DOI：10.16285/j.rsm.2017.10.017

岩石应变软化变形特性及损伤本构模型研究

刘冬桥[1]，王 焯[2]，张晓云[1, 3, 4]

（1. 中国矿业大学（北京）深部岩土力学与地下工程国家重点实验室，北京 100083；2. 中国岩石力学与工程学会，北京 100029；
3. 中国矿业大学（北京）力学与建筑工程学院，北京 100083；4. 绍兴文理学院 土木工程学院，浙江 绍兴 312000）

摘 要：对滇藏铁路三江段的花岗岩进行了单轴和常规三轴压缩试验，研究了岩石在不同围压条件下的变形特性及其损伤演化规律。试验结果表明：该岩石压缩变形过程中，内部裂隙的演化经历了无起裂、起裂并稳定扩展、加速扩展、扩展变缓以及扩展停止 5 个阶段，且围压对岩石变形特性有显著影响。在此基础上，提出了基于有损微元生成的损伤演化模型，建立了三轴压缩条件下岩石应变软化损伤本构模型。该模型能够统一描述岩石峰前及峰后全部变形特性及其损伤演化规律，且损伤方程形式简单、参数物理意义明确。理论结果和试验数据具有很好的一致性，且参数分析结果也表明了该模型的合理性。

关 键 词：岩石；三轴压缩；应变软化；损伤演化；本构模型

中图分类号：TU 452 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－7598 (2017) 10－2901－08

Characteristics of strain softening of rocks and its damage constitutive model

LIU Dong-qiao[1], WANG Zhuo[2], ZHANG Xiao-yun[1, 3, 4]

（1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Chinese Society for Rock Mechanics and Engineering, Beijing 100029, China; 3. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 4. College of Civil Engineering, Shaoxing University, Shaoxing, Zhejiang 312000, China）

Abstract: The uniaxial and conventional triaxial compression tests were conducted on granite from Sanjiang region of Yunnan-Tibet railway in the laboratory. The deformation characteristics and the damage evolution law of rocks were examined under different confining pressures. The results show that the internal cracks experience five stages during the compression deformation process, including no crack, crack initiation and stable propagation, crack accelerating propagation, crack decelerating propagation and crack termination. In addition, confining pressure significantly influences deformation characteristics of rock. Based on the above analysis and the damage model of micro units, a damage constitutive model is developed under the triaxial compression condition. The proposed model has a simple function form and distinct physical meaning parameters, which can be used to describe both the pre-peak and post-peak deformation characteristics of rocks. Furthermore, theoretical results obtained by this model are in good agreement with experimental results in the literature. The rationality of the model is verified by the parameter analysis.

Keywords: rock; triaxial compression; strain softening; damage evolution; constitutive model

1 引 言

岩石作为一种特殊的地质材料，在经历了漫长而复杂的成岩过程后，其内部含有一定数量、不同形状、随机分布的微观孔隙和裂纹，呈现出非均质、各向异性等特征，其变形力学行为具有明显的非线性特征。进入深部以后，岩石受“三高一扰动”（即高地应力、高地温、高岩溶水压和采矿扰动）作用[1]，脆延转化、冲击地压、岩爆、瓦斯突出等众多岩石非线性工程问题凸显。因此，研究岩石非线性变形特性及其损伤演化规律具有重要工程意义。

国内外学者对大理岩、花岗岩、石英岩、砂岩、长石岩、页岩等开展了大量的三轴试验研究[2–9]，结果表明，围压是影响岩石变形特性的重要因素。岩

收稿日期：2016-09-05
基金项目：国家自然科学基金资助项目(No. 51704298)；北京市共建专项资助项目(No. 80044810)；中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. 2015QB01)。
This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51704298), the Beijing Education Committee Cooperation Building Foundation Project (80044810) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2015QB01).
第一作者简介：刘冬桥，男，1986 年生，讲师，硕士生导师，主要从事岩石力学理论及工程方面的教学与研究工作。E-mail: liudongqiao@yeah.net

石的弹性模量、屈服应力、峰值强度、残余强度、峰值时的极限应变、应变强化度都有随着围压增加而增大的趋势，且围压还对岩石的破坏形式起着决定性作用。在此基础上进一步对岩石损伤演化规律及本构模型的建立开展了大量理论研究。Gurson[10]从微孔洞损伤对材料变形行为的影响角度，建立了细观本构模型。张全胜[11]、任建喜[12]等基于 CT 数建立了损伤变量，对应力−应变全过程进行分段，分别给出了本构关系。Krajcinovic[13−14]、唐春安[15]、曹文贵[16]等从岩石材料内部所含缺陷分布的随机性及岩石微元强度服从 Weibull 分布的角度出发，建立了岩石应变软化的损伤统计本构模型。Darabi 等[17]研究了损伤恢复现象，基于此提出了细观损伤本构模型。冯西桥等[18]在总结已有脆性或准脆性固体材料基于损伤力学的分析方法基础上，提出了 DMG 损伤本构模型。Shao 等[19]研究了脆性岩石变形特性，提出了一种各向异性损伤本构模型。张治亮等[20]基于密度方法研究了岩石损伤演化规律。上述研究较好地模拟了岩石应力−应变过程变形特性，但对峰后变形特性研究的还较少，特别是将峰前和峰后变形作为整体开展的研究更是鲜见报道。

本文对滇藏铁路三江段花岗岩开展了单轴和常规三轴压缩试验，分析了花岗岩应变软化变形特性及其损伤演化规律。并基于缺陷增长，建立了岩石应变软化损伤本构模型，该模型能够很好地描述岩石峰前及峰后全部变形特性。

2 试验结果及分析

2.1 试验概况及结果

试样取自滇藏铁路三江段，为燕山期花岗岩，呈灰白色，含暗色矿物，中–粗粒结构，矿物主要成分为斜长石（51.0%）和石英（36.3%），平均密度为 2.69 g/cm^3，平均纵波波速为 4.27 km/s。按照国际岩石力学学会标准[21]加工成ϕ50 mm×100 mm 的圆柱体试样，用砂轮机对试样各表面仔细研磨，使上下端面不平行度在±0.05 mm 以内，端面不平整度在 ±0.02 mm 以内，沿试件高度上直径误差在 ±0.3 mm 以内，端面与试件轴线垂直度偏差在 0.25° 以内，试样如图 1 所示。试验在中国矿业大学（北京）深部岩土力学与地下工程国家重点实验室自主研发的 T-P（热−力）耦合作用下深部软岩气体运移规律试验系统上进行。试验采用位移控制方式加载，加载速率为 0.002 mm/s，试验结果见表 1。

2.2 岩石变形特性分析

岩石的轴向应变和径向应变由轴向和径向引伸计分别测得，体积应变为

$$\varepsilon_{\mathrm{v}} = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_2 \tag{1}$$

式中：ε_{v}为体积应变；ε_1为轴向应变；ε_2为径向应变。



图 1 试样照片

Fig.1 Images of prepared rock specimens

表 1 花岗岩试验结果

Table 1 Experimental results of granite samples

试样编号	围压/MPa	峰值强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
1−1	0	125.37	43.90	0.241
1−2	20	324.65	52.23	0.249
1−3	40	438.31	57.06	0.222

不同围压下岩石偏应力−应变关系曲线如图 2 所示。从图中可以看出，加载初期，岩石原生裂隙闭合，曲线呈现上凹特征；随后，岩石进入弹性阶段，轴向和径向曲线都具有较好的线性特征；随着偏应力的继续增大，曲线上凸并趋于水平，斜率逐渐减小至 0，此时偏应力达到峰值。偏应力较低时，轴向应变较大，径向应变不明显，岩石主要处于轴向压缩阶段，岩石体积压缩减小；随着偏应力的增大，径向应变量急剧增加，与轴向应变相当时，岩石体积保持不变；偏应力进一步增大，径向应变超过轴向应变，径向膨胀逐渐占据主导，岩石发生扩容。

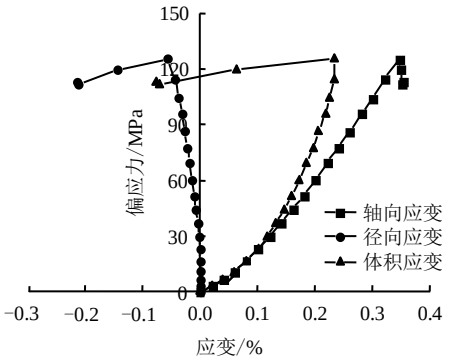
岩石发生上述变形的过程实质上是岩石内部裂隙萌生及扩展演化的过程。由于裂隙变形引起的体积难以直接测量，一般采用间接法，用岩石的总体积应变ε_{v}与基体部分体积应变$\varepsilon_{\mathrm{v}}^{\mathrm{e}}$之差来反映，这里基体部分被视为各向同性弹性材料。因此，裂隙体积应变$\varepsilon_{\mathrm{v}}^{\mathrm{c}}$曲线图见图 3，其计算式为

$$\varepsilon_{\mathrm{v}}^{\mathrm{c}} = \varepsilon_{\mathrm{v}} - \varepsilon_{\mathrm{v}}^{\mathrm{e}} = \varepsilon_{\mathrm{v}} - \frac{1-2\mu}{E}(\sigma_1 + 2\sigma_3) \tag{2}$$

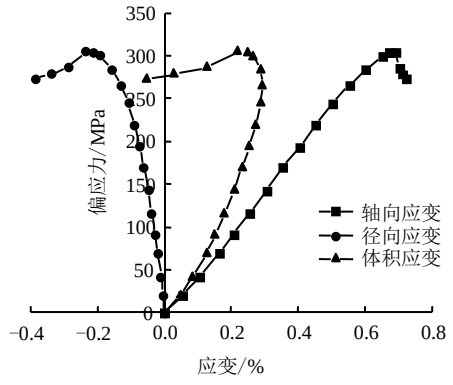
式中：μ为泊松比；E为弹性模量；σ_1、σ_3为轴向与径向应力。

由图 3 可知，加载初期，岩石原生裂隙闭合，

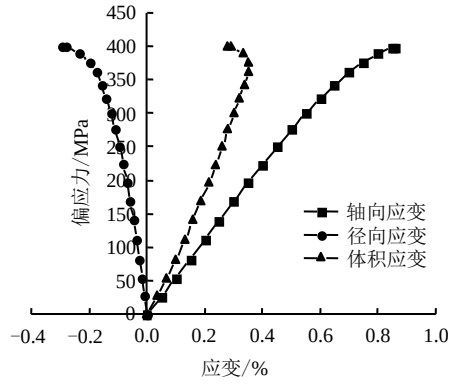
表现为不可逆的非线性变形，应力−应变曲线表现为上凹；应力超过闭合应力 σ_{cc} 后，进入弹性阶段，岩石裂隙几乎没有起裂的现象发生，应力−应变曲线呈线性关系；应力超过起裂应力 σ_{ci} 后，岩石裂隙开始起裂并稳定扩展，岩石开始出现不显现的非线性行为，但仍以弹性变形为主，应力–应变曲线近似线性关系；应力超过扩容应力 σ_{cd} 后，岩石裂隙不稳定加速扩展，径向应变增长速率远高于轴向应变，岩石体积转为扩容，出现膨胀现象，并导致岩石最终破坏，应力−应变曲线表现为上凸；在岩石破坏后产生新裂隙的同时，大量裂隙扩展、贯通形成宏观的破裂面，导致岩石强度迅速下降；应力下降至接近残余强度时，裂隙扩展变缓并逐渐趋于停止。



(a) σ_3 = 0 MPa



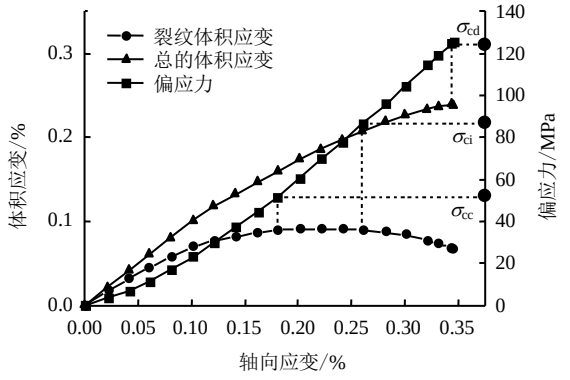
(b) σ_3 = 20 MPa



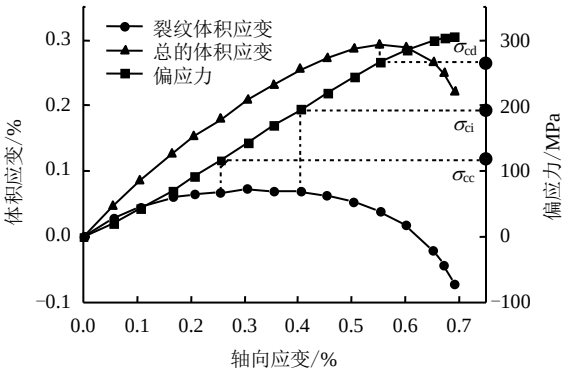
(c) σ_3 = 40 MPa

图 2　不同围压下岩石偏应力−应变关系曲线

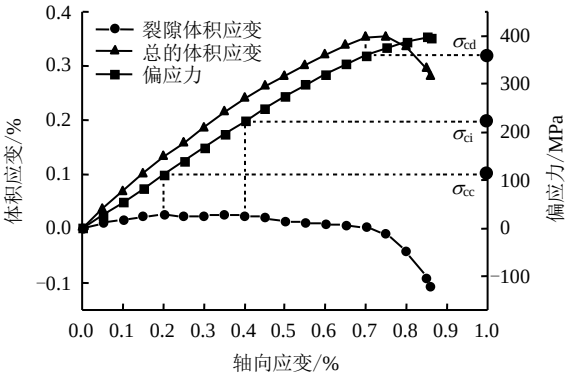
Fig.2　Deviatoric stress and strain curves under different confining pressures



(a) σ_3 = 0 MPa



(b) σ_3 = 20 MPa



(c) σ_3 = 40 MPa

图 3　不同围压下岩石裂隙体积应变曲线

Fig.3　Crack volumetric strain curves under different confining pressures

另外，围压对岩石变形特性有显著影响。随着围压的增大，岩石由脆性逐渐向延性过渡，加载初期曲线的上凹特征越来越不明显，但偏应力较大时曲线的上凸特征越来越明显；岩石的闭合应力、起裂应力、扩容应力及峰值应力也随围压的增加而增大，如图 4 所示。

上述分析表明，岩石的变形破坏过程具有显著的非线性特征，是岩石裂隙萌生及扩展演化的结果。因此，构建岩石本构模型，应充分考虑其力学损伤机制。

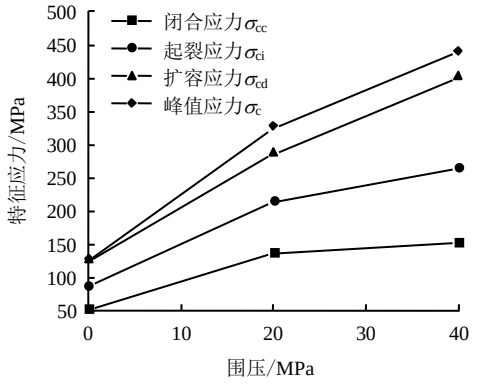


图 4 不同围压下的特征应力

Fig.4 Characteristic stresses under different confining pressures

3 损伤本构模型

3.1 损伤变量及其计算

Rabotnov[22]在 Kachanov[23]提出的连续性因子概念的基础上，最早将损伤变量定义为

$$D=(A-\tilde{A})/A=1-\tilde{A}/A \tag{3}$$

式中：D 为损伤变量；A 为受损后材料横截面的表观总面积；$\tilde{A}$ 为受损后材料横截面的有效承载面积或称净面积；$A-\tilde{A}$ 为受损后材料横截面的缺陷面积。初始无损伤时，$\tilde{A}=A$，$D=0$；完全损伤破坏时，$\tilde{A}=0$，$D=1$。

在此基础上，Lematire[24]创立了应变等效性假说，建立的岩石损伤模型为

$$\tilde{\sigma}=\frac{\sigma}{1-D} \tag{4}$$

式中：$\tilde{\sigma}$ 为有效应力；σ 为名义应力。

该模型认为损伤即岩石材料中的微裂隙，并且这些微裂隙一旦形成则不能承受任何应力。因此，当岩石达到完全损伤（即 D= 1）以后，岩石所受名义应力 σ =0，显然与实际具有残余强度不符。因此，沈珠江[25]和曹文贵等[26]提出了三轴压缩条件下，岩土材料新型损伤模型为

$$\sigma_1=\sigma_1'(1-D)+\sigma_1''D \tag{5}$$

式中：σ_1 为轴向名义应力；σ_1' 为轴向有效应力；σ_1'' 为有损部分所承受的轴向应力，其值等于残余强度。该模型如图 5 所示，空白部分表示未损伤，阴影部分表示有损伤。

根据应变等效性假说，轴向有效应力 $\sigma_1'=E\varepsilon_1$，这里 E 为弹性模量。所以在三轴压缩条件下岩石的应力–应变关系式可表达为[26]

$$\sigma_1=E\varepsilon_1(1-D)+[\sigma_1^{\mathrm{r}}-\mu(\sigma_2+\sigma_3)]D+\mu(\sigma_2+\sigma_3) \tag{6}$$

式中：σ_2 和 σ_3 为围压；σ_1^{r} 为残余强度。

对式（6）进行形式变换，可进一步得到损伤变量的计算公式为

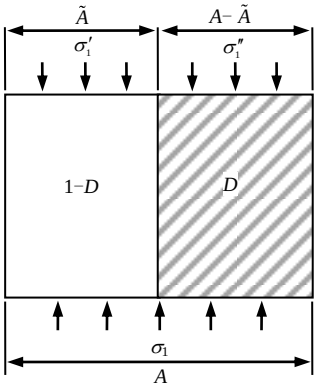


图 5 岩石微观单元轴向受力分析[26]

Fig.5 Axial mechanical analysis of rock micro unit[26]

$$D=\frac{\sigma_1-\mu(\sigma_2+\sigma_3)-E\varepsilon_1}{\sigma_1^{\mathrm{r}}-\mu(\sigma_2+\sigma_3)-E\varepsilon_1}=\left(1-\frac{\tilde{E}_1}{E}\right)\Big/\left(1-\frac{\tilde{E}_1^{\mathrm{r}}}{E}\right)=f(\varepsilon_1)\left(1-\frac{\tilde{E}_1}{E}\right) \tag{7}$$

式中：$\tilde{E}_1$ 为轴向广义变形模量，$\tilde{E}_1=[\sigma_1-\mu(\sigma_2+\sigma_3)]/\varepsilon_1$；$\tilde{E}_1^{\mathrm{r}}$ 为残余强度对应的广义变形模量，$\tilde{E}_1^{\mathrm{r}}=[\sigma_1^{\mathrm{r}}-\mu(\sigma_2+\sigma_3)]/\varepsilon_1$；$f(\varepsilon_1)=E/(E-\tilde{E}_1^{\mathrm{r}})$ 为轴向应变 ε_1 的函数。

可以看出，该模型中损伤的确定属于变形模量衰减的范畴，根据已有研究，采用通过变形模量衰减来计算损伤的前提条件是，应力–应变曲线过原点的切线斜率即为无损材料的弹性模量[27]。由以往岩石压缩试验结果可知，应力–应变曲线过原点的切线斜率显然不是岩石无损状态的弹性模量。因此，基于推广的应变等效理论[11]，提出了一种新的计算变形模量衰减的方法来确定损伤量，如图 6 所示。

图 6 应力–应变曲线中，弹性阶段的反向延长线与横轴相交，设交点为 ε_{cc}，称其为裂纹闭合应变，则对于应力–应变曲线上任意一点 $A(\varepsilon_1,\ \sigma_1)$ 的广义变形模量可改进表示为

$$\tilde{E}_1=\frac{\sigma_1-\mu(\sigma_2+\sigma_3)}{\varepsilon_1-\varepsilon_{cc}} \tag{8}$$

残余强度对应的广义变形模量可改进表示为

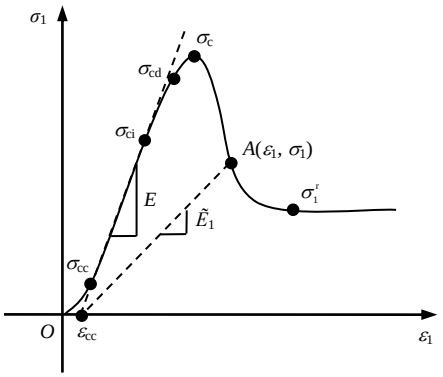


图 6　变形模量计算图

Fig.6　Calculation chart of deformation modulus

$$\tilde{E}_1^{\mathrm{r}}=\frac{\sigma_1^{\mathrm{r}}-\mu(\sigma_2+\sigma_3)}{\varepsilon_1-\varepsilon_{\mathrm{cc}}} \tag{9}$$

则改进后的损伤变量 D 为

$$D=(1-\frac{\tilde{E}_1}{E})/(1-\frac{\tilde{E}_1^{\mathrm{r}}}{E})=\frac{\sigma_1-\mu(\sigma_2+\sigma_3)-E(\varepsilon_1-\varepsilon_{\mathrm{cc}})}{\sigma_1^{\mathrm{r}}-\mu(\sigma_2+\sigma_3)-E(\varepsilon_1-\varepsilon_{\mathrm{cc}})} \tag{10}$$

3.2　损伤演化模型及方程

在 3.1 节损伤变量定义的基础上，假设岩石由无数微元组成，仅包括无损和有损两种类型的微元，横截面的微元总数为 k（$k\to+\infty$），如图 7 所示，白色部分表示无损微元，记其数量为 m，阴影部分表示有损微元，记其数量为 n，则有 $k=m+n$。并进一步假设：①微元的面积都相等，记为 A_0；②无损微元可以转化为有损微元，但有损微元不能转化为无损微元，且该转化过程瞬时完成；③微元受载变形破坏过程满足应变等效性假设。

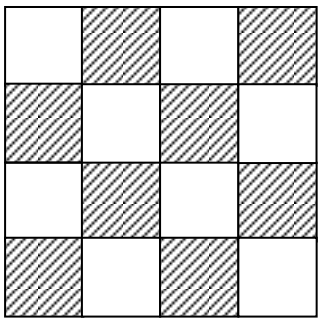


图 7　岩石微元结构示意图

Fig.7　Structural diagram of rock micro units

根据 3.1 节损伤变量的定义，则可将损伤变量进一步表达为

$$D=\frac{A-\tilde{A}}{A}=\frac{nA_0}{kA_0}=\frac{n}{k} \tag{11}$$

式中：$0\leqslant n\leqslant k$，所以损伤变量 $D\in[0,1]$。

岩石变形破坏是一个从局部开始、渐进演化的过程，最弱处首先产生缺陷，并不断衍生新缺陷，最终导致岩石破坏。因此，将岩石变形破坏的损伤演化过程可以看成是无损微元不断转化为有损微元的过程，则一个小的变形 $\Delta\varepsilon$ 过程中，新的有损微元的数量 $n(\varepsilon+\Delta\varepsilon)$ 是原有数量 $n(\varepsilon)$ 加上在 $\Delta\varepsilon$ 内由无损微元转化为有损微元的数量，即

$$n(\varepsilon+\Delta\varepsilon)=n(\varepsilon)+pm(\varepsilon)\Delta\varepsilon=n(\varepsilon)+p(k-n(\varepsilon))\Delta\varepsilon \tag{12}$$

或

$$\frac{\Delta n}{\Delta\varepsilon}=\frac{n(\varepsilon+\Delta\varepsilon)-n(\varepsilon)}{\Delta\varepsilon}=p(k-n(\varepsilon)) \tag{13}$$

式中：p 为无损微元转化为有损微元的生成率。

自然界中岩石缺陷的增长与已存在缺陷密切相关，已有缺陷越多越容易生成新的缺陷[28]，因此，有损微元的生成率 p 不再为常数，而是有损微元数量 $n(\varepsilon)$ 的增函数，可设为

$$p=r\frac{n(\varepsilon)}{k} \tag{14}$$

式中：r 为有损微元的自然生成率，即在没有限制的环境下的生成率。

将式（14）代入式（13），可得到有损微元的增长方程为

$$\frac{\Delta n}{\Delta\varepsilon}=r\frac{n(\varepsilon)}{k}(k-n(\varepsilon)) \tag{15}$$

将上式改写为微分形式，即为

$$\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}\varepsilon}=r\frac{n(\varepsilon)}{k}(k-n(\varepsilon)) \tag{16}$$

将损伤变量表达式（11）代入式（16），可得到损伤变量 D 的微分表达式为

$$\frac{\mathrm{d}D}{\mathrm{d}\varepsilon}=\frac{1}{k}\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}\varepsilon}=r\frac{n}{k}\left(1-\frac{n}{k}\right)=rD(1-D) \tag{17}$$

对式（17）进行积分，可得到损伤演化方程的表达式为

$$D=\frac{1}{1+\mathrm{e}^{a-r\varepsilon}} \tag{18}$$

式中：a=ln(k/n_0−1)反映了初始损伤程度，n_0 为初始时刻有损微元的数量；r 反映了损伤增长的快慢。

进一步可将式（18）变换为

$$\ln(1/D-1)=a-r\varepsilon \tag{19}$$

按 3.1 节式（10）计算损伤变量，将计算结果代入式（19），并进行线性拟合，就可以得到参数 a 和 r

的值，即可得出损伤演化方程。

3.3 本构方程

将损伤演化方程（18）代入式（6），即可得到岩石常规三轴压缩变形全过程的本构方程表达式为

$$\sigma_1 = E(\varepsilon_1-\varepsilon_{cc})\left(1-\frac{1}{1+e^{a-r(\varepsilon_1-\varepsilon_{cc})}}\right)+\frac{\sigma_1^r-\mu(\sigma_2+\sigma_3)}{1+e^{a-r(\varepsilon_1-\varepsilon_{cc})}}+\mu(\sigma_2+\sigma_3) \tag{20}$$

这里 $\varepsilon_1 \geqslant \varepsilon_{cc}$。由于围压作用，大多数岩石的裂纹闭合应变 ε_{cc} 接近于 0，且随着围压的增加，有 $\varepsilon_{cc}\to 0$，所以可以忽略 $0 \leqslant \varepsilon_1 < \varepsilon_{cc}$ 阶段的情况。

4 模型验证

4.1 实例验证

为了验证上述损伤本构模型的正确性，引用文献[3]石英岩常规三轴压缩试验数据，首先按 3.1 节方法，计算出石英岩的损伤量；再按照 3.2 节方法，通过 Logistic 拟合得出损伤演化方程，结果见表 2，效果见图 8。

表 2 损伤演化方程拟合结果

Table 2 Fitting equations of damage evolution equation

围压/MPa	弹性模量/GPa	裂纹闭合应变/%	损伤演化方程	拟合度
0	78.32	0.11	$D=\frac{1}{1+e^{15.79-35.81(\varepsilon_1-0.11)}}$	0.949
3	78.49	0.11	$D=\frac{1}{1+e^{7.43-11.44(\varepsilon_1-0.11)}}$	0.979
5	78.44	0.11	$D=\frac{1}{1+e^{6.28-8.52(\varepsilon_1-0.11)}}$	0.995
8	78.46	0.11	$D=\frac{1}{1+e^{5.58-6.72(\varepsilon_1-0.11)}}$	0.984

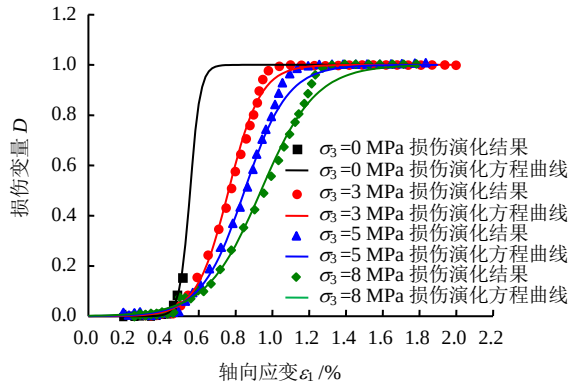


图 8 损伤演化结果与理论方程曲线比较

Fig.8 Comparison between calculated results and theoretical values of damage evolution equation

再进一步，按 3.3 节方法，将损伤演化方程代入式（5），可得到石英岩的本构方程，其与试验结果对比如图 9 所示。可以看出，本文建立的本构方程与试验数据吻合良好，可以反映岩石应变软化、残余强度阶段变形等特性，从而验证了本文损伤本构模型的合理性。

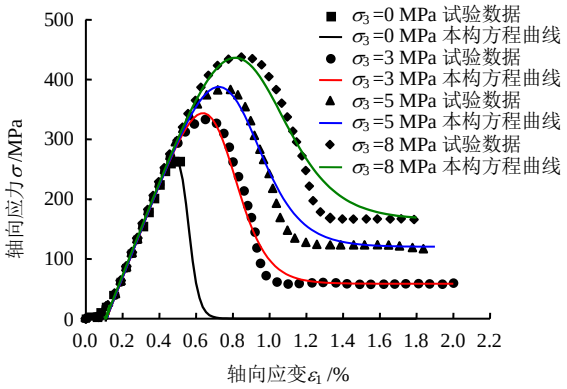


图 9 试验数据与本构方程曲线比较

Fig.9 Comparison between test results and theoretical curves of constitutive model

4.2 参数分析验证

在实例验证的基础上，进一步对模型中的参数进行分析，来验证模型的合理性。本文得出的损伤演化方程曲线如图 10 所示，从图中可以看出：①岩石压缩变形过程中，损伤量经历了无损伤、损伤开始、损伤加速、损伤变缓和完全损伤 5 个阶段，这与对岩石压缩变形过程中微裂隙演化的认识是一致的；②岩石轴向变形相同时，损伤量随着围压的增大而减小，也即是说达到相同损伤量，围压高的岩石所需轴向变形更大，这与围压对岩石损伤有抑制作用的认识也是一致的。

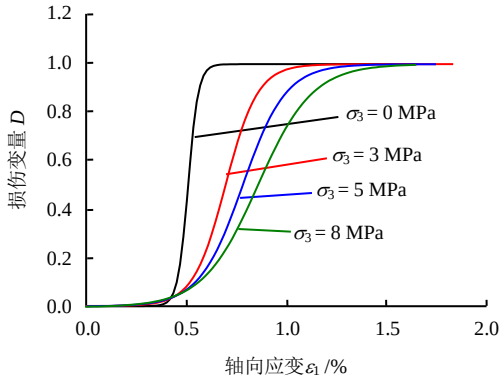


图 10 本文损伤演化方程曲线

Fig.10 Theoretical curves of damage evolution equation

本文得出的本构方程曲线如图 11 所示，从图中可以看出：①本构方程曲线能够表征岩石峰前及峰后全部变形特性，即线弹性阶段、塑性阶段、应变

软化阶段以及残余强度阶段的变形特性；②随着围压的增大，屈服强度、峰值强度和残余强度都增大，脆性逐渐向延性过渡。

综合上述参数分析，可以认为，本文提出的损伤本构模型具有合理性。

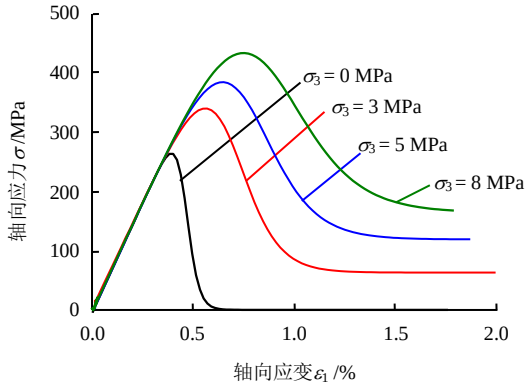


图 11　本文本构方程曲线

Fig.11　Theoretical curves of the constitutive model

5　结　论

（1）岩石压缩变形过程中，微裂隙的演化经历了无起裂、起裂并稳定扩展、加速扩展、扩展变缓以及扩展停止 5 个阶段。

（2）基于微元假说，提出的损伤演化模型，能够统一描述岩石变形破坏全过程的损伤规律，且损伤方程形式简单、参数物理意义明确。

（3）建立的损伤本构模型，能够模拟常规三轴压缩不同围压条件下，岩石峰前及峰后全部变形特性；通过与试验数据对比、参数分析，模型合理且模拟吻合度高，可以用于工程应用。

参 考 文 献

[1] 何满潮，谢和平，彭苏萍，等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803－2813.
HE Man-chao, XIE He-ping, PENG Su-ping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(16): 2803－2813.

[2] WAWERSIK W R, FAIRHURST C. A study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1970, 7(5): 561－575.

[3] YUMLU M, OZBAY M U. A study of the behaviour of brittle rocks under plane strain and triaxial loading conditions[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1995, 32(7): 725－733.

[4] PATERSON M S, WONG T. Experimental rock deformation: the brittle field[M]. Berlin: Springer, 2005.

[5] MOGI K. Deformation and fracture of rocks under confining pressure (2): Elasticity and plasticity of some rocks[J]. **Bulletin of the Earthquake Research Institute University of Tokyo**, 1965, 43: 349－379.

[6] 王伟，李雪浩，胡大伟，等. 脆性岩石三轴压缩渐裂过程中的渗透性演化规律研究[J]. 岩土力学，2016, 37(10): 2761－2768.
WANG Wei, LI Xue-hao, HU Da-wei, et al. Permeability evolution of brittle rock in progressive failure process under triaxial compression [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(10): 2761－2768.

[7] 卢允德，葛修润，蒋宇，等. 大理岩常规三轴压缩全过程试验和本构方程的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2489－2493.
LU Yun-de, GE Xiu-run, JIANG Yu, et al. Study on conventional triaxial compression test of complete process for marble and its constitutive equation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(15): 2489－2493.

[8] 衡帅，杨春和，张保平，等. 页岩各向异性特征的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(3) : 609－616.
HENG Shuai, YANG Chun-he, ZHANG Bao-ping, et al. Experimental research on anisotropic properties of shale[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(3) : 609－616.

[9] 张春会，赵全胜，王来贵，等. 三轴压缩岩石应变软化及渗透率演化的试验和数值模拟[J]. 煤炭学报，2015, 40(8): 1774－1782.
ZHANG Chun-hui, ZHAO Quan-sheng, WANG Lai-gui, et al. Test and numerical modeling on strain softening behavior and permeability evolution of rock under triaxial compression[J]. **Journal of China Coal Society**, 2015, 40(8): 1774－1782.

[10] GURSON A L. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth. Part I. Yield criteria and flow rules for porous ductile media[J]. **Journal of Engineering Materials and Technology**, 1975, 99(1): 297－300.

[11] 张全胜，杨更社，任建喜. 岩石损伤变量及本构方程的新探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 30－34.

ZHANG Quan-sheng, YANG Geng-she, REN Jian-xi. New study of damage variable and constitutive equation of rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(1): 30－34.

[12] 任建喜, 葛修润. 单轴压缩岩石损伤演化细观机理及其本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(4): 425－431.
REN Jian-xi, GE Xiu-run. Study of rock meso-damage evolution law and its constitutive model under uniaxial compression loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(4): 425－431.

[13] KRAJCINOVIC D, SILVA M A G. Statistical aspects of the continuous damage theory[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 1982, 18(7): 551－562.

[14] KRAJCINOVIC D. Continuous damage mechanics[J]. **Applied Mechanics Review**, 1984, 37(1): 1－5.

[15] 唐春安. 岩石破裂过程中的灾变[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.
TANG Chun-an. Break in rock failure[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1993.

[16] 曹文贵, 赵衡, 张永杰, 等. 考虑体积变化影响的岩石应变软硬化损伤本构模型及参数确定方法[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 647－654.
CAO Wen-gui, ZHAO Heng, ZHANG Yong-jie, et al. Strain softening and hardening damage constitutive model for rock considering effect of volume change and its parameters determination method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(3): 647－654.

[17] DARABI M K, AL-RUB R K A, LITTLE D N. A continuum damage mechanics framework for modeling micro-damage healing[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 2012, 49: 492－513.

[18] FENG Xi-qiao, YU Shou-wen. Damage micromechanics for constitutive relations and failure of microcracked quasi-brittle materials[J]. **International Journal of Damage Mechanics**, 2010, 19: 911－948.

[19] SHAO J F, CHAU K T, FENG X T. Modeling of anisotropic damage and creep deformation in brittle rocks[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2006, 43: 582－592.

[20] 张治亮, 徐卫亚, 王伟, 等. 韧性岩石常规三轴压缩试验及变形与损伤演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊 2): 3857－3862.
ZHANG Zhi-liang, XU Wei-ya, WANG Wei, et al. Investigation on conventional triaxial compression tests of ductile rock and law of deformation and damage evolution[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(Supp. 2): 3857－3862.

[21] FAIRHURST C E, HUDSON J A. Draft ISRM suggested method for the complete stress-strain curve for intact rock in uniaxial compression[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1999, 36(3): 279－289.

[22] RABOTNOV Y N. Creep rupture[M]//Applied Mechanics. Berlin: Springer, 1969: 342－349.

[23] KACHANOV L M. On creep rupture time[J]. **Izv. Akad. Nauk. SSSR, Otd. Techn. Nauk**, 1958, 8: 26－31.

[24] LEMAITRE J. A continuous damage mechanics model for ductile materials[J]. **Journal of Engineering Materials and Technology**, 1985, 107(1): 83－89.

[25] 沈珠江. 结构性黏土的弹塑性损伤模型[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(3): 21－28.
SHEN Zhu-jiang. An elasto-plastic damage model for cemented clays[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1993, 15(3): 21－28.

[26] 曹文贵, 赵衡, 李翔, 等. 基于残余强度变形阶段特征的岩石变形全过程统计损伤模拟方法[J]. 土木工程学报, 2012, 45(6): 139－145.
CAO Wen-gui, ZHAO Heng, LI Xiang, et al. A statistical damage simulation method for rock full deformation process with consideration of the deformation characteristics of residual strength phase[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2012, 45(6): 139－145.

[27] 谢和平, 鞠杨, 董毓利. 经典损伤定义中的“弹性模量法”探讨[J]. 力学与实践, 1997, 19(2): 1－5.
XIE He-ping, JU Yang, DONG Yu-li. Discussion on the method of elastic module in the classic damage definition[J]. **Mechanics and Practice**, 1997, 19(2): 1－5.

[28] 陈剑平. 岩土体变形的耗散结构认识[J]. 长春科技大学学报, 2001, 31(3): 288－293.
CHEN Jian-ping. Towards understanding of dissipative structure deformation process of rock and soil mass[J]. **Journal of Changchun University of Science and Technology**, 2001, 31(3): 288－293.