

基于八面体理论的岩石循环加-卸载本构模型及修正

罗吉安¹, 刘丰茂², 刘之喜², 马雷鸣², 陈烨开², 李欣慰²

(1. 安徽理工大学力学与光电物理学院, 安徽 淮南 232001;

2. 安徽理工大学土木建筑学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: 探究岩石的受力特点及破坏特性是研究岩石地下工程安全性的关键, 诸多学者都期望能在岩石本构模型的研究上取得突破性进展。在此背景下, 提出了一种能够描述循环加-卸载条件下岩石的本构模型。首先, 假设岩石的微元强度服从八面体剪应力理论并且微元破坏服从 Weibull 概率公式, 将岩石本构中的损伤变量以及岩石微元强度表达式里包含的损伤因子进行本构变换, 得到关于应力、应变等其他表现加-卸载下岩石损伤本构模型的参数, 表示出岩石微元强度和损伤变量, 再将得到的岩石微元强度和损伤变量代入所提出的岩石本构模型中, 并进行等式变换得到一个函数表达式。通过将其与实验数据进行拟合对比分析, 得出修正后的拟合参数, 将其代入函数式中, 得到损伤本构模型的修正式。最后将拟合参数进行必要的敏感性分析, 得出各拟合参数的实际物理意义。

关键词: 循环加-卸载; 本构模型; 八面体剪应力理论; 岩石

中图分类号: O347.3; TU457

文献标识码: A

岩石地下工程与人们的生命安全息息相关, 如隧道、地下井巷等, 主要原因是当岩石开挖后, 周围岩石失去原有的平衡状态, 内部的应力场也会发生变化。另外, 岩石地下工程难免受到周期加-卸载作用, 如地面交通周期荷载、地震等。众多学者对周期荷载作用下的岩石性质展开了研究, 但却较少涉及循环加-卸载作用下岩石的本构模型。因此, 将循环加-卸载作用引入岩石本构模型的研究中, 为岩石损伤本构模型研究提供新的思路。

岩石本构模型研究一直是岩石力学的重中之重, 虽然现有的岩石本构模型比较多, 但是往往存在许多问题, 难以反映实际情况。因此, 基于徐志英^[1]、刘佑荣^[2]等的岩石、岩体破坏理论, 研究人员从不同方向对岩石损伤本构模型进行了探讨。曹文贵等^[3-5]将岩石损伤本构理论与统计学理论有机地结合起来, 利用岩石微元强度服从 Weibull 随机分布的特点, 建立了岩石破裂全过程的损伤本构模型。在此基础上, 袁小平等^[6]将 Drucker-Prager 准则很好地运用到岩石弹塑性损伤本构模型的研究中, 建立了 Drucker-Prager 准则下的岩石损伤本构模型。李西蒙等^[7]分析了分级循环加-卸载应力-应变曲线特征和分级循环加-卸载下岩石疲劳损伤演化过程, 建立了循环加-卸载条件下轴向应变与循环数目之间的理论模型。王者超等^[8]通过花岗岩三轴循环试验, 系统地研究了花岗岩疲劳力学特性, 并提出了其疲劳力学模型。此外, 何明明等^[9]研究了循环加载过程变形 3 阶段的变形特性、循环软化与循环硬化、能耗特征, 并且建立了耗散能随循环次数变化的演化方程。张平等^[10-11]通过预测压气储能洞室

* 收稿日期: 2019-06-26; 修回日期: 2019-07-10

基金项目: 国家自然科学基金(51404013); 安徽高校自然科学基金重大项目(KJ2018ZD010); 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金(SKLGDUK1212)

作者简介: 罗吉安(1978—), 男, 博士, 副教授, 主要从事矿山工程力学的理论与应用研究。

E-mail: 19552433@qq.com

通信作者: 刘丰茂(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩石蠕变与损伤本构研究。

E-mail: liufmaust@163.com

的长期稳定性,提出了一种能够描述岩石循环加-卸载的本构关系,使岩石损伤本构模型研究取得了重大进展。

基于以上研究背景,本工作将基于 Weibull 随机分布特点的岩石损伤本构模型进行拓展,引入八面体剪应力理论,并假设岩石微元强度服从八面体剪应力理论并且微元破坏服从 Weibull 概率公式,通过加-卸载循环试验,描述每个循环内岩石强度及加-卸载模量的变化,进而提出循环加-卸载岩石损伤本构模型;进一步通过岩石损伤本构公式变换,得到关于应力、应变、泊松比、弹性模量以及其他能够表现加-卸载下岩石损伤本构模型的实验参数,将所采用的八面体剪应力理论以及各实验参数代入本构模型中,从而得到岩石的本构数学模型,并对单轴循环加-卸载作用下的岩石材料试验进行数据拟合,进一步分析所提出的岩石损伤本构模型以及各试验参数的物理意义。

1 岩石本构模型

1.1 本构模型的建立

根据岩石在变形前后应变等价的原则,即利用 J. Lemaitre 应变等价假说,建立岩石损伤本构关系

$$\sigma^* = \sigma / (1 - D) = E \epsilon^e / (1 - D) \quad (1)$$

式中: σ^* 为有效应力矩阵, σ 为名义应力矩阵, E 为岩石材料弹性矩阵, ϵ^e 为岩石弹性应变矩阵, D 为岩石损伤变量。对于以上建立的岩石损伤本构模型,损伤变量的确定是其关键,但是由于损伤变量的影响因素极为复杂,并且无法直接从试验中准确地获得,所以本研究结合岩石的破坏模型与判断依据,引入岩石微元强度和岩石破坏服从 Weibull 概率公式的特点,提出了基于八面体剪应力理论表示岩石损伤变量的方法。基于徐卫亚等^[12]采用的方法,即假定岩石的破坏准则通式为

$$f(\sigma^*) - k_0 = 0 \quad (2)$$

式中: k_0 是表示与材料黏聚力和内摩擦角有关的常数。式(2)虽然能够非常直观地表现出岩石微元强度的破坏情况,但却不能清楚地表现宏观状态下岩石破坏的程度,因此如何用岩石的微元强度表示宏观岩石强度将成为解决问题的关键。岩石内部由无数微元组成,两者是整体与个体的关系,故可引入概率统计学说,设岩石微元破坏的概率为 $P[f(\sigma^*)] = P[k_0]$,依据概率统计理论,损伤变量的破坏概率为

$$D = \int_0^{k_0} P(x) dx \quad (3)$$

1.2 岩石微元强度确定

岩石微元强度实际上决定了宏观条件下岩石破坏的危险程度,因此,选择何种强度准则或者理论来近似定义岩石微元强度将是岩石损伤本构模型建立的关键。目前,用 Drucker-Prager 破坏准则、Coulomb-Mohr 准则、莫尔库伦强度准则等定义岩石的微元强度,都取得了不错的研究进展。然而,有些岩石在两向或三向受力情况下,破坏之前的变形较大,没有明显的破坏荷载,表现出显著的塑性变形、流动或挤出,这种破坏即为塑性破坏。对于这类岩石,八面体剪应力理论认为,当八面体剪应力达到材料危险状态时的八面体剪应力值时,材料将处于危险状态,该理论更适用于复杂状态下的塑性材料,故八面体剪应力理论适用于定义某些复杂状态下岩石的微元强度。任何应力状态下的八面体剪应力理论可表示为

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (4)$$

式中: σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为 3 个主应力。故基于八面体剪应力理论下岩石的微元强度为

$$F = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1^* - \sigma_2^*)^2 + (\sigma_2^* - \sigma_3^*)^2 + (\sigma_3^* - \sigma_1^*)^2} \quad (5)$$

式中: σ_1^* 、 σ_2^* 、 σ_3^* 为损伤变量修正后的有效主应力。

1.3 三轴作用下岩石本构关系的建立

假设岩石为各向同性体, 并且其破坏时岩石的微元强度服从 Weibull 概率分布, 则岩石的概率密度分布函数为

$$P(F) = (m/F_0)(F/F_0)^{m-1} \exp[-(F/F_0)^m] \quad (6)$$

式中: F 为微元破坏 Weibull 分布的分布变量, m 和 F_0 为 Weibull 的分布参数。基于统计学理论, 将式(6)代入式(3), 变换整理后可得损伤变量为

$$D = \int_0^F P(x) dx = 1 - \exp[-(F/F_0)^m] \quad (7)$$

上述岩石损伤变量求解的关键在于岩石微元强度的确定, 本研究将八面体剪应力理论近似表示岩石的微元强度, 故将式(5)代入式(7)得出岩石损伤变量的最终表达式

$$D = \int_0^F P(x) dx = 1 - \exp\left[-\left(\frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1^* - \sigma_2^*)^2 + (\sigma_2^* - \sigma_3^*)^2 + (\sigma_3^* - \sigma_1^*)^2} / F_0\right)^m\right] \quad (8)$$

损伤力学中 J. Lemaitre 应变等价假说以及材料力学中广义胡克定律可表示为

$$\sigma^* = \sigma / (1 - D) \quad (9)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{E} [\sigma_1^* - \mu(\sigma_2^* + \sigma_3^*)] \quad (10)$$

式中: E 为弹性模量, μ 为泊松比。联立式(8)、式(9)、式(10), 可得岩石在三轴作用下的损伤关系

$$\sigma_1 = [E\varepsilon_1 + \mu(\sigma_2^* + \sigma_3^*)] \exp\left[-\left(\frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1^* - \sigma_2^*)^2 + (\sigma_2^* - \sigma_3^*)^2 + (\sigma_3^* - \sigma_1^*)^2} / F_0\right)^m\right] \quad (11)$$

所以, 岩石在三轴作用下的损伤本构模型可表示为

$$\sigma_1 = E\varepsilon_1 (1 - D) + \mu(\sigma_2 + \sigma_3) \quad (12)$$

或

$$\sigma_1 = E\varepsilon_1 \exp\left[-\left(\frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1^* - \sigma_2^*)^2 + (\sigma_2^* - \sigma_3^*)^2 + (\sigma_3^* - \sigma_1^*)^2} / F_0\right)^m\right] + \mu(\sigma_2 + \sigma_3) \quad (13)$$

1.4 单轴作用下岩石本构关系的建立

当岩石材料处于单轴状态下时, 仅受到单方向的力, 故将三轴作用下岩石本构关系进行公式变换, 即可得到单轴作用下岩石本构模型

$$\sigma = E\varepsilon \exp\left[-(\sqrt{2}(1 - \mu)E\varepsilon/3F_0)^m\right] \quad (14)$$

2 试验过程及数据分析

基于章清叙等^[13]周期荷载作用下红砂岩变形特性的试验方法, 本研究通过对砂岩的循环加-卸载试验(见图 1)来验证提出的岩石本构关系。选取直径为 50 mm、高为 100 mm 的标准岩石试件(见图 2), 并且要求砂岩试件两端不平行度误差不大于 0.05 mm。对每个试件都进行 6 个等级的加-卸载, 加载卸载过程不间断, 每次加载的峰值大约为 30、40、50、60、70、80 MPa, 当加载到第 6 等级时, 岩石自动急剧卸载, 岩石破坏。砂岩的循环加-卸载应力-应变曲线如图 3 所示。

从实验数据中可以看出, 岩石在循环加-卸载试验过程中存在残余变形, 并且第一次卸载时最大, 达到 0.12, 这是由于自然界岩石材料中存在诸多缝隙、空隙等, 在加载过程中, 这些空隙不断被压密, 形成了无法逆转的塑性变形, 这也符合葛修润等^[14-15]提出的岩石疲劳破坏和不可逆变形问题的结论。经过多次反复加载与卸载, 且每次施加的峰值荷载都比前一次施加的峰值荷载大, 塑性滞回环的面积也



图 1 循环加-卸载试验机

Fig. 1 Cyclic loading and unloading test machine



图 2 标准岩石试件

Fig. 2 Standard rock specimens

将有所扩充,岩石的弹性模量也有所增加,因此,结合岩石力学中砂岩弹性模量的经验取值,可将砂岩的弹性模量取值为 12 GPa。另外,由应力-应变曲线也可以看出,经过最后一个等级加载后,岩石急剧卸载,这是由于岩石在承受大约 82 MPa 后发生破坏,破坏后岩石无法再承受应力,所以,应力将急剧下降,直至为零。

3 参数拟合及本构修正

3.1 拟合公式的变换

目前,对于 Weibull 分布下的岩石损伤本构模型数据拟合过程,大部分采取在本构模型的基础上引进经验公式,进而推导出关于 m 和 F_0 的函数表达式。此种方法虽然可以拟合出 m 和 F_0 ,但形式过于复杂。本研究通过系列等式变换,将所提出的本构模型变换为较简单的关于 m 和 F_0 的数学表达式,再进行拟合,即可得到所需要的参数。首先,将式(14)进行变换,可得

$$\sigma/E\varepsilon = \exp\left[-(\sqrt{2}(1-\mu)E\varepsilon/3F_0)^m\right] \quad (15)$$

再进一步变换,得

$$\ln(\sigma/E\varepsilon) = -[\sqrt{2}(1-\mu)E\varepsilon/3F_0]^m \quad (16)$$

故

$$F_0[-\ln(\sigma/E\varepsilon)]^{\frac{1}{m}} = \sqrt{2}(1-\mu)E\varepsilon/3 \quad (17)$$

令 $A = -\ln(\sigma/E\varepsilon)$, $B = \sqrt{2}(1-\mu)E\varepsilon/3 \approx 0.47E\varepsilon - 0.47E\varepsilon\mu$, $n = \frac{1}{m}$, 可得出本构变换方程为

$$B = F_0 A^n \quad (18)$$

3.2 拟合数据的处理及分析

本研究采用单轴循环加-卸载试验对所提出的岩石本构关系进行验证。首先,对所选试件进行分等级加-卸载试验,并根据实验数据对所有循环下的实验曲线进行拟合,然后选取试验曲线拟合程度较好的典型试验结果曲线(见图 4、图 5),再进行整理分析。

对实验数据进行拟合处理后,便可分别得到加载阶段曲线和卸载阶段曲线,由加-卸载曲线可知:实验数据拟合曲线的拟合校正系数均在 0.98 以上(第 1 等级加载除外),说明拟合效果非常好。另外,

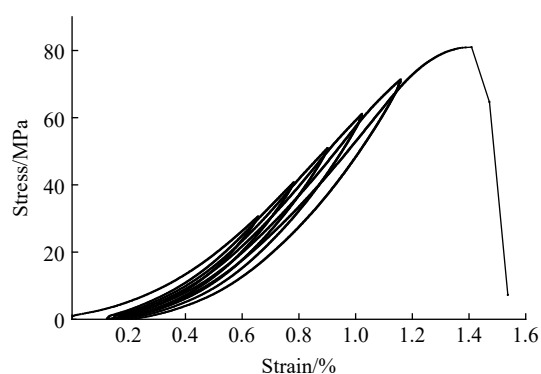


图 3 试验应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curve of the tests

第 1 等级加载的拟合校正系数只有 0.93, 拟合程度较低。这是由于第 1 次加载时, 加载峰值应力只有 30 MPa, 并且岩石在自然状态下, 内部有许多空隙和缝隙, 当初次加载时, 大多数情况只是将岩石内部的空隙和缝隙压密, 损伤积累得也不明显, 因此并不十分符合所提出的岩石本构模型。

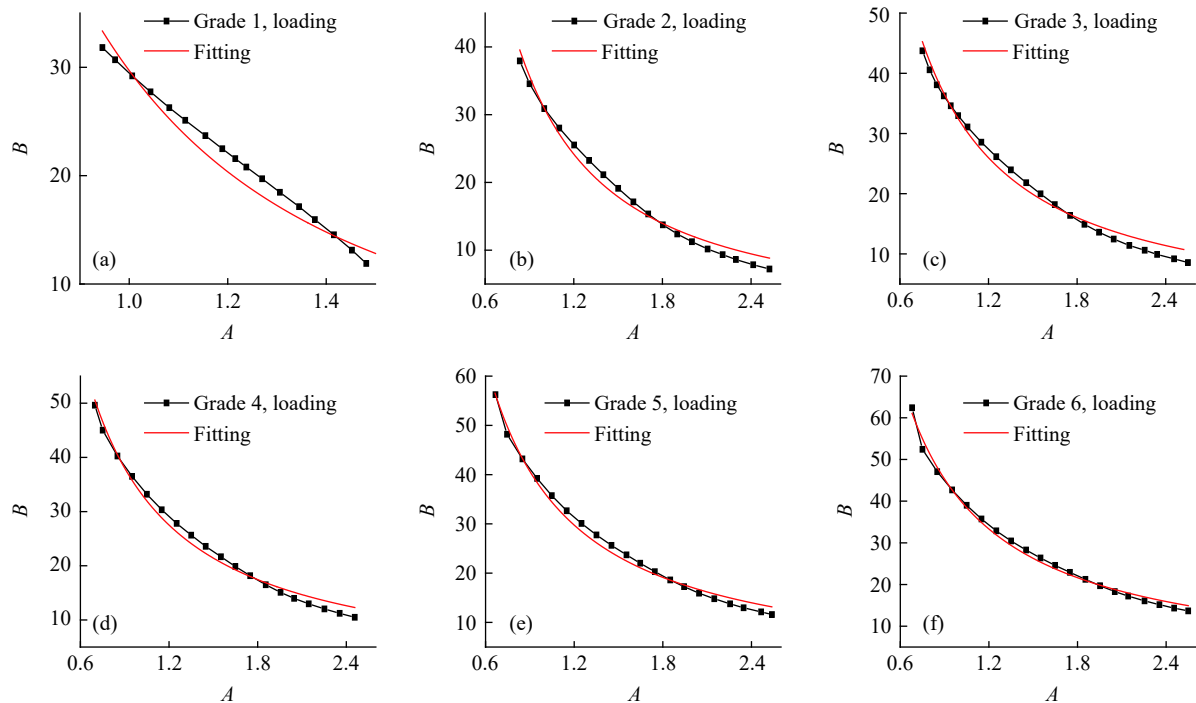


图 4 加载阶段 B - A 曲线拟合

Fig. 4 B - A fitting curve during loading stage

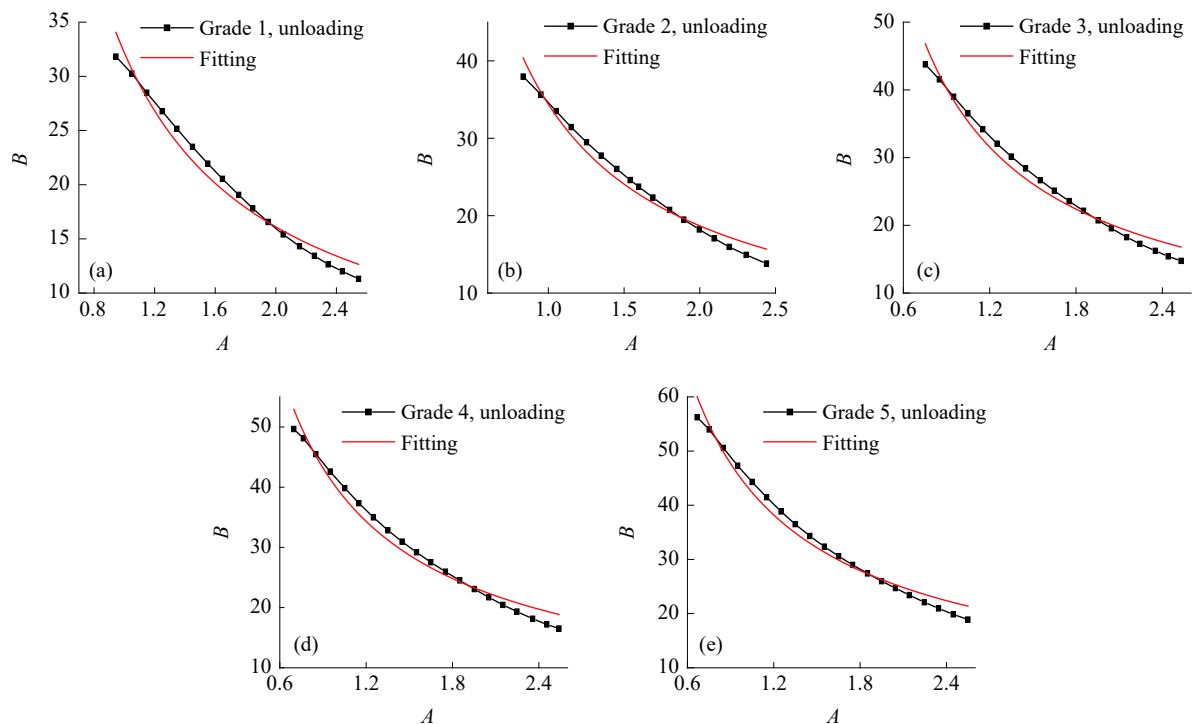


图 5 卸载阶段 B - A 曲线拟合

Fig. 5 B - A fitting curve during unloading stage

随着加-卸载等级的提高,拟合程度愈加完美,尤其在加载过程中表现得十分明显,岩石在不同等级加载下,开始时所承受的应力较小,随着等级增加,应力逐渐地增加,岩石内部损伤不断积累,故损伤本构模型的拟合效果趋于良好。另外,通过表 1 可以观察到,卸载过程时拟合效果提高得并不非常明显,但总体拟合效果良好。

表 1 加-卸载等级参数

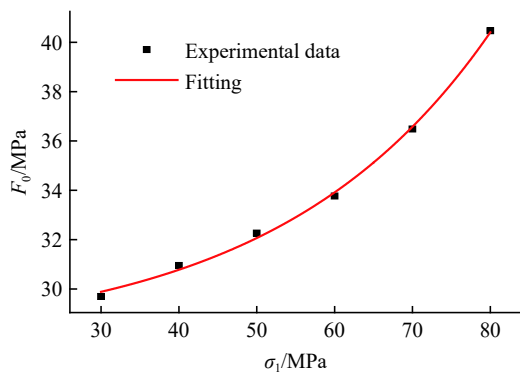
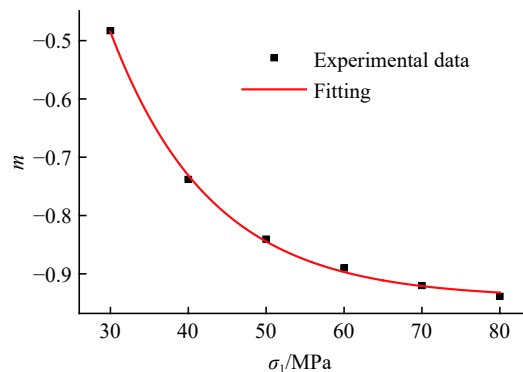
Table 1 Parameters of each loading and unloading level

Loading and unloading grade	m	F_0	R^2
Grade 1, loading	-0.483 01	29.691 94	0.932 97
Grade 2, loading	-0.737 97	30.952 10	0.983 45
Grade 3, loading	-0.840 34	32.264 57	0.984 80
Grade 4, loading	-0.890 04	33.767 98	0.988 36
Grade 5, loading	-0.920 34	36.484 55	0.991 11
Grade 6, loading	-0.938 51	40.468 44	0.993 62
Grade 1, unloading	-1.001 48	32.181 62	0.972 66
Grade 2, unloading	-1.135 50	34.403 39	0.975 51
Grade 3, unloading	-1.183 00	36.806 63	0.973 74
Grade 4, unloading	-1.252 52	39.700 14	0.976 53
Grade 5, unloading	-1.297 34	43.966 39	0.978 54

根据表 1 中各加-卸载等级的参数可知,参数 m 与加-卸载等级的大小呈反比,而参数 F_0 与加-卸载等级的大小呈正比,也就是说随着加-卸载等级的提高,参数 m 减小,参数 F_0 增大。在循环加-卸载过程中,岩石所受到的峰值应力逐渐增加,岩石强度逐渐增大,可认为岩石的强度随 F_0 的增大而增大,故 F_0 反映出岩石的宏观平均强度。另外,在不断的循环荷载作用下,岩石的微元强度有所减小,因此, m 有可能与岩石微元强度有关,反映了岩石微元强度分布的集中程度, m 越小,岩石塑性程度将越高,对于两个参数的性质及物理意义则需要更加具体的分析。

3.3 损伤本构模型的修正

通过以上对参数 m 、 F_0 的分析可以看出,参数 m 、 F_0 的变化规律受所施加应力的影响,如果能够分析参数 m 、 F_0 与所施加应力的关系并进行拟合,就能比较有效地对岩石损伤模型进行修正。如图 6、图 7 所示,将参数 m 、 F_0 分别作为纵坐标,岩石所受到的应力为横坐标,取每次循环加载的峰值应力 30、40、50、60、70、80 MPa 为横坐标参考点,可得到 F_0 - σ_1 与 m - σ_1 散点分布图,采用双曲线进行拟合,

图 6 Weibull 分布参数 F_0 与正应力 σ_1 的关系Fig. 6 Relation between Weibull distribution parameter F_0 and the normal stress σ_1 图 7 Weibull 分布参数 m 与正应力 σ_1 的关系Fig. 7 Relation between Weibull distribution parameter m and the normal stress σ_1

可得到

$$F_0 = 0.684\ 35 \exp(\sigma_1/27.491\ 45) + 17.846\ 35 \quad (19)$$

$$m = 4.660\ 29 \exp(-\sigma_1/12.917\ 26) - 0.941\ 63 \quad (20)$$

式(19)和式(20)的拟合系数分别高达 0.997 02 和 0.998 23, 也就是说在不同应力情况下参数 m 、 F_0 的变化规律较符合拟合公式。将式(19)、式(20)代入式(14), 即可得到修正后的损伤本构模型。

4 敏感性分析

通过对加-卸载过程中实验数据的拟合发现, 本构模型中的参数 m 、 F_0 具有一定的变化规律, 并且这些变化与刘树新等^[16]提出的 Weibull 参数变化规律相似。因此, 本研究进行了本构损伤模型参数的敏感性分析, 进一步确定参数的具体物理意义。

以拟合效果较好的第 6 次循环加载阶段为例, 首先将 m 固定为拟合值 -0.938 517 71, 分别对 F_0 取 20、25、30、35、40、45, 将其参数分别代入损伤本构模型, 即可得到 F_0 取值不同情况下的应力-应变曲线, 如图 8 所示。

从图 8 可以看出, 随着 F_0 的增大, 应力-应变曲线趋于平缓, 岩石的峰值强度也逐渐减小, 进一步表明参数 F_0 与岩石的宏观平均强度有关。另外, 从表 1 可以观察到, 随着加-卸载等级的增加, 参数 F_0 逐渐增加, 岩石的平均宏观强度逐渐降低。这是由于在不断加-卸载过程中, 岩石的内部损伤逐渐积累, 使得岩石宏观强度随之降低, 即对试样第 1 次加载达到某个值后卸载, 且试样不破坏, 对所得数据进行分析整理后, 对试样第 2 次加载达到某个值后卸载, 且试样不破坏, 再对所得数据进行分析整理后, 对试样进行第 3 次加载达到某个值后卸载, 且试样不破坏, 依次类推, 当进行第 6 次加载时试件破坏。进行多组试验, 取典型曲线进行敏感性分析, 最终得出参数 F_0 可能与岩石的平均宏观强度有关, 与参数 F_0 的敏感性情况一致。

同样以拟合效果较好的第 6 次循环加载阶段为例, 将参数 F_0 固定为拟合值 40.468 44, 分别对 m 取 0、-0.5、-1.0、-1.5、-2.0、-2.5。将其参数分别代入损伤本构模型, 即可得到 m 不同情况下的应力-应变曲线, 如图 9 所示。

从图 9 可以发现: 当理论应力值小于 32 MPa 时, 随着参数 m 的减小, 理论应力值逐渐减小; 反之, 当理论应力值大于 32 MPa 时, 随着参数 m 的减小, 理论应力值逐渐增大。除此之外, 随着参数 m 的减小, 理论应力值的增长速率是逐渐增加的, 其中参数 m 与岩石微元强度分布的集中程度有关, 即 m 越小, 岩石微元强度分布的集中程度越高, 理论应力值的增长速率越高, 故岩石脆性增加。岩石在初始加载时内部变形一般较小, 但随着循环加-卸载等级的增加, 岩石内部产生损伤逐渐积累, 其变形量将急剧增加, m 逐渐减小, 岩石微元强度分布的集中程度也越高, 岩石逐渐向脆性发展。

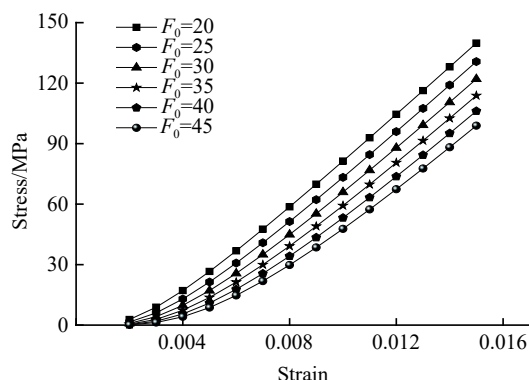


图 8 参数 F_0 的敏感性分析情况

Fig. 8 Sensitivity analysis of parameter F_0

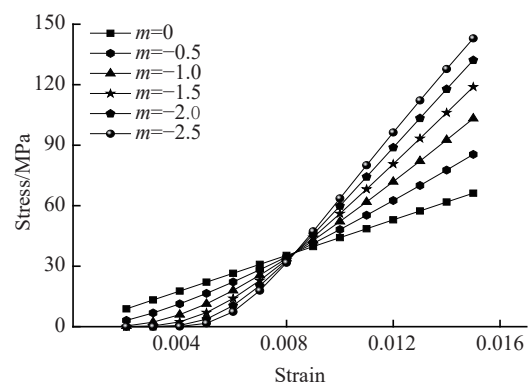


图 9 参数 m 敏感性分析情况

Fig. 9 Sensitivity analysis of parameter m

5 结 论

(1)从岩石损伤的理念出发,假设岩石的微元强度服从八面体剪应力理论并且微元破坏服从Weibull 概率公式,建立了基于八面体剪应力理论的循环加-卸载下岩石的损伤本构模型,该模型具有灵活性好、参数少、便于拟合等优点。

(2)在数据处理拟合过程中,采取先将本构损伤模型进行等式变换后再进行拟合的方法,将复杂的损伤本构拟合过程转变为较为简单的幂函数拟合,省去了非线性拟合数值选取的复杂过程,为损伤本构模型的拟合提供了一种新的参考方法。

(3)将数据拟合后得到的参数进行整理分析,并对所得到的参数值进行重新拟合分析,最终得到修正后的损伤本构模型,修正后的本构关系将更好地描述循环加-卸载曲线,比之前更具有实际意义。

(4)在循环加-卸载情况下,参数 F_0 与岩石的宏观平均强度有关,参数 m 与岩石微元强度分布的集中程度有关。随着加-卸载等级的提高,参数 m 减小,岩石微元强度分布的集中程度提高,岩石逐渐向脆性发展,而参数 F_0 增大,岩石的平均宏观强度则逐渐降低。

参考文献:

- [1] 徐志英. 岩石力学 [M]. 北京:水利电力出版社, 1986.
XU Z Y. Rock mechanics [M]. Beijing: Water Conservancy and Electricity Press, 1986.
- [2] 刘佑荣, 唐辉明. 岩体力学 [M]. 北京:中国地质大学出版社, 1999.
LIU Y R, TANG H M. Rock mass mechanics [M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 1999.
- [3] 曹文贵, 方祖烈, 唐学军. 岩石损伤软化统计本构模型之研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(6): 628–633.
CAO W G, FANG Z L, TANG X J. A study of statistical constitutive model for soft and damage rocks [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(6): 628–633.
- [4] 曹文贵, 赵明华, 唐学军. 岩石破裂过程的统计损伤模拟研究 [J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 184–187.
CAO W G, ZHAO M H, TANG X J. Study on simulation of statistical damage in the full process of rock failure [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(2): 184–187.
- [5] 曹文贵, 张升. 基于 Mohr-Coulomb 准则的岩石损伤统计分析方法研究 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2005, 32(1): 43–47.
CAO W G, ZHANG S. Statistical analysis of rock damage based on Mohr-Coulomb criterion [J]. Journal of Hunan University (Natural Science Edition), 2005, 32(1): 43–47.
- [6] 袁小平, 刘红岩, 王志乔. 基于 Drucker-Prager 准则的岩石弹塑性损伤本构模型研究 [J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1103–1108.
YUAN X P, LIU H Y, WANG Z Q. Study of elastoplastic damage constitutive model of rocks based on Drucker-Prager criterion [J]. Geotechnical Mechanics, 2012, 33(4): 1103–1108.
- [7] 李西蒙, 刘长友, 鲁岩, 等. 单轴分级循环加载条件下砂岩疲劳变形特性与损伤模型研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(1): 8–17.
LI X M, LIU C Y, LU Y, et al. Fatigue deformation characteristics and damage model of sandstone subjected to uniaxial step cyclic loading [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2017, 46(1): 8–17.
- [8] 王者超, 赵建纲, 李术才, 等. 循环荷载作用下花岗岩疲劳力学性质及其本构模型 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(9): 1888–1900.
WANG Z C, ZHAO J G, LI S C, et al. Fatigue mechanical behavior of granite subjected to cyclic load and its constitutive model [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(9): 1888–1900.
- [9] 何明明, 陈蕴生, 李宁, 等. 单轴循环荷载作用下砂岩变形特性与能量特征 [J]. 煤炭学报, 2015, 40(8): 1805–1812.
HE M M, CHEN Y S, LI N, et al. Deformation and energy characteristics of sandstone subjected to uniaxial cyclic loading [J]. Journal of Coal Mine, 2015, 40(8): 1805–1812.
- [10] 张平阳, 夏才初, 周舒威, 等. 循环加-卸载岩石本构模型研究 [J]. 岩土力学, 2015, 12(36): 3354–3359.
ZHANG P Y, XIA C C, ZHOU S W, et al. A constitutive model for rock under cyclic loading and unloading [J]. Geotechnical Mechanics, 2015, 12(36): 3354–3359.
- [11] 夏才初, 张平阳, 周舒威, 等. 大规模压气储能洞室稳定性和洞周应变分析 [J]. 岩土力学, 2014, 35(5): 1391–1398.
XIA C C, ZHANG P Y, ZHOU S W, et al. Stability and tangential strain analysis of large-scale compressed air energy storage

- cavern [J]. *Geotechnical Mechanics*, 2014, 35(5): 1391–1398.
- [12] 徐卫亚, 韦立德. 岩石损伤统计本构模型的研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(6): 787–791.
XU W Y, WEI L D. Study on statistical damage constitutive model of rock [J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(6): 787–791.
- [13] 章清叙, 葛修润, 黄铭, 等. 周期荷载作用下红砂岩三轴疲劳变形特性试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(3): 473–478.
ZHANG Q X, GE X R, HUANG M, et al. Testing study on fatigue deformation law of ren-sandstone under triaxial compression with cyclic loading [J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(3): 473–478.
- [14] 葛修润, 卢应发. 循环荷载作用下岩石疲劳破坏和不可逆变形问题的探讨 [J]. *岩土工程学报*, 1992, 14(3): 56–60.
GE X R, LU Y F. Discussion on fatigue failure and irreversible deformation of rock under cyclic loading [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1992, 14(3): 56–60.
- [15] 葛修润, 蒋宇, 卢允德, 等. 周期荷载作用下岩石疲劳变形特性试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(10): 1581–1585.
GE X R, JIANG Y, LU Y D, et al. Testing study on fatigue deformation law of rock under cyclic loading [J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(10): 1581–1585.
- [16] 刘树新, 刘长武, 韩小刚, 等. 基于损伤多重分形特征的岩石强度 Weibull 参数研究 [J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(11): 1786–1791.
LIU S X, LIU C W, HAN X G, et al. Weibull distribution parameters of rock strength based on multi-fractal characteristics of rock damage [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(11): 1786–1791.

Study and Correction of Cyclic Loading-Unloading Constitutive Model of Rock Based on Octahedral Theory

LUO Ji'an¹, LIU Fengmao², LIU Zhixi², MA Leiming², CHEN Yekai², LI Xinwei²

(1. *School of Mechanics and Optoelectronics Physics, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China;*

2. *School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China*)

Abstract: Exploring the stress and failure characteristics of rock is the key to study the safety of rock underground engineering, thus many scholars expect to make breakthrough in the study of rock constitutive model. In this paper, a constitutive model is proposed to describe the rock under cyclic loading and unloading. Firstly, it is assumed that the micro-unit strength of rock obeys Octahedral shear stress theory and the micro-unit failure of rock obeys Weibull probability formula, and the damage variables in rock constitution and the damage factors contained in micro-unit strength of rock expression are transformed into the constitutive equation. Then the parameters such as stress, strain and others representing the damage constitutive model of rock under loading and unloading can be obtained and are used to express the micro-unit strength and damage variables. Substituting the micro-unit strength and damage variables into the proposed rock constitutive model, a function expression can be carried out by an equation transformation. Through the comparison and analysis of the fitting data with the experimental results, the modified fitting parameters are acquired, and can be substituted into the function to revise the damage constitutive model. Finally, the necessary sensitivity analysis of the fitting parameters is implemented to obtain the practical physical significance of each fitting parameter.

Keywords: cyclic loading and unloading; constitutive model; octahedral shear stress theory; rock