

基于非线性动态强度准则的岩石动态变形过程 统计损伤模拟方法

曹文贵, 林星涛, 张超, 杨尚

(湖南大学 岩土工程研究所, 湖南 长沙 410082)

摘要: 岩石动态应变率对岩石动态变形过程具有极其重要的影响, 因此, 首先考虑岩石动态应变率对岩石强度的非线性影响特点, 通过对现有岩石动态强度准则进行改进, 建立反映应变率影响的非线性岩石动态强度准则, 为岩石动态变形过程模拟方法研究奠定了坚实的基础; 然后, 采用本文非线性动态强度准则, 在重点探讨考虑应变率影响的岩石微元强度度量方法基础上, 引入统计损伤理论建立岩石动态统计损伤本构模型, 并提出基于岩石动态三轴试验曲线的模型参数确定方法, 进而建立岩石动态变形过程模拟方法。它不仅能反映应力状态而且能反映应变率对岩石变形过程的影响; 最后, 通过与现有同类模型理论曲线以及相应试验曲线的比较分析, 表明了提出模型与方法的合理性与优越性。

关键词: 岩石力学; 非线性动态强度准则; 应变率; 统计损伤; 动态本构模型

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2017)04 - 0794 - 09

A statistical damage simulation method of dynamic deformation process for rocks based on nonlinear dynamic strength criterion

CAO Wengui, LIN Xingtao, ZHANG Chao, YANG Shang

(*Institute of Geotechnical Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China*)

Abstract: The dynamic strain rate has a great effect on the dynamic deformation process of rocks. Considering the nonlinear effect of dynamic strain rate of rocks on their strength, a nonlinear dynamic strength criterion reflecting the influence of strain rate was developed based on the improvement to the existing dynamic strength criterions of rocks. With the nonlinear dynamic strength criterion proposed and the measurement method of the microelement strength considering the effect of the strain rate of rocks, a dynamic statistical damage constitutive model for rocks was proposed based on the statistical damage theory. A method for determining the model parameters based on the dynamic stress-strain curves from the dynamic triaxial test of rocks was also put forward. A method simulating the dynamic deformation process of rocks was established, which reflect the influence of not only stress state but also strain rate on the dynamic deformation process of rocks. Finally, a comparison between the experimental and theoretical curves of this model and other existing similar models was carried out and the rationality and advantage of the proposed model in this paper were demonstrated.

收稿日期: 2016 - 07 - 07; **修回日期:** 2016 - 11 - 21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51378198); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20130161110017)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51378198) and Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China(Grant No. 20130161110017)

作者简介: 曹文贵(1963 -), 男, 博士, 1985年毕业于北京钢铁学院采矿工程专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: cwglyp@hnu.edu.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.0755

Key words: rock mechanics; nonlinear dynamic strength criterion; strain rate; statistical damage; dynamic constitutive model

1 引言

岩石或岩体结构经常受动态荷载(如地震、爆破和冲击等)作用,此时,岩石的动态变形性质极为复杂,岩石的强度和刚度等均会因其所受荷载的性质(如加载速度或应变率等)变化而显著变化,致使岩石变形过程表现出强烈的非线性变形特征,因此,如何考虑岩石动态变形特征进而发展岩石变形过程模拟方法成为岩石动态本构关系研究的核心,这正是本文研究的出发点。

岩石动态变形过程模拟研究的主流方法是过应力模型理论^[1]。目前采用该方法获得的岩石动态本构模型较多^[2-3],使用它们模拟岩石动态变形过程取得了较好的效果,但是,由于该类模型没有充分反映岩石变形力学参数(主要指模量)受岩石动态变形性质的影响,而且,一般只考虑了单轴应力下的岩石动态变形过程的模拟,因而,将其应用于岩石动态变形过程模拟时,其效果不很理想,应用也受到限制。

为此,谢理想等^[1, 4-5]将损伤理论引入岩石动态本构模型研究,并结合黏塑性理论与过应力模型理论,对岩石动态变形过程模拟方法进行较深入研究,获得了新型岩石动态损伤本构模型。虽然该模型较前一类模型能更好地反映岩石动态变形性质对岩石动态变形力学参数的影响,但是,由于其在建立动态损伤本构模型时认为岩石损伤仅与动态变形大小有关,致使该类岩石动态本构模型仍存在较大的局限性。其一,岩石的破坏即损伤并不直接取决于动态变形或应变的大小,而是直接决定于岩石所受应力水平的高低,因此,采用基于动态应变的岩石损伤演化模型难以准确反映岩石动态损伤的力学机制;其二,虽然动态应变能在一定程度上可反映岩石动态损伤的程度,但岩石动态损伤还与加载速度或应变率存在密切关系,因为岩石强度也与加载速度或应变率相关,上述模型并未反映这一特征;再者,该模型仅考虑了单轴应力下的岩石动态变形过程的模拟,不能适用于三维应力状态下的岩石动态变形过程模拟,正因为如此,采用该类模型模拟岩石动态变形过程的效果仍然不佳。

于是,曹文贵等^[6-8]基于岩石强度准则建立出岩

石动态损伤模型,并在此基础上结合黏塑性理论发展了岩石动态变形过程模拟的新型动态统计损伤本构模型。它克服了采用动态应变无法直接而准确地描述岩石损伤演化过程的缺陷,使所建立的损伤模型能更好地刻画岩石损伤的力学机制,因而该模型较前述同类模型具有明显的优势,但仍然存在一定的局限性。首先,由于该模型将岩石动态应力视为静态应力与因岩石动态性质引起的惯性力的叠加,而惯性力只与动态应变率相关,它与岩石所受应力的大小无关,致使利用该模型模拟岩石动态变形过程时的岩石动态应力始终包含由应变率引起的惯性力,换句话说讲,即使岩石不受荷载作用,岩石动态应力也不为 0,而且,应变率越大,即使当动态应变为零时的动态应力与实际相差也越大,这显然与实际情况相悖;其次,由于在建立该动态统计损伤本构模型时采用的岩石强度准则是静态强度准则,无法反映岩石动态变化对其强度的影响。综合上述两方面原因,该岩石动态统计损伤本构模型最多只能模拟低加载速度或低动态应变率条件下的岩石动态变形过程,无法准确反映高加载速度或高应变率条件下岩石动态变形特性。但是,无论如何该研究方法为岩石动态变形过程模拟方法研究提供了一条可行的研究思路和途径,只要能充分考虑高应变率对岩石动态变形性质的影响对此作出改进,就有望使岩石动态变形过程模拟方法获得明显的改善,这正是本文研究的核心内容。

为此,本文将首先考虑高应变率下岩石动态变形的特点,从探讨适合不同应变率(包括低应变率和高应变率)条件下岩石动态强度准则出发,引进统计损伤理论对岩石动态变形过程模拟方法进行进一步深入研究,进而提出适合于高低动态应变率条件的岩石动态统计损伤本构模型,以期完善岩石动态变形过程模拟的理论与方法。

2 岩石动态强度准则

由于本文研究旨在引进统计损伤理论探讨复杂应力状态下岩石动态变形过程模拟方法,而该方法的关键在于基于岩石强度准则建立出岩石损伤演化模型,可是,岩石强度与岩石动态性质密切相关,致使岩石动态强度与加载速度或动态应变率具有明

显的非线性关系，采用线性静态强度准则不能反映岩石动态破坏机制，因此，为了使利用统计损伤理论建立出的岩石动态变形本构模型能更好地模拟岩石动态变形过程，必须首先对岩石动态强度准则进行深入研究，以建立出适应于不同加载速度或应变率条件下的岩石动态强度准则。下面将以现有研究为基础，探讨合理的岩石动态强度准则。

为了建立岩石动态强度准则，赵 坚和李海波^[9]通过对新加坡 Bukit Timah 花岗岩进行一系列动力学试验，并在此基础上，通过对试验数据进行系统分析，总结出了动态荷载作用下的岩石 Mohr-Coulomb 强度准则，其在一定程度上反映了岩石强度的动态性质，但它仅适用于低加载速度或低动态应变率情况，存在较大的局限性。于是，戚承志和钱七虎^[10]基于现有研究成果，对不同应变率区岩石强度的应变率依赖性机制及其转化进行了探讨，提出了基于热活化与黏性机制的岩石单轴动力强度与应变率依赖的强度准则，可表示为

$$Y = C_1 + C_2 T \ln(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0) + b(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_s)^n / [(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_s)^n + 1] \quad (1)$$

式中： Y 为岩石单轴动态强度； $\dot{\epsilon}$ 为岩石单轴动态应变率； $\dot{\epsilon}_0$ 为岩石单轴极限应变率； b 为宏观黏性对强度增长的贡献的最大幅值； $\dot{\epsilon}_s$ 为岩石强度 - 应变率半对数曲线的拐点对应的应变率； T 为岩石材料的起始温度； C_1, C_2, n 为材料常数。该准则虽然反映了岩石动态强度受热活化机制和黏性机制的共同影响特点，但是，它不能反映复杂应力状态对岩石动态强度的影响。钱七虎和戚承志^[11]针对复杂应力状态岩石工程问题提出了复杂应力状态岩石动态强度准则，但是该动态强度准则较为复杂，不便于工程应用，为此，本文将在此基础上作进一步探讨，以提出简单而又能反映强度动态特征的岩石动态强度准则。具体分析方法与过程如下所述。

2.1 新型岩石动态强度准则

众所周知，静态岩石 Mohr-coulomb 强度准则可表示为

$$\sigma_1 = \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} + \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (2)$$

式中： σ_1, σ_3 分别为岩石最大和最小主应力； c 和 φ 分别为岩石静态黏聚力和内摩擦角。令 $\sigma_3 = 0$ 代入式(2)可得岩石单轴压缩条件下黏聚力，可表示为

$$c = \sigma_1 \frac{1 - \sin \varphi}{2 \cos \varphi} \quad (3)$$

由于赵 坚等^[9, 12]的研究已表明，动态荷载作用下的岩石动态强度变化主要由黏聚力变化引起，内

摩擦角在不同加载速度下只有较小的变化，因此，可忽略内摩擦角变化对岩石动态强度的影响。于是，将式(3)中的单轴静态应力 σ_1 替换为单轴动态应力 Y 即式(1)可得动态黏聚力 c_d ，可表示为

$$c_d = \frac{1 - \sin \varphi}{2 \cos \varphi} \left[C_1 + C_2 T \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} + \frac{b(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_s)^n}{(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_s)^n + 1} \right] \quad (4)$$

由式(4)可以看出，岩石动态黏聚力可视为由静态和动态效应两部分的叠加，其较明显地揭示了岩石动态黏聚力的力学机制和物理意义。于是，令 $c = c_d$ ，并将其代入式(2)可得复杂应力状态下岩石动态强度准则，可表示为

$$\sigma_{1d} = \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} + C_1 + C_2 T \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} + \frac{b(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_s)^n}{(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_s)^n + 1} \quad (5)$$

很显然，式(5)也必须符合静态条件下岩石强度准则，对于静态问题，式(5)中右边最后两项必然均为 0，即

$$\sigma_1 = \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} + C_1 \quad (6)$$

于是，比较式(2)，(6)可得

$$C_1 = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (7)$$

再将式(7)代入式(5)，则式(5)亦可改写为

$$\sigma_{1d} = \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} + \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} + C_2 T \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} + \frac{b(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_s)^n}{(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_s)^n + 1} \quad (8)$$

对于一般岩石工程，温度变化较小，可将温度 T 视为常数，因此，可令 $A = C_2 T$ (常数)，将其代入式(8)即可得到本文提出的非线性动态强度准则，可表示为

$$\sigma_{1d} = \alpha \sigma_3 + k + A \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} + \frac{b(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_s)^n}{(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_s)^n + 1} \quad (9)$$

其中，

$$\alpha = (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi) \quad (10)$$

$$k = 2c \cos \varphi / (1 - \sin \varphi) \quad (11)$$

由此可以看出，本文提出的岩石动态强度准则能反映岩石动态应变率对岩石强度的非线性影响，因而较现有同类岩石动态强度准则具有一定的优越性。

2.2 非线性岩石动态强度准则的验证

前述已提出了新型非线性岩石动态强度准则，其合理性仍须验证，为此，引进方 秦等^[13]试验资料，对本文提出的新型非线性岩石动态强度准则的合理性进行验证。

方秦等^[13]采用自主研发的 SHPB 试验装置对盐岩在 5~25 MPa 围压作用下的单轴动力学性能进行了试验研究, 获得了不同围压下盐岩静态和动态应力-应变曲线。于是, 根据不同围压下盐岩静态应力-应变曲线可获得不同围压 σ_3 下盐岩屈服应力(见表 1), 因此, 采用式(2)进行线性拟合可获得盐岩静态屈服强度指标 $c_y = 6.41$ MPa, $\varphi_y = 10.3^\circ$, 其拟合相关系数为 0.993 8。根据不同围压和应变率下的盐岩动态应力-应变曲线, 可获得不同围压和应变率下的盐岩动态屈服应力(见表 2), 采用式(9)进行曲线拟合, 即可获得不同围压下盐岩动态屈服强度参数(见表 3)。于是, 将由此获得的盐岩静态屈服强度指标和动态强度参数代入式(9)即可获得在不同围压下盐岩动态强度曲线见图 1, 为了比较方便起见, 动态强度试验曲线也列入其中。

表 1 盐岩在不同围压下的静态屈服应力

Table 1 Static yield stresses of salt rock under different confining pressures

σ_3 /MPa	静态屈服应力/MPa
5	19.52
15	29.62
25	41.89

表 2 盐岩在不同围压和应变率下的动态屈服应力

Table 2 Dynamic yield stresses of salt rock under different confining pressures and strain rates

σ_3 /MPa	$\dot{\epsilon} / s^{-1}$	动态屈服应力/MPa
5	426	41.44
	519	49.53
	695	53.35
	739	61.44
15	440	60.58
	476	60.72
	609	67.59
	631	66.34
25	430	50.10
	433	52.29
	513	57.89
	531	68.12
	574	71.53
	597	72.57

表 3 盐岩动态屈服强度参数

Table 3 Dynamic yield strength parameters of salt rock

σ_3 /MPa	A	$\dot{\epsilon}_0 / s^{-1}$	b	n	$\dot{\epsilon}_s / s^{-1}$	相关系数
5	0.03	10^{-4}	87.33	1.54	843.55	0.976 7
15	-0.10	10^{-4}	64.87	1.24	469.20	0.997 0
25	0.04	10^{-4}	46.09	6.85	535.04	0.960 6

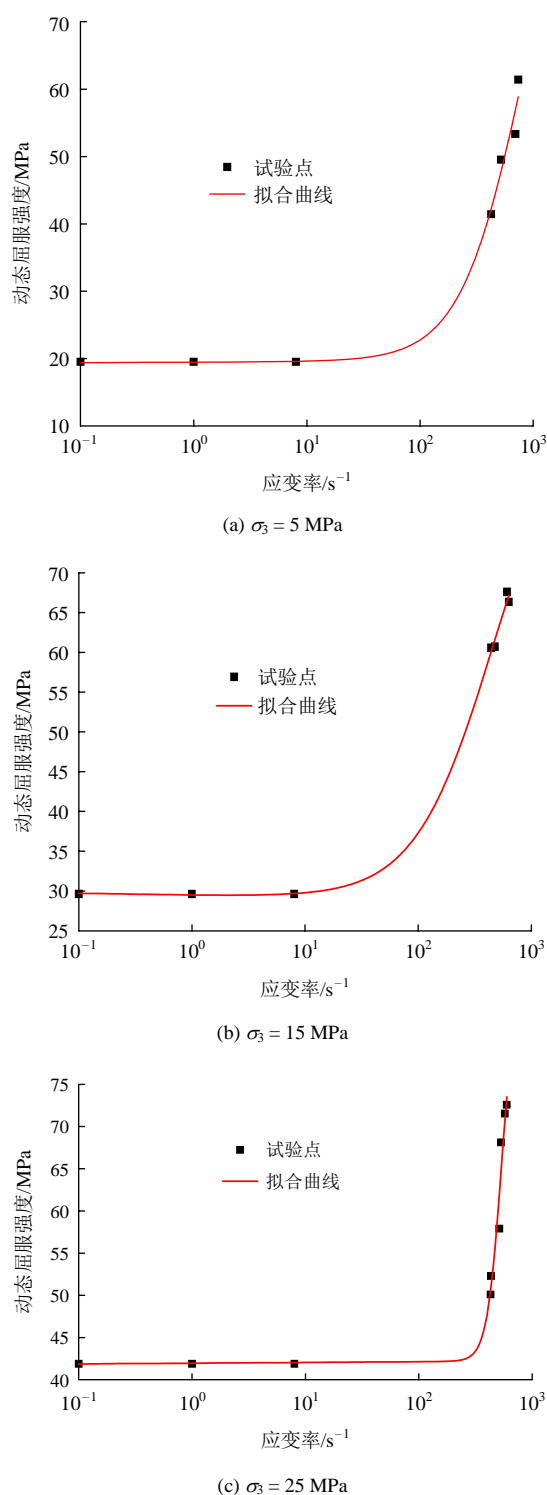


图 1 不同围压下盐岩屈服强度与应变率的关系

Fig.1 Relationship between yield strength and strain rate of salt rock under different confining pressures

由此可以看出, 采用本文非线性岩石动态强度准则拟合实测的动态强度曲线, 其拟合相关系数均在 0.960 6 以上, 而且, 理论曲线与试验曲线吻合良好, 说明了本文提出的非线性岩石动态强度准则具有良好的合理性与可行性。

3 岩石动态统计损伤本构模型

为了研究岩石动态变形过程模拟方法, 引入统计损伤理论进行研究是一个良好的思路^[14-16], 但由于岩石动态损伤与岩石的动态变形性质密切相关, 因此, 在利用统计损伤理论研究岩石动态变形过程模拟方法时必须反映岩石的动态变形性质。为此, 下面将考虑岩石动态变形特点, 利用统计损伤理论对岩石动态变形过程模拟方法即动态本构模型进行研究。其具体内容与研究过程如下所述。

3.1 岩石动态损伤模型

岩石动态损伤模型是利用统计损伤理论建立岩石动态本构模型的关键之一, 本文拟基于 Lemaitre 应变等价性假设^[17]建立岩石动态损伤模型。为此, 将动态荷载作用下的岩石抽象为损伤和未损伤两部分材料组成, 并假设岩石损伤后不具有任何承载力, 岩石所受荷载全部由未损伤部分材料承担, 于是, 采用 X. Li 等^[16]方法可得岩石动态损伤模型, 可表示为

$$\sigma_{id} = \sigma'_{id}(1 - D_d) \quad (i=1, 2 \text{ 或 } 3) \quad (12)$$

式中: σ_{id} 为岩石动态宏观名义应力, σ'_{id} 为岩石动态有效应力(即未损伤部分材料所受应力), D_d 为岩石动态损伤变量或损伤因子(即岩石损伤部分截面积与岩石总面积之比)。由于 σ'_{id} 为岩石未损伤部分所受应力, 如果假设未损伤部分材料服从广义胡克定律^[16], 则

$$\sigma'_{id} = E_d \varepsilon'_i + \mu_d (\sigma'_{jd} + \sigma'_{kd}) \quad (13)$$

式中: E_d 和 μ_d 分别为岩石动态弹性模量和动态泊松比; ε'_i 为未损伤部分材料的微观应变; $i, j, k = 1, 2, 3$ 或 $2, 3, 1$ 或 $3, 2, 1$ 。由于损伤和未损伤材料紧密混杂在一起, 可认为它们的变形存在协调关系^[16], 即

$$\varepsilon_i = \varepsilon'_i \quad (14)$$

式中: ε_i 为岩石动态宏观应变。将式(12)和(14)代入式(13)可得

$$\sigma_{id} = E_d \varepsilon_i (1 - D_d) + \mu_d (\sigma_{jd} + \sigma_{kd}) \quad (15)$$

由此可以看出, 为了利用式(15)模拟岩石动态变形过程, 还必须解决岩石动态损伤变量 D_d 的确定方法即岩石动态损伤演化模型问题。

3.2 岩石动态统计损伤演化模型

岩石动态损伤演化模型是岩石动态本构模型研究的另一关键问题, 本文拟采用概率论与数理统计

理论进行研究, 为此, 假定动态荷载作用下的岩石由无数微元组成, 并设岩石微元强度为 F_d 且服从 Weibull 分布, 则由 X. Li 等^[16]可得岩石动态统计损伤演化模型, 可表示为

$$D_d = \begin{cases} 1 - \exp[-(F_d / F_0)^m] & (F_d \geq 0) \\ 0 & (F_d < 0) \end{cases} \quad (16)$$

式中: m, F_0 分别为岩石微元强度 F_d 的 Weibull 分布参数。很显然, 建立岩石动态损伤演化模型的关键在于岩石微元强度的度量方法。过去, 曹文贵等^[16-8]采用基于静态岩石屈服强度准则的微元强度度量方法, 它虽然能较好地反映岩石静态强度, 但无法反映岩石强度的动态变化性质, 因此, 将其应用于岩石动态变形过程模拟方法研究必然存在明显缺陷, 为此, 必须发展反映岩石动态变形性质的微元强度度量方法, 其具体内容如下所述。

本文引进 X. Li 等^[16]的思路, 采用本文前述提出的非线性岩石动态屈服强度准则即式(9)建立出如下岩石动态微元强度度量方法, 可表示为

$$F_d = \sigma'_{id} - \alpha \sigma'_{3d} - k - A \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} - \frac{b(\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_s)^n}{(\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_s)^n + 1} \quad (17)$$

式中: $\sigma'_{id}, \sigma'_{3d}$ 分别为岩石未损伤部分所受最大和最小主应力即最大和最小有效应力; 其它参数或变量的物理意义如前所述。于是, 利用式(12)和(15), 亦可将岩石动态微元强度 F_d 表示为

$$F_d = \frac{E_d \varepsilon_i (\sigma_{id} - \alpha \sigma_3)}{\sigma_{id} - \mu_d (\sigma_{2d} + \sigma_{3d})} - k - A \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} - \frac{b_y (\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_s)^n}{(\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_s)^n + 1} \quad (18)$$

由此可以看出, 本文建立的动态岩石微元强度度量方法可反映岩石动态应变率对强度的非线性影响, 较现有同类方法具有明显的合理性。

3.3 岩石动态本构模型及其参数确定方法

前述已建立出岩石动态损伤模型及损伤演化模型, 于是, 将式(16)代入式(15)即可得到模拟岩石动态变形过程的岩石动态统计损伤本构模型, 可表示为

$$\sigma_{id} = \begin{cases} E_d \varepsilon_i \exp[-(F_d / F_0)^m] + \mu_d (\sigma_{jd} + \sigma_{kd}) & (F_d \geq 0) \\ E_d \varepsilon_i + \mu_d (\sigma_{jd} + \sigma_{kd}) & (F_d < 0) \end{cases} \quad (19)$$

由此可以看出, 本文建立的岩石动态本构模型具有多方面的优越性。首先, 它反映了岩石动态变形过程中的动态应力与动态应变之间的非线性关系; 其次, 由于本文模型采用的岩石微元强度度量方法反映了岩石的动态变形特征, 因此, 本文由此

建立的岩石动态本构模型更能合理地揭示岩石动态变形力学机制；另外，从式(19)可以看出，当岩石动态应力为 0 时其动态应变亦为 0，克服了应用杨明辉等^[7]模型模拟岩石动态变形过程时出现岩石动态应力为 0 而动态应变不为 0 的不合理现象，因此，本文模型较现有同类模型具有明显的优越性。

上述已经建立出模拟岩石动态变形过程的岩石动态统计损伤本构模型即式(19)，它包含多个参数，必须建立出合理的模型参数确定方法，方能用于岩石动态变形过程的模拟。为此，下面将进一步介绍该模型参数的确定方法。

除了岩石动态微元强度随机分布参数 m 和 F_0 外，该模型其它参数确定方法已在前述进行介绍，这里不再赘述，这里仅介绍基于岩石三轴动态应力应变曲线的 m 及 F_0 确定方法。为此，考虑到常规三轴试验一般是等围压静载的实际情况 ($\sigma_{2d} = \sigma_{3d} = \sigma_3$ ， σ_3 为静围压)，则可将式(19)中第一式改写为

$$\sigma_{1d} = E_d \varepsilon_1 \exp[-(F_d / F_0)^m] + 2\mu_d \sigma_3 \quad (20)$$

其中， F_d 可由式(18)并令 $\sigma_{2d} = \sigma_{3d} = \sigma_3$ 得到，可表示为

$$F_d = \frac{E_d \varepsilon_1 (\sigma_{1d} - \alpha \sigma_3)}{\sigma_{1d} - 2\mu_d \sigma_3} - k - A \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} - \frac{b(\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_s)^n}{(\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_s)^n + 1} \quad (21)$$

于是，根据常规岩石三轴应力应变曲线的极值特性，由式(20)可得

$$\left. \frac{\partial \sigma_{1d}}{\partial \varepsilon_1} \right|_{\substack{\sigma_{1d} = \sigma_{1dc} \\ \varepsilon_1 = \varepsilon_{1dc}}} = 0 \quad (22)$$

式中： σ_{1dc} ， ε_{1dc} 分别为常规岩石三轴应力应变曲线峰值点对应的动态应力和动态应变，可由试验曲线获得。另外，峰值点应力 σ_{1dc} 和应变 ε_{1dc} 也必须满足式(20)，即

$$\sigma_{1dc} = E_d \varepsilon_{1dc} \exp[-(F_{dc} / F_0)^m] + 2\mu_d \sigma_3 \quad (23)$$

其中， F_{dc} 可将 $\sigma_{1d} = \sigma_{1dc}$ 及 $\varepsilon_1 = \varepsilon_{1dc}$ 代入式(21)得到，即

$$F_{dc} = \frac{E_d \varepsilon_{1dc} (\sigma_{1dc} - \alpha \sigma_3)}{\sigma_{1dc} - 2\mu_d \sigma_3} - k - A \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} - \frac{b(\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_s)^n}{(\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_s)^n + 1} \quad (24)$$

于是，联立式(22)及(23)可得

$$m = - \frac{(\sigma_{1dc} - 2\mu_d \sigma_3) F_{dc}}{E_d \varepsilon_{1dc} (\sigma_{1dc} - \alpha \sigma_3) \ln(1 - D_{dc})} \quad (25)$$

$$F_0 = \frac{F_{dc}}{[-\ln(1 - D_{dc})]^{1/m}} \quad (26)$$

其中， D_{dc} 可将 $\sigma_{1d} = \sigma_{1dc}$ 及 $\varepsilon_1 = \varepsilon_{1dc}$ 代入式(15)并令 $\sigma_{2d} = \sigma_{3d} = \sigma_3$ 获得，可表示为

$$D_{dc} = 1 - \frac{\sigma_{dc} - 2\mu_d \sigma_3}{E_d \varepsilon_{dc}} \quad (27)$$

上述式(25)和(26)即为本文提出的模型参数 m 和 F_0 的确定方法。可是，由于由常规岩石三轴试验获得的动态应力应变试验曲线一般为偏应力和偏应变关系曲线，也就是说不能由试验曲线直接获得 σ_{1dc} 及 ε_{1dc} ，必须进行转换。为此，设由常规岩石三轴试验获得的岩石动态偏应力应变试验曲线峰值点应力和应变分别为 σ'_{1dc} 和 ε'_{1dc} ，则

$$\sigma_{1dc} = \sigma'_{1dc} + \sigma_3 \quad (28)$$

$$\varepsilon_{1dc} = \varepsilon'_{1dc} + \varepsilon_c \quad (29)$$

式中： ε_c 为岩石试件受到静水压力 σ_3 作用即轴向应力 σ_{1d} 加载到围压 σ_3 所产生的初始应变； σ'_{1dc} ， ε'_{1dc} 由试验曲线峰值点应力和应变直接获得。一般认为岩石在静水压力 σ_3 作用下不会产生损伤，因此，利用式(19)中第二式，并令 $\sigma_{1d} = \sigma_{2d} = \sigma_{3d} = \sigma_3$ 可得初始应变 ε_c 的确定方法，可表示为

$$\varepsilon_c = (1 - 2\mu_d) \sigma_3 / E_d \quad (30)$$

4 实例分析与讨论

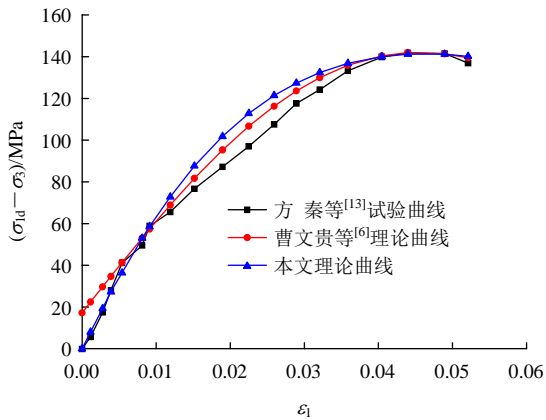
前述已经建立出模拟岩石动态变形过程的岩石动态统计损伤本构模型，并提出了基于常规岩石三轴试验曲线的模型参数确定方法，但其合理性与可行性仍需验证。为此，仍然引进方秦等^[13]关于盐岩的 SHPB 试验资料进行分析。

为了利用本文模型获得模拟该盐岩动态变形过程的动态应力 - 应变曲线，必须首先确定该模型计算参数。前述已确定出关于盐岩强度指标与参数，见表 3，其它参数必须依据方秦等^[13]试验曲线采用前述方法确定，所得参数见表 4。于是，将上述参数代入本文模型进行分析计算即可得到本文模型理论曲线，并同时采用曹文贵等^[6]的模型进行分析计算，可获得曹文贵等^[6]的模型理论曲线。为了进行比较分析，将本文和曹文贵等^[6]的模型理论曲线与方秦等^[13]的试验曲线列在同一曲线图中见图 2。由此可以看出，虽然本文模型和曹文贵等^[6]的模型均能反映岩石动态变形过程的变形非线性，但是本文模型理论曲线较曹文贵等^[6]的模型曲线更接近于试验曲线，尤其是在初始变形阶段，本文模型的模拟效果要明显好于曹文贵等^[6]的模型，其原因如本文

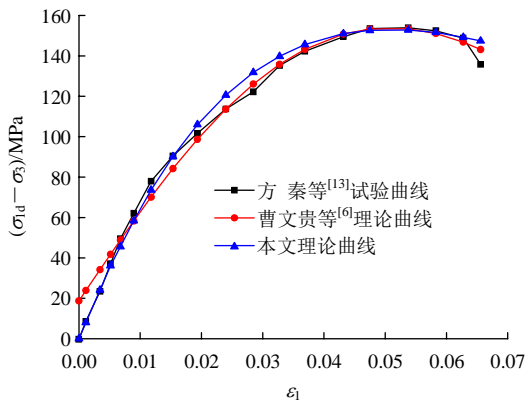
表 4 不同围压和应变率下本构模型参数

Table 4 Parameters of the constitutive model under different confining pressures and strain rates

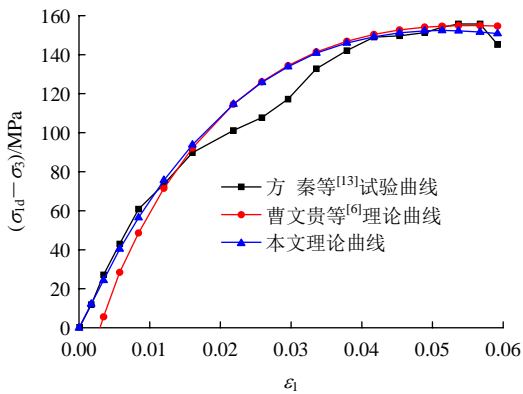
σ_3 / MPa	$\dot{\epsilon} / \text{s}^{-1}$	E_d / GPa	μ_d	$\sigma'_{1dc} / \text{MPa}$	$\epsilon'_{1dc} / 10^{-2}$	m	F_0 / MPa
5	426	7.12	0.37	142.23	4.64	1.099 4	343.0
	519	7.21	0.37	153.91	5.10	1.072 7	370.0
15	476	7.13	0.37	153.17	5.14	1.043 2	349.8
	631	7.24	0.37	175.25	5.53	1.114 4	398.9
25	433	6.08	0.37	137.14	5.32	1.049 7	295.5
	513	6.95	0.37	153.12	5.15	1.011 2	327.7



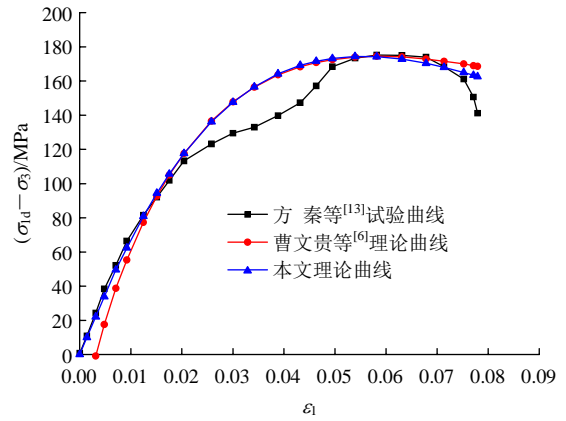
(a) $\sigma_3 = 5 \text{ MPa}$, $\dot{\epsilon} = 426 / \text{s}$



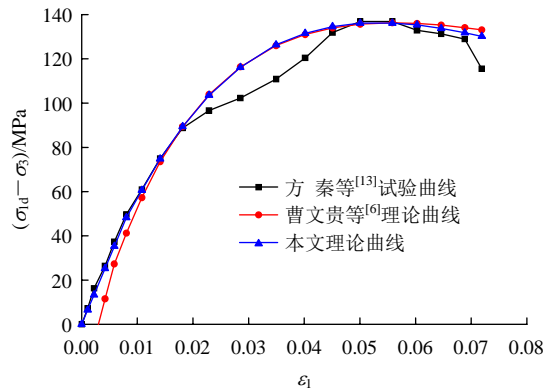
(b) $\sigma_3 = 5 \text{ MPa}$, $\dot{\epsilon} = 519 / \text{s}$



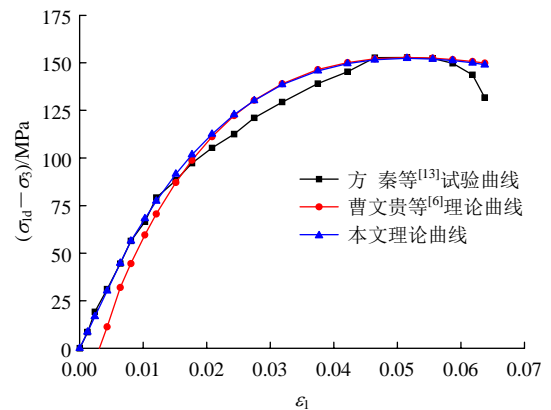
(c) $\sigma_3 = 15 \text{ MPa}$, $\dot{\epsilon} = 476 / \text{s}$



(d) $\sigma_3 = 15 \text{ MPa}$, $\dot{\epsilon} = 631 / \text{s}$



(e) $\sigma_3 = 25 \text{ MPa}$, $\dot{\epsilon} = 433 / \text{s}$



(f) $\sigma_3 = 25 \text{ MPa}$, $\dot{\epsilon} = 513 / \text{s}$

图 2 理论与试验曲线比较

Fig.2 Comparison of theoretical and experimental curves

引言所述。

另外，将同一围压下本文模型理论曲线列于同一曲线图(见图 3)中，由此可以看出，在相同围压下，应变率不同，盐岩变形过程也明显不同。随应变率的增加，岩石的强度也在增加，显然其符合实际情况。

综合上面所述，本文模型较现有同类模型能更好地模拟岩石的动态变形过程，具有明显的合理性与优越性。

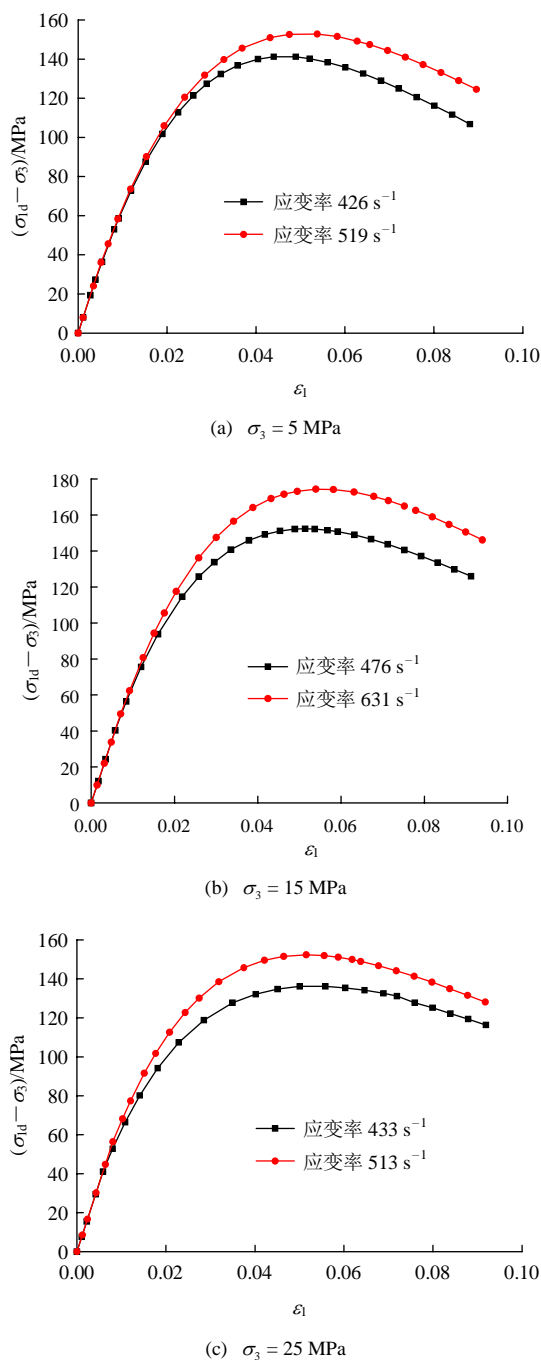


图3 不同围压下应变率对岩石变形过程的影响

Fig.3 Effect of strain rate on rock deformation under different confining pressures

5 结论

本文重点考虑岩石动态应变率对岩石动态变形过程的影响,从探讨非线性岩石动态强度准则入手,引入统计损伤理论对岩石动态变形过程模拟方法进行了深入研究。由此可得如下结论:

(1) 考虑岩石应变率对岩石强度的非线性影响机制,对现有岩石动态强度准则进行改进,建立出

了适用于高低应变率条件的非线性岩石动态强度准则,为岩石动态变形过程模拟方法研究奠定了坚实的理论基础。

(2) 在基于本文建立的非线性岩石动态强度准则的岩石微元强度度量方法基础上,引入统计损伤理论建立出了岩石动态统计损伤本构模型,并提出了基于动态三轴应力-应变试验曲线的本构模型参数确定方法,进而建立出了反映不同围压和应变率影响的岩石动态变形过程模拟方法。

(3) 通过本文与现有同类模型理论曲线以及试验曲线的比较分析,表明了本文模型的合理性与优越性。

(4) 考虑到本文岩石动态强度准则是基于莫尔-库仑强度准则建立起来的,而莫尔-库仑准则仅适用于低围压情况,而且,本文模型未考虑岩石孔隙压密引起的非线性效应,因此,本文模型仅适用于低围压致密岩石动态变形过程的模拟,相关问题有待进一步研究。

参考文献(References):

- [1] 谢理想, 赵光明, 孟祥瑞. 岩石在冲击载荷下的过应力本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增1): 2 772 - 2 781.(XIE Lixiang, ZHAO Guangming, MENG Xiangrui. Research on excess stress constitutive model of rock under impact load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Supp.1): 2 772 - 2 781.(in Chinese))
- [2] KINOSHITA S, SATO K, KAWAKITA M. On the mechanical behavior of rocks under impulsive loading[J]. Bulletin of the Faculty of Engineering Hokkaido University, 1977, (83): 51 - 62.
- [3] 于亚伦, 金科学. 高应变率下的矿岩特性研究[J]. 爆炸与冲击, 1990, (3): 266 - 271.(YU Yalun, JIN Kexue. Studies on the dynamic behavior of magnetites and granite under high strain rates[J]. Explosion and Shock Waves, 1990, (3): 266 - 271.(in Chinese))
- [4] 郑永来, 夏颂佑. 岩石黏弹性连续损伤本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(增1): 428 - 432.(ZHENG Yonglai, XIA Songyou. Viscoelastic damage constitutive model for rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(Supp.1): 428 - 432.(in Chinese))
- [5] 单仁亮, 薛友松, 张倩. 岩石动态破坏的时效损伤本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1 771 - 1 776.(SHAN Renliang, XUE Yousong, ZHANG Qian. Time-dependent damage model of rock under dynamic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1 771 - 1 776.(in Chinese))

- [6] 曹文贵, 赵衡, 张玲, 等. 恒应变率下的岩石三轴动态变形过程模拟方法[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(11): 1 658 - 1 664.(CAO Wengui, ZHAO Heng, ZHANG Ling, et al. Simulation method of dynamic triaxial deformation process for rock under invariable strain rate[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(11): 1 658 - 1 664.(in Chinese))
- [7] 杨明辉, 赵明华, 曹文贵. 基于统计理论的岩石动态损伤本构模型研究[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(4): 95 - 98.(YANG Minghui, ZHAO Minghua, CAO Wengui. Research on damage constitutive model of rock under dynamical load based on statistical theory[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(4): 95 - 98.(in Chinese))
- [8] 刘军忠, 徐金余, 吕晓聪, 等. 围压下岩石的冲击力学行为及动态统计损伤本构模型的研究[J]. 工程力学, 2012, 29(1): 55 - 63.(LIU Junzhong, XU Jinyu, LU Xiaocong, et al. Study on dynamic behavior and damage constitutive model of rock under impact loading with confining pressure[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(1): 55 - 63. (in Chinese))
- [9] 赵坚, 李海波. 莫尔-库仑和霍克-布朗强度准则用于评估脆性岩石动态强度的适用性[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 171 - 176.(ZHAO Jian, LI Haibo. Estimating the dynamic strength of rock using Mohr-Coulomb and Hoek-Brown criteria[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2): 171 - 176. (in Chinese))
- [10] 戚承志, 钱七虎. 岩石等脆性材料动力强度依赖应变率的物理机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 2(2): 177 - 181.(QI Chengzhi, QIAN Qihu. Physical mechanism of dependence of material strength on strain rate for rock-like material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2): 177 - 181.(in Chinese))
- [11] 钱七虎, 戚承志. 岩石、岩体的动力强度与动力破坏准则[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2008, 36(12): 1 599 - 1 605.(QIAN Qihu, QI Chengzhi. Dynamic strength and dynamic fracture criteria of rock and rock mass[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2008, 36(12): 1 599 - 1 605.(in Chinese))
- [12] 卢志堂, 王志亮. 中高应变率下花岗岩动力特性三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(6): 1 087 - 1 094.(LU Zhitang, WANG Zhiliang. Triaxial tests on dynamic properties of granite under intermediate and high strain rates[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(6): 1 087 - 1 094.(in Chinese))
- [13] 方秦, 阮征, 翟超辰, 等. 围压与温度共同作用下盐岩的 SHPB 试验及数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(9): 1 756 - 1 765.(FANG Qin, RUAN Zheng, ZHAI Chaochen, et al. Split Hopkinson pressure bar test and numerical analysis of salt rock under confining pressure and temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(9): 1 756 - 1 765.(in Chinese))
- [14] 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.
- [15] 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 Wengui, FANG Zulie, TANG Xuejun. A study of statistical constitutive model for soft and damage rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(6): 628 - 633.(in Chinese))
- [16] LI X, CAO W G, SU Y H. A statistical damage constitutive model for softening behavior of rocks[J]. Engineering Geology, 2012, 143/144: 1 - 17.
- [17] LEMAITRE J. How to use damage mechanics[J]. Nuclear Engineering and Design, 1984, 80(2): 233 - 245.