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(9):2414—2424 (in Chinese))

Study on the creep fracture laws of mudstone under different loading and unloading conditions based on particle flow code

WANG Jun-guang, YANG Peng-jin, LIANG Bing, JIN Qiao

(Liaoning Technology University school of Mechanics & Engineering, Fuxin 123000, China)

Abstract: In order to study the creep fracture laws of mudstone in Pingdingshan 12 mine under different loading and unloading conditions, the Burgers-NVPB model is developed by combining the Burgers creep model and the nonlinear viscoplastic body (NVPB). The numerical integration scheme of force and displacement between particles is established based on the particle flow theory. New two-dimensional Particle Flow Code (PFC^{2D}) is obtained and the viscoelastic plastic creep model with the accelerated creep characteristics is further developed. In this work, the PFC^{2D} model is established and subjected to uniaxial compression and three axis loading creep numerical simulation, and the feasibility of Burgers-NVPB model for creep test is verified by comparing with the laboratory tests. Moreover, uniaxial compression and creep tests under different loading and unloading confining pressure rates are carried out, and the fracture morphology, the number of microcracks and the fracture mechanism of samples under different conditions are analyzed. The results show that under the loading and unloading confining pressure condition, the fracture morphology of the specimen is much more complicated and the total number of microcracks is more than that under uniaxial compression. With the increase of loading and unloading rate, the specimen's fracture mode can transfer from the shear failure to the tensile failure, the localization effect of microcrack development becomes significant, and the total number of microcracks is reduced. In the creep fracture stage, a large number of tensile cracks are produced in the specimens, and with the decrease of loading and unloading rate, less shear cracks in the specimens have more significant impact on the macroscopic fracture morphology.

Keywords: rock mechanics; particle flow code; NVPB; loading and unloading rate; creep fracture