



移动阅读

刘晓辉,郝齐钧,吴世勇,等. 准静态应变率下的煤岩非线性力学特性[J]. 煤炭学报,2019,44(5):1437-1445. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2019.6008

LIU Xiaohui,HAO Qijun,WU Shiyong,et al. Nonlinear mechanical properties of coal rock under quasi-static strain rate [J]. Journal of China Coal Society,2019,44(5):1437-1445. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2019.6008

准静态应变率下的煤岩非线性力学特性

刘晓辉^{1,2},郝齐钧²,吴世勇³,张茹^{4,5},余洁²

(1. 西华大学 流体与动力机械教育部重点实验室,四川 成都 610039; 2. 西华大学 能源与动力工程学院,四川 成都 610039; 3. 雅砻江流域水电开发有限公司,四川 成都 610051; 4. 四川大学 水利水电学院,四川 成都 610065; 5. 四川大学 深地科学与工程教育部重点实验室,四川 成都 610065)

摘要:为研究开挖扰动下煤岩的非线性力学特征,利用 MTS815 伺服刚性试验机对芙蓉白皎煤矿煤岩进行 $10^{-5} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 准静态应变率下的单轴压缩试验,分析准静态应变率下煤岩的应力-应变曲线、抗压强度、弹性模量、泊松比等力学特性的变化规律,基于煤岩显著的非线性力学特征,修正并验证黏弹性损伤本构模型的合理性。研究表明:① 煤岩单轴压缩荷载作用下具有明显的压密、线弹性、塑性屈服、峰后破坏 4 个阶段;煤岩力学特性应变率相关性突出,随着应变率的增加,压密阶段缩短,线弹性阶段增长,屈服阶段应力强化特征及峰后破坏阶段应力软化特征趋于明显;② 由于原生裂隙的闭合和扩展,煤岩受载作用下,各阶段均呈现显著的非线性力学特征,随着应变率的增加,压密阶段和线弹性阶段表现出的明显非线性特征呈减弱趋势;③ 准静态应变率 $10^{-5} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 范围内,抗压强度随应变率增加由 8.83 MPa 增加至 12.57 MPa,增长率 42.35%;弹性模量随应变率增加总体呈现先增加后减小的变化趋势,在 $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 应变率区间,弹性模量由 1 644 MPa 增加至 1 825 MPa,随后在 $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 应变率区间内减小,变化趋势发生明显转折;泊松比在准静态应变率下随应变率增加而呈现逐渐减小的变化趋势,从 1.53 下降到 0.71,减小 53.59%;整个准静态应变率范畴下,煤岩的力学特征参数(抗压强度、弹性模量、泊松比)均表现出显著的非线性变化趋势,均在临界应变率 10^{-3} s^{-1} 附近发生转折。④ 利用一个损伤体和一个 Maxwell 模型并联方式,综合考虑准静态应变率下煤岩的非线性变化特征后,引入材料常数 a 对胡克定律进行修正,推导得出准静态应变率下煤岩的非线性损伤演化本构方程,并结合煤岩单轴压缩试验对其合理性进行验证。

关键词:煤岩;准静态应变率;力学特征;非线性;本构方程

中图分类号:TD313

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2019)05-1437-09

Nonlinear mechanical properties of coal rock under quasi-static strain rate

LIU Xiaohui^{1,2},HAO Qijun²,WU Shiyong³,ZHANG Ru^{4,5},YU Jie²

(1. Key Laboratory of Fluid and Power Machinery, Ministry of Education, Xihua University, Chengdu 610039, China; 2. School of Energy and Power Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China; 3. Yalong River Hydropower Development Company, Ltd., Chengdu 610051, China; 4. Sichuan College of Water Resources and Hydropower, Chengdu 610065, China; 5. MOE Key Laboratory of Deep Earth Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In order to study the nonlinear mechanical characteristics of coal rock under excavation disturbance, the uni-

收稿日期:2019-01-30 修回日期:2019-04-01 责任编辑:韩晋平

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0600702);四川省教育厅重点科研基金资助项目(18ZA0457);四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室开放基金资助项目(SKHL1718)

作者简介:刘晓辉(1977—),女,四川成都人,副教授,博士。E-mail:liuxh@mail.xhu.edu.cn

通讯作者:吴世勇(1965—),男,四川眉山人,教授级高级工程师,博士。Tel:028-82907635,E-mail:wushiyong@ylhdc.com.cn

axial compression test of quasi-static strain rate of 10^{-5} – 10^{-2} s^{-1} was carried out by MTS815 servo rigidity testing machine on the coal rock of Fu Rong, Bai Jiao Coal Mine, China. The variation of mechanical properties such as stress-strain curve, compressive strength, elastic modulus and Poisson's ratio of coal rock under quasi-static strain rate were analyzed. Based on the significant nonlinear mechanical characteristics of coal rock, the viscoelastic damage constitutive model was modified and verified. The research shows that ① Under uniaxial compression loading, the coal rock has four stages, such as compaction, linear elasticity, plastic yield and post-peak damage. The strain rate correlation of coal rock mechanical properties is outstanding. With the increase of strain rate, the compaction phase is shortened, the linear elastic phase is increased, and the stress strengthening characteristics in the yielding stage and the stress softening characteristics in the post-peak failure stage tend to be obvious. ② Due to the closure and expansion of the primary fissures, each stage of the loading coal rock presents remarkable nonlinear mechanical characteristics. With the increase of strain rate, the obvious nonlinear characteristics of the compaction stage and the linear elastic stage show a weakening trend. ③ In the range of quasi-static strain rate 10^{-5} – 10^{-2} s^{-1} , the compressive strength increases with the strain rate from 8.83 MPa to 12.57 MPa, the growth rate is 42.35%. The modulus of elasticity generally increases first and then decreases with the increase of strain rate. In the range of 10^{-5} – 10^{-4} s^{-1} strain rate, the elastic modulus increases from 1 644 MPa to 1 825 MPa, followed by 10^{-4} – 10^{-2} s^{-1} is reduced within the strain rate interval, and the trend of change is obviously turning. The Poisson's ratio shows a decreasing trend with the increase of strain rate under the quasi-static strain rate, which decreases from 1.53 to 0.71, and decreases value by 53.59%. The mechanical characteristics parameters (compressive strength, elastic modulus, Poisson's ratio) of coal rock under the whole quasi-static strain rate category all shows significant nonlinear changes, and all of them turn around the critical strain rate of 10^{-3} s^{-1} . ④ Using a damage body and a Maxwell model in parallel, considering the nonlinear variation characteristics of coal rock under quasi-static strain rate, the material constant a is used to modify the Hooke's law, and the constitutive equation of nonlinear damage evolution of coal rock under quasi-static strain rate is derived. The constitutive equation's rationality is verified with the combination of the uniaxial compression test of coal rock.

Key words: coal rock; quasi-static strain rate; mechanical properties; nonlinear; constitutive equation

能源开采工程中涉及的岩石材料大多为敏感性材料,应变率作为影响着岩石力学特性的重要因素之一,长期以来一直倍受关注^[1]。煤炭资源作为我国最为重要的基础性能源,其安全、高效开采,有效进行灾害预防与预警,更是国民经济发展过程中必须解决的问题之一。不同的开挖扰动过程对应着煤岩处于不同的应变率状态下的变化过程。因此通过煤岩不同应变率效应下的力学特性和破坏规律研究,具有较强的工程指导意义,能够更好地反映出不同扰动状态下煤岩的破坏机理。

应变率范围的划分至今仍无定论,李夕兵^[2]提出划分 10^{-5} ~ 10^{-1} s^{-1} 为静态应变率, 10^{-1} ~ 10^3 s^{-1} 为准动态及动态应变率。对于煤岩,研究发现其开采过程其扰动动载应变率处于 10^{-5} ~ 10^3 s^{-1} 大范围内^[3]。在动载作用下大多数研究均是在 10^0 ~ 10^3 s^{-1} 动态应变率范围内,如李明等^[4]采用 SHPB 试验系统进行了 57.433 ~ 240.100 s^{-1} 应变率内的煤岩单轴压缩试验,通过试验得出,随着应变率的升高,压密阶段缩短,弹性变形阶段延长,动态弹性模量和峰值应力呈对数形式增加的结论。刘晓辉等^[5]针对 10 ~ 10^2 s^{-1}

应变率段的煤岩开展了冲击压缩 SHPB 试验,发现随着应变率的增加,煤岩抗压强度、动态弹性模量增大的同时,煤岩碎块数量随应变率的增加而增加但破碎尺度呈减小趋势。江红祥^[6]、王登科^[7]、解北京^[8]、李海涛^[9]等则从煤岩的强度变化、破碎及能量释放规律进行了讨论,极大丰富了动态应变率下煤岩力学特性的研究方向。然而大量研究发现,煤岩开采导致煤岩原有应力场平衡被打破、应力重新调整变化的动载影响过程,对于煤岩而言其变形往往是缓慢的,其应力调整速度变化导致的应变率不大于 10^{-1} s^{-1} 状态,就算在矿震近震源动载应变率等级也在 10^{-3} ~ 10^{-1} s^{-1} 范围内^[3],而针对该应变率范畴的研究却鲜有报道。因此笔者针对该范畴,对 10^{-5} ~ 10^{-2} s^{-1} 准静态应变率范畴内的煤岩展开力学特性研究。

考虑到煤岩作为一种由远古植物沉积演化而来的沉积岩,其成岩过程地质情况复杂,内部存在大量的原生缺陷如微空洞、微裂隙等,其力学特性必定表现出明显的非均质性,那么在外加荷载下,煤岩势必呈现出非线性特征^[10]。杨小彬等^[11]基于损伤力学和热力学原理,通过考虑煤岩的初始损伤来表征煤岩

的非线性特征,建立煤岩在单轴和三轴压缩条件下的煤岩非线性损伤本构方程,并验证了该本构方程的正确性。王超等^[12]利用损伤力学理论,通过煤岩单轴压缩条件下,裂纹体积的变化来研究煤岩的内部损伤演化过程,构建了相应的统计损伤本构模型。郭子红、潘红宇、杨卫忠等^[13-15]同样利用损伤理论,分别从不同角度构建了岩石的本构方程,并验证了其正确性。因此,正确构建符合煤岩非线性特性的损伤演化本构方程,对于进一步深入研究煤岩的力学性能具有一定的理论意义。

加之,煤岩的力学特性与应变率息息相关,讨论煤岩率效应下的本构关系,同样具有重要的现实和理论意义。蔡灿等^[16]构建了一个 Bingham 模型和一个 Maxwell 模型并联而成的损伤模型,并在考虑了孔隙度的情况下,利用拉普拉斯变换,构建了在中低应变率下的岩石动态本构模型。单仁亮等^[17]对云架岭煤矿无烟煤进行了动态冲击试验,并利用1个弹簧元件和2个表征低、高应变率的 Maxwell 体并联,构建出了可以反应煤岩塑性流动和应变硬化等特征的黏弹性损伤模型。郭德勇等^[18]利用1个损伤体和3个分别表征低、中、高的 Maxwell 模型并联,建立了能够表征煤岩的塑性流动特征的黏弹性损伤本构模型。还有大量的学者对岩石进行了在应变率效应下的本构关系研究^[19-22]。

然而对于煤岩,由于其自身原生裂隙在加载条件下的闭合,煤岩的应力-应变曲线在压密阶段和线弹性阶段会表现出明显与率效应相关的非线性,现有的研究很少涉及煤岩的非线性和准静态应变率下的本构关系研究。因此笔者拟针对煤岩开采原岩应力变化这一过程,展开准静态应变率范畴下的不同应变率下煤岩非线性力学特征研究,修正并验证准静态应变率下的非线性损伤演化本构方程。

1 煤岩制备及其试验方案

1.1 煤样制备

试验煤岩选自四川省宜宾市芙蓉白皎煤矿,埋深+300 ~ +450 m,为富硫富灰煤岩;煤岩成岩物质以有机质化合物形式存在,除含有大部分非晶态矿物外,还包括石英、方解石、高岭石等化合物^[5]。

根据国家标准《煤和岩石物理力学性质测定方法》,在整个试样制备过程,充分考虑煤岩软弱破碎,强度较低的特征,采用干钻、干切、干磨的方法,尽可能减少人为扰动对煤岩原始状态的影响;在煤岩压缩试验中,采用圆柱形标准煤岩 $\phi 50 \text{ mm} \times L100 \text{ mm}$,直

径控制在 $(50_{-2}^{+6}) \text{ mm}$,高径比为 2 ± 0.2 ;两端面不平行度 $\leq 0.05 \text{ mm}$,端面垂直试样轴线且最大偏差度不超过 0.25° 。煤岩试件通过取芯、切割和两端面研磨抛光的制备方法制成圆柱体试样后,所有试验试样平均直径为 47.52 mm ,平均高度为 100.46 mm ,参考以往试验经验,该试件能够满足单轴压缩试验的要求。图1为部分试验煤岩实物图。



图1 煤岩实物

Fig. 1 Coal rock physical map

1.2 试验方案

为了获得准静态应变率下的煤岩力学特征变化规律,试验利用美国 MTS815 Flex Test GT 岩石力学试验系统,对芙蓉白皎煤矿煤岩展开轴向位移(LVDT)控制下的 $10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 四种应变率的单轴压缩试验。通过其表面安装的轴向、环向引伸计测得轴向、环向变形、加载位移等数据,得到准静态应变率下的煤岩应力-应变曲线和抗压强度、弹性模量、泊松比等力学特性变化规律。

2 准静态应变率下的煤岩力学特征

2.1 典型应力-应变曲线分析

通过试验可以发现,作为经历了复杂构造运动后形成的沉积煤岩,其内部存在着大量的原生裂隙,导致煤岩的应力-应变曲线具有明显的4个变化阶段,如图2所示: I 压密阶段(OA)、II 线弹性阶段(AB)、III 塑性屈服阶段(BC)、IV 破坏阶段(CD)。

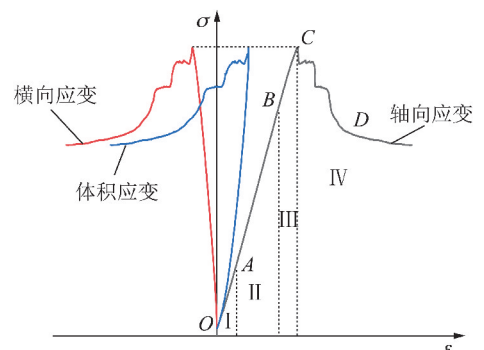


图2 煤岩典型应力-应变曲线

Fig. 2 Typical stress-strain curves of coal rock

压密阶段(OA)。在轴向荷载作用下,煤岩体内原生裂隙闭合,其宏观性质的变化体现在煤岩体积减小,密度增大。在压密阶段,裂隙的闭合导致应变的增长速率大于应力的增长速率,弹性模量随着应变的增加而逐渐增大,煤岩的力学性质变化表现出非线性特征。轴向和横向应力-应变曲线表现出向下凹的变化趋势,而体积应变几乎与坐标轴重合。

线弹性阶段(AB)。在原生裂隙闭合的同时,少量的微裂隙产生。此时外荷载远未达到煤岩的最大抗压强度,作用在煤样上的应力仅使原生裂隙产生微小的扩展,损伤应变能释放率保持稳定,弹性变形能不断积累。煤岩宏观上表现出密度增大,弹性模量基本保持不变的性质。随着煤岩应力的增加,轴向应变线性增加,而在后期,横向应变和体积应变发生非线性变化,煤岩扩容开始。

塑性屈服阶段(BC)。随着外加荷载的增加,煤岩内部原生裂隙加速扩展,新的裂纹开始产生,塑性变形开始占据主导地位。随着应变的增加,煤岩应变能释放率加快,应力变化速率减小,轴向和横向应力-应变曲线呈现上凸的变化特征,体积应变减小至负值,轴向应力在塑性屈服阶段的最后达到峰值。

峰后破坏阶段(CD)。随着加载时间的增加,煤岩变形逐渐增加,应力逐渐减小,细微裂隙贯通形成宏观裂纹,应变能释放速率加快,同时由于应变仍在逐渐增加,煤岩应力必须减小,应力-应变曲线呈现出下跌的变化特征。在这一阶段,煤岩在宏观上表现为试样变形速度加快,整体发生失稳,失去承载能力。

2.2 不同应变率下的应力-应变曲线分析

图3为准静态应变率下煤岩轴向应力-应变曲线。由图3可以看出,随着应变率从 10^{-5} s^{-1} 增加到 10^{-2} s^{-1} ,压密阶段占峰前轴向应力-应变曲线的比例逐渐减小,在相同的应变下,煤岩的应力逐渐增大。这是因为随着应变率的增加,煤岩在单位时间内接收到的能量增加,煤岩内原生裂隙迅速闭合,导致压密阶段变得不明显。

随着应变率的增加,应力增长在 $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 应变率段呈现出非线性变化的特征。这是因为在低应变率下,煤岩系统内部能够及时恢复到平衡状态,微裂隙的产生与扩展更能对煤岩的宏观应力-应变曲线产生影响。随着应变率从 10^{-4} s^{-1} 增加到 10^{-2} s^{-1} ,煤岩应力-应变曲线的非线性变化趋势减弱,呈现出线性变化的特征。同时,随着应变率的增加,线弹性阶段在峰前应力-应变曲线段所占的比例逐渐增加。

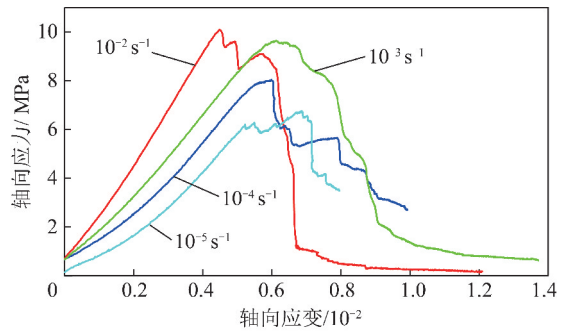


图3 不同应变率下的煤岩轴向应力-应变曲线

Fig. 3 Axial stress-strain curves of coal rock under different strain rates

当应变率从 10^{-5} s^{-1} 增加到 10^{-2} s^{-1} ,塑性屈服阶段所占比例逐渐减小。当应变率为 10^{-2} s^{-1} 时,表现出应力强化的变化特征。这是由于塑性破坏阶段随着应变率的增加,煤岩整体变形的黏滞性增加,微裂纹的扩展滞后于变形的增加,煤岩应变能释放速率的相对减慢导致应力的不断增加^[23]。

图4分别为不同应变率下的煤岩的横向和体积应力-应变的曲线。由图4可以看出,在压密阶段和线弹性阶段,各应变率作用下煤岩的横向和体积应力-应变的曲线几乎重合。在塑性屈服阶段,不同应变率下的横向和体积应力差在很小的应变内形成,并达到煤岩的扩容点。

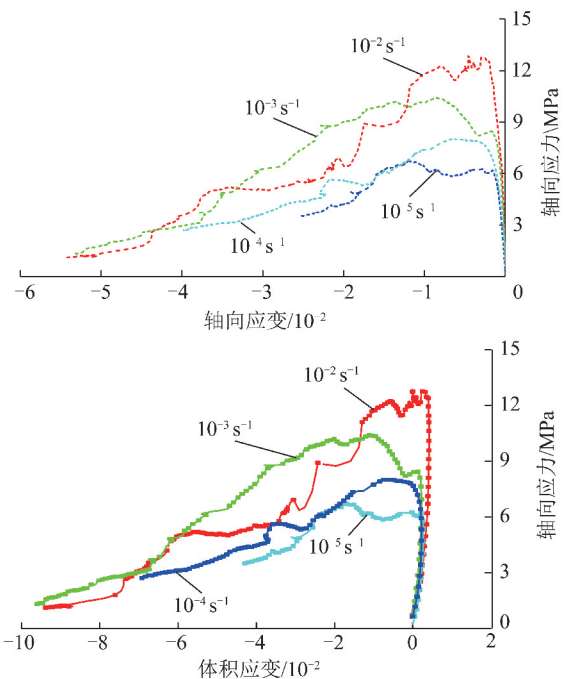


图4 不同应变率下的煤岩横向和体积应力-应变曲线

Fig. 4 Lateral stress and volume stress-strain curves of coal rock under different strain rates

对于峰后破坏的轴向应力-应变曲线,应变率从

10^{-5} s^{-1} 增加至 10^{-4} s^{-1} , 煤岩的应力-应变曲线呈现出台阶分段形下降变化趋势; 当应变率为 $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 时, 煤岩应力-应变曲线呈现出光滑、陡峭的下降变化趋势, 其应变软化特征表现明显。对于横向和体积应力-应变曲线, 在峰后破坏阶段, 呈现出明显的应力波动特性; 随着应变率从 10^{-5} s^{-1} 增加至 10^{-3} s^{-1} , 煤岩应力下降的趋势逐渐明显, 但未出现明显的应变软化现象, 在应变率为 10^{-2} s^{-1} 时, 应变软化现象明显。

2.3 抗压强度 σ 与应变率 $\dot{\varepsilon}$ 的关系

由于煤岩试样物理性质存在着一定差异性, 相同应变率下煤岩抗压强度具有一定的离散性, 所以用每组应变率下的抗压强度的均值表征抗压强度的变化趋势。

图 5(a) 为不同应变率下抗压强度的变化趋势, 煤岩的抗压强度在准静态应变率下呈现出非线性变化的特征。随着应变率的增加, 煤岩在单轴压缩条件下的抗压强度逐渐增加, 从 8.83 MPa 增加至 12.57 MPa, 增长率为 42.35%。由图 5(a) 还可以看出, 在 $10^{-5} \sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 应变率段, 煤岩在相同应变率下的抗压强度均相差 3 MPa 以上, 当应变率为 10^{-2} s^{-1} 时其差值减小至 0.7 MPa, 说明在高应变率下, 煤岩试样性质的离散性对试验结果的影响大大减小。当应变率为 10^{-3} s^{-1} 时, 抗压强度取得最大值为 13.52 MPa, 之后随着应变率增加, 抗压强度减小。有学者认为^[9,23], 应变率效应下的煤岩的力学特性变化存在着临界值, 当小于某个应变率时煤岩的率效应不明显, 大于该临界应变率时, 煤岩力学特性变化趋势明显。在 $10^{-5} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 准静态应变率段下, 随着应变率的增加, 应变率对煤岩力学特性的影响在 10^{-3} s^{-1} 达到最大。当应变率为 10^{-3} s^{-1} , 煤岩内部颗粒间的黏结力在短时间内受到强烈冲击产生过快调整, 致使煤岩强度增大、破坏迅速; 而当应变率为 10^{-2} s^{-1} 时, 煤岩的抗压强度减小。

2.4 弹性模量 E 与应变率 $\dot{\varepsilon}$ 的关系

弹性模量作为衡量煤岩弹性变形能力的指标, 是为了表征煤岩经历压密阶段后, 原生裂隙闭合, 在外力作用下, 所呈现出的弹性变形特征。

首先由图 3 可以看出, 随着应变率的增加, 线性阶段应力-应变曲线所占比例逐渐增加, 其斜率也逐渐变大, 说明随着应变率的增加, 煤岩的弹性模量逐渐增大。其次为减少煤岩离散性的影响, 用每组应变率下的弹性模量的均值表征弹性模量的变化趋势, 图 5(b) 为不同应变率下煤岩的弹性模量。由图 5(b) 可以看出, 在准静态应变率下, 弹性模量表现出

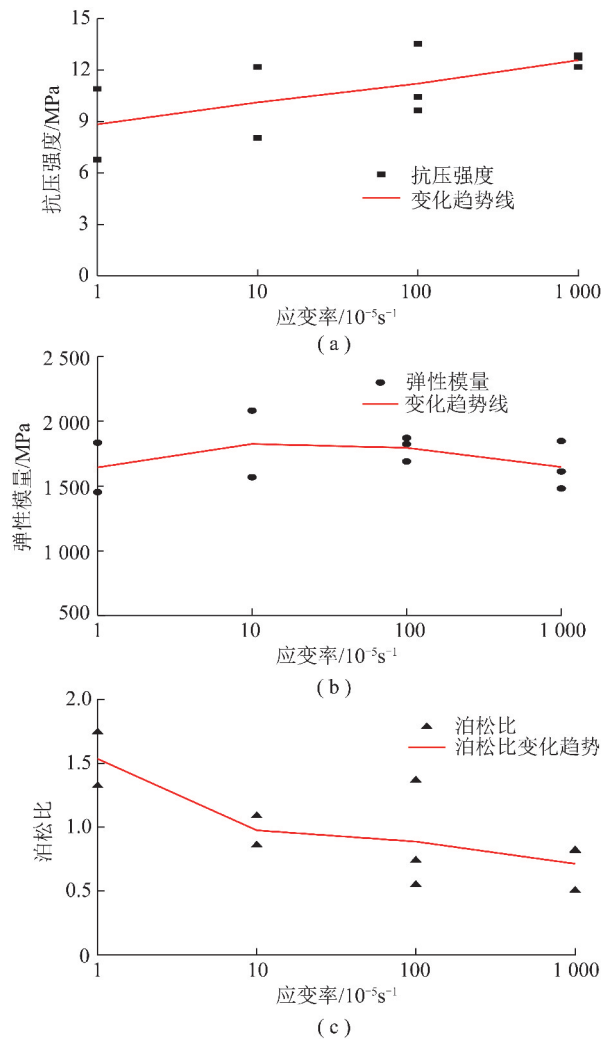


图 5 不同应变率下煤岩的抗压强度、弹性模量和泊松比
Fig. 5 Compressive strength, elastic modulus and poisson's ratio of coal rock under different strain rates

明显的非线性变化特征。随着应变率从 10^{-5} s^{-1} 增加至 10^{-4} s^{-1} 时, 弹性模量从 1 644 MPa 增加至 1 825 MPa, 增长率为 11%。当应变率增加至 10^{-3} s^{-1} 时, 煤岩的弹性模量变化趋势发生了明显的转折, 与抗压强度的变化趋势类似, 说明 10^{-3} s^{-1} 同样为煤岩弹性模量变化的临界应变率。

2.5 泊松比 μ 与应变率 $\dot{\varepsilon}$ 的关系

为表征煤岩的环向变形能力在准静态应变率下的变化特性, 利用不同应变率下煤岩的泊松比进行衡量。同样为减少离散性影响, 使用每组应变率下的泊松比的均值表征泊松比的变化趋势, 图 5(c) 为不同应变率下煤岩的泊松比。由图 5(c) 可以看出, 随着应变率由 10^{-5} s^{-1} 增加至 10^{-2} s^{-1} , 煤岩的泊松比呈现整体下降趋势, 从 1.53 下降到 0.71, 增长率为 -53.59%。在应变率为 10^{-3} s^{-1} 时, 泊松比的离散度突然变大, 最大值为 1.37。同时发现, 在准静态应变率下, 泊松比的变化同样呈现出了明显的

非线性特征。

3 准静态应变率下的煤岩非线性损伤演化本构方程

综上所述,煤岩作为一种非均质天然损伤地质体,在不同的准静态应变率条件下,应力-应变曲线、抗压强度、弹性模量、泊松比均表现出非线性变化特征。接下来就基于此,利用损伤力学进一步研究煤岩的本构关系。

在外力作用下,由于内部裂隙的扩展和发育导致煤岩的宏观力学性能劣化称之为损伤^[24]。损伤力学主要分为宏观损伤力学和细观损伤力学两个方向,其中细观损伤力学从岩石材料的细观结构,从几何过程上考虑不同类型损伤的分布,由其微元的破坏和损伤演化过程,来研究岩石的宏观变形及损伤演化与细观损伤变量及其演化之间的关系^[25-26,15]。宏观损伤力学则主要以岩石的宏观性能测试为基础,以宏观的角度来研究损伤对岩石性能的影响和损伤变量的演变。两种研究方法都有各自的优缺点和侧重,但考虑到煤岩内部发达的原生微裂隙,从微观的角度来考察损伤演化过程,相信更能准确的表现出宏观煤岩破坏过程。

3.1 损伤演变方程的建立

煤岩在外力加载条件下的破坏过程,就是其内部裂隙生长、发育、扩展的过程。煤岩是一种天然矿物材料,由于其生成条件、矿物成分的不同以及构造运动的不规律,导致煤岩体内存在着许多强度不同的缺陷。在一维情况下,假设煤岩体内缺陷的分布是随机且相互独立的,故利用泊松分布来描述缺陷的分布^[27]。所以在长度 $\varphi(l) = \lambda e^{-\lambda l}$ 的区段内缺陷的概率密度为

$$\varphi(l) = \lambda e^{-\lambda l} \quad (1)$$

式中, λ 为单位长度上含有缺陷数目数学期望。

假设在微元内,缺陷超过了一定数目后便丧失承载能力,以 D 表示损伤变量,则

$$D = \frac{\int_0^x l\varphi(l) dl}{\int_0^{\infty} l\varphi(l) dl} = 1 - (\lambda x + 1)e^{-\lambda x} \quad (2)$$

在三维情况下,存在有线、面、体 3 种缺陷,一般有

$$D = 1 - [(\lambda x)^m + 1] \exp[-(\lambda x)^m] \quad (3)$$

式中, m 表示维数 ($m=1 \sim 3$), 在本方程中 $m=3$ 。

设:

$$\alpha = 1/\lambda \quad (4)$$

其中, α 为缺陷间距的数学期望,称之为完整度。完整度 α 是荷载的函数,也是变形 ε 的函数,唐春安^[28]认为 α 与 ε 成反比例函数,即

$$\alpha = \frac{c}{\varepsilon} \quad (5)$$

其中, c 为比例系数。令

$$\frac{x}{c} = \frac{1}{\varepsilon_0} \quad (6)$$

则

$$D = 1 - \left[\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^m + 1 \right] \exp \left[\left(- \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^m \right] \quad (7)$$

煤岩试样的损伤部分无承载能力,其余部分为线弹性的,满足胡克定律,但由图 2 的煤岩应力应变曲线可以看出,煤岩的应力-应变关系在压密阶段具有明显的非线性变化,其变化特征符合幂函数的变化特征,所以为满足其非线性特征,需对胡克定律进行修正,即

$$\sigma = E_0 \varepsilon^a (1 - D) \quad (8)$$

式中, a 为与煤岩相关的材料常数; E_0 为弹性常数。

所以可以由式(7),(8)得到本构方程:

$$\sigma_1 = E_0 \varepsilon^a \left[\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^m + 1 \right] \exp \left[\left(- \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^m \right] \quad (9)$$

式中, ε_0 为与煤岩有关的材料常数。

3.2 考虑应变率的煤岩非线性损伤演化本构方程的构建

从上文可知,煤岩在准静态应变率下具有明显的率相关性,不同应变率下的煤岩的塑性特性存在明显的差异。故引入一个黏弹性元件表现煤岩在不同应变率的黏弹性响应,整个试件可以看作一个损伤体和一个黏弹性元件的并联体,其本构模型如图 6 所示,图中各元件分别代表: D_a 为损伤体, η_1 为黏性元件, E_1 为弹性元件, σ 为应力值的大小。

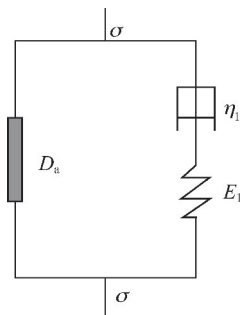


图 6 黏弹性损伤本构模型

Fig. 6 Viscoelastic damage constitutive model

麦克斯韦元件的模型为

$$\sigma_2 = E_1 \int_0^t \dot{\varepsilon} \exp \left(- \frac{t - \tau}{\varphi_1} \right) d\tau \quad (10)$$

在准静态应变率下,将煤岩加载应变率视为恒定

应变率, 所以有

$$\sigma_2 = E_1 \dot{\varepsilon} \varphi_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon}{\dot{\varepsilon} \varphi_1}\right) \right] \quad (11)$$

式中, $\dot{\varepsilon}$ 代表应变率, 在本文中应变率取 $10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2} \text{ s}^{-1}$; φ_1 为松弛时间, s 。

因此, 由煤岩的式(9)~(11)得到考虑应变率的非线性损伤演化本构方程为

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 = E_0 \varepsilon^a \left[\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^m + 1 \right] \exp\left[\left(-\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^m \right] + E_1 \dot{\varepsilon} \varphi_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon}{\dot{\varepsilon} \varphi_1}\right) \right] \quad (12)$$

式中, E_1 为弹性常数。

3.3 本构方程实验验证

根据单轴压缩试验, 利用式(12)的本构方程对不同应变率下的煤岩应力-应变曲线进行拟合, 拟合过程中所对应的本构方程参数见表1, 并与试验曲线进行对比验证, 如图7所示。

表1 拟合后本构方程参数

Table 1 Constitutive equation parameters after fitting						
$\dot{\varepsilon}/\text{s}^{-1}$	E_0/MPa	a	ε_0	E_1/MPa	φ_1/s	R^2
10^{-2}	23.23	1.75	0.80	17.98	0.67	0.89
10^{-3}	28.95	1.45	0.58	10.12	0.79	0.89
10^{-4}	13.37	1.25	0.77	20.38	2.31	0.98
10^{-5}	21.74	1.70	0.57	10.00	15.46	0.87

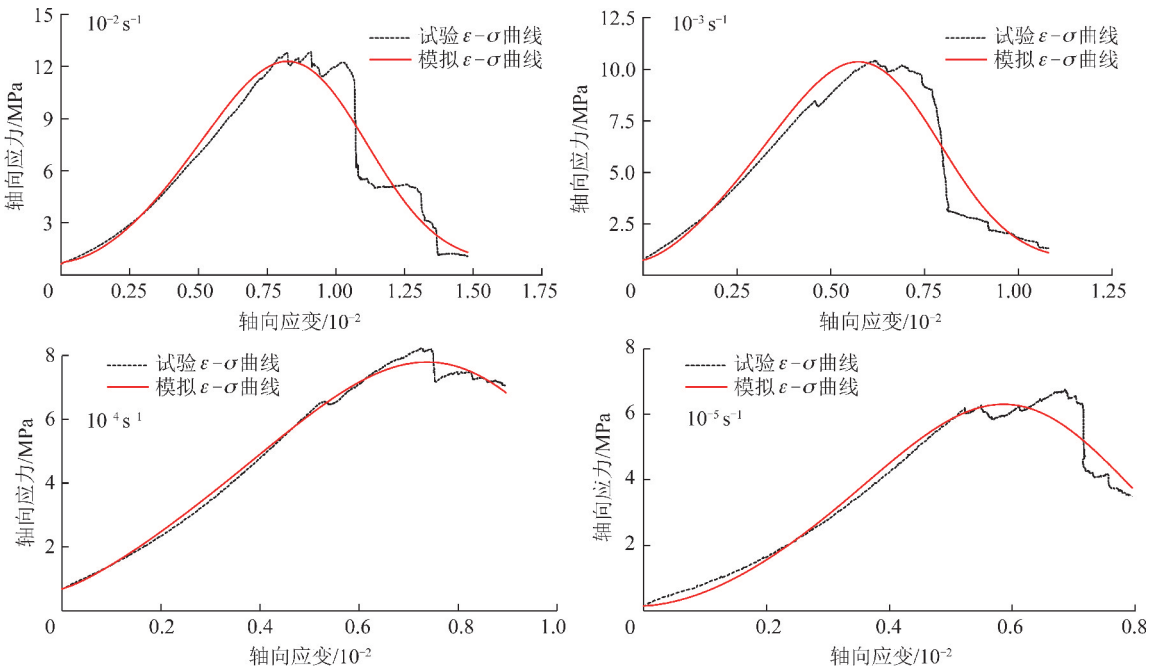


图7 不同应变率下煤岩应力应变曲线对比

Fig. 7 Comparison of stress and strain curves of coal rock under different strain rates

由图7可以看出, 在压密阶段, 煤岩单轴压缩试验所得应力应变曲线与通过本构方程拟合得到的应力应变曲线吻合较好, 但在线弹性阶段, 模拟曲线均高于试验曲线。说明在压密阶段, 构建的本构方程能够很好的体现出煤岩的非线性, 损伤变量的演化比较符合实际煤岩内损伤的演化; 在线弹性阶段, 模拟曲线以线性变化的形式体现, 但煤岩由于自身的非均质性使得其在线弹性阶段仍体现出一点非线性特征。同时也说明, 修正后的幂函数形式的胡克定律能体现出不同应变率下的煤岩非线性特征。在塑性阶段和峰后破坏阶段, 由于煤岩的塑性和宏观裂隙的贯通, 试验所得应力-应变曲线出现了应力软化和应力波动等现象, 而本构方程的模拟曲线呈现的是光滑的非线性变化形式, 导致其不能很好的模拟煤岩力学性质

的变化, 这一问题是值得进一步深入分析讨论的。

4 结 论

(1) 在准静态应变率下, 煤岩变形破坏阶段分为压密、线弹性、塑性屈服、峰后破坏4个阶段, 在压密阶段表现出显著的非线性变化特征; 随着应变率的增加, 压密阶段非线性变化逐渐不明显, 线弹性阶段占比增大。

(2) 在准静态应变率下, 随着应变率的增加, 抗压强度总体呈现逐渐增加的趋势, 并在应变率为 10^{-3} s^{-1} 取得最值; 弹性模量在 10^{-3} s^{-1} 时发生转折, 总体上表现出先增加、后减小的趋势; 泊松比在应变率为 10^{-3} s^{-1} 时, 相同应变率下泊松比的离散度突然变大, 总体上呈现非线性减小的趋势。

(3)依据准静态应变率下煤岩的非线性变化特征,对胡克定律进行修正,并利用一个损伤体和一个 Maxwell 模型并联,推导出的准静态应变率下的煤岩非线性损伤演化本构方程得到较好的验证。

参考文献 (References):

- [1] 吴绵拔. 加载速率对岩石抗压和抗拉强度的影响[J]. 岩土工程学报, 1982, 4(2): 97-106.
WU Mianba. Effect of loading rate on rock compressive strength and tensile strength [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1982, 4(2): 97-106.
- [2] 李夕兵. 岩石动力学基础与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [3] 何江. 煤矿采动荷载对煤岩体的作用及诱冲机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.
HE Jiang. Study on the effect of coal mining dynamic load on coal and rock mass and its mechanism of trapping [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2013.
- [4] 李明, 茅献彪, 曹丽丽, 等. 高应变率下煤力学特性试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(2): 317-324.
LI Ming, MAO Xianbiao, CAO Lili, et al. Experimental study on mechanical properties of coal under high strain rate [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(2): 317-324.
- [5] 刘晓辉, 张茹, 刘建锋. 不同应变率下煤岩冲击动力试验研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(9): 1528-1534.
LIU Xiaohui, ZHANG Ru, LIU Jianfeng. Experimental study on impact dynamics of coal and rock under different strain rates [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(9): 1528-1534.
- [6] 江红祥, 杜长龙, 刘送永. 冲击速度对煤岩破碎能量和粒度分布的影响[J]. 煤炭学报, 2013, 38(4): 604-609.
JIANG Hongxiang, DU Changlong, LIU Songyong. Effect of impact velocities on cracking energy and particle distribution of coal and rock [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(4): 604-609.
- [7] 王登科, 刘淑敏, 魏建平, 等. 冲击载荷作用下煤的破坏特性试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(3): 594-600.
WANG Dengke, LIU Shumin, WEI Jianping, et al. Experimental study on failure characteristics of coal under impact loading [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2017, 34(3): 594-600.
- [8] 解北京, 崔永国, 王金贵. 煤冲击破坏力学特性试验研究[J]. 煤矿安全, 2013, 44(11): 18-21.
XIE Beijing, CUI Yongguo, WANG Jingui. Experimental study on mechanical properties of coal impact failure [J]. Coal Mine Safety, 2013, 44(11): 18-21.
- [9] 李海涛. 加载速率效应影响下煤的冲击特性评价方法及应用[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2014.
LI Haitao. Evaluation method and application of impact characteristics of coal under the influence of loading rate effect [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2014.
- [10] 郝宪杰, 袁亮, 卢志国, 等. 考虑煤体非线性弹性力学行为的弹塑性本构模型[J]. 煤炭学报, 2017, 42(4): 896-901.
HAO Xianjie, YUAN Liang, LU Zhiguo, et al. Elastoplastic constitutive model considering nonlinear elastic mechanical behavior of coal [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(4): 896-901.
- [11] 杨小彬, 丁元伟, 秦跃平, 等. 煤岩非线性损伤试验及理论模型[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2009, 28(6): 884-887.
YANG Xiaobin, DING Yuanwei, QIN Yueping, et al. Nonlinear damage test and theoretical model of coal and rock [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2009, 28(6): 884-887.
- [12] 王超, 杨小彬, 郭伟旗, 等. 煤岩单轴加载统计损伤本构模型[J]. 煤矿安全, 2015, 46(11): 10-13.
WANG Chao, YANG Xiaobin, GUO Weiqi, et al. Statistical damage constitutive model for coal and rock uniaxial loading [J]. Coal Mine Safety, 2015, 46(11): 10-13.
- [13] 郭子红, 刘新荣, 刘保昆, 等. 基于塑性体积应变的岩石损伤变形特性实验研究[J]. 实验力学, 2010, 25(3): 293-298.
GUO Zihong, LIU Xinrong, LIU Baoxian, et al. Experimental study on rock damage and deformation characteristics based on plastic volumetric strain [J]. Laboratory Mechanics, 2010, 25(3): 293-298.
- [14] 潘红宇, 董晓刚, 张天军, 等. 单轴压缩下松软煤样破裂损伤演化特性研究[J]. 西安科技大学学报, 2018, 38(2): 202-209.
PAN Hongyu, DONG Xiaogang, ZHANG Tianjun, et al. Study on rupture damage evolution characteristics of soft coal under uniaxial compression [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2018, 38(2): 202-209.
- [15] 杨卫忠, 王博. 基于细观损伤的岩石受压本构关系模型研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2010, 31(6): 6-9.
YANG Weizhong, WANG Bo. Research on rock compression constitutive relation model based on mesoscopic damage [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2010, 31(6): 6-9.
- [16] 蔡灿, 伍开松, 袁晓红, 等. 中低应变率下的岩石损伤本构模型研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 795-802.
CAI Can, WU Kaisong, YUAN Xiaohong, et al. Study on constitutive model of rock damage under medium and low strain rate [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(3): 795-802.
- [17] 单仁亮, 程瑞强, 高文蛟. 云驾岭煤矿无烟煤的动态本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2258-2263.
SHAN Renliang, CHENG Ruiqiang, GAO Wenjiao. Dynamic constitutive model of anthracite in Yunjialing Coal Mine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(11): 2258-2263.
- [18] 郭德勇, 吕鹏飞, 赵杰超, 等. 煤岩冲击变形破坏特性及其本构模型[J]. 煤炭学报, 2018, 43(8): 2233-2242.
GUO Deyong, LÜ Pengfei, ZHAO Jiechao, et al. Impact deformation and constitutive model of coal rock [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(8): 2233-2242.
- [19] 李会云. 考虑高围压和高应变率的岩石类材料弹塑性损伤本构模型[D]. 天津: 天津大学, 2017.
LI Huiyun. Elastoplastic damage constitutive model for rock materials considering high confining pressure and high strain rate [D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [20] 胡时胜, 王道荣. 冲击荷载下混凝土材料的动态本构关系[J]. 爆炸与冲击, 2002, 22(3): 242-246.
HU Shisheng, WANG Daorong. Dynamic constitutive relations

- of concrete materials under impact loading [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2002, 22(3): 242-246.
- [21] 付玉凯, 解北京, 王启飞. 煤的动态力学本构模型 [J]. *煤炭学报*, 2013, 38(10): 1769-1774.
FU Yukai, XIE Beijing, WANG Qifei. Dynamic mechanical constitutive model of coal [J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(10): 1769-1774.
- [22] 李晓锋, 李海波, 刘凯, 等. 冲击荷载作用下岩石动态力学特性及破裂特征研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(10): 2393-2405.
LI Xiaofeng, LI Haibo, LIU Kai, et al. Dynamic mechanical properties and fracture characteristics of rock under impact loading [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(10): 2393-2405.
- [23] 刘晓辉. 不同应变率下煤岩破断规律与能量释放特征研究 [D]. 成都: 四川大学, 2017.
LIU Xiaohui. Study on the breaking law and energy release characteristics of coal and rock under different strain rates [D]. Chengdu: Sichuan University, 2017.
- [24] 谢和平. 岩石、混凝土损伤力学 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990: 308.
- [25] 蒋维, 邓建, 李隐. 基于对数正态分布的岩石损伤本构模型研究 [J]. *地下空间与工程学报*, 2010, 6(6): 1190-1194.
JIANG Wei, DENG Jian, LI Yin. Research on rock damage constitutive model based on lognormal distribution [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2010, 6(6): 1190-1194.
- [26] 蒋维, 邓建. 基于对数正态分布的岩石损伤统计分析方法研究 [J]. *南华大学学报(自然科学版)*, 2010, 24(2): 34-37.
JIANG Wei, DENG Jian. Research on statistical analysis method of rock damage based on lognormal distribution [J]. *Journal of Nanhua University (Natural Science)*, 2010, 24(2): 34-37.
- [27] 洪华生, 邓汉忠. 工程规划与设计中的概率概念 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1985.
- [28] 唐春安. 岩石破裂过程中的灾变 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.