

岩石峰值后区特性和数值模拟方法探讨

葛修润 周伯海 刘明贵 丰定祥

(中国科学院武汉岩土力学研究所 武汉 430071)

摘 要 本文就目前国内外文献普遍接受的关于岩石全过程曲线和后区特性分为Ⅰ型、Ⅱ型两类的分类法提出了异议。作者根据能量的观点和新的试验成果论证了Ⅱ型曲线的不合理性,并建议了一种新的分类模式。这些新的试验结果是使用作者们合作研制的最新一代的自适应控制岩石力学试验机,采用纵向应变率保持常数时对脆性岩类的岩样进行单轴压缩试验时取得的。文章对目前采用的岩石峰值后区特性的数值模拟方法也提出了异议,提出了今后的改进方向。

为了研究岩石的强度和变形特性及岩石发生破裂的发展过程,利用岩石力学试验机对圆柱形岩石试件进行单轴或三轴压缩试验是基本手段之一。

试验机对试件所施加的轴向载荷和试件轴向变形的关系曲线通常称之为力—位移曲线。若试件截面积和长度在试验过程中的变化量是一个小量,则通过简单的换算,可以将力—位移曲线方便地转换成名义上的应力—应变曲线。

众所周知,不管使用何种类型的试验机,通过岩石的单轴压缩试验都可取得岩石的峰值强度。在达到峰值强度之前的力—位移曲线叫作峰值前区特性曲线。过峰值强度点以后的力—位移曲线叫作峰值后区特性曲线。包括前、后区特性曲线在内的完整的力—位移曲线叫做全过程曲线。

研究全过程曲线,特别是峰值后区特性是二十多年来岩石力学界十分关注的问题,因为无论是在理论上还是在岩体工程实践方面它都具有重要意义。例如,岩体在生成之后受过多次数剧烈的构造运动的作用,程度不同地受到了破坏。因此在原位上的岩体材料性质应该说在一定程度上与岩石的峰值后区性能相当。在工程实践中,“破裂的岩石”仍然能够支撑住相当大的负荷,特别是侧面有支撑时更是这样。

但是过峰值强度点后的力—位移曲线在实验中不一定都能成功地获得,它与所使用的试验机的性能和试验方法有关。

当我们使用“柔性”机时,由于过峰值强度点后“柔性”试验机释放出它所储存的形变能的量大于岩石试件在峰值后区发生完全破坏所需要的能量,致使试件的变形迅速地、不受控制地持续下去直至破坏,从而无法测到峰值后区曲线。

因此要想获得峰值后区曲线有如下两条途径可走:

(1)单纯地增加试验机刚度,以减少试验机系统释放的形变能,这就是刚性机。由于“刚性”机的刚度也不可能无限地提高,操作上也不方便,近年来走这条途径的人已越来越少了。

(2)采用电液伺服闭环控制方式的岩石力学试验机。要利用闭环系统的反馈原理,通过不断地自动调整使试验机释放的形变能的绝大部分(或部分)被试验机系统本身所吸收,而不传给岩石试件,从而达到有效控制岩石试件的破裂过程。同时也使被控制量准确地按所需的函数

规律变化,实现了自动控制。这类试验机的出现无疑是试验机发展史上的一个重大进步。

近二十年来,国外和国内的研究工作者进行了大量的实验研究和理论分析,从国内外的文献来看,将岩石全过程曲线(主要指的是峰值后区特性曲线)区分为 I 型和 II 型似乎已成为普遍接受的定论,也未见在这方面有什么重大的争论。

岩石的峰值后区特性又常常地被归结为“软化”现象。并将峰值后区特性曲线视为一种本构关系。因此在数值模拟方法上往往是将这种峰值后区曲线作为一种模拟的对象,纳入到岩石的本构关系中去,从而采用种种相应的模拟的方法和算法。

1 关于全过程曲线 I、II 型分类概况和讨论

1.1 I、II 型分类法

这种分类的提法来源于文献^[1]。Wawersik 和 Fairhurst 在 1970 年基于他们对六种不同的岩石所作的单轴压缩试验的结果(图 1)提出了将全过程曲线区分为两个基本类型(图 2a)。这种分类方法后来又被进一步概念化地归结为如图 2b 所示的模式。

从图 2 可以看出, I 型和 II 型的全过程曲线的差别在于后区特性曲线。I 型曲线代表的是脆性十分明显的岩类。

文献^[1]的结论部分对 I 型、II 型岩类在破裂特征上的差异归结为:“在准静态的单轴压缩试验中所研究的应力-应变全过程曲线可以区分为两个类型。对 I 型岩石而言,破裂的传播是稳定的。这意味着当承载能力逐步减小时需要向试件作功。II 型破裂是不稳定的,或者说是自己能持续进行的。为了控制破裂,必须从材料中抽取能量。否则,即使是使用完全刚性的试验机,II 型岩石的破裂也是不能受控的。”

关于上述 I 型、II 型分类的观点一直被众多的文献和专著所接受和引用^[2]、^[3]、^[4]和^[5]仅是一些有代表性的例子。

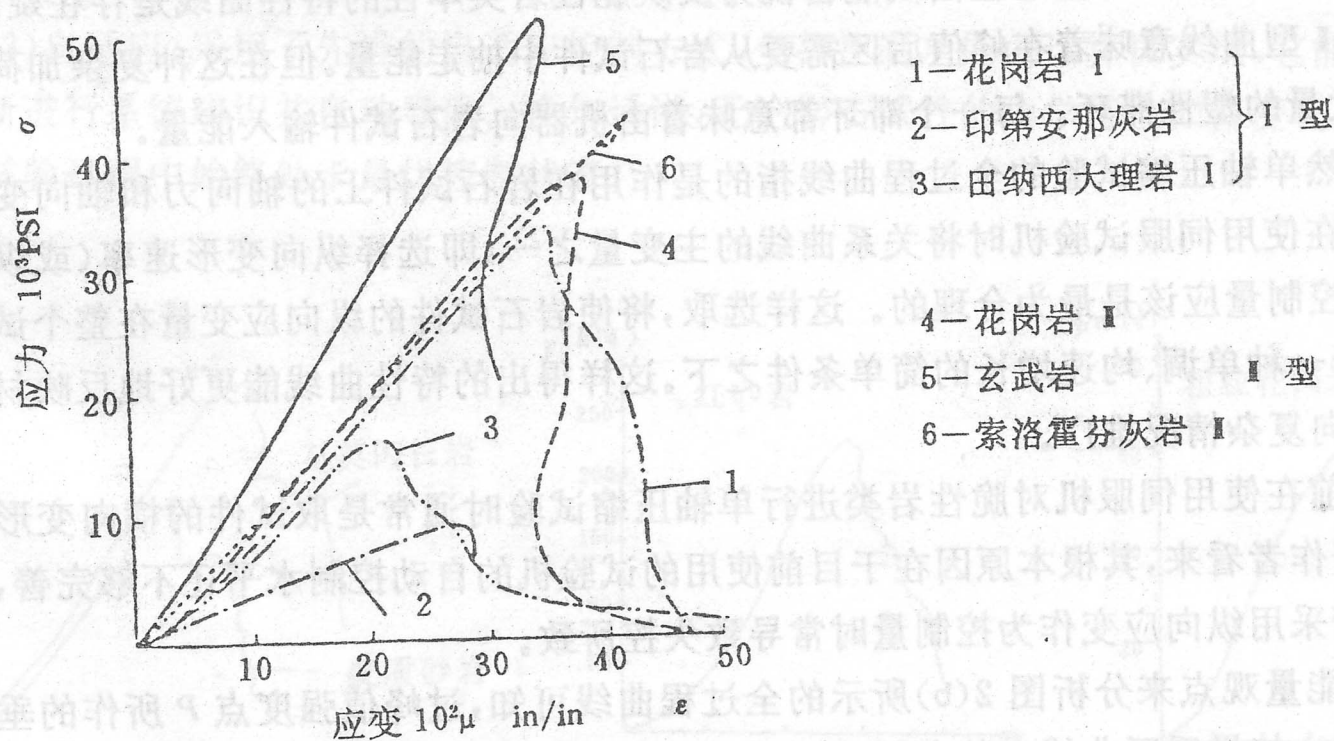
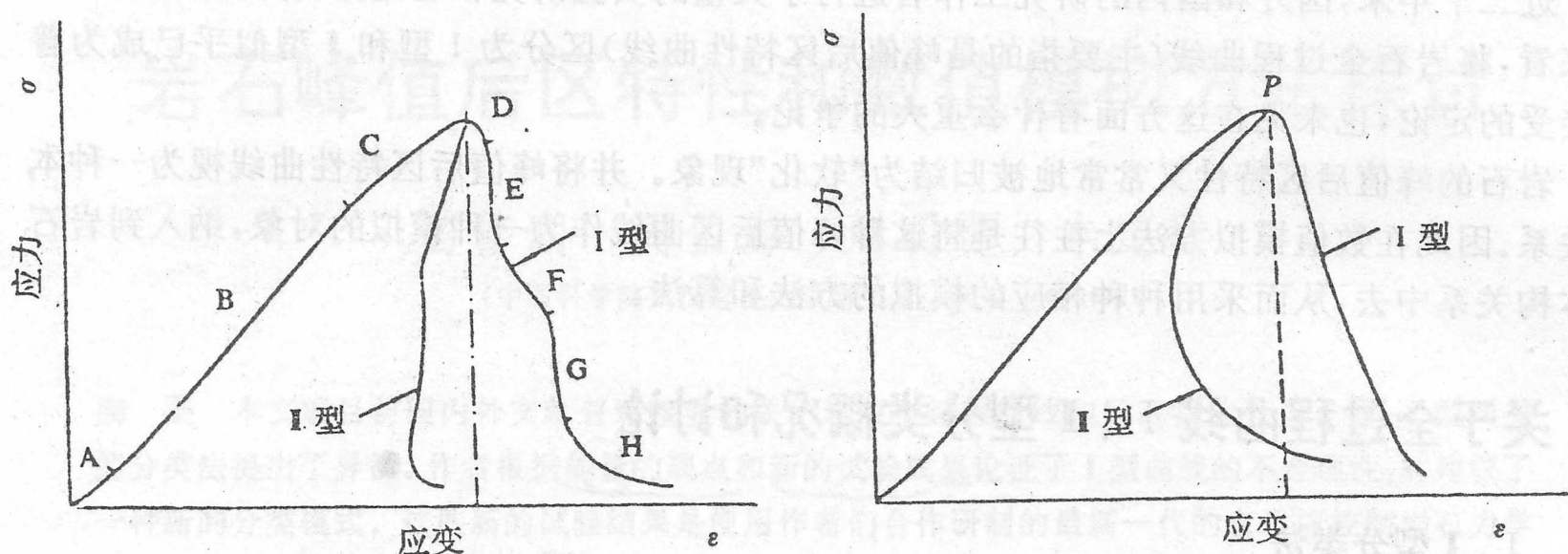


图 1 六种岩石的单轴压缩试验曲线,据文献^[1]

1.2 形成 I 型和 II 型分类方法的试验条件

在岩石力学试验中,试验条件对试验结果有很大的影响。



(a)文献[1]中建议的两类全过程曲线模式 (b)目前普遍采用的两类全过程曲线的基本模式

图2 全过程曲线的分类

在文献[1]所提到的试验中安置了三台与试件平行的辅助液压缸。过峰值强度点后,一旦试件抗力的下降趋势陡于试验机的卸载特性曲线,就人为地由辅助液压缸对加荷系统施加反的作用力,使试件的破裂不再发展,从而在很多情况下导致试件的轴向变形逆转,于是又向试件施力,如此反复进行下去直到试件破坏。在使用闭环控制试验机时,对于脆性岩类都是在过峰值强度点后采用横向变形率作为控制量,来得到脆性岩类的那种所谓 I 型的特征曲线的。

1.3 对 I 型、II 型分类的讨论

(1)在上述特定的控制条件下,就轴向力和轴向变形而言,一直处于多次反复加荷—卸荷、伸长和缩短的复杂过程之中。由此得出的 I 型曲线只是这种复杂的加荷—卸荷过程的外包络线而已。这样得出的 I 型全过程曲线能否视为反映脆性岩类本性的特性曲线是存在疑问的。表面上看来, I 型曲线意味着在峰值后区需要从岩石试件中抽走能量。但在这种复杂加荷—卸荷过程形成大量的塑性滞环。每一个滞环都意味着由机器向岩石试件输入能量。

(2)既然单轴压缩试验的全过程曲线指的是作用在岩石试件上的轴向力和轴向变形的关系曲线,则在使用伺服试验机时将关系曲线的主变量之一,即选择纵向变形速率(或纵向应变速率)作为控制量应该是最为合理的。这样选取,将使岩石试件的纵向应变在整个试验过程中一直处于一种单调、匀速增长的简单条件之下。这样得出的特性曲线能更好地反映材料的本性,又易于向复杂情况推广。

(3)目前在使用伺服机对脆性岩类进行单轴压缩试验时通常是取试件的横向变形率作为控制量。据作者看来,其根本原因在于目前使用的试验机的自动控制水平还不够完善,因而对脆性岩类若采用纵向应变作为控制量时常导致失控所致。

(4)从能量观点来分析图 2(b)所示的全过程曲线可知,过峰值强度点 P 所作的垂直线是一条分界线。如果后区曲线在其右侧,即所谓的 I 型曲线,这意味着岩石试件在破坏过程中尚需补充能量。如在其左侧即所谓的 II 型曲线。如果 I 型全过程曲线确实是脆性岩类本性的反映,那么脆性岩类的岩石试件在峰值后区过程中不但不需补充能量,而是还必须从岩石试件中“抽取”能量,破裂过程才能得控制。由此,从能量观点导出的逻辑推论应该是:如果 I 型曲线是合理的话,那么无论是采用什么样的试验机,对于具有 I 型曲线的脆性岩类在纵向变形率保持

即：即按本文所述加载方式，应力曲线也可能会出现，但不可能出现。

常数的条件下其破裂发展过程是决不可能受控的。因为在纵向变形保持单调、匀速增长的条件
下试验机一定要向岩石试件作功的。

(5)我们为了证明 I 型、II 型分类法的不合理性，必需开展新的实验研究，目标是在纵向变
形率保持常数条件下取得脆性岩类的后区特性曲线。为了达到这一目的，我们研制了新一代的
高性能的电液伺服闭环控制岩石力学试验机。

2 新一代的电液伺服自适应控制岩石力学试验机及新的试验结果

2.1 关于目前使用的伺服试验机

目前使用的电液伺服闭环控制方式的试验机大部分是采用传统的模拟控制方式，国外最近
也有采用数字直接控制的，即 DDC 方式。这两种控制方式的重要特点就是采用一个固定不
变的校正环节。当系统调整后，参数就不再改变，而不管试验对象是否改变。

从闭环控制系统的角度看，试验对象是闭环中的一个主要环节，它的力学特征与系统的特
性密切相关。不同岩石试件的力学特性相差甚远。即使同一岩石试件，在峰值前区和后区其力
学性质更有明显的差异。一般的闭环伺服控制试验机无论是模拟控制的还是计算机控制的，都
无法很好适应上述的情况。

2.2 新一代自适应控制岩石力学试验机

我们最近研制成功的新型试验机具有以下特点：

(1)多功能。采用了独特的设计方法，没有很大的刚性构件，可以进行多种力学试验。如：
单轴、三轴压缩和拉伸试验（试件直径为 5 厘米）；直剪试验（ 20×30 厘米²）；各种波形的疲劳
试验等。

(2)高频响。在设计采用了多种先进技术与合理的措施，保证了系统的高频响特性，疲劳试
验频率可达 20Hz 以上。同时也尽可能地降低了能耗。

(3)自适应。采用了先进的自适应控制方式，全部控制功能由计算机实现，它能在试验过程
中不断进行系统辨识并自动寻优。换句话说，无论岩石试件的力学特性如何变化，都能保证系
统在试验过程中始终处于最优控制状态。

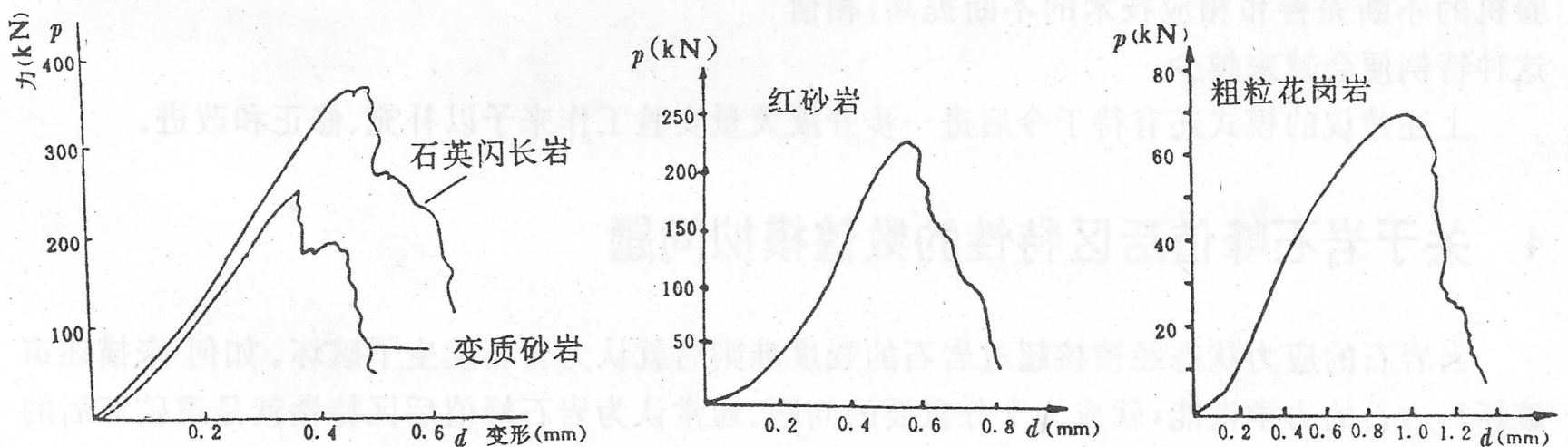


图 3 用电液自适应控制岩石力学试验机在纵向应变率为常数的条件下 ($\dot{\epsilon} = 5 \times 10^{-6}$ 秒) 得出的全过程曲线

2.3 有关全过程曲线新的试验结果

目前,我们已经利用这台试验机对许多不同岩性的岩石试件进行了单轴压缩试验。特别要指出的是在轴向应变率保持常数的条件下对几乎各种脆性岩石都能作出令人满意的峰值后区曲线。图3所示为几种典型脆性岩石的全过程曲线。对这几种岩石试件曾经用美国MTS公司的815.03型电液伺服闭环控制试验机作过单轴压缩试验。当采用纵向应变保持常数的控制方式时则过峰值后就会发生失控。

这几种岩石按其脆性程度应归属于前述的Ⅰ型岩类,但由图3可知,它们在轴向应变率为常数的条件下得到了与传统的Ⅰ型曲线完全不同的峰值后区特性曲线。因此,这些试验结果充分证明了所谓Ⅰ型的不合理性,从而所谓的Ⅰ型、Ⅱ型的分类法也是不合适的。

3 关于岩石峰值后区特性和全过程曲线分类的新见解

综上所述,我们根据最新的试验结果可以得出以下结论:对绝大部分过去归于Ⅰ型岩类的脆性岩石来说,在轴向变形率保持常数的条件下其破裂过程是可以控制的,是可能取得完美的峰值后区特性曲线的。因此,前述的Ⅰ型、Ⅱ型分类法是不合理的。我们建议采用图4所示的模式作为岩石峰值后区特性曲线和全过程曲线的新模型。

此新模型以过峰值强度点 P 所作的垂直线为极限线,在轴向变形率保持常数条件下,绝大部分岩石的后区特性曲线均在其右侧。越是脆性的岩石其峰值后区曲线的坡度(指绝对值)越陡,即越逼近极限线,且其曲线上有明显的台阶状。这是由于突然的局部破裂造成抗力急剧下降和破裂传播受阻等复杂因素形成的。而韧性越大的岩石其后区特性曲线的坡度越平缓。

在我们的试验中也有极少数破裂过程尚无法有效控制的特例。因为这类岩石的后区曲线几乎与过 P 点的垂线相重合了。不过,随着试验机的不断完善和相应技术的不断提高,相信这种特例便会越来越少。

上述建议的模式还有待于今后进一步开展大量实验工作来予以补充、修正和改进。

4 关于岩石峰值后区特性的数值模拟问题

当岩石的应力状态经校核超过岩石的强度准则后就认为岩石发生了破坏。如何来描述遭破坏后岩石的力学性能,就成为十分重要的问题。通常认为岩石峰值后区特性就是遭破坏后的岩石的基本特性。对第Ⅰ类全过程曲线而言,过峰值强度点后的后区特性曲线是具有负坡的。随着轴向位移的增长,强度继续下降。这种情况经常被称之为“软化”。在数值模拟时往往是采取各种算法来逼近后区特性曲线。但是这种处理方法实际上存在有概念性问题。因为上述的这种作法是默认后区特性曲线是一种过峰值强度点以后的岩石的一种本构关系。

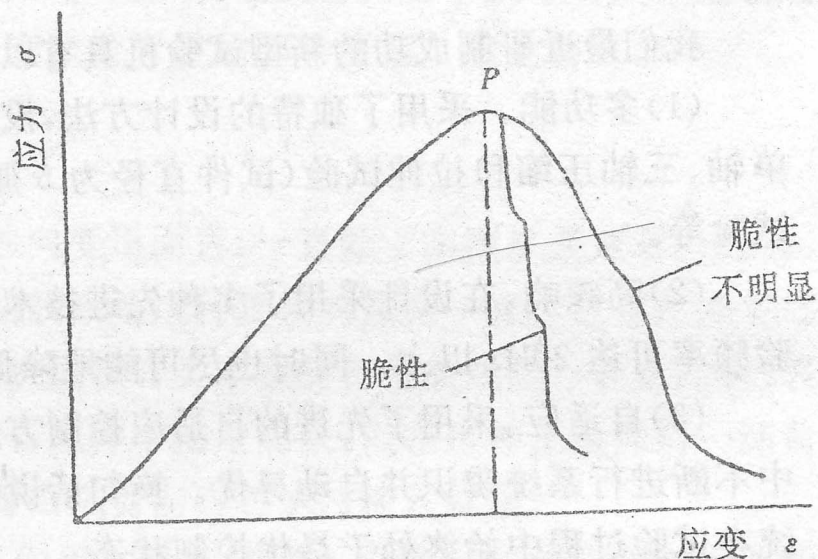


图4 岩石全过程曲线的新模型

我们认为,如果以峰值强度点作为分界的话,则峰值后区的区段内可以看作作为损伤急剧发展,微裂隙急剧扩大为宏观的大裂纹而导致试件总体发生崩溃的阶段。对一个岩石试件而言,此时试件的一部分已破损,另一部分还基本完好。所以在单轴压缩试验中所测得的后区特性曲线实质上是一部分尚属完整岩石与另一部分已遭受到破损的岩石组合在一起的综合力学特性曲线。请注意,它仅是一种综合特性,而并不是某一种本构关系。所以把这后区特性曲线视为岩石过峰值点后的一种本构关系是不合适的。从而在数值模拟时单纯地追求去逼近它也是不适宜的。

假如我们研究一个岩体工程问题,例如岩质边坡或地下洞室稳定问题,某些区域是破损区,某些区域的岩石尚属完好,对于这两类区域应采取不同的力学性质。将部分完好的岩石和部分受损的岩石的综合力学特性作为这些工程问题中的破损区的力学特性显然是不适宜的。

如果细致研究本文所给出的岩石后区特性曲线可以看出对脆性较明显的岩石而言其后区曲线一般都较陡,并且局部有小台阶。可以作这样的分析,即在破裂急剧发展时这类岩石的后区特性基本上呈垂直下跌的趋势,而台阶状乃是破裂局部受阻的缘故,综合在一起是有一定的负坡度。对脆性较明显的岩类而言,可以将其过峰值点后的基本力学性质用垂直下跌,即有很大应力降的模型也许更切合实际情况。如果是这样,那么在数值模拟的方法上如何合理地描述岩石在破裂后的应力 σ 的方法是十分重要的。对脆性较明显的岩类而言,研究描述破裂后应力突降的合理方法,显然比那种研究“软化”的描述方法更切合实际。

参 考 文 献

- 1 Wawersik W R, Fairhurst C. *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 1970, 7: 561~575
- 2 Paterson M S. *Experimental Rock Deformation—The Brittle Field*. Springer-Verlag, 1978
- 3 Brady B H G, Brown E T. *Rock Mechanics for Underground Mining*. George Allen & Unwin Ltd, 1985.
- 4 李先炜. 岩块力学性质. 煤炭工业出版社, 1983.
- 5 陶振宇, 潘别桐. 岩石力学原理和方法. 中国地质大学出版社, 1991.