

# 岩石力学室内试验装置的新进展 —RMT-64岩石力学试验系统\*

葛修润 周百海

(中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071)

**文 摘** 采用先进的设计方案、独特的结构布局,并采用了计算机直接控制和自适应控制技术,研制了一套功能多样化、体积小型化的RMT-64岩石力学试验系统,并进行了初步试验研究。该系统进行单轴压缩试验时对脆性明显的岩类大都能在纵向变形率控制下获得全过程曲线,而使用进口的电液伺服机时往往难以做到。这些试验结果已经为研究岩石力学的某些重大理论问题提供了依据。由于70年代初由国际著名学者提出的并沿用至今的关于岩石I型、II型分类准则与这些最新的试验成果不相符合,作者认为I型、II型分类概念应重新考虑。

**关键词** 岩石力学; 试验装置; 室内试验

**中图法分类号** TU 458; TU 415

## 1 前 言

近年来,由于岩石力学基本理论的发展和工程应用的需要,对岩石力学室内试验方法、试验内容、特别是室内试验装置提出了许多新的要求。例如,为了研究岩石的强度和变形特性及岩石发生破裂和破坏的发展过程,对岩石圆柱形试件进行单轴和三轴压缩试验,测定其轴向载荷和轴向变形及与横向变形,体积变形等的全过程曲线是十分重要的。

众所周知,要获取这类全过程曲线,传统的试验机无法满足要求。七十年代开始出现的电液伺服试验机较好地满足这方面的要求。目前,电液伺服试验机在岩石力学领域已得到相当广泛的应用。国际上生产这类试验装置的以MTS公司,Instron公司和岛津公司等最为著名。国内有些单位也在试制这类岩石力学试验机,但尚处于起步阶段,从技术性能上来看与国外产品还有不少差距。

近十年来,国内许多单位已经进口了为数不少的电液伺服试验机,价格十分昂贵。但从在岩石力学领域的使用情况看,这些国外制造的电液伺服试验机的功能还有不足之处。据作者看来,这些从国外引进的电液伺服机大都是沿用了材料试验机的设计方法,在设计时没有充分考虑到岩石力学试验的特点。为了跟踪岩石峰值后区的瞬态变化,要求试验机具有十分良好的动态性能。这一点在设计上也没有得到充分重视。因此,采用国外的电液伺服机对于脆性明显的岩类在纵向变形率保持常数的条件下进行单轴压缩

收稿日期:1993-12-10. 葛修润,男,59岁,研究员,博士导师,现从事岩石力学与试验研究。

\*实验部分系国家自然科学基金资助项目;仪器研制部分系中国科学院院长基金资助项目。

试验时常常难以获得峰值后区特性曲线,这就是说试验过峰值强度点后试验机容易失控。

目前已经引进的电液伺服试验机采用的都是模拟控制。其主要特点是采用了固定不变的控制器参数。我们认为,这种控制方式很难与岩石力学试验的要求相适应。岩石试件是整个闭环系统中的一环。它的力学特性将直接影响到系统特性。而岩石试件具有两个显著特点:一是不同岩石的力学特性相差甚远。二是同一个岩石试件在试验过程中其力学性能在不断变化。以峰值强度点为分界的前区和后区特性更是截然不同。采用固定不变的控制器参数显然难以保证试验机始终保持良好的动、静态特性。

业已进口的用于岩石力学领域的电液伺服机的功能单一也是一个值得改进的方面。许多机器只能做单轴和三轴的静态压缩试验。岩石和混凝土材料在周期载荷作用下的力学特性、不可逆变形的积累和发展以及岩石疲劳破坏的机理和疲劳强度研究等都是当今岩石力学界十分关注的研究课题。国内虽然已经引进了相当数量的电液伺服疲劳试验机,但是这些疲劳机的设计也是以金属材料为对象,以拉伸、弯曲等为主要的方式。而岩石的疲劳试验则以压缩状态下的周期载荷试验为主,而且对机器的轴向出力以及变形测量方面的要求都与金属材料的疲劳试验机有所不同。

对岩石节理面力学特性的试验研究也是岩石力学学科中一项十分重要的研究课题,节理的力学指标更是岩体工程中必需具备的基本力学指标之一。节理面的直接剪切试验是获取这种力学指标的一种主要试验方法。通过直剪试验,可以测定节理面的剪切强度与剪切位移的全过程曲线,研究法向载荷、法向位移控制条件对剪切强度的影响,以及模拟地震时反复剪切运动对节理面力学性能的影响等。国内、外一些单位为了工作的需要自行研制了电液伺服直剪仪,但很少见到定型的产品。

我们为了适应岩石力学学科发展的需要,为了满足岩体工程中关于室内岩石试验的要求,在分析国外设备的优缺点的基础上,专门设计研制了一套功能多样化、体积小型的岩石力学试验系统。我们采用了先进的设计方案,独特的结构布局,并采用了计算机直接控制和自适应控制技术。在技术水平上以赶超国际先进水平为目标。

## 2 RMT-64 岩石力学试验系统的技术性能和特点

### 2.1 概况

RMT-64 岩石力学试验系统的研制工作经过多年的努力业已完成。研制过程中得到中国科学院院长基金的特别支持。

这一套功能多样化的试验装置,既可以作单轴和三轴压缩试验,也可以作节理面的直剪试验。其突出的优点之一是在进行压缩过程和直剪试验时可以进行周期载荷下的疲劳试验,也可以进行松弛试验。以单轴和三轴压缩试验为例,周期载荷频率可高达 20Hz。RMT-64 岩石力学试验系统可采用三种不同的控制模式;即载荷控制,纵向变形(应变)率控制或剪切位移率和横向变形(应变)率控制。机器的动态性能十分良好,纵向变形率可高达 1mm/s,这就是说,在进行单轴压缩试验时,从试件开始加载到试件破坏的整个过程不超过 1 秒钟,而且这瞬间变化的全过程曲线能实时显示在显示屏上,各项测

量数据由计算机自动记录。后处理软件丰富,试验结束后可立即给出各种业已整理好的试验曲线和数据。

众所周知,即使使用从国外引进的电液伺服机对于脆性岩类进行单轴压缩试验时,也很难采用纵向变形率控制方式,因为在这种控制方式下机器很容易失控,这也是美国 MTS 公司等推荐改用横向变形率控制方式进行试验的主要原因。由于 RMT-64 试验系统优良的静、动态性能、在纵向变形率控制方式下,对于大部分脆性明显的岩类均可测得全过程曲线,试验的成功率远远高于从国外引进的机器。

RMT-64 岩石力学试验系统已于一九九三年十二月十六日,由中国科学院组织鉴定,参加鉴定会的有中国科学院院士及各方面的专家。他们一致认为:RMT-64 型岩石力学试验系统的总体性能与国外同类型试验装置相比已经达到国际领先水平。

## 2.2 RMT-64 岩石力学试验系统的技术性能及特点

RMT-64 岩石力学试验系统由主机、液压系统、伺服控制系统、计算机控制及处理系统四大部分组成。整个系统具有良好的动、静态特性,能跟踪脆性岩石的瞬间破坏,对大部分岩石都能作出令人满意的试验结果。该系统自动化程度高,试验功能多,操作简单、方便,保护功能强、屏幕显示丰富,便于后处理。其总体性能指标如下:

技术特点:(1)试验功能多,一机多用;(2)响应快,跟踪性能好,纠偏能力强;(3)超调小,稳定性好;(4)无静差,实现了二阶无差度;(5)精度高;(6)自动化程度高、操作方便、保护功能强;(7)软件功能强,自适应实时控制,丰富的屏幕显示,数据自动处理与贮存,后处理方便。

技术指标:(1)最大垂直静载荷 600kN, 最大垂直动载荷 500kN;(2)最大水平静载荷 400kN, 最大水平动载荷 300kN;(3)系统精度  $< 0.5\%$  F、S;(4)系统稳定性:零漂  $< \pm 0.05\%$  F、S/h;(5)最大压缩变形量 5mm;(6)最大剪切变形量 15mm;(7)三轴室最高围压 50MPa;(8)伺服液压缸行程 40mm。

## 3 RMT-64 岩石力学试验系统的主机结构

RMT-64 系统的主机由刚性机架,安装底座、三轴试验装置、剪切试验装置、二个高性能伺服液压缸等部分组成。各种试验装置的安装十分方便,更换不同的装置就能做不同的试验。在主机的设计上我们采用了许多独特的方法,使得这台试验机具有许多与众不同的特点。

### 3.1 多功能

在这台试验机上可以进行多种岩石力学试验,最大限度地利用了伺服系统的能力,基本能够满足工程应用和基础理论研究方面的需要。可进行的试验类型和达到的技术指标见表 1。

### 3.2 结构独特

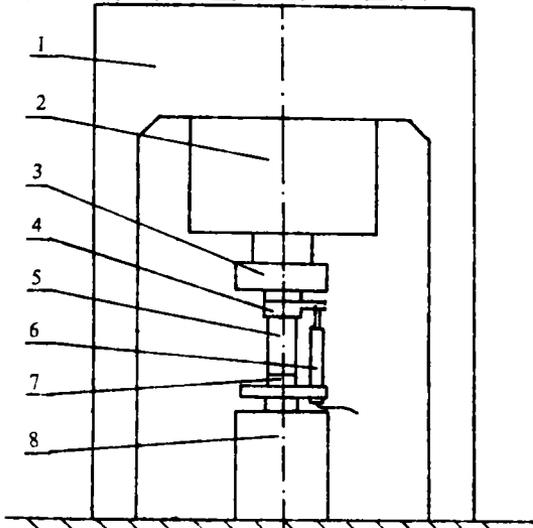
为了满足多功能的要求,在总体设计上采用了与传统方式不同的结构:

(1) 水平剪力由拉力提供,使作用力与反力基本平衡,省去了笨重的反力座;(2) 垂直加荷油缸上置,使底座有足够的空间来安放各种试验装置;(3) 机架刚度远小于一般

表1 RMT-64岩石力学试验系统的试验类型和技术指标  
Tab.1 Test types and technical indices of RMT-64 system

试验类型	控制方式	试件尺寸(mm)	技 术 指 标
单轴压缩	纵向变形 或横向变形	$\phi 50 \times 100 \sim 110$	纵向或横向变形(应变)率保持匀速,可在任意点进行 松弛试验 应变率范围 $1 \times 10^{-2} \sim 10^{-7}/s$
三轴压缩	纵向变形	$\phi 50 \times 100$	纵向变形(应变)率保持匀速,可在任意点进行松弛试 验 应变率范围 $1 \times 10^{-2} \sim 10^{-7}/s$ 最高围压:50MPa
单轴疲劳	轴 向 力	$\phi 50 \times 100 \sim 110$	正弦波、三角波、方波 $F_{max} = 20Hz$
三轴疲劳	轴 向 力	$\phi 50 \times 100$	正弦波、三角波、方波 $F_{max} = 20Hz$ 最高围压:50MPa
直 剪	法 向 力 或位移速率	$300 \times 200 \times 200$	法向力恒定,剪切位移速率保持常数 最高速率为 $1 \times 10^{-4} mm/s$
直剪疲劳	法 向 力 或水平力	$300 \times 200 \times 200$	法向力恒定 水平加载:正弦波、三角波、方波 $F_{max} = 5Hz$

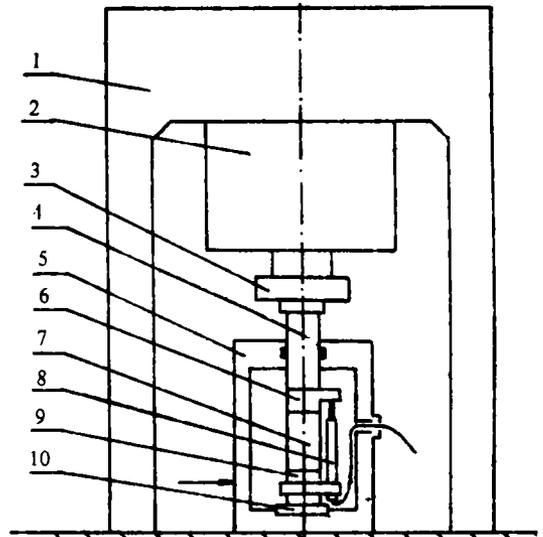
的伺服刚性试验机,这是经过严密的分析计算而确定的。由于以上这些特点,整体结构小巧而紧凑,重量也大大减轻了。



1. 机架; 2.600kN 伺服液压缸; 3. 载荷传感器; 4. 上垫块; 5. 试件; 6. 位移传感器; 7. 下垫块  
8. 刚性座

图1 单轴试验示意图

Fig.1 Schematic diagram of axial tests



1. 机架; 2.600kN 伺服液压缸; 3. 载荷传感器; 4. 加力活塞; 5. 三轴室; 6. 上垫块; 7. 试件; 8. 位移传感器; 9. 下垫块; 10. 底座

图2 三轴试验示意图

Fig.2 Schematic diagram of triaxial tests

### 3.3 自平衡式三轴试验装置

在传统的三轴室中,加力活塞的运动会造成围压的波动,我们设计了自平衡式三轴试验装置。在几乎不增加体积和重量的情况下,消除了活塞运动造成的围压波动,同时也抵消了围压对加力活塞的作用力,试验过程中围压始终保持稳定。这样就省去了稳压装置,同时还提高了试验的准确度和系统的效率。该装置运动副之间的摩擦力很小,消除了非线性对系统的影响。

### 3.4 高性能伺服液压缸

液压缸是系统的执行机构,它的性能直接关系到整个伺服系统的性能。我们在设计中充分考虑了岩石力学试验对系统动态特性的特殊要求,液压缸为对称结构,并采用了先进的多级组合密封方式,大大地提高了系统的线性和响应速度,消除了极限环与爬行现象。

### 3.5 剪切试验装置

剪切试验时的法向与水平向的载荷、位移均为伺服控制,整个剪切装置与主机的各接触面之间均装有滚动体,以使摩擦力减至最小。有专门的升降装置供装取试件使用。操作简单、方便。

RMT-64系统的单轴压缩试验,三轴压缩试验和剪切试验装置的示意图分别见图1、2和图3。

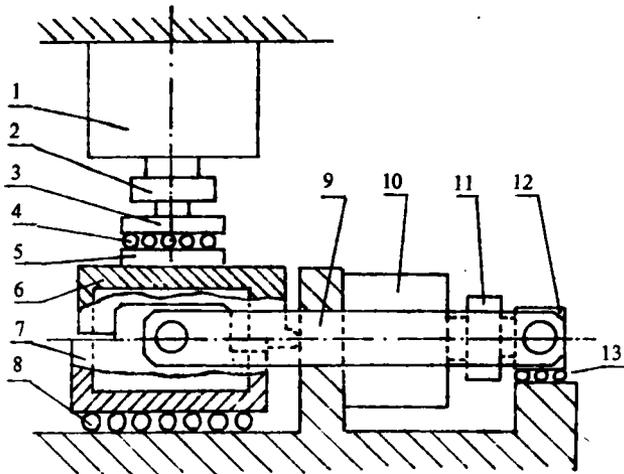
## 4 RMT-64岩石力学试验系统的伺服液压源

伺服液压源的作用是

向液压缸提供恒温、恒压的稳定液流,它提供的流量既要满足系统工作需要又要尽量减小能耗。为此,我们作了精心的设计,使之与系统相匹配。设置了热交换器以稳定油温,设置了三级过滤装置来净化液压油以满足精密伺服系统的要求。同时还设置了液压系统超温、超压、泄漏和滤油器堵塞等多种保护及报警装置。液压原理见图4。

液压源技术指标:工作压力 21MPa; 额定流量 16L/m; 过滤精度 10 $\mu$ m; 工作油温 40 $^{\circ}$ C~45 $^{\circ}$ C; 油泵型号 CY-Y132M-4; 电机功率:7.5kW。

## 5 RMT-64的伺服控制系统

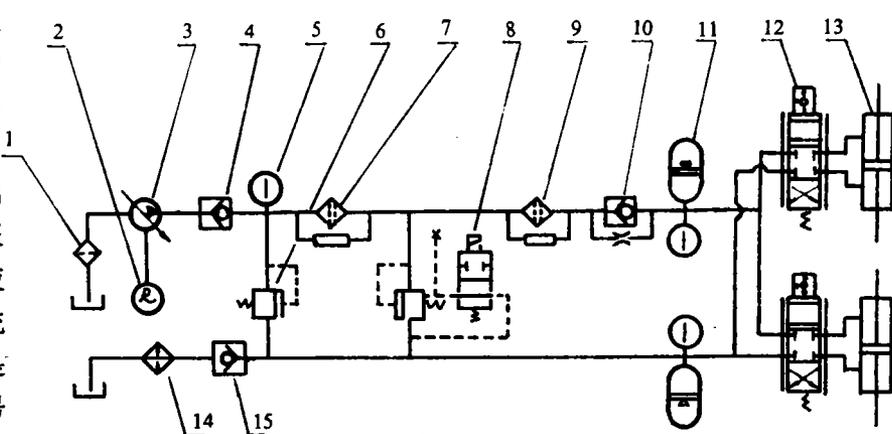


1.600kN 伺服缸; 2. 载荷传感器; 3. 上垫板; 4. 滚动体; 5. 下垫板; 6. 上剪切盒; 7. 下剪切盒; 8. 滚动体; 9. 拉杆; 10.400kN 伺服缸; 11. 载荷传感器; 12. 承力横梁; 13. 滚动体

图3 剪切试验示意图

Fig.3 Schematic diagram of shearing tests

伺服控制系统是整个闭环系统中的重要部分,它的主要作用有二:一是将计算机发出的指令信号经伺服放大器传送给电液伺服阀以控制系统的工作状态。二是将系统的反馈信号经传感器和二次仪表传送到计算机系统,以便对数据进行处理和贮存。同时还可以通过 X-Y



1.粗滤油器; 2.电动机; 3.油泵; 4.单向阀; 5.压力表; 6.安全阀; 7.次级滤油器; 8.电磁溢流阀; 9.精滤油器; 10.单向节流阀; 11.蓄能器; 12.电液伺服阀; 13.伺服液压缸

图 4 RMT-64 的液压系统原理图

Fig.4 Principle of the hydraulic system in RMT-64

记录仪和数显表显示试验的进程和参数。此外,它还可以向伺服阀提供激振信号,以改善其动态响应并减小迟滞。这个部分主要由电液伺服阀,伺服放大器,二个力传感器及二次仪表,八个位移传感器及二次仪表,数显表、X-Y 记录仪,操作面板等组成。传感器及二次仪表均是专门设计加工的,具有精度高、稳定性好、频宽大的特点。控制系统原理见图 5。

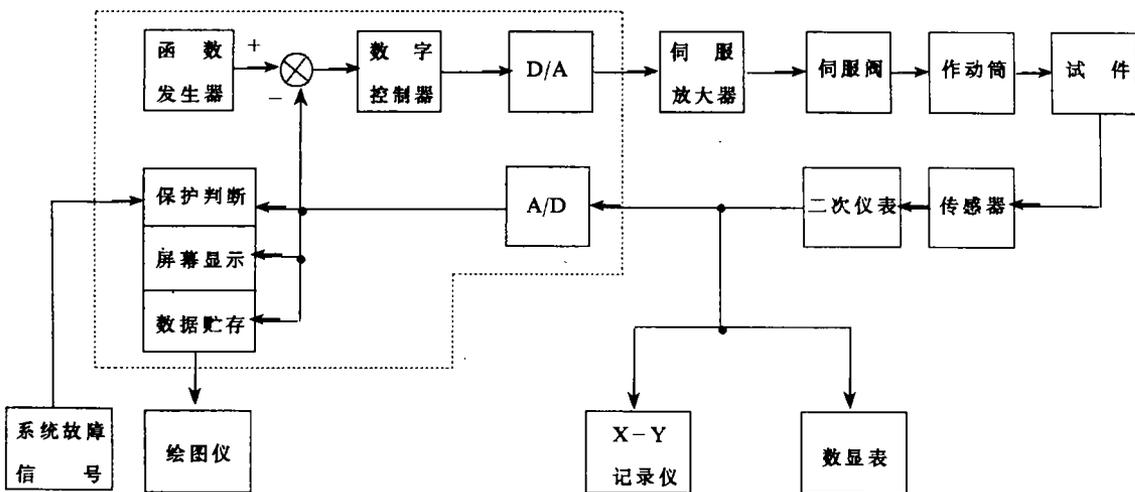


图 5 RMT-64 的控制系统原理图

Fig.5 Principle of the control system in RMT-64

## 6 RMT-64 的计算机控制及数据处理系统

这个系统由一台 AST386/33 计算机,一块高性能 A/D、D/A 数据采集板,以及一台绘

图仪组成。RMT-64系统的运行是在计算机直接控制下进行的。我们采用了先进的自适应控制方法,它能随着控制对象的参数变化而不断改变控制器的参数,使系统始终处于一种最优控制状态。这样,无论试件的力学特性如何变化,都能获得令人满意的试验结果。在试验进行的过程中,能在屏幕上实时显示主要的试验曲线,加载波形和试验数据。同时,所有的试验数据都由计算机采集并贮存,试验结束后,可以马上给出试验结果和各种试验曲线。

整个试验机系统的自动化程度很高,没有传统的控制仪表。试验参数用键盘输入并在屏幕上显示,操作简单、方便。整个试验过程完全是自动进行的,试验达到预定值后能自动卸载并回到初始状态,在无人管理的情况下也不会出现问题,由于计算机参与,系统具有多种保护功能,能避免意外的损坏。

(待续)

## 简 讯

### 我国岩石力学试验技术的重大进展

中科院院长基金特别支持项目、代表国际领先水平的RMT-64岩石力学试验系统,最近由中国科学院武汉岩土力学研究所研制成功,于1993年12月16日在武汉通过了由中国科学院组织的专家鉴定。参加鉴定的专家一致认为:该系统设计新颖,技术先进,与国内外同类试验机相比较,在整体技术上达到国际领先水平,该系统的研制成功,使得同行可以开展许多以前无法开展的研究工作,对岩石力学的学科发展有重要意义,它可替代进口产品,具有良好的出口前景。专家组成员、学部委员、华中理工大学校长、著名机械工程专家杨叔子教授认为,该系统采用的数字化技术代表了试验机今后发展的方向。该系统的研制成功标志着我国岩石力学试验技术跃上了一个新的台阶。

RMT-64岩石力学试验系统是由武汉岩土力学所葛修润研究员主持研制的,周北海工程师为该系统的主设计师。该研制组在广泛调研国内外岩石力学试验技术现状的基础上,经过数年攻关研制成功了这套技术先进、具有多功能特点的电液伺服控制试验系统。RMT-64系统采用了独特的设计方案,整个试验过程完全由计算机直接控制(D·D·C方式),自动化程度高,控制终端屏幕显示功能丰富,能实时显示试验曲线和数据,配有各种后处理软件,试验结束即可得到结果。该系统另外一个最大的特点就是试验成功率高,明显优于国内外同类试验机。目前岩石力学纵向变形控制下的单轴压缩试验成功率很低,而该系统却能对大多数岩石都做出令人满意的试验结果。在控制台上无需复杂的调节旋钮和开关,整个操作都是在计算机键盘上进行的,既简单又方便。

该系统研制得到了中国科学院院长基金的特别支持。科研人员运用该系统做了许多以前无法开展的研究工作,成功地完成了国家自然科学基金和中国科学院择优支持的“八五”重点基础课题的研究,取得了令人满意的结果。

据悉,在研制阶段中,瑞典、香港等大学的学者、专家对该系统给予了极高的评价,并表示待鉴定后将着手洽谈购买事宜。RMT-64系统以其优良的性能,明显低于国外同类产品的价格,具有很强的竞争力。预计不久将进入国际市场,为此,将结束中国高性能试验机只能进口不能出口的历史。

(陈继荣)