

# 微型单轴煤岩试验机的研制及试验研究

赵 东, 冯增朝, 赵阳升

(太原理工大学 采矿工艺研究所, 山西 太原 030024)

**摘要:** 针对较小煤岩试件单轴抗压强度的测定和破坏规律研究的不足, 设计针对  $\phi 5\text{ mm} \times 10\text{ mm}$  的微小试件单轴试验的微型试验机, 对煤岩破坏过程中的裂纹扩展规律及破坏机制进行研究。该试验机主要由预应力装置、主加载应力装置、试件腔和液压传输系统组成, 与现有试验机相比, 有如下特点: (1) 能够在煤岩试件加载过程中, 与三维显微 CT 耦合使用, 观测内部裂纹裂缝的产生、发展和对试件破坏的影响; (2) 可以绘制出与普通试验机相类似的煤岩全应力 - 应变曲线, 通过尺度效应换算系数  $\alpha$  得出任意大小煤岩试件的单轴抗压强度, 并且能够如实反映微型煤岩试件加载过程中的各个变形阶段; (3) 与之前对煤岩破坏研究的数值模拟方法相结合并比较其结果的异同点, 得出的结论可以深化煤岩破坏规律的相关理论。装置操作性和便携性较强, 为了使其应用范围进一步扩大, 还将对各部件进行改进, 提高加载装置的刚度和加载对试件产生的最大应变值, 使其能够测定更高强度的岩石试件。初步的试验结果证实试验机研究的可行性, 试验机的研制弥补普通试验机和大型试验机对煤岩破坏规律研究的不足, 对岩石力学学科的发展起到一定的推动作用。

**关键词:** 岩石力学; 微型试验机; 单轴压缩; 三维显微 CT; 全应力 - 应变曲线

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2010)07 - 1314 - 09

## DEVELOPMENT OF MICRO UNIAXIAL COAL AND ROCK TESTING MACHINE AND EXPERIMENTAL STUDY

ZHAO Dong, FENG Zengchao, ZHAO Yangsheng

(Institute of Mining Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

**Abstract:** Because of the deficiency of uniaxial compression intensity testing and failure law on micro rock-samples, a testing machine for micro sample  $\phi 5\text{ mm} \times 10\text{ mm}$  has been designed in order to study fractures extending or breakage mechanism during the rock and coal samples under uniaxial compression. The machine is mostly composed of prestressing equipment, primary loading stress equipment, sample room and hydraulic pressure transmission equipment. There are several advantages compared with typical or ordinary testing machine: (1) During the loading process of rock and coal samples and coupling with three-dimension microscope CT, emergence and development of inner fractures and cracks have been observed. (2) Curves of complete stress-strain which are similar with ordinary curves have been drawn, using size-scale effects coefficient for calculating and obtaining the uniaxial compression intensity in others size of samples. Beyond these curves, four phases of micro samples under compression have been reflected faithfully during the whole testing course. (3) Compared with the former numerical simulation of rock testing, the same and different aspects have been

**收稿日期:** 2010 - 02 - 25; **修回日期:** 2010 - 03 - 27

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目(50534030); 山西省自然科学基金项目(2009011027 - 1); 山西省研究生优秀创新项目(20093040); 山西省高等学校优秀青年学术带头人支持计划资助(2008)

**作者简介:** 赵 东(1986 -), 男, 2007 年毕业于太原理工大学安全工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩石力学和煤层气开采及综合利用方面的研究工作。E-mail: zhaodong0301@163.com

analyzed; and the conclusion is used for deeper interrelated theories. In order to get more applications, in the future the machine's each part will be perfected: not only the operational characteristics will be enhanced, but also the loading values will be leveled up, so as to test the higher intensity rock-samples. The elementary testing results are proved that the experimental study is scientific and feasible. The development of this testing machine will improve the investigations on fracture law and the development of rock mechanics to which ordinary and large-scale machines could not implement.

**Key words:** rock mechanics; micro testing machine; uniaxial compression; three-dimension microscope CT; complete curve of stress-strain

## 1 引言

岩石力学的发展始终是伴随着试验机的发展而逐渐与材料力学独立,并发展、成长和成熟的。早期,岩石力学的试验完全采用普通的材料试验机,之后随着人们对岩石和试验机刚度的认识,发明了刚性试验机,为了模拟地壳深部岩石的受力状态,研制了围压三轴试验机、真三轴试验机(仪)、高温高压三轴试验机和大型真三轴试验机,并随之进行了大量的相关试验研究,揭示了岩石、岩体的许多鲜为人知的特性,大大推动了岩石力学学科的发展,成为对国民经济中有重要影响的新兴学科<sup>[1~8]</sup>。

岩石的单轴抗压强度是其主要指标之一,岩石的单轴破坏形式及破坏方式亦是岩石力学相关问题的重要参考依据。之前的研究集中在宏观岩体的受力特征及外观的变形和破坏,在岩石单轴压缩至破坏的过程中,对于内部原生裂隙的扩张发展以及新的裂纹裂缝产生的研究,以上的试验机由于体积比较庞大,只能处理标准试件或大试件,例如 $\phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的标准圆柱形试件, $\phi 100\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ 的圆柱形大试件和 $1\text{ m}\times 1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 的大型立方体真三轴试件等,并且只能对试件表面产生的裂纹或裂缝进行分析研究,无法对内部裂隙、裂纹或裂缝的产生发展规律进行研究。而至于微小试件的细观变形及破坏规律的试验研究,至今鲜有人研究,只涉及对微小试件破坏过程描述的数值模拟研究<sup>[9]</sup>。微型单轴煤岩试验机的研制及相关应用,恰好弥补了这一空白,通过对试件的轴向加载,并与三维显微CT耦合使用,在整个试验过程中可以将单轴压缩引起的试件内部原生裂隙的发展及新的裂纹、裂缝的产生规律加以分析,从而更好地对单轴压缩时岩石变形的细观特性及破坏规律进行研究。

## 2 试验机的功能参数和试件的选用

### 2.1 主要功能

试验机的加载方式是单轴的。第一,可用于对 $\phi 5\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 的标准微型圆柱形岩石及煤试件进行单轴抗压强度试验,加载可以是手动也可以是自动控制,加载速率可以调节,根据试验数据绘制整个试验过程的全应力-应变曲线,再与三维显微CT耦合观测整个破坏过程,得出试件在受轴向加载时,内部裂纹的产生及扩展,以及使得试件最终破坏的断裂面的状态,进而对受轴向加载时的破坏方式和相应的峰值强度及其他强度值加以分析;第二,可以预先设定某一强度值,对试件进行蠕变试验,配以显微CT观测试件蠕变过程中原有微裂隙面的发展,以及是否有新的裂纹、裂缝产生,在长期的承载下试件是否会发生破坏,如果发生破坏其首要裂隙面是如何发展的;第三,根据特定的需要,可以对直径小于 $5\text{ mm}$ 的煤岩试件进行强度或蠕变试验,但直径不能小于 $3\text{ mm}$ ,在此尺寸下,试件的加工非常困难,而且试件较易破坏,不易得到理想的全应力-应变曲线。具体可以分为以下几方面:

(1) 标准微型煤岩试件的单轴抗压强度测定及全应力-应变曲线的绘制;

(2) 与三维显微CT耦合,在一定的加载速率下,煤岩试件的裂纹扩展随承载强度的变化;

(3) 与三维显微CT耦合,设定某一应力值,观测煤岩试件在特定承载强度下的蠕变规律及内部裂隙的发展;

(4) 特定需求下,较小试件的强度及蠕变试验及与三维显微CT耦合观测。

### 2.2 相关技术参数

(1) 试验机的刚度为 $0.8\times 10^4\text{ kN/m}$ ,加载装置的弹性模量为 $206\text{ GPa}$ ,剪切模量为 $80\text{ GPa}$ ,泊松比 $0.26$ ,所测试件的弹性模量为 $0.25\sim 5\text{ GPa}$ ,泊松

比 0.11~0.25, 试件的刚度为 $(0.1\sim1)\times 10^2$  kN/m。

(2) 所测试件的最大应力为 80 MPa, 高于此应力的岩石, 会由于试件刚度与试验机刚度相近, 而使结果偏差较大, 不能进行试验。

(3) 试件的标准尺寸为 $\phi 5$  mm $\times$ 10 mm, 根据特定需求, 直径可以略微减小, 但不能小于 3 mm。

(4) 试验机对试件产生变形的精度为 $5\times 10^{-4}$  mm。

(5) 加载过程中试验机对试件产生的最大变形是 0.8 mm。

### 2.3 试件的选用

国际岩石力学学会对岩石试验的试件尺寸要求是<sup>[10]</sup>: 试件高度与直径之比为 2.0~3.0, 样品直径比岩石内矿物颗粒的平均直径大 10 倍以上。本试验机所试验的煤岩样品颗粒直径是十微米至百微米级, 与试件直径之比符合要求, 而且取样是采用台式钻样机进行, 钻头是标准的 5 mm 煤岩小试样钻头, 由于取样中可能出现一系列外部因素, 例如若所取样品位于煤岩本身的裂隙上, 则会造成取样不成功, 因此取出来可以试验的样品宏观上看肯定是均匀的, 可以进行试验。但试件的大小会对测定的强度值产生影响, 存在尺度效应, 具体换算关系式为

$$\sigma_1 / \sigma_2 = (D_1 / D_2)^a \quad (1)$$

式中:  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  分别为常规试件和本试验试样这 2 种尺寸下岩石试件的单轴抗压强度;  $D_1$ ,  $D_2$  分别为常规试件和本试验试样 2 种尺寸下岩石试件的横截面直径;  $a$  为尺度效应系数。

国际岩石力学建议的标准试件形状是圆柱形, 尺寸为 $\phi 50$  mm $\times$ 100 mm, 而本试验的试件尺寸为 $\phi 5$  mm $\times$ 10 mm, 直径的比值是 10:1, 便于计算, 而且此尺寸以下的试件加工较困难。 $a$  随试件的属性而有所不同, 范围为 0.1~1, 因此, 用本试验机测得的峰值强度和残余强度, 与先前普通试验机测得的结果相比较, 通过式(1)的换算, 得到的强度值仍然可以使用, 而且试验证明绘制出的整个变形破坏过程的全应力-应变曲线也是科学的<sup>[10~12]</sup>。

## 3 试验机的结构和原理

### 3.1 试验机的外观组成及与显微 CT 的组合

试验机底部半径为 40 mm, 总高度为 165 mm, 其中加载装置高度为 55 mm。图 1 为试验机的外观尺寸, 并用刻度尺标示实物尺寸, 顶部螺母是预应力加载装置, 以下中空钢管是试件放置腔, 其下部的较大构件是承载装置和相应的液压传动装置, 外接有精密压力表, 旁边的旋钮是加载螺母。图 2 为试验机与三维显微 CT 配套耦合使用图, CT 机的探头紧挨着试件腔, 工作时 X 射线透过试件腔来观测内部试件的变形, 随着对试件的加载值逐步增加, 进而观测试件承载时的所有变形阶段直至最终破坏。



图 1 试验机的外观尺寸

Fig.1 Appearance dimension of testing machine



图 2 试验机与三维显微 CT 的配套耦合使用图

Fig.2 Mating coupling of testing machine and three-dimensional microscope CT

### 3.2 试验机的结构组成

试验机由预应力装置、主加载应力装置、放置试件的试件腔、精密压力表和内部的液压传输系统五部分组成, 内部结构图如图 3 所示。

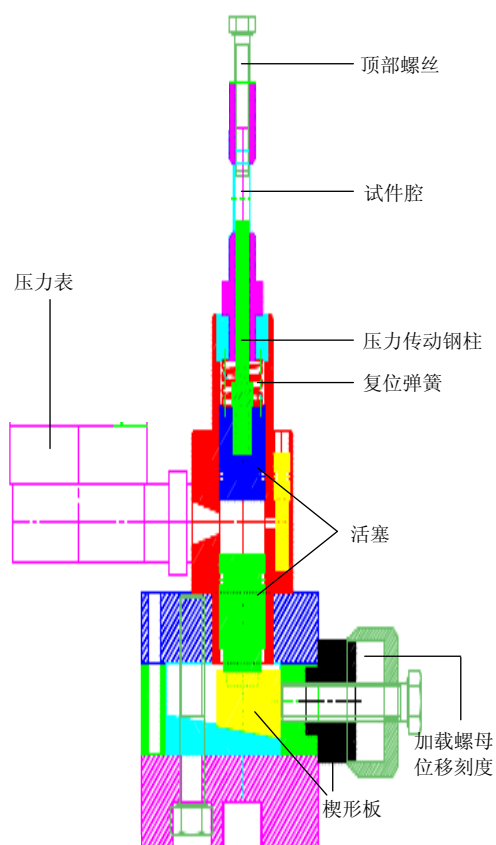


图 3 试验机的内部结构图

Fig.3 Scheme of inside structure of testing machine

### 3.2.1 预应力装置

主要作用是装入试件以后, 通过其上部的螺母旋扭给试件一个预应力, 预应力的值根据试件的情况而定, 可以是 0 也可以是具体的值, 前提是不能破坏试件, 并且尽可能使试验机的主加载装置产生的应变达到最大值以前, 试件发生破坏, 最终能得出完整的全应力 - 应变曲线, 以揭示试件的强度特性, 并且结合所绘曲线对所有的变形阶段加以描述(如压密阶段、弹性阶段、屈服阶段和破坏后残余阶段)。由于试验机的加载螺母对试件产生的变形有限, 对标准试件来说只能达到 8% 的应变, 而往往有些情况下, 试件达到试验机的最大应变时, 试件没有发生破坏, 此时就得出全应力 - 应变曲线, 因此只要试件出现这种情况时, 相类似的试件再进行试验时就要用预应力装置来预先加载, 通过预先加载对试件产生的应变和试验时主加载螺母产生应变之和, 最终使试件发生破坏, 得出全过程曲线。预应力装置的另一个作用是, 预先将试件锁紧在试件腔里, 这样就可以通过之后的逐步加载来逐点绘制应力 - 应变曲线, 如果不预先锁紧试件, 加载螺

母加载时, 就会出现一段空载, 这样就浪费了原本就有限的加载位移值。预应力装置的原理与加载螺母是一样的, 可以理解为试验机的上下两个装置分别加载, 最终目的相同, 就是要使试件发生破坏, 该装置也是采用旋转螺母的方式加载, 螺母旋转一圈产生的位移为 0.2 mm, 可以在螺母外圈加上环形百分尺, 这样旋转一个刻度产生的位移为  $2 \times 10^{-3}$  mm, 精度为  $1 \times 10^{-3}$  mm, 符合试验要求。

### 3.2.2 主加载应力装置

主要作用是试验时通过加载装置螺母上的位移刻度值, 来确定试件的绝对变形量, 并根据相对应的应力值来绘制全应力 - 应变曲线。具体过程是试件装入试件腔及根据试件属性加载相应的预应力后, 对试件进行精准的单轴抗压强度试验, 直至试件发生破坏并且出现残余强度, 此时试验完成之后绘制曲线。装置主要由一个微型刻度加载装置(加载螺母)及内部的一个楔形面组成, 加载方式分为手动和自动控制加载, 手动加载时通过旋转加载螺母推动楔形板前进, 同时使得楔形板的顶面向试件的轴向移动, 从而对试件产生轴向的压缩, 应力随之增大, 直至试件破坏, 完成对试件的加载; 自动控制加载主要用于与三维显微 CT 的耦合使用以及对加载速率要求较高的试验中, 在主加载旋扭上用台式钻机钻开 2~3 个孔, 随后插入不锈钢棒与环形装置固定在一起, 这样就使得环形装置旋转时带动螺母旋转, 控制装置可以放置在 CT 室外面而与之隔离, 通过设定的旋转速率对环形装置进行控制, 从而对试件产生均匀的加载, 随之试件产生变形, 整个变形与加载的过程可以透过显微 CT 观测, 环形装置的外盘仍然采用百分刻度, 即一圈一百个刻度值, 刻度仪转动一个刻度, 试件产生的变形为  $1 \times 10^{-3}$  mm, 精度为  $5 \times 10^{-4}$  mm, 加载螺母最大旋程为 8 圈, 一圈对应一百刻度值, 对试件产生的最大变形为 0.8 mm, 整个测量过程的精度是符合要求的。

### 3.2.3 放置试件的试件腔

位于预应力装置与内部压力室之间, 是一个圆柱型的中空不锈钢管, 钢管的内径为 6 mm, 以保证试件在加载过程中, 内部有足够的变形空间, 并且不会对试件产生偏移的变形。钢管的作用是放置试件, 试验时不至于使试件偏移而偏出加载装置。当与三维显微 CT 耦合时, 试件腔的材质就要换作高强度钛合金, 这是由于钢与煤岩试件的密度相差

较大, 在 CT 机进行扫描时, 会由于外壳的阻挡而使内部试件的图像模糊不清, 采用高强度钛合金后, 由于钛的密度很小, 仅比煤岩的密度大一点点, 因此用显微 CT 扫描时, 可以呈现出清晰完整的变形图像。

### 3.2.4 精密压力表

压力表的精度是 0.1 MPa, 为数字式压力表, 工作原理是通过压力腔内的液压压力值来反映到此表上的具体数值, 此值需要通过一定的换算得到此时试件所受的应力值, 如果与显微 CT 耦合使用时, 就将此表换成高精密记忆数字压力表。

### 3.2.5 液压传输系统

此系统是内部所受应力值的测定及承载的核心装置, 通过对试件的加载产生的形变, 使得试件产生相应的抗压强度, 此应力值通过加载钢柱传递至内部的液压腔室中, 通过液压腔室接触面积换算得到的应力值反映到压力表中显示出来, 因此此系统是应力的传递、转换和显示系统。

### 3.3 工作原理及与三维显微 CT 的耦合使用

试验机的加载工作系统由以下几部分组成: 加载螺母、楔形板、液压腔和承载装置。试件放入试件腔中, 由顶部螺丝固定, 可加载预应力, 加载大小取决于试件强度; 加载时通过旋转加载螺母, 使其不断前进, 通过挤压楔形板使之与螺母一起前进, 楔形板的前进带动活塞向上移动, 由于楔形板长高比是 10:1, 螺母旋转一圈螺纹前进 1 mm, 所以活塞移动的距离为 0.1 mm, 对试件产生的变形是 0.1 mm。活塞压缩液压腔时产生压力, 并在压力表中显示, 液压腔直径是 18 mm, 压力通过钢柱传递至试件腔中, 试件所受压力等同于液压腔中对活塞的压力, 由于试件的尺寸是 5 mm, 根据关系式:

$$\sigma_{\text{表}} S = \sigma_{\text{试件}} s \quad (2)$$

式中:  $\sigma_{\text{表}}$ ,  $S$  分别为压力表显示的抗压强度和液压腔的横截面积;  $\sigma_{\text{试件}}$ ,  $s$  分别为试件的实际抗压强度和试件的横截面积。由式(1)可得试件所受的应力为压力表显示值的 13 倍。螺母最大旋转圈数为 8, 对试件产生的最大变形是 0.8 mm。试验机上部有一复位弹簧, 用以卸载时使活塞回复原位, 但弹簧产生的压力远远小于试件所受的压力, 因此对试验的影响可以忽略不计; 液压腔右端有一调节装置, 用以对液压系统的正常工作起协调作用。

三维显微 CT 设备是太原理工大学采矿工艺研究所新购进的设备, 主要用于测量在细观形态下岩石或煤的微裂隙和节理发育状况。使用之前对试件腔的材质和数字压力表进行改进, 且采用自动加载, 过程如节 3.2.2 所述。耦合试验时, 首先装入试件, 根据试件属性调整预应力值, 置入后将试验机放置于 CT 机旁, 试件腔要紧挨着 CT 机的探头, 连接好自动加载装置并将控制器放置于与 CT 机隔离的操作间中, 而后设定加载速率及相应的参数开始操作, 三维显微 CT 采用 360°全方位立体扫描, 可以由计算机自动合成整个受载变形破坏过程的立体图形。由于 CT 设备的辐射性较强, 因此试验时绝对禁止人员站在机器旁边操作。

## 4 试验机研制的技术难点和创新点

### 4.1 试验机研制的关键技术

(1) 在试验机加载钢柱和试件腔的材质选取上, 加载钢柱选用高强度不锈钢, 试件腔在进行普通强度试验时选用不锈钢, 与三维显微 CT 耦合使用时选用高强度钛合金, 由于钛合金的价格较高, 使得其应用范围很小, 不易推广使用, 因此在进行试验机研制时, 曾考虑将试件腔取消, 即在预应力装置与主承载装置之间, 用螺钉固定 4 个角并使试件外露以便于 CT 观测, 但试件的外露很容易使试件发生侧向偏移而滑出加载装置以外, 且初步的试验证实此方案不可取, 因此权衡再三还是选用钛合金作为试件腔的材质。为了对刚度较大的试件进行试验, 还要在加载装置的选材上继续深入研究, 直至发现刚度更大且方便适用的材质。

(2) 自动控制加载装置的研制, 对于与三维显微 CT 的耦合使用和对加载速率要求较高的试验, 采用手动加载的方式显然不满足要求, 而且与 CT 耦合试验时, 由于 CT 的辐射性使得工作时严禁人员在周围试验, 这样就需要自动控制的加载装置。此时最核心的问题是如何将环形旋转盘固定到主加载螺母上, 且旋转时误差尽可能小, 以达到相应的精度, 最后决定采用误差最小的三向钻孔固定法, 控制装置通过线缆连接与旋转盘分离, 达到试验时在 CT 机外的操作间控制加载且观测变形过程的目的。

### 4.2 试验机研制的创新点

(1) 首创并研制成功针对微型  $\phi 5 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$



的标准圆柱形较低强度的煤岩试件的压力试验机,可以对单轴加载过程中岩石或煤试件的强度特性及细观破坏机制进行研究,结合宏观大尺度下煤岩的单轴抗压特性,结果可以更全面地反映岩石或煤在不同尺度范围内的强度变形特性和破坏规律,弥补了普通岩石试验机和大型岩石试验机对煤岩尺度效应及其相关破坏过程研究的不足,促进学科发展。

(2) 首创了预应力和主加载应力装置的配套使用,可以根据不同试件的强度在有限的主加载变形情况下都能得到完整的全应力-应变曲线。之前的所有试验机都是使试件的初始应力为0,然后对试件进行逐步加载,直到试件破坏,而本试验机通过对试件的初始预应力,使试件在加载前就处于受力状态,因此此后的应力-应变较明显。而且根据试件的不同强度,在总加载圈数限定下,使得每一个试件都可以被破坏,并且均能得到破坏后的残余强度及性态。最终能使设备在有限范围内达到最大化利用,扩大针对不同强度煤岩试件的应用范围。

(3) 首创了微小岩石的强度试验与三维显微CT的配套耦合使用,不仅可以对小试件岩石或煤进行强度试验,绘制全应力-应变曲线,还可以通过CT观测整个破坏过程,观测岩石内部裂纹、裂缝的最先产生处,及岩石固有裂隙或节理在加载过程中如何发展变化,并且可以推算固有裂隙及节理对岩石强度的影响程度。

## 5 试验过程及结果分析

### 5.1 1<sup>#</sup>煤样试验过程

1<sup>#</sup>煤样是高变质程度的烟煤试件,试样的直径为4.95 mm,高度为9.88 mm。全应力-应变曲线如图4所示,由图4可以看出,1<sup>#</sup>煤样在整个试验过程中,应力随着应变的增加而逐渐增加,应变为

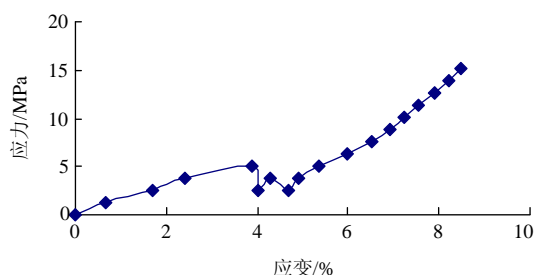


图4 1<sup>#</sup>煤样全应力-应变曲线

Fig.4 Complete curve of strain-stress of coal sample #1

4%时,试件破坏,应力突然降低,可以认为是强度达到峰值而后突然下降,随后,应力随着应变一直增大,直至达到试验机对试件所能产生的最大变形,此时应力超过14.5 MPa。此试件没有明显的峰值强度和残余强度,之所以会出现这种情况,初步分析是煤样质地松软,由于加载过程中使煤样逐步压实,导致破坏后断裂区域没有错位,而且随着加载的进一步进行,将裂纹压密,产生更大的应变与应力值。结合试件空腔与试件的尺寸关系,得出如下2点假设:一是破坏后裂缝与顶底面的夹角大于45°,随着裂缝的扩张,上下两部分发生错动,而在试件腔有限空间的影响下,相邻裂缝再次缩合并固定,产生径向约束,而后随着加载对变形的增加,使得应力逐步增大,且再次大幅度提高;二是裂缝与顶底面的夹角小于45°,断裂的上下两部分没有发生错动,而是继续紧挨着,内部的孔隙逐渐被压密,承受着更大的应力与应变。1<sup>#</sup>煤样完毕后取出,与以下3个试件不同的是,呈四分五裂的小块或粉末状<sup>[13]</sup>。

### 5.2 2<sup>#</sup>煤样试验过程

2<sup>#</sup>煤样直径为4.97 mm,高为9.95 mm,属无烟煤试件。全应力-应变曲线如图5所示,由图5可以看出,2<sup>#</sup>煤样在整个试验过程中,在应变为5%时试件破坏,出现了明显的峰值,峰值过后,应力急剧下降,降至3.9 MPa后随着应力的增加而缓慢上升,直至达到平衡。而在峰前阶段,应力随着应变的增加逐渐增大,OA段的斜率要高于AB段,基本呈线性增长。此煤样的峰值强度为14.4 MPa,可以预测此煤质地较密,有明显的线弹性阶段与残余变形阶段。

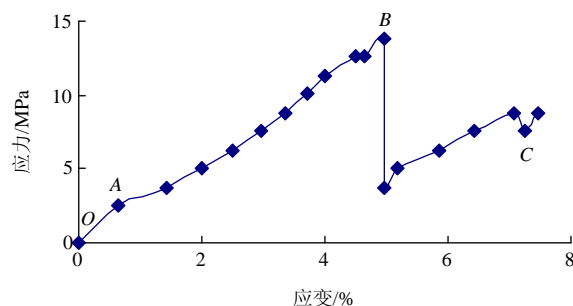


图5 2<sup>#</sup>煤样全应力-应变曲线

Fig.5 Complete curve of strain-stress of coal sample #2

### 5.3 3<sup>#</sup>煤样试验过程

3<sup>#</sup>煤样直径为4.98 mm,高为9.97 mm,属无烟煤试件。全应力-应变曲线如图6所示,由图6可

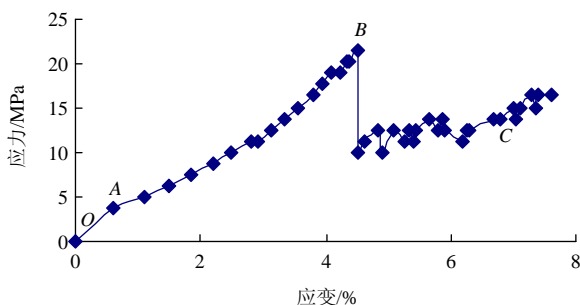


图 6 3#煤样全应力 - 应变曲线

Fig.6 Complete curve of strain-stress of coal sample #3

以看出, 3#煤样在整个试验过程中, 在应变为 4.3% 时试件破坏, 出现了明显的峰值, 峰值过后, 应力急剧降低, 降到 10.4 MPa 而后应力随着应变的增加, 在 10.4~14.5 MPa 附近波动, 直至平衡, 在峰前阶段, 应力与应变基本呈线性关系, 且  $OA$  段斜率高于  $AB$  段, 与之前煤样得出的结果相同。此煤样的峰值强度为 21.0 MPa, 可以预测该煤样在以上 3 种试件中最为坚硬, 有明显的线弹性阶段及残余变形阶段。根据之前相关资料<sup>[11]</sup>, 此标准煤试件  $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  的抗压强度是 60 MPa, 由此根据式(1)算得此种煤的尺度效应系数  $a = 0.46$ 。

#### 5.4 1#岩样试验过程

1#岩样直径为 4.96 mm, 高为 9.93 mm, 属中等强度的砂岩。如图 7 所示, 由图 7 曲线可以看出, 1#岩样在整个试验过程中, 在应变为 3% 时试件破坏, 出现了峰值, 而后应力下降一定幅度至 10.5 MPa, 峰值过后, 应力随着应变的增加, 在 10.4~14.5 MPa 附近波动, 直到平衡, 在峰前阶段, 应力与应变呈现出压密阶段、线弹性阶段和屈服阶段, 对应图中  $OA$ ,  $AB$  和  $BC$  线段。此岩样的峰值强度为 18.3 MPa, 岩石质地疏松。由岩样与煤样曲线对比可知, 砂岩与煤的应力应变过程相比, 有明显的屈服阶段。

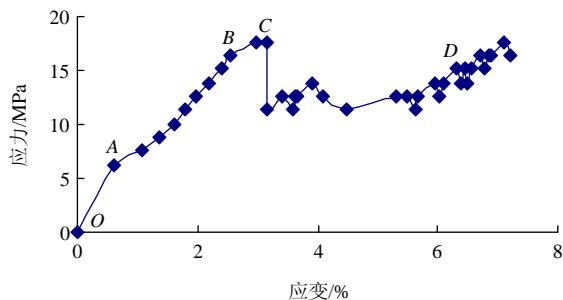
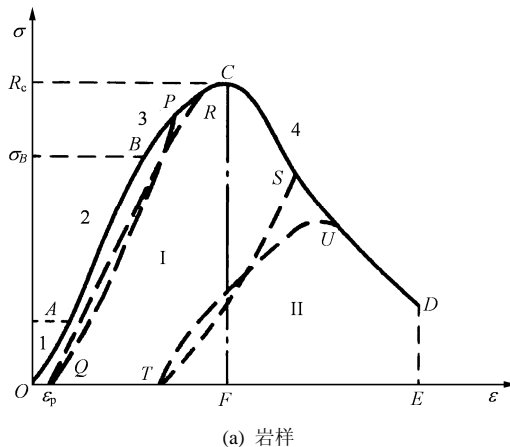


图 7 1#岩样全应力 - 应变曲线

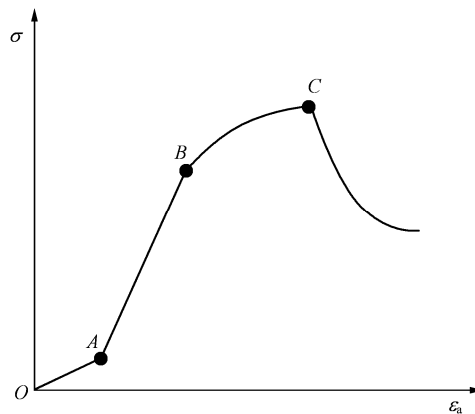
Fig.7 Complete curve of strain-stress of rock sample #1

#### 5.5 与普通煤岩试件的结果比较

图 8 分别是普通试验机下典型岩石和煤试件的全应力 - 应变曲线, 与本试验机得出的结果相比, 除了 1#煤样试件的曲线之外, 其他 3 个试件的曲线均可以反映出由普通试验机所绘制出的全应力 - 应变曲线的 4 个变形阶段。



(a) 岩样



(b) 煤样

图 8 典型试件的全应力 - 应变曲线

Fig.8 Complete curves of strain-stress of typical samples

如图 8(a)所示,  $OA$  是压密阶段,  $AB$  是线弹性阶段,  $BC$  是屈服阶段,  $CD$  是残余变形阶段, 其中  $C$  点是峰值强度,  $D$  点是残余强度, 图 7 的 4 个变形阶段也非常明显, 区别在于压密阶段是线性的, 峰后的残余强度在达到低值后随着变形的增加, 有继续上升的趋势, 这可能是由于试件破坏后充填于试件腔, 造成试件断裂而再一次闭合所致, 但总体来看, 得到了岩石变形的全应力 - 应变曲线, 试验结果可以反映试件的单轴抗压特性<sup>[14]</sup>。

如图 8(b)所示,  $OA$  和  $AB$  段都是线弹性阶段, 只是斜率不同,  $BC$  段、 $CD$  段与之前一致<sup>[15]</sup>。图 5, 6 的共同点是整个变形过程中只有 3 个阶段, 即压密阶段、线弹性阶段和残余变形阶段, 与图 8(b)相

比较, 少了屈服阶段, 这可能是由于较小的试件, 由于强度较低, 在没有达到屈服强度时就发生破坏, 其余变形阶段均相同。通过对图 8(a), 8(b)的横向比较, 说明岩石和煤的单轴压缩曲线是存在差别的, 不同之处为压密阶段是否线性。由此得到此试验机对微小煤岩试件的单轴抗压强度试验是科学的, 符合规定的, 其结果可以被采用。

## 6 结果讨论及应用前景

试验机通过与三维显微 CT 的耦合, 可以观测试件的整个破坏过程以及裂纹裂缝的产生扩展规律, 所得出的抗压强度值和绘制出的全应力 - 应变曲线可以与普通试验机的结果相比较, 通过分析以说明其科学性。由于之前对小试件强度及破坏规律的研究, 主要集中在数值模拟领域, 而鲜有试验研究方面的报道, RFPA 岩石变形破坏模拟软件<sup>[16]</sup>与非均质煤岩变形破坏模拟软件<sup>[17]</sup>都是这方面的典型代表, 图 9 为 RFPA 对岩石破坏过程的数值模拟破坏图形。本试验机的研制应用可以和 Z. C. Feng 等<sup>[16, 17]</sup>的数值模拟研究相结合, 从而深化岩石变形破坏的相关理论。对于实际工程的应用, 可以是对某一区域或范围内的岩石进行采样, 由于岩石试件的尺寸较小, 因此对岩石的采样相对比较容易, 一小块岩石就可以使用, 而得出的抗压强度与全过程应力 - 应变曲线通过尺度效应换算, 可以应用于该区域任意尺度岩石的单轴抗压强度的测定上, 通过不同采样点采下的岩石样品分别进行试验和比较分析, 能够得出此区域内哪些地块的岩石比较疏软, 哪些比较坚硬, 针对特定问题, 可以在一定范围内对某些工程设计提供参考。

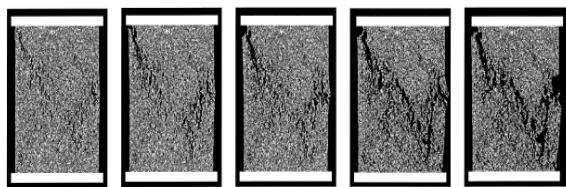


图 9 RFPA 岩石的破坏图形

Fig.9 Fracture figures of rock sample with RFPA

试验机在目前的范围内, 只可以进行单轴试验, 如果需要做三轴改进, 会在试件腔周围加上可以加载围压的装置, 使之进行三轴试验, 届时会对其进

行继续深入的研究。

该试验机主要是面向科研的, 适用于对微型煤或岩石试件单轴抗压强度的测定及整个破坏过程的观测和分析, 并且从中得出一些必要的物理参数。针对传统试验机研究岩石强度与破坏过程的不足, 可以填补此细观研究领域的空白, 因此对于科研的应用前景较大, 并且以科研结果为契机, 还可将细观结果及结论运用到工程实际中, 指导实际的生产施工。具体是通过对微小试件原生裂隙及新生裂纹裂缝的产生和发展的分析, 并结合宏观破裂时大裂隙的表面分布, 可以综合得出岩石破坏时宏观及微观裂隙的总体分布状态, 对于整个岩体的研究与运用有较高的价值。目前试验机处于实验室研发阶段, 没有进行推广及相应的成果鉴定, 如进行大范围的使用及推广, 必将使得整个岩石或煤强度领域的研究锦上添花, 而且还能够对工程实际施工中遇到的难题进行理论指导与实践应用。

## 7 结 论

本文详细介绍了适用于  $\phi 5 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  的圆柱形煤岩试件的单轴抗压强度测定的微型试验机, 以及与三维显微 CT 耦合使用, 来观测试验过程中试件的裂纹扩展和破坏规律。与普通试验机相比有如下优点: (1) 能够在煤岩试件加载过程中, 与三维显微 CT 耦合使用, 观测内部裂纹裂缝的产生、发展和对试件破坏的影响; (2) 可以绘制出与普通试验机相类似的煤岩全应力 - 应变曲线, 通过尺度效应换算系数  $a$  得出任意大小煤岩试件的单轴抗压强度, 并且能够如实反映微型煤岩试件加载过程中的各个变形阶段; (3) 与之前对煤岩破坏研究的数值模拟方法相结合并比较其结果的异同点, 得出的结论可以深化煤岩破坏规律的相关理论。

通过对几个煤岩试件的单轴抗压强度试验, 并与普通煤岩试件的结果相比较, 得出此试验机对测定微小煤岩试件单轴抗压强度, 以及绘制全应力 - 应变曲线的科学性, 结果是可以被采用的。由于试验机的可操作性、便携性以及主要部件材质的继续改进, 预测其应用范围将进一步扩大。

## 参考文献(References):

- [1] VUTUKURI V S, LAMA R D, SALUJIA S S. Handbook on



- mechanics properties of rocks[M]. [S.l.]: [s.n.], 1974.
- [2] 陶振宇. 岩石力学的理论与实践[M]. 北京: 水利出版社, 1981.  
(TAO Zhenyu. Theory and practice of rock mechanics[M]. Beijing: China Water Conservancy Press, 1981.(in Chinese))
- [3] 冶金部长沙矿冶研究所岩石力学研究组. 岩石及混凝土三向压缩试验研究[J]. 金属矿山, 1976, (6): 1 - 7.(Rock Mechanics Group, Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy. Rock and concretes triaxial compression test study[J]. Metal Mine, 1976, (6): 1 - 7.(in Chinese))
- [4] 张金铸, 林天健. 岩石三轴试验中应力状态和破坏性质的转化[J]. 力学学报, 1979, 15(2): 3 - 10.(ZHANG Jinzhu, LIN Tianjian. Stress conditions and the variation of rupture characteristics of a rock as shown by triaxial tests[J]. Acta Mechanica Sinica, 1979, 15(2): 3 - 10.(in Chinese))
- [5] 任爱华. 新研制的 800 t 高温高压伺服三轴流变仪[J]. 地球物理学报, 1988, 31(2): 63 - 69.(REN Aihua. 800 t high temperature and high pressure servo-controlled triaxial rock rheological testing system[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1988, 31(2): 63 - 69.(in Chinese))
- [6] 石泽全, 周枚青. 800 MPa 高温高压三轴室设计研究[J]. 地球物理学报, 1990, 33(2): 202 - 207.(SHI Zequan, ZHOU Meiqing. Designing of 800 MPa high temperature and high pressure triaxial cell[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1990, 33(2): 202 - 207.(in Chinese))
- [7] 赵阳升, 万志军, 张 渊, 等. 20 MN 伺服控制高压高温高压岩体三轴试验机的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 1 - 8.(ZHAO Yangsheng, WAN Zhijun, ZHANG Yuan, et al. Research and development of 20 MN servo-controlled rock triaxial testing system with high temperature and high pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 1 - 8.(in Chinese))
- [8] 任爱华. 岩石三轴仪内加热器的试验研究[C]// 第一届高温高压岩石力学学术讨论会论文集. 北京: 学术书刊出版社, 1988: 166 - 170.(REN Aihua. Experimental research on inner heating apparatus of rock triaxial testing system[C]// Proceedings of the 1st Symposium of High Temperature and High Pressure Rock Mechanics. Beijing: Academy Press, 1988: 166 - 170.(in Chinese))
- [9] 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 矿产资源科学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2006.(Department of Engineering and Material Science, National Natural Science Foundation of China. Science and engineering of mine resources[M]. Beijing: Science Press, 2006.(in Chinese))
- [10] 陈 颢, 黄庭芳. 岩石物理学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.(CHEN Yong, HUANG Tingfang. Rock physics[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009.(in Chinese))
- [11] 冯增朝, 赵阳升. 岩体裂隙尺度对其变形及破坏的控制作用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 78 - 83.(FENG Zengchao, ZHAO Yangsheng. Control effect of fissure scale on deformation and failure of rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 78 - 83.(in Chinese))
- [12] 吕兆兴, 冯增朝, 赵阳升. 岩石的非均质性对其材料强度尺寸效应的影响[J]. 煤炭学报, 2007, 32(9): 917 - 920.(LU Zhaoxing, FENG Zengchao, ZHAO Yangsheng. Influence of rock in homogeneity on strength-size effect of rock materials[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(9): 917 - 920.(in Chinese))
- [13] 王学滨. 岩样单轴拉伸应变局部化及全程应力 - 应变曲线[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增 2): 5 784 - 5 788.(WANG Xuebin. Strain localization and complete stress-strain curve of rock specimen in uniaxial tension[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Supp.2): 5 784 - 5 788.(in Chinese))
- [14] 易 达, 刘洁荣, 葛修润. 岩石三轴压缩任意围压下应力 - 应变曲线的预测方法研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(7): 1 062 - 1 065.  
(YI Da, LIU Jierong, GE Xiurun. Forecast of stress-strain curves of rock under arbitrary confining pressures in triaxial compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(7): 1 062 - 1 065.(in Chinese))
- [15] 曹树刚, 刘延保, 李 勇, 等. 煤岩固 - 气耦合细观力学试验装置的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1 681 - 1 690.(CAO Shugang, LIU Yanbao, LI Yong, et al. Research and development of testing apparatus of coal solid-gas coupled meso-mechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(8): 1 681 - 1 690.(in Chinese))
- [16] FENG Z C, ZHAO Y S, ZHAO D. Investigating the scale effects in strength of fractured rock mass[J]. Chaos Solitions and Fractals, 2009, 41(5): 2 377 - 2 386.
- [17] TANG C A, LIU H, LEE P K K, et al. Numerical studies of the influence of microstructure on rock failure in uniaxial compression - part 1: effect of heterogeneity[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(4): 555 - 569.