

电液伺服自适应控制岩石力学试验机 及其对岩石力学某些问题研究的意义

葛修润 周伯海[✓] 刘明贵 丰定祥

TU 45

摘 要

本文介绍了一种新型的岩石力学试验机。自动控制理论中的自适应原理已用在此机器上。此试验机也是一种多用途机。单轴压缩试验、三轴试验和拉伸试验、直接剪切试验以及在不超过 10 Hz 的周期载荷作用下的疲劳试验等都可用本机来完成。

根据用本试验机取得的有关破裂后区特性方面的新的试验结果可以证明,目前在文献中得到公认的有关全过程曲线的分类方法是不合理的。

关键词: 岩石力学试验机 伺服控制机 单轴压缩试验 全过程曲线

1 前 言

近些年来,伺服控制试验机在岩石力学领域得到了越来越多的应用,大大促进了岩石力学理论的发展。目前的伺服试验机,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。这两种控制方式的主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,即所谓的以不变应万变。恰恰就是这一点不适合石岩力学领域。

从闭环控制系统的角度来看,试验对象是闭环中的一个重要环节,它的力学特性与系统的特性密切相关,试验对象的力学特性不同,系统的特性也就不同。对岩石试件来说尤其如此,因为岩石力学特性相差很远,以弹性模量为例可相差上百倍之多。即使是同一个试件,在加载过程中其力学特性也在不断变化,这从荷载-变形全过程曲线上可以看出。尤其是前区与后区的差别更大。当我们用传递函数来描述时,前区和后区是两种完全不同的状态。对于一个参数已调定的伺服试验机,它的适应范围也已确定。对于这个范围之外的试验对象,就很难作出令人满意的试验结果。在作变形控制时,尤其是纵向变形控制时,对脆性岩石往往是做不出破坏后区的,而在作施力控制时,系统或是超调过大,导致波形失真甚至振荡,或是响应缓慢,导致循环速度低。

针对传统的伺服试验机的不足,我们研制了新一代的电液伺服自适应控制岩石力学试验机。在这台试验机上,我们尽可能地采用了最先进的技术,使其具备了许多特点,下面分两部分介绍。

2 主机及液压系统的特点

2.1 多功能

本机可以进行单轴(500kN级)、三轴压缩与拉伸(围压 50MPa)、疲劳(10Hz)、剪切(300kN级)以及三点弯曲等多项试验。最大限度地利用了伺服系统的能力,该试验机基本上能进行工程上所要求的各种室内岩石力学试验。剪切试验的面积为 $30 \times 20 \text{cm}^2$, 单轴、三轴压缩试验的试样直径为 $\phi 50 \text{mm}$ 。

2.2 结构独特

为实现试验机的多功能,本机在总体设计上采用了与传统方式不同的结构,垂直加荷油缸是上置式的,水平剪切是由拉力来获得,这样力与反力基本上相互抵消,使得整体结构小巧而紧凑。另外,本机的机架刚度小于常规的刚性试验机,这是因为经过细致的分析与严密推导证明,机架刚度到一定程度就能满足要求,并非越大越好,对电液伺服试验机来说更是如此,这一点是与传统设计理论不同的。

2.3 技术先进

加荷油缸采用了对称结构,并采用了最先进的密封方式,既无泄漏,摩擦又小,大大提高系统的线性和响应速度,消除了极限环振荡和爬行现象。

自行设计了独具一格的自平衡三轴室,使围压对加力活塞的作用力自行抵消,活塞运动造成的围压波动也被消除。这样,省去了稳压源,同时提高了试验的准确度和系统的工效。

测量元件全部采用了传感器,其中横向变形传感器是自行设计的,已被批准为专利。这样,使得测量全部自动化,同时省了粘贴应变片的繁琐工作,使工作效率大为提高。

3 控制及检测

针对前面所提到的传统电液伺服试验机的不足,我们采用了自适应控制方式。这是当前最先进的控制方式之一,以往用于飞行器的控制。整个控制系统除二次仪表外没有硬件,全部功能由微机实现。它能在试验过程中不断进行系统辨认并自动寻优。换句话说,无论试件的力学特性如何变化,系统在实验过程中始终处于最优控制状态。这里,我们根据岩石力学的特点,选择的优化指标是响应快,超调小,并实现二阶无差度。同时,由于计算机的参与,系统具有很强的保护功能。除传统的对掉电、掉压、超温、泄漏等具有保护功能外,还能根据试验的具体要求,进行超行程、超负荷保护。

在具体的实现方式上有以下几个特点:

1. 双 CPU 并行工作,大大提高了采样及处理的速度,可以在执行复杂的控制程序的情况下,实现 1ms 的采样周期。在系统辨认及寻优过程中实现了无扰动切换。

2. 自动化程度高, 操作简单。试验前的操作过程采用了菜单式程序, 既方便又可靠。试验达到预定值后能自动卸荷并回到初始状态。在无人管理的情况下也不会造成事故。

3. 数据采集及整理全部自动化, 并能根据要求在试验过程中实时显示试验的进行情况, 事后能绘出各类试验曲线。

由于以上种种特点, 本机在整体水平上达到了世界一流的水准。目前调机工作已经完成, 初步的单轴和三轴压缩试验也已完成, 完全达到并超过了预定指标。尤其是纵向变形控制的单轴试验, 对几乎各种脆性岩样都能作出令人满意的破坏后区。根据资料显示, 这是目前为止任何电液伺服岩石试验机都尚不能做到的。

4 对有关岩石力学特性的两个基本问题的商榷

采用我们研制的新型电液伺服自适应控制的岩石力学试验机已进行了部分的单轴压缩试验。从目前已取得的试验结果看, 我们感到岩石力学基本特性方面有如下两个基本问题需进一步商榷。

4.1 将岩石荷载-位移全过程曲线的后区曲线划分为所谓 I 型和 II 型的分类法是存在问题的

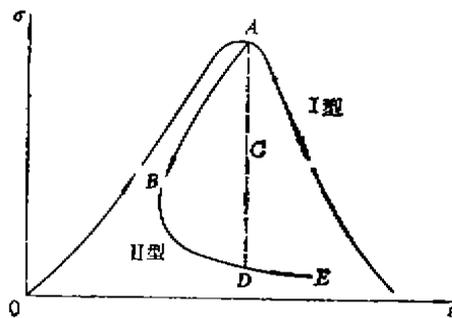


图 1 岩石荷载-位移曲线及分类^[1]

Fig.1 Load-displacement curves for rock and its classification

Wawersik 和 Fairhurst 在 1970 年^[1]将后区曲线划分为 I、II 型两个基本类型(图 1)。I 型为稳定断裂传播型。它的特点是外力超过了试件承载力的峰值后, 试件所储蓄的变形并不能使断裂继续扩展, 只有再增加外功才能使试件进一步的破损。韧性大的和软弱的岩类具有此特性。II 形称为非稳定断裂传播型。它的特点是外力超过峰值后, 尽管试验机不再做功, 但试件本身所储蓄的能量能使断裂继续扩展, 并导致整个试件破坏。他们认为大部分脆性岩石具有 II 型的后区特性。

上述的分类似乎已成为定论, 并被许多岩

石力学著作和文献广泛引用^[2,3,4,5,6]。

据我们了解, 文献[1]的作者提出上述分类时是基于这样的试验条件: 他们采用的是热胀式刚性机, 当超过强度峰值点后他们采用三只与试件平行安置的液压柱进行反向加荷从而达到卸荷。因此后区的卸荷过程中对于脆性岩类而言所显示的 II 型曲线的变形回弹是由于液压柱主动反向加荷的缘故。

当采用电液伺服控制机(例如从美国进口的 MTS 试验机)进行试验时, 由于控制方式还不够完善和先进, 因此对脆性岩类, 在采用纵向应变率控制时常常由于失控使试件崩溃而得不到后区曲线。转而采用横向应变率控制方式常被认为是获得脆性岩类后区曲线的基本途径。这种控制方式虽然比较敏感, 但在实施过程中就荷载和纵向应变而言是处于多次反复的加荷和卸荷、伸长和缩短的过程中, 所得出的 II 型曲线实质上是这种加荷卸荷过程的外包络

线。

我们可以进一步从能量的观点来分析图 1 所示的全过程曲线。图中 *ACD* 线是一条分界线, 如后区曲线在其右边, 即所谓的 I 型, 这意味着在破坏过程中尚需补充能量。如后区曲线在其左边 则为 II 型, 对这类岩石而言, 这意味着为了得出后区曲线在试件破坏过程中不但不需要补充能量, 还需要从岩石试件中“抽去”能量才能得到控制。如果这确实是岩石自身的特性, 则对具有所谓 II 型后区曲线的岩石类试件在破坏过程中的能量的抽排是绝对必需的, 由此导出的逻辑推论是在纵向应变率保持常数的条件下, 对这种岩类是绝对得不到后区特性曲线的, 因为纵向应变率控制方式意味着纵向应变的持续和单调增长, 从而机器始终在不断地对岩石试件做功。

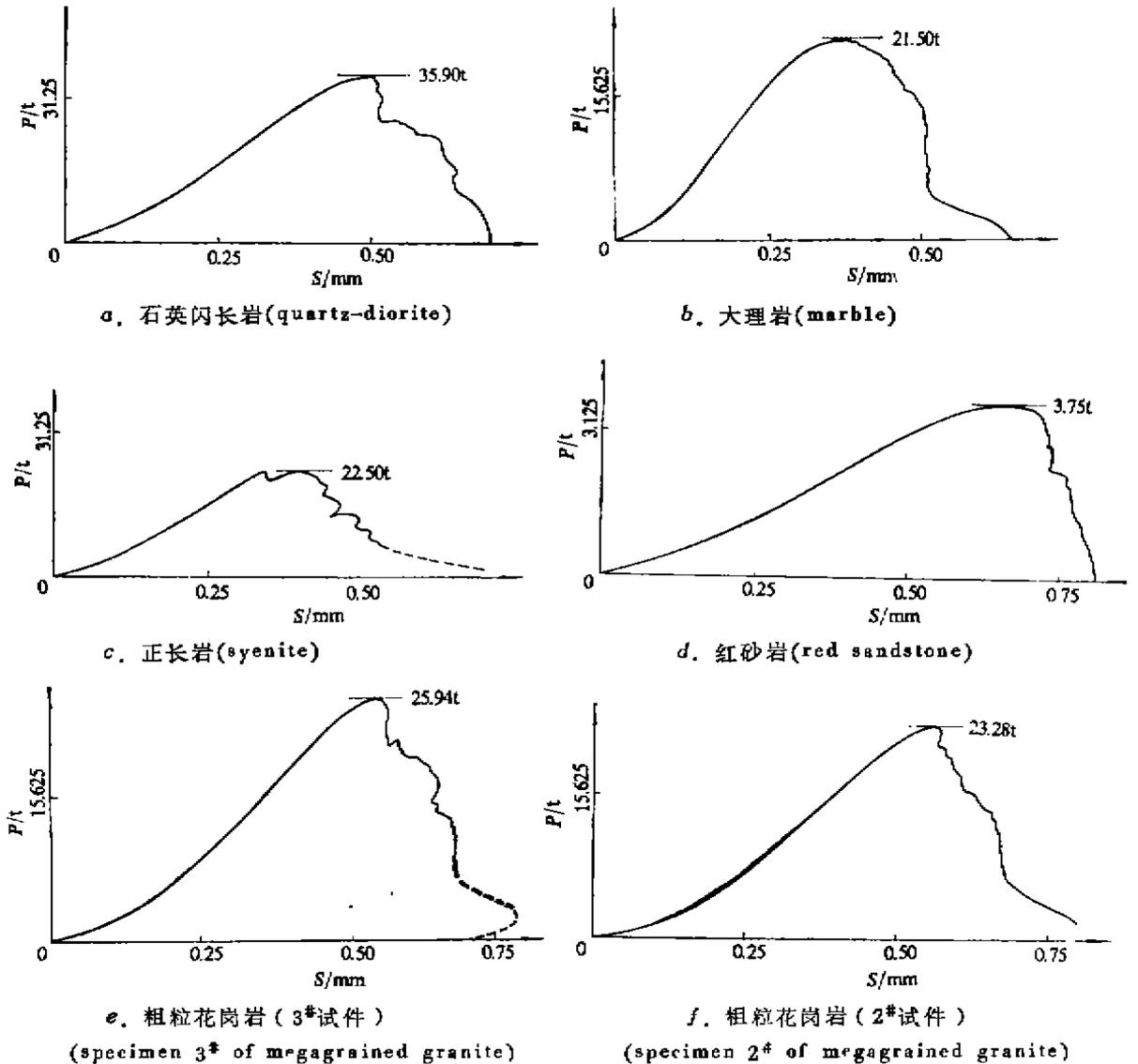


图 2 各种岩石试件的荷载位移曲线 ($\dot{\epsilon} = 5 \times 10^{-6} s^{-1}$)

Fig.2 Load-displacement curves for various rock specimens ($\dot{\epsilon} = 5 \times 10^{-6} s^{-1}$)

然而我们采用新型的自适应控制方式的电液伺服试验机对各种不同岩类进行的试验表明,在纵向应变率保持常数的条件下,都得到了荷载-位移全过程曲线。图2是石英闪长岩、大理岩、正长岩、红砂岩以及粗粒花岗岩试件的试验曲线。其中石英闪长岩、正长岩以及粗粒花岗岩的脆性明显,应属于所谓Ⅱ型那一类的岩石,但由于采用了比较先进的控制技术,它们都可以在纵向应变率控制条件下控制其破坏过程。得出的后区曲线必然在图1 ACD线的右侧,即从总体上说,为了导致这类试件的破坏仍然是需要增补能量的,而不是抽去能量。由此我们得出如下看法:

(1) 在先进的控制技术条件下,绝大部分岩石都可以在纵向应变率保持常数条件下得到过峰值的后区曲线,其破坏进程是可以受控的。从总体上说,就整个后区过程而言,试件的破坏仍然需要补充能量的。

(2) 因此Ⅰ、Ⅱ型的分类是不适宜的。其所以得出Ⅱ型的后区曲线看来是与不够完善的控制方式和试验条件有关。

(3) 对大部分岩石而言,其后区曲线都在图1 ACD线的右侧,脆性越大的岩石,其后区曲线愈陡,越接近ACD线。

4.2 把岩石的过峰值后的后区曲线视为本构或用以直接模拟岩石的“软化”特性,都是不适宜的

我们认为岩石的后区曲线虽然反映了岩石破坏过程中的某些性能,但它本质上并不是一种本构关系。因为在峰值后区,岩石试件部分已遭破坏,这部分可视为一种介质,但别的一部分仍然未遭破坏,此部分可视为另一种介质,因此是一种复杂状态,是由“不同介质”组成的系统。此时的后区曲线,只是这种复杂系统的综合特性的反映,显然这不可能是一种本构关系。因此在数值分析中用这种复杂系统的综合特性曲线作为本构关系,或作为描述那些过峰值强度后被判别为破坏单元的所谓软化模型显然是不合理的,并且是偏于危险的。

参 考 文 献

- 1 Wawersik W R, Fairhurst C. A study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments. *Int J Rock Mech Min Sci*, 1970; 7: 516—575
- 2 M S 佩特森 (1978). 实验岩石形变——脆性域. 张崇寿等译. 北京: 地质出版社, 1982
- 3 B H G 布雷迪, E T 布朗 (1985). 地下采矿岩石力学. 冯树仁等译. 北京: 煤炭工业出版社, 1990
- 4 李先炜. 岩块力学性质. 北京: 煤炭工业出版社, 1990
- 5 吴玉山, 林卓英. 单轴压缩下岩石破坏后区力学特性的试验研究. *岩土工程学报*, 1987; 9(1): 23—21
- 6 陶振宇, 潘别桐. 岩石力学原理和方法. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991

**The Servo-controlled Rock Mechanics Testing Machine
Based on The Self-adaptable Principle and It's Significance
for Some Research Field of Rock Mechanics**

Ge Xiurun Zhou Bohai Liu Mingguai Feng Dingxiang

Abstract

In this paper a modern rock mechanics testing machine of the new generation is introduced. The self-adaptable principle of the automatic control theory has been applied in the design of the machine.

This testing machine is also a multi-purpose one. The uniaxial compression test, the triaxial compression and tension test, the direct shear test and the fatigue test under cyclic loading with the max. frequency of 10 Hz can be carried out using the same machine.

Based on the new test results of the post-failure behaviour of rock obtained by use of this new testing machine it is proved that the classification of the complete curves of rocks which is common recognized in the literature is unreasonable.

Key words: rock mechanics testing machine, servo-controlled machine, uniaxial compression test, complete curves