

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.2481

# 岩石空心圆柱扭剪试验系统研制

周 辉<sup>1,2</sup>, 姜 玥<sup>1,2</sup>, 卢景景<sup>1,2</sup>, 胡大伟<sup>1,2</sup>, 张传庆<sup>1,2</sup>, 陈 珺<sup>1,2</sup>, 李 震<sup>3,4</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点试验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学 北京 100049;

3. 河南理工大学 土木工程学院, 河南 焦作 454000; 4. 河南理工大学 深部矿井建设重点学科开放实验室, 河南 焦作 454000)

**摘 要:** 针对深部工程岩体开挖时围岩内部应力状态复杂变化的特点, 研制了可实现主应力量值变化和应力主轴旋转等复杂应力路径的岩石空心圆柱扭剪试验系统, 可用于开展复杂应力作用下岩石的强度、变形和破坏形态的室内试验研究。介绍了该试验系统的基本结构、工作原理及技术参数。该试验系统具有如下特点: (1) 通过利用空心圆柱试样与上、下压头的特点, 克服了岩石试样扭矩施加的技术困难, 将施加轴向力和扭矩的两个加载轴合二为一, 彻底解决了轴向力加载与扭矩施加机构之间相互影响的技术难题。(2) 通过采用新型自平衡加载三轴室, 实现了轴向力、扭矩、内围压和外围压 4 种荷载的独立施加和控制。(3) 采用应力与流量的加载控制方式, 并通过软件集成, 实现了主应力量值改变和应力主轴旋转耦合应力路径的准确模拟以及加载过程的稳定控制。(4) 该试验系统结构简单, 功能多样, 操作方便。采用该试验系统进行了初步试验, 验证了试验系统的可行性与实用性, 表明该试验系统具有实现应力主轴旋转及主应力量值改变的复杂应力路径的功能。

**关 键 词:** 岩石力学; 空心圆柱; 扭剪; 试验系统; 复杂应力路径

**中图分类号:** TU 415

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 7598 (2018) 04 - 1535 - 08

## Development of hollow cylinder torsional apparatus for rock

ZHOU Hui<sup>1,2</sup>, JIANG Yue<sup>1,2</sup>, LU Jing-jing<sup>1,2</sup>, HU Da-wei<sup>1,2</sup>,  
ZHANG Chuan-qing<sup>1,2</sup>, CHEN Jun<sup>1,2</sup>, LI Zhen<sup>3,4</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China; 4. Open Laboratory for Deep Mine Construction, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China)

**Abstract:** A novel hollow cylinder torsional apparatus was developed for rock to investigate the variations of the principal stress and orientation induced by the excavation of rock mass. The improved apparatus can be used to study the strength, deformation and failure mode of rock under complex stress in the laboratory. This study introduced the basic structure, working principle and technical parameters of the apparatus in detail. According to the features of the hollow cylinder sample with top and bottom pressure heads, the technical problem of the torque application was solved by combining the loading axis of the axial force with the torque into one. A new self-balanced loading triaxial cell was employed to load and control four loadings independently, which were from the axial force, torque, inner and outer confining pressures. Through the software integration technology, a load control method for stress and flow was applied to perform the accurate simulation of the principal stress, the stress path of the principal axis rotation and stability control of the loading process. At last, a preliminary test was carried out using the hollow cylinder torsional apparatus with advantages: simple structure, multiple functions and easy operation. Experimental results verified the feasibility and practicability of the apparatus, and indicated that the system realised the rotation of the principal stress axes and the change of the principal stress.

**Keywords:** rock mechanics; hollow cylinder; torsional shear; testing system; complex stress path

收稿日期: 2016-10-21

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (No. 2014CB046902); 中国科学院科研装备研制项目 (No. YZ201553); 国家自然科学基金项目 (No. 51427803, No. 51404240, No. 51709257); 河南省高等学校深部矿井建设重点学科开放实验室开放基金 (No. 2015KF-06)。

This work was supported by the National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program) (2014CB046902), the Instrument Developing Project of the Chinese Academy of Sciences (YZ201553), the National Natural Science Foundation of China (NSFC) (51427803, 51404240, 51709257) and the Project of Key Opening Laboratory for Deep Mine Construction at Henan Province (2015KF-06)。

第一作者简介: 周辉, 男, 1972 年生, 博士, 研究员, 主要从事岩石力学试验、理论、数值分析与工程安全性分析方面的研究工作。

E-mail: hzhou@whrsm.ac.cn

## 1 引言

为了适应我国国民经济持续快速发展,在交通、水利水电、采矿等基础工程建设和资源/能源开发领域需要建设大量深埋长大隧道(隧洞、巷道),TBM(全断面岩石隧道掘进机)以其安全、高效、经济等独特优势成为深埋长大隧道(隧洞、巷道)施工的最佳选择和必然发展方向。TBM 开挖过程会引起围岩应力持续调整<sup>[1-4]</sup>,其突出特点是:主应力量值大幅度改变同时伴随应力主轴大角度旋转。在深埋高应力条件下,围岩应力的上述变化常导致高强度岩爆、大变形卡机等重大工程灾害,严重威胁施工安全,经济损失巨大。因此,深入揭示深部地层 TBM 掘进围岩主应力量值改变和应力主轴旋转组合条件下围岩破坏机制和力学特征是进行上述重大工程灾害准确预测与可靠防控的基本前提和科学依据,也是深部地层 TBM 选型和系统适应性设计需要重点考虑的关键因素之一。

目前,常用的岩石室内试验装置如单轴压缩仪、常规三轴压缩仪、直剪仪、真三轴压缩仪等<sup>[5-6]</sup>只可实现某些特定应力路径下的试验,不能实现主应力量值大幅度改变同时伴随应力主轴大角度旋转的加载应力路径。

为实现主应力量值及方向的改变,借鉴真三轴试验机的研制,结合文献资料,发现若采用实心圆柱体形式的试样,仅能实现应力方向沿特定方位变化,与实际工程中岩石的应力状态不符。若采用六面体形式的试样,通过设定与 6 个面对应的加载装置,改变每个面上的载荷,以实现应力大小及方向的改变。但是该种方式,可操作性低,且应力方向的变化受到约束,并不是真正意义上的应力主轴旋转。若采用空心圆柱形式的试样,依托薄壁圆筒理论,可以较好实现应力大小及方向的变化。

依据空心圆柱试样的受力特点,岩土工程技术领域已开发出适用于土样的空心圆柱扭剪仪。Hight 等<sup>[7]</sup>提出了用于研究土体应力主轴旋转影响的空心圆柱仪,推导了适用于空心圆柱的受力分析公式,试验结果较好地反映出该仪器的可靠性及实用性。颜国正等<sup>[8]</sup>研制了可以实现四向独立控制加载的空心圆柱试样真三轴仪。李作勤<sup>[9]</sup>阐述了用于土工试验的扭转三轴仪的特点、优点和局限性以及设计原则。姚仰平等<sup>[10]</sup>研制了振动拉压剪三轴仪,并用于饱和标准砂的动力试验。栾茂田等<sup>[11]</sup>与日本诚研株式会社合作,成功开发了土工静力-动力液压三轴-扭转多功能剪切仪,能够实现多种固结条件、多种

静力与循环剪切的复杂应力路径试验。沈扬等<sup>[12-13]</sup>分析和对比了同类产品的参数指标与工作性能,与英国 GDS 仪器设备有限公司合作,联合研发了能够进行中高频主应力轴循环旋转试验的新型空心圆柱仪(ZJU-HCA)。孙田等<sup>[14]</sup>对英国 GDS 公司的中型空心圆柱扭剪仪进行了改进,可用于开展砂砾土动力特性试验。

但是,土与岩石是 2 种不同的工程材料,现有的作用于土样的空心圆柱扭剪仪不适用于岩石材料,主要表现为:土样重塑性好,可用常规工具进行任意形状的切削重塑。因此,制作端面具有环状分布凹槽的土样较为方便,易于实现加载端面的扭矩传递。但岩石的黏聚力较高,无法制作重塑岩样,需要采用其他方法实现岩样扭矩的施加。相对岩石而言,土的强度极小,因此,适用于土样的空心圆柱扭剪仪可输出的外力较小,并常用水压实现围压的加载,而岩样的围压加载常通过油压实现。另一方面,岩石破坏所需应力水平较高,这决定了适用于岩石的试验设备必须具有较高的应力承受能力。相对土而言,岩石的变形极小,需采用不同于土样的空心圆柱扭剪仪的变形测量方法和装置。

现有的适用于土样的空心圆柱扭剪仪的轴向加载与扭矩加载结构存在相互影响的问题,比如轴向加载引起的摩擦效应。但由于施加于土样的外力水平相对较小,这种相互影响对于土样可忽略不计。岩石达到破坏必须施加较大载荷时,轴向力的加载可产生较大的阻碍扭转运动的摩擦力,这种相互影响对于岩石而言较为突出。

综上所述,现有的岩石室内试验装置不能实现应力主轴旋转等复杂的应力路径,试验功能较为单一;同时,适用于土样的空心圆柱扭剪仪无法应用于岩石试验,并且由于岩石和土体性质的不同,无法进行直接改造以应用于岩石试验。因此,需要设计一种适用于岩石扭剪的仪器,更好地模拟岩石实际应力状态。笔者所在研究团队从深部重大工程安全性研究的实际出发,通过技术集成创新,研发了一套岩石空心圆柱扭剪试验系统,以合理揭示深部地层 TBM 掘进围岩主应力量值改变和应力主轴旋转组合条件下围岩破坏机制和力学特征。本文对该试验系统的技术参数、结构组成、主要功能及部分试验结果进行了详细的介绍。

## 2 试验技术原理

试验的基本原理:通过对岩样施加内、外围压、轴向力以及扭力 4 个独立的荷载,岩样受到轴向应

力、径向应力、环向应力以及剪应力的共同作用(见图1),与主应力以及应力主轴旋转角之间形成对应关系,进而实现对主应力量值变化以及应力主轴的旋转等复杂应力路径的分析。通过理论分析,建立岩石空心圆柱扭剪试验加载参数与应力参数之间的解析关系,提出了可以同时实现主应力量值改变和应力主轴旋转的岩石空心圆柱扭剪试验技术原理和试验方法。

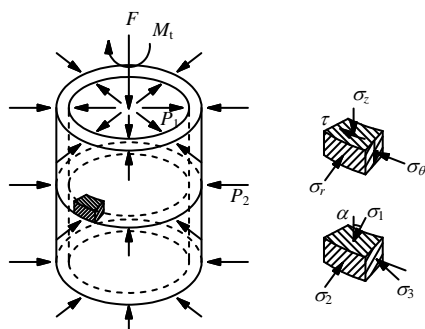


图1 空心圆柱受力分析图

Fig.1 Hollow cylinder sample under loading

根据 Hight 等<sup>[7]</sup>提出的适用于空心圆柱试样的受力分析公式,结合本试验仪器的结构特征,提出了一套较为完整的荷载与单元体应力的转换关系式:

$$\sigma_z = \frac{F(D^2/4 - r_0^2) - P_1 r_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \quad (1)$$

$$\sigma_r = \frac{P_2 r_0 + P_1 r_i}{r_0 + r_i} \quad (2)$$

$$\sigma_\theta = \frac{P_2 r_0 - P_1 r_i}{r_0 - r_i} \quad (3)$$

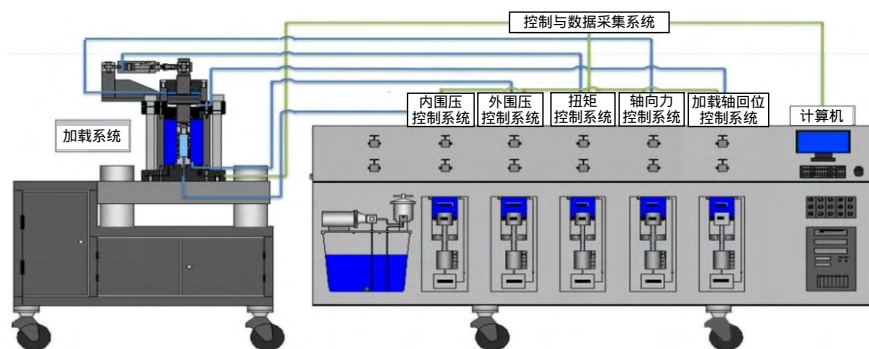
$$\tau_{z\theta} = \frac{3M_t R_4^2 L}{2(r_0^3 - r_i^3)} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan \frac{2\tau_{z\theta}}{\sigma_z - \sigma_\theta} \quad (5)$$

式中:  $r_0$  为试样外径;  $r_i$  为内径;  $D$  为轴向活塞的直径;  $L$ 、 $R_4$  分别为扭转装置力臂及千斤顶活塞半径。试验仪器的加载参数:  $F$  为轴向力;  $P_1$ 、 $P_2$  分别为内、外压;  $M_t$  为扭力。试样单元体应力参数:  $\sigma_z$  为轴向应力;  $\sigma_r$  为径向应力;  $\sigma_\theta$  为环向应力;  $\tau_{z\theta}$  为剪应力;  $\alpha$  为大主应力与垂直方向的夹角。

### 3 试验系统结构设计

该试验系统主要由加载系统、控制系统、数据采集系统组成(见图2)。



(a) 系统构成图



(b) 装配图

图2 岩石空心圆柱扭剪试验系统

Fig.2 The hollow cylinder torsional apparatus for rock

#### 3.1 加载系统

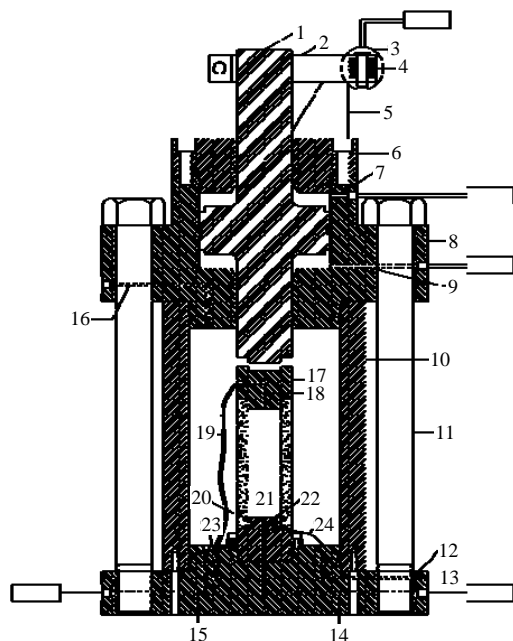
该试验装置加载系统主要由试验机、试验机固定支座、操作平台等部分组成。其中,试验机由底座、套筒、下压头、上压头、轴向活塞、上座、顶盖、连接杆、扭转装置组成(见图3)。

##### 3.1.1 试验机组成

试验时,试样通过工装与上下压头黏结(采用高强度黏合剂黏结)固定(见图4)。将黏结的试

样放置试验机底座的开孔中,下压头与底座之间通过螺栓连接,并保证第6通道与第9通道在同一条中心线上,实现对试样内腔的充油。上压头方形凹槽与轴向活塞方形凸头对应,轴向活塞通过二者的咬合将轴向荷载及扭矩传递给试样。空心圆柱型套筒通过销钉与底座相连,上座放置于套筒上。其中,套筒与底座及上座间的密封通过密封圈装置及连接杆实现。活塞放置于十字型油腔中,且其下端从上

座的下方伸出,并保证活塞的下表面和底座、下压头、上压头的上下表面水平平行,保证荷载施加的稳定性。顶盖套入活塞并放置于上座上,顶盖通过螺栓与上座连接。



1 - 轴向活塞; 2 - 扭矩传力杆; 3 - 千斤顶; 4 - 关节轴承; 5 - 扭矩反力支座; 6 - 顶盖; 7 - 第 1 通道; 8 - 上座; 9 - 第 3 通道; 10 - 套筒; 11 - 连接杆; 12 - 底座; 13 - 第 10 通道; 14 - 第 9 通道; 15 - 第 8 通道; 16 - 第 2 通道; 17 - 上压头; 18 - 第 4 通道; 19 - 排气管; 20 - 下压头; 21 - 第 6 通道; 22 - 第 7 通道; 23 - 第 5 通道; 24 - 数据线

图 3 试验机主体结构示意图

Fig.3 Schematic of the main structure of the apparatus

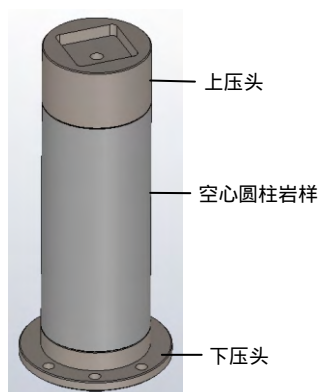


图 4 空心圆柱岩石试样和上、下压头装配示意图

Fig.4 Schematic of rock sample assembled with the top and bottom pressure heads

扭矩传力杆的一端固定在活塞顶部,另一端通过关节轴承与千斤顶的活塞头连接,千斤顶的另一端与扭矩反力座一端铰接,保证扭矩传力杆和千斤顶水平平行并与活塞垂直(见图 5)。两个连接杆分

别穿过扭矩反力座另一端的两个螺纹孔,并将扭矩反力座、上座、底座固定,通过连接杆穿过上座和底座的剩余螺纹孔将上座和底座固定。采用该种方式确保扭矩施加的连续性及稳定性。

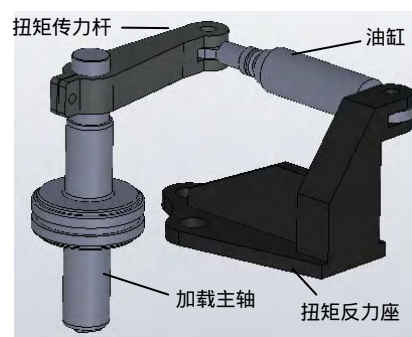


图 5 扭矩施加装置示意图

Fig.5 Schematic of the torque loading structure

### 3.1.2 试验机固定支座

试验机固定支座由整体框架、升降液压杆、控制箱及液压油箱等组成。框架底端采用滚轮设计,便于试验机的整体移动。通过安装在框架上部的控制箱,可以方便地控制升降液压杆的上下移动,用于提升试验机,完成试验过程中的试样安放及仪器安装。该固定支座不仅为试验机提供了可以方便移动的平台,而且集成了升降液压杆,可以较便捷地移动安装试验装置。

### 3.1.3 操作平台

试验操作平台采用轻质铝合金材料制成,可以方便移动。集成了计算机控制系统,伺服液压控制加载系统及应变控制采集系统。该平台为整个试验系统提供了方便的操作空间。

### 3.1.4 加载技术原理

试验开始前关闭第 2、5、10、1、3、8 通道和第 9 通道。

当加载外围压时,打开第 2 通道,通过液压伺服泵向第 8 通道输油,第 2 通道有液压油流出时关闭第 2 通道,继续加载外围压至设定值,试验结束并需卸载外围压时,打开第 2 通道。

当加载内围压时,打开第 5 通道,通过液压伺服泵向第 9 通道输油,第 5 通道有液压油流出时关闭第 5 通道,继续加载内围压至设定值,试验结束并需卸载内围压时,打开第 5 通道。

当加载轴向力时,通过液压伺服泵向第 1 通道输油至设定值,试验结束时卸载液压伺服泵的油压。

当加载扭矩时,通过液压伺服泵向千斤顶输油至设定值,试验结束时卸载千斤顶的油压。



### 3.2 控制系统

#### 3.2.1 计算机控制系统

为实现复杂应力路径的应力控制,自主设计了一套与之对应的应力-应变控制软件系统(见图6)。采用高压伺服泵、压力传感器、位移传感器、工控机形成闭环控制,精确控制压力和位移,实现设定的应力路径。

#### 3.2.2 高精度伺服加载控制系统

加载控制系统由偏压加载系统、外围压加载系统、内围压加载系统及扭力加载系统4部分构成。

由于试验复杂应力路径的设定,需要对4部分加载系统进行独立或混合控制。可实现:流量控制、阶梯压力控制及恒压控制,且3种控制方式可以实现无障碍转换。其控制精度高,操作方便,具有自我保护功能。

试验中,将泵缸与试验机第1、3、8、9通道以及扭转千斤顶通过高压承压管相连,关闭第2、4、10通道。通过操作平台上的控制阀以及计算机控制系统控制各向压力的变化,达到设定的应力路径。

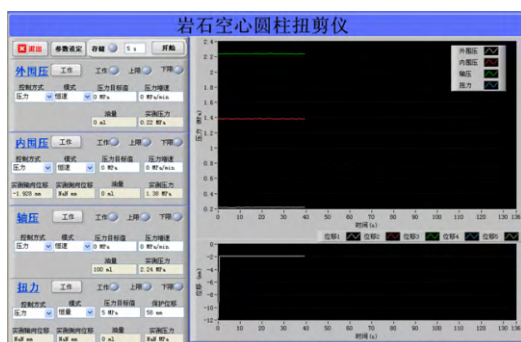


图6 计算机控制系统界面  
Fig.6 Computer control system

### 3.3 数据采集系统

#### 3.3.1 加载数据采集

依托计算机控制系统,采用16位、16路、100 ks/s的PCI采集卡对压力传感器、位移传感器的数据进行采集,软件可设置采集数据保存路径、采集间隔时间。并预留多路数据采集通道,便于后期扩展声波、声发射等附属检测装置。

#### 3.3.2 变形测量采集

##### (1) 采集方式

现阶段采用在试样表面粘贴高精度应变片的应变测量方式,其中,使用的高精度应变片,灵敏性高,适用范围广,能够在当前试验环境中实现高精度的采集。具体方式为:在岩样外表面标定出两个轴线方向,在两轴线的中点处分别粘贴应变花(分

别对应0°、45°、90°三个方向)。利用自行研制的内壁贴片工具,在与外表面应变花粘贴区域对应的内表面处,分别粘贴应变花。在已贴好的应变花及导线端头部位,涂抹硅胶进行保护。在后续试样安装过程中,将应变花的导线与数据传输通道连接,获取12组数据。通过一定的数学关系将获得的数据转换为轴向应变、环向应变、径向应变以及剪应变。

考虑到应变花粘贴的难度较大,在试验后续阶段将采用新的变形测量方式。轴向应变采用对称布置的LVDT位移传感器,环向应变及径向应变通过置于空心圆柱试样的内外应变环的变化表示。剪应变通过可测量试样转角的应变片得到。

##### (2) 采集系统

采用一种紧凑灵活的基于以太网的数据采集系统-DS-NET,其信号调理带隔离、精度高、性能稳定、工作可靠。该采集系统最高采样率可达10 kHz/通道,且完全模块化设计,配置方便。通道扩展方便,且支持多种传感器连接,所有通道的数据采集都是同步的,可以得到高质量的测试数据。

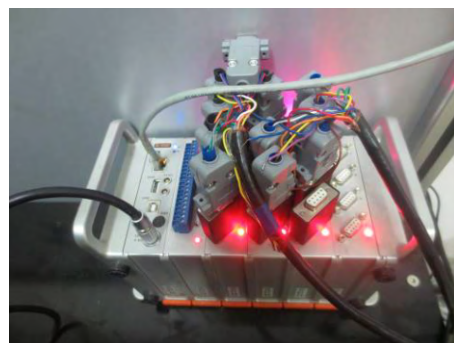


图7 变形测量采集系统  
Fig.7 Collector system of the deformation measurement

## 4 岩石空心圆柱扭剪试验系统的主要功能、技术参数与校订

### 4.1 主要功能

该试验系统可独立或混合地加载轴向力、内围压、外围压、扭力,且克服了4种荷载施加时相互干扰的缺陷,通过4种荷载组合变化,可以模拟出复杂的应力状态和应力路径(主应力量值改变和应力主轴旋转),可普遍用于岩石复杂加载路径的室内试验。具有以下特点:

(1) 进行复杂应力路径的模拟,包括主应力量值的变化、应力主轴的旋转以及主应力量值与应力主轴旋转的共同影响,中主应力系数的影响等。

(2) 可实现多种类型的试验研究,包括单轴试

验, 常规三轴压缩试验、真三轴压缩试验以及扭剪试验等。

(3) 试验加载系统采用高精度闭环伺服电机控制, 耗能低, 无噪音, 可以长时间运行。

(4) 仪器装置结构简单, 操作方便, 适合室内试验操作。

## 4.2 主要技术参数

(1) 最大轴向压力: 440 MPa。

(2) 最大围压: 60 MPa。

(3) 扭转方向力臂: 180 mm。

(4) 压力控制精度:  $< 0.01$  MPa。

(5) 轴向变形测量范围: 10 mm。

(6) 环向变形测量范围: 10 mm。

(7) 径向变形测量范围: 10 mm。

(8) 切向变形测量范围: 10 mm。

(9) 试样尺寸: 空心圆柱试样, 外径为 50 mm, 内径为 30 mm, 高度为 120 mm。

(10) 加载控制方式: 应力控制和流量控制。

## 4.3 岩石空心圆柱扭剪试验系统的校订

校订原理为利用金属材料的均质性, 基于弹性理论, 将金属试样实际受力大小与油压换算后的应力大小进行比较。具体为:

(1) 加工与岩样同尺寸的黄铜试样。

(2) 利用应变片标定仪对高精度应变片进行标定。

(3) 分别施加轴力、扭力, 结合应变片所测的数据与黄铜的弹性模量、剪切模量进行计算, 得出金属试样实际受到的轴向力以及扭力大小, 从而与通过油压换算的应力进行比较。

(4) 采用校订后的数据进行试验加载控制以及后续试验结果的处理。

## 5 试验

为验证岩石空心圆柱扭剪试验系统的实用性及可靠性, 本文利用该装置分别进行了 4 个加载参数的独立控制试验及扭剪试验。

### 5.1 岩样制备

试验岩样取自锦屏二级水电站工程现场的  $T_{2b}$  大理岩, 利用岩石取芯机成功制作出了外径为 50 mm、内径为 30 mm、高度为 120 mm 的壁厚均匀的薄壁空心圆柱岩石试样 (见图 8)。

### 5.2 试验步骤

(1) 试样准备: 对加工好的试样清洗、测量尺寸。在岩样外表面标定出两个轴线方向, 在两轴线的中心处分别粘贴应变花。用特制的内壁贴片机

粘贴内壁应变片。并在试样内壁涂抹硅胶, 在保护应变片的同时, 保证试样内压力室的密封性。



图 8 空心圆柱岩石试样

Fig.8 Hollow cylinder rock sample

(2) 黏结试样: 利用工装将上压头、下压头与岩样通过高强度黏合剂进行黏结固定, 放置 12 h 待黏结剂达到最高强度方可进行试验。其中, 高强度黏合剂为丙烯酸结构 AB 胶, 具有强度高、耐高温、黏稠度适中、操作时间充足等特点。能够实现上、下压头与岩样的紧密黏结。

(3) 安装试样: 试样安装前, 将试样与上、下压头用热缩套密封。随后, 试样安装在三轴压力室底座 (压力机承压板中心) 从下到上依次是下压头、岩样、上压头。连接上压头上的排气管。

(4) 数据输出连接: 用接线器将 4 个应变花的数据传输线与应变采集接口相连, 数据将从 2 个通道输出。

(5) 仪器调试: 组装仪器 (底座、围压室、上部结构及扭转装置) 连接三轴压力室与加载控制系统。打开加载控制软件及应变采集软件。

(6) 充油: 施加比较小的轴向压力, 将轴向活塞与上压头接触。分别向围压室、内腔充油。当内外排气孔出油时, 视为油已充满。

(7) 加载: 按照预先设定的加载参数缓慢改变试样内外围压、轴压和扭力。

(8) 试验结束, 将轴向千斤顶以及扭转千斤顶回归原位。并将内外围压室的液压油排空, 拆除试样。输出试验数据。

### 5.3 试验结果及分析

#### 5.3.1 4 个加载参数的独立控制试验

为验证 4 个加载控制参数的独立性, 对试样施加 4 个荷载, 如图 9 所示, 外围压为 10 MPa, 内围压为 5 MPa, 轴向活塞油压为 1.56 MPa, 扭力油压逐渐加载, 直至 1.83 MPa。试验过程中, 4 种加载参数可独立控制, 内、外围压较稳定地保持 5 MPa

的压差,轴向活塞油压可稳定于设定值,扭力则能按照预期的加载目标加载。由此可知,该加载系统可以较好地控制4个加载参数,能够达到预期设定的应力路径。

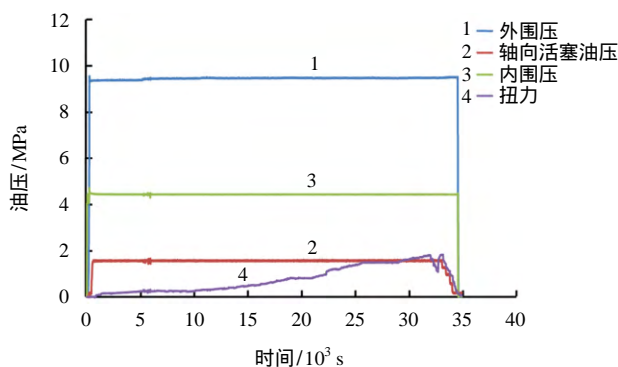


图9 液压泵油压-时间曲线

Fig.9 Oil pressure of hydraulic pump vs. time

### 5.3.2 扭剪试验

为实现该应力路径,设定的加载路径为:首先对岩样施加相等的内、外围压,同步达到20 MPa后,加载轴向力。为获得岩样的物理参数,在加载初期采用循环加卸载的方式。当三者达到设定值并保持稳定时,连续施加扭力,直至岩样发生破坏(见图10)。试验过程中,各加载参数均能较稳定地实现预期设定的加载路径。

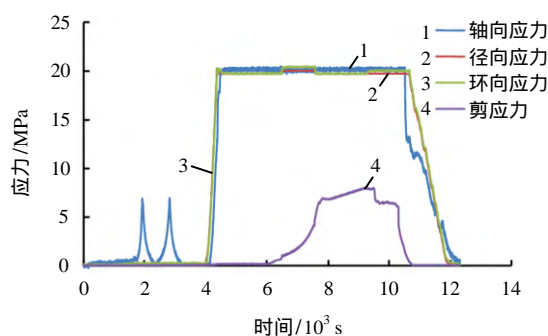


图10 岩样应力-时间曲线

Fig.10 Rock sample stress vs. time

大理岩在扭剪应力路径下,内外围压、轴压稳定在20 MPa,缓慢施加剪应力,直至破坏。

在主应力空间描述该试验的应力路径:用 $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ 表示一点的应力状态,主应力大小随着扭力的施加逐渐变化,其中,中主应力系数 $b=0.5$ ,主应力轴旋角 $\alpha=45^\circ$ 恒定不变。通过改变围压及轴压的大小,可以研究不同中主应力对岩石强度的影响。

在偏平面上描述该试验的应力路径:用 $(p, q, \theta_\sigma)$ 表示一点的应力状态,在整个加载过程中保持 $p=20$  MPa,  $\theta_\sigma=0^\circ$ 恒定不变,仅使广义剪应力 $q$ 值发生变化,可研究剪应力对岩石强度的影响。

分析试验结果,发现该试验系统能较好地实现拟定的加载路径,具有较好的可实施性。

## 6 讨论

研究团队研制的岩石空心圆柱扭剪仪,实现了复杂应力路径的试验模拟,解决了传统岩石力学试验仪器无法实现应力主轴旋转应力路径的关键难题,打破了现阶段岩石力学室内试验应力路径单一化的制约现状,推动了岩石力学试验技术的发展,为岩石力学的理论研究提供了重要的试验手段,在岩石力学研究领域具有重要意义。该试验系统在如下关键理论和技术问题方面取得创新和技术突破:

(1) 在试验技术原理和试验方法方面:结合理论分析,总结出一套成熟的可以同时实现主应力值量和方向改变的岩石空心圆柱扭剪试验技术和试验方法。

(2) 在加载技术与加载系统方面:采用岩石试件端面和上、下压头刚性黏结技术以及与岩石试样无相对自由度且可传递扭矩的扭矩施加新技术,解决岩石试样扭矩施加的技术难题;利用将施加轴向力和扭矩的两个加载轴合二为一的新技术,彻底解决轴向力加载与扭矩施加机构之间相互影响的技术难题;自主研发出一种新型的自平衡加载室,实现轴向力、扭力、内围压和外围压4种荷载的独立施加和控制。

(3) 在加载控制和软件系统方面:采用应力与流量的加载控制方式,并通过软件集成,实现主应力值改变和应力主轴旋转耦合应力路径的准确模拟以及加载过程的稳定控制。

## 7 结论

(1) 目前国内外现有的岩石力学试验仪器都只能进行主应力值改变条件下的力学试验,均无法实现应力主轴旋转的应力路径和应力条件,不适用TBM开挖卸荷引起的围岩应力变化的特点。研究团队研制的岩石空心圆柱扭剪试验系统,可以同时实现主应力方向及主应力值变化的应力路径,使得室内岩石力学试验可以实现复杂应力路径,模拟实际工程中岩石真实的受力状态,为工程建设提供可靠依据。

(2) 试验系统基于薄壁圆筒理论,利用机械结



构的传力特点,实现了轴向力与扭力的相互独立及耦合,避免了较大摩阻力的产生。从而实现加载系统对 4 个加载参数的独立及耦合控制。

(3) 经过初步试验,分析试验结果,证实了试验系统可独立控制加载参数,进而模拟复杂应力路径。

(4) 试验系统整体性好,精度高,功能多样,操作方便,推广性强。

本仪器的研制是国际上岩石力学研究领域的前沿课题,可填补国内外本领域的空白;同时,对于建立新的岩石力学理论体系,提升我国深部岩体工程安全性研究水平,促进国家重点战略新兴产业——TBM 高端制造业的发展,推进重大试验平台和科研装备建设具有重要的科学意义。

**致谢:**本研究得到中国科学院青年创新促进会的资助,在此表示感谢!

## 参考文献

- [1] 张社荣, 梁礼绘. 考虑三维应力旋转的隧洞衬砌支护时机研究[J]. 水利学报, 2007, 38(6): 704 - 709.  
ZHANG She-rong, LIANG Li-hui. Analysis on tunnel liner supporting time considering three-dimensional stress rotation[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(6): 704 - 709.
- [2] 孙常新, 韩立新, 高峰. 隧道开挖中的应力旋转和裂隙塑性变形问题研究[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(1): 6 - 11.  
SUN Chang-xin, HAN Li-xin, GAO Feng. Research on stress rotation and plastic deformation of cracks[J]. *Modern Tunneling Technology*, 2011, 48(1): 6 - 11.
- [3] 崔激, 王宁. 开挖过程中隧洞围岩应力主轴旋转及其对围岩破坏模式的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(6): 2062 - 2070.  
CUI Wei, WANG Ning. Principal stress axis rotation and effect on failure model of surrounding rock during tunnelling[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, 45(6): 2062 - 2070.
- [4] 程建龙, 杨圣奇, 潘玉丛, 等. 挤压地层双护盾 TBM 围岩变形及应力场特征研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 1): 371 - 380.  
CHENG Jian-long, YANG Sheng-qi, PAN Yu-cong, et al. Study of features of surrounding rock deformation and stress field in squeezing ground excavation by double shield TBM[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(Suppl.1): 371 - 380.
- [5] 牛学超, 张庆喜, 岳中文. 岩石三轴试验机的现状及发展趋势[J]. 岩土力学, 2013, 34(2): 600 - 607.  
NIU Xue-chao, ZHANG Qing-xi, YUE Zhong-wen. Current situation and development trends of rock triaxial testing machines[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(2): 600 - 607.
- [6] 朱杰兵, 蒋昱州, 王黎. 岩石力学室内试验技术若干进展[J]. 固体力学学报, 2010, 31: 209 - 215.  
ZHU Jie-bing, JIANG Yu-zhou, WANG Li. Advanced of laboratory test technique in rock mechanics[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2010, 31: 209 - 215.
- [7] HIGHT D W, GENS A, SYMES M J. The development of a new hollow cylinder apparatus for investigating the effects of principal stress rotation in soils[J]. *Geotecnique*, 1983, 33(4): 355 - 383.
- [8] 颜国正, 许广赓, 张德骏. 空心圆柱试样真三轴仪应力路径的控制[J]. 吉林工业大学学报, 1993, 71(23): 9 - 17.  
YAN Guo-zheng, XU Guang-geng, ZHANG De-jun. The stress-path control in a hollow cylinder specimen-shaped truly triaxial apparatus[J]. *Journal of Jilin University of Technology*, 1993, 71(23): 9 - 17.
- [9] 李作勤. 扭转三轴综述[J]. 岩土力学, 1994, 15(1): 81 - 93.  
LI Zuo-qin. The review of triaxial torsion shear test[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1994, 15(1): 81 - 93.
- [10] 姚仰平, 谢定义. 振动拉压扭剪三轴仪及其试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报, 1996, 28(2): 129 - 133.  
YAO Yang-ping, XIE Ding-yi. Extension-compression and torsion vibrating triaxial apparatus and experimental investigation[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology*, 1996, 28(2): 129 - 133.
- [11] 栾茂田, 郭莹, 李木国, 等. 土工静力-动力液压三轴-扭转多功能剪切仪研发及应用[J]. 大连理工大学学报, 2003, 43(5): 670 - 675.  
LUAN Mao-tian, GUO Ying, LI Mu-guo, et al. Development and application of soil static and dynamic universal triaxial and torsional shear apparatus[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2003, 43(5): 670 - 675.
- [12] 沈扬, 周建. 空心圆柱仪(HCA)性能指标分析及同类产品比较[J]. 科技通报, 2006, 22(5): 671 - 680.  
SHEN Yang, ZHOU Jian. The analysis and comparison on the performance index of hollow cylinder apparatus in the world[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2006, 22(5): 671 - 680.
- [13] 沈扬, 周建, 张金良, 等. 新型空心圆柱仪的研制与应用[J]. 浙江大学学报(工学版), 2007, 41(9): 1451 - 1456.  
SHEN Yang, ZHOU Jian, ZHANG Jin-liang, et al. Development and application of novel hollow cylinder apparatus[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2007, 41(9): 1451 - 1456.
- [14] 孙田, 陈国兴, 朱定华. 空心圆柱扭剪仪的改进及应用[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2014, 36(1): 54 - 59.  
SUN Tian, CHEN Guo-xing, ZHU Ding-hua. Improvements and application of hollow cylinder torsional shear apparatus[J]. *Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition)*, 2014, 36(1): 54 - 59.