

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.0189

岩石空心圆柱扭剪仪试验能力

周 辉^{1,2}, 姜 玥^{1,2}, 卢景景^{1,2}, 胡大伟^{1,2}, 张传庆^{1,2}, 陈 琚^{1,2}, 李 震^{3,4}

(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实验室, 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: 针对自行研制的岩石空心圆柱扭剪仪可独立控制 4 个加载参数 (轴力、扭力、内围压和外围压) 的功能, 通过数学和力学分析, 系统地整理出几种易于实现且符合实际工程的应力路径及加载方式: 在轴力与内围压满足一定关系的前提下, 可以获取岩石的抗拉强度, 提供一种新型测量岩石抗拉强度的方法; 通过控制内外围压及轴力, 可以进行常规三轴试验与真三轴试验, 克服了现阶段岩石真三轴试验中试验装置复杂、试样加载面摩擦大的缺点; 在轴力与内、外围压分别满足一定关系时, 可以分别实现平均应力 p 不变与中主应力系数 b 不变的应力路径, 用于研究应力主轴旋转对岩石力学性质的影响。上述应力路径的实现对于岩石力学性质的研究以及现阶段岩石室内试验的发展具有重要意义。

关 键 词: 岩石力学; 应力主轴旋转; 空心圆柱扭剪仪; 应力路径

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018)05-1917-06

Study of hollow cylinder torsional apparatus for rock

ZHOU Hui^{1,2}, JIANG Yue^{1,2}, LU Jing-jing^{1,2}, HU Da-wei^{1,2},
ZHANG Chuan-qing^{1,2}, CHEN Jun^{1,2}, LI Zhen^{3,4}

(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 self-made hollow cylinder torsional apparatus for rock was developed to control four loading parameters independently, including axial force, torque, internal and external confining pressures. This study presented several stress paths and loading methods which were easy to implement in practical engineering projects and meet their requirements through mathematics and mechanics analysis. The tensile strength of rock can be obtained in the premise that the axial force and internal confining pressure satisfy specific relationships. By controlling the internal and external confining pressures and axial force, conventional triaxial tests and true triaxial tests can be carried out by using the hollow cylinder torsional apparatus for rock. Thus, the existing disadvantages of the complicated true-triaxial test apparatus and the large loaded surface friction were overcome. The mean stress p and the coefficient of intermediate principal stress b can be kept constant when the axial force and the internal and external confining pressures meet certain relationships, respectively. Those stress paths can be used to study the effect of the stress rotation on rock mechanical properties. Therefore, the realisation of the above stress paths is of great significance to the study of rock mechanical properties and the development of laboratory tests.

Keywords: rock mechanics; principal stress rotation; hollow cylinder torsional apparatus; stress path

1 引 言

隧道及地下空间工程发展迅速, 从传统能源 (石油、煤矿、金属矿等) 到新型能源 (页岩气、

天然气等) 的开采以及水电资源、核资源的利用, 大量高应力、富水工程开工建设, 保证深部工程开挖过程中的围岩稳定具有重要意义。深部工程开挖卸荷过程中, 围岩存在多种破

收稿日期: 2017-02-08

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (973 计划) (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); 河南省教育厅高等学校重点科研项目 (No. 16A560004)。

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 Key Scientific Research Project of Henan Higher Education Institutions (16A560004).

第一作者简介: 周辉, 男, 1972 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 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.

坏模式, 目前对于围岩破坏机制的研究尚不全面, 特别是岩体开挖过程中应力大小及应力方向改变造成的岩体破坏机制^[1]。现阶段针对应力大小改变对岩石力学性质影响的研究较为深入, 而对于应力方向改变产生的影响鲜有研究。随着埋深的增加, 地下工程开挖过程中围岩应力场重分布, 出现较为明显的应力主轴旋转现象, 改变了围岩的破坏模式, 加剧了岩体破裂情况, 对施工环境造成损害, 严重影响施工安全^[1]。因此, 应力主轴旋转对岩石力学性质的影响不能忽视, 需要深入研究。

目前, 受试验技术的限制, 考虑应力主轴旋转的岩石室内试验研究还处于空白阶段, 仅通过数值软件模拟, 定性分析应力主轴旋转对岩石强度及变形的影响, 提出应力主轴旋转下的裂隙扩展机制^[1-4]。为完善岩石室内试验研究^[5-6], 作者所在的研究团队依据薄壁圆筒理论, 通过借鉴土体空心圆柱扭剪仪特点^[7-19], 结合岩石材料的力学性质, 攻克一系列难题, 研制出一套可实现复杂应力路径的岩石空心圆柱扭剪试验系统^[20]。该项研究填补了现阶段模拟复杂应力路径的岩石室内试验仪的空白, 对推动岩石室内试验发展具有重要意义。

本文的目的在于分析、了解现有岩石室内试验可实现应力路径局限性的基础上, 结合岩石空心圆柱扭剪试验系统的功能特点, 通过数学和力学分析, 系统地整理出几种易于实现且符合实际工程情况的应力路径与加载方式, 为后续试验方案设定及理论研究提供理论基础。

2 试验设备及试验技术原理

岩石空心圆柱扭剪仪的基本原理是通过对空心圆柱试样施加轴力、内外围压以及扭力 4 个独立荷载, 实现试验控制系统中的 4 个加载参数与试样单元体的 4 个应力参数形成一一映射的关系。空心圆柱试样受到轴向应力、径向应力、环向应力及剪应力的共同作用, 在主应力空间中与主应力及应力主轴旋转角之间形成对应关系, 如图 1 所示。图中试验控制系统的 4 个加载参数如下: F 为轴力, P_1 、 P_2 分别为内、外围压, M_t 为扭力; 空心圆柱试样单元体的应力参数包括: σ_z 为轴向应力, σ_r 为径向应力, σ_θ 为环向应力, $\tau_{z\theta}$ 为剪应力; σ_1 、 σ_2 和 σ_3 分别为最大、中间和最小主应力。

自行研制的岩石空心圆柱扭剪试验系统可以实现轴力、内外围压以及扭力的独立控制^[20], 试验系统如图 2 所示。因此, 岩石空心圆柱扭剪仪可以实现复杂应力路径下岩石力学性质研究的室内试

验。试验采用空心圆柱薄壁试样(见图 3), 其外径为 50 mm, 内径为 30 mm, 高为 120 mm。利用自行研制的双钻头装置^[20]加工空心圆柱试样, 该装置为套筒结构, 内、外钻头通过连接头同轴连接, 可实现一次成孔, 保证了空心圆柱试样内、外孔的同轴性。与常规制备方式相比, 新方法钻取的岩样尺寸精确度和加工效率大幅度提高。

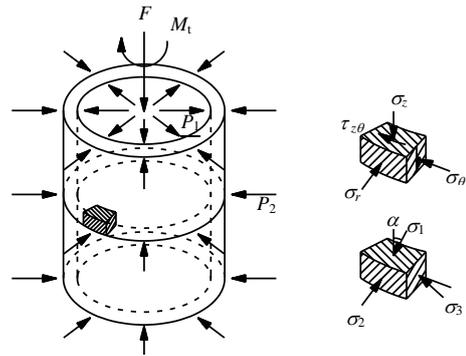


图 1 空心圆柱试样受力关系
Fig.1 Hollow cylinder specimen under loads

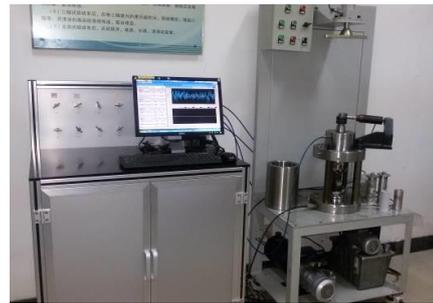


图 2 岩石空心圆柱扭剪试验系统
Fig.2 Hollow cylinder torsional apparatus for rock



图 3 空心圆柱岩石试样
Fig.3 Rock specimen of hollow cylinder

3 基本公式

根据土力学中已有文献对土体空心圆柱扭剪仪的研究成果^[7-19], 结合本试验仪器的功能特点^[20], 提出了一套较为完整的试验控制系统加载参数与空心圆柱试样单元体应力参数的对应关系, 在柱坐标

系及直角坐标系下的表达式分别为

$$\left. \begin{aligned}
 \sigma_z &= \frac{F(D^2/4 - r_0^2) - P_1 r_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \\
 \sigma_r &= \frac{P_2 r_0 + P_1 r_i}{r_0 + r_i} \\
 \sigma_\theta &= \frac{P_2 r_0 - P_1 r_i}{r_0 - r_i} \\
 \tau_{z\theta} &= \frac{3M_t R_4^2 L}{2(r_0^3 - r_i^3)} \\
 \sigma_1 &= (\sigma_z + \sigma_\theta)/2 + \sqrt{(\sigma_z - \sigma_\theta)^2/4 + \tau_{z\theta}^2} \\
 \sigma_2 &= \sigma_r \\
 \sigma_3 &= (\sigma_z + \sigma_\theta)/2 - \sqrt{(\sigma_z - \sigma_\theta)^2/4 + \tau_{z\theta}^2} \\
 p &= \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \\
 q &= \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \\
 q_1 &= \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \\
 b &= \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \\
 \alpha &= \frac{1}{2}\arctan \frac{2\tau_{z\theta}}{\sigma_z - \sigma_\theta} \\
 \theta_\sigma &= \arctan \frac{2b - 1}{\sqrt{3}}
 \end{aligned} \right\} (1)$$

式中： r_0 为试样外半径； r_i 为内半径； 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； p 为平均应力； q 为最大剪应力； q_1 为广义剪应力； b 为中主应力系数； α 为大主应力与竖直方向的夹角； θ_σ 为洛德角。其中， F 、 P_1 、 P_2 与 M_t 为试验控制系统的加载参数； σ_z 、 σ_r 、 σ_θ 及 $\tau_{z\theta}$ 为空心圆柱试样单元体的应力参数； σ_1 、 σ_2 、 σ_3 、 p 、 q 、 q_1 、 b 及 α 为主应力空间中应力参数。

4 试验能力探讨

基于岩石空心圆柱扭剪试验系统可以独立控制 4 个加载参数的功能特点，试验仪可进行室内岩石力学常规试验（包括抗压（拉）强度试验、常规三轴试验和真三轴试验）及应力主轴旋转试验等。

4.1 抗压（拉）强度试验

岩石的抗压（拉）强度是评价岩石力学性质的重要指标之一，岩石空心圆柱扭剪试验仪可以实现岩石抗压（拉）强度的测定。其中，规定压力为正，

拉力为负。

4.1.1 抗压强度测定

对试样连续施加轴向荷载，获取岩石的单轴抗压强度。根据式（1）可得

$$\left. \begin{aligned}
 \sigma_c = \sigma_1 = \sigma_z &= \frac{F(D^2/4 - r_0^2)}{r_0^2 - r_i^2} \\
 \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_r = \sigma_\theta = \tau_{z\theta} &= 0
 \end{aligned} \right\} (3)$$

式中： σ_c 为单轴抗压强度。

4.1.2 抗拉强度测定

依据薄壁圆筒理论，对轴压及内压空心圆柱试样进行受力分析（见图 4），可知环向应力即为岩石的抗拉强度。

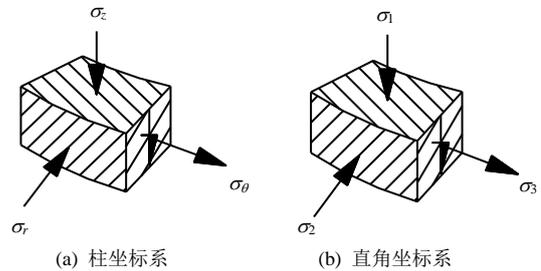


图 4 轴压及内压空心圆柱单元体受力分析图
Fig.4 Hollow cylinder specimen under axial compression and internal confining pressure

根据式（1）可得到空心圆柱试样受轴力与内围压情况下的应力：

$$\left. \begin{aligned}
 \sigma_1 = \sigma_z &= \frac{F(D^2/4 - r_0^2) - P_1 r_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \\
 \sigma_2 = \sigma_r &= \frac{P_1 r_i}{r_0 + r_i} \\
 \sigma_1 = \sigma_3 = \sigma_\theta &= \frac{-P_1 r_i}{r_0 - r_i}
 \end{aligned} \right\} (4)$$

式中： σ_1 为抗拉强度。

由于岩石的抗压强度远大于抗拉强度，为保证试样在受拉状态下发生破坏，轴向应力与轴向荷载需满足一定条件，根据式（4）可知：

$$\left. \begin{aligned}
 0 \leq \sigma_z < \sigma_c \\
 \frac{P_1 r_i^2}{D^2/4 - r_0^2} \leq F < \frac{\sigma_c (r_0^2 - r_i^2) + P_1 r_i^2}{D^2/4 - r_0^2}
 \end{aligned} \right\} (5)$$

抗拉强度测定的具体实现方式如下：利用黏结剂（环氧树脂胶）将上下压头与空心圆柱试样黏结密封，施加一定的轴力，通过上压头的开孔向空心圆柱试样内部施加内围压，直至试样破坏，获取试样的抗拉强度值。

4.2 三轴试验

由于可以较好模拟现场岩石的应力状态，三轴试验被广泛用于研究岩石的力学性质，包括常规三轴试验与真三轴试验。

4.2.1 常规三轴试验

同常规岩石力学试验仪，岩石空心圆柱扭剪仪可以实现常规三轴试验，计算公式为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 = \sigma_z = \frac{F(D^2/4 - r_0^2) - P_1 r_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \\ \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_r = \sigma_\theta = P_1 = P_2 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

常规三轴试验的具体实现方式如下：将上、下压头与空心圆柱试样通过硅胶黏结，采用在空心圆柱试样外壁包裹热缩套、内壁涂抹硅胶的方式，达到隔绝液压油与保护试样的目的。试验中，对试样施加相同的内、外围压，增加轴向力直至岩样发生破坏，且通过设定不同的围压值，用于研究围压对岩石强度变形的影响。

4.2.2 真三轴试验

目前，用于真三轴试验的室内岩石力学试验仪一般是通过加载板对立方体试样的 3 个面施加荷载的方式，实现真三轴的应力状态。主要存在以下问题：①加载试验装置复杂，操作繁琐；②试验中立方体试样的 3 个面受到加载板引起的摩擦力，影响试验结果^[22]。

依据薄壁圆筒理论，通过独立控制 4 个加载参数，岩石空心圆柱扭剪仪可以实现真三轴的应力状态。由于液压油与试样属于柔性接触，大大削弱了端面摩擦的影响，可得到较为精确的试验结果，进而定量评价中主应力对岩石力学性质的影响。

根据式 (1)、(2) 可以得到主应力及中主应力系数与加载参数的关系表达式：

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 = \sigma_z = \frac{F(D^2/4 - r_0^2) - P_1 r_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \\ \sigma_2 = \sigma_r = \frac{P_2 r_0 + P_1 r_i}{r_0 + r_i} \\ \sigma_3 = \sigma_\theta = \frac{P_2 r_0 - P_1 r_i}{r_0 - r_i} \\ b = \frac{-2r_0 r_i (P_1 - P_2)}{P_2 r_0^2 - F(D^2/4 - r_0^2) - r_0 r_i (P_1 - P_2)} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

真三轴试验的具体实现方式与常规三轴试验实现方式类似，不同之处在于真三轴试验中使用环氧树脂胶将上、下压头与试样黏结密封。试验中对试样施加不同的内、外围压，实现复杂应力路径的

模拟，可用于研究中间主应力效应。

4.3 应力主轴旋转试验

为研究主应力方向对岩石力学性质的影响，应力主轴旋转试验的实现具有重要意义。

4.3.1 常 p 下应力主轴旋转试验

应力主轴旋转过程中，为研究岩石在主应力空间偏平面上的破坏轨迹（见图 5，图中 p_1 、 p_2 、 p_3 表示不同的平均应力），评价应力主轴旋转对岩石强度、变形的影响等。保证平均应力 p 为一常数，是一种重要的应力路径。为后续考虑应力主轴旋转的理论研究，提供试验基础。

根据式 (1)，可以得到：

$$p = \frac{1}{3} \cdot \frac{F(D^2/4 - r_0^2) + 2P_2 r_0^2 + 3P_1 r_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \quad (8)$$

当设定平均应力 p 为一常数 A 时，根据式 (8) 可得

$$F = \frac{3A(r_0^2 - r_i^2) + 3P_1 r_i^2 - 2P_2 r_0^2}{(D^2/4 - r_0^2)} \quad (9)$$

由式 (9) 可知，该应力路径下轴向力由平均应力及内、外围压控制。当设定平均应力不变时，通过改变内、外围压，试样可以在不同扭力作用下发生破坏。当设定平均应力为不同常数时，可以获得不同平均应力下的岩石破坏轨迹，进而分析平均应力对岩石力学性质的影响。

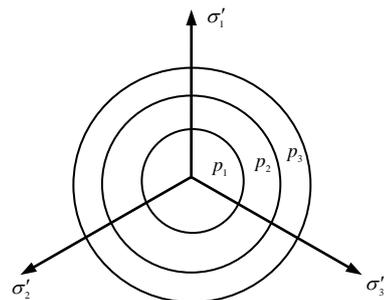


图 5 偏平面上岩石破坏轨迹示意图
Fig.5 Schematic of rock failure locus on offset plane

4.3.2 常 θ_σ 下应力主轴旋转试验

洛德角 θ_σ 表达了主应力分量之间的比例关系，可以反映材料的不同受力状态。 θ_σ 为常数的应力主轴旋转试验，可用于研究岩石在主应力空间中子午面上的破坏轨迹（见图 6）。根据式 (2) 可知， θ_σ 为常数，与中主应力系数保持常数等效。

根据式 (1)、(2) 可得

$$b = \frac{1}{2} + \frac{\left(P_2 r_0^2 + 3r_0 r_i (P_1 - P_2) - F (D^2/4 - r_0^2) \right)}{2(r_0^2 - r_i^2)} \quad (10)$$

$$2 \sqrt{\frac{\left(-P_2 r_0^2 + F (D^2/4 - r_0^2) + r_0 r_i (P_1 - P_2) \right)^2}{4(r_0^2 - r_i^2)^2} + \frac{9M_T^2 R_4^2 L^2}{4(r_0^3 - r_i^3)^2}}$$

当轴向力满足下式，可以实现 $b=0.5$, $\theta_\sigma=0^\circ$ 的应力路径：

$$F = \frac{P_2 r_0^2 + 3r_0 r_i (P_1 - P_2)}{(D^2/4 - r_0^2)} \quad (11)$$

结合偏平面上岩石破坏轨迹，可以研究主应力空间中考虑应力主轴旋转的岩石破坏面。

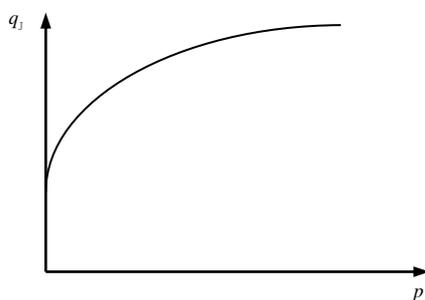


图6 子午面上岩石破坏轨迹示意图
Fig.6 Schematic of rock failure locus on meridian plane

5 结论

根据薄壁圆筒理论，利用岩石空心圆柱扭剪仪，对空心圆柱试样进行力学分析，探讨了岩石空心圆柱扭剪仪模拟复杂应力路径的能力，得到以下结论：

(1) 控制轴向力及内围压，用岩石空心圆柱扭剪仪可以获取岩石的抗压（拉）强度，特别是岩石抗拉强度的测定，改进了现阶段岩石抗拉强度获取的试验方法，提出一种精确度较高，试验操作简便的新型试验方法。

(2) 控制轴向力及内、外围压，用岩石空心圆柱扭剪仪可以实现常规三轴试验及真三轴试验。特别是真三轴试验的实现，解决了现阶段真三轴试验中试验装置复杂、试样端面摩擦力大的技术难题，对中间主应力效应的研究提供手段。

(3) 在满足式(9)的前提下，通过调整内、外围压，可实现平均应力为常数的应力路径，研究主应力空间偏平面上应力主轴旋转下岩石的破坏轨迹。

(4) 在满足式(11)的前提下，通过调整内、外围压及轴向荷载，可以实现应力洛德角为0下的

应力路径，研究主应力空间子午面上应力主轴旋转下岩石的破坏轨迹，进而获取岩石在主应力空间中考虑应力主轴旋转的完整破坏面。

综上所述，岩石空心圆柱扭剪仪可以实现多种复杂应力路径，可用于研究应力主轴旋转对岩石强度及变形的影响，完善岩石强度准则，深入研究岩石力学性质，对实际工程具有重要指导意义。该试验仪改进了现阶段岩石室内试验技术，极大地推动了岩石室内试验的发展。

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] EBERHARDT E. Numerical modelling of three-dimension stress rotation ahead of an advancing tunnel face[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2001, 38(4): 499—518.
- [2] 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.
- [3] 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 Tunnelling Technology*, 2011, 48(1): 6—11.
- [4] 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.
- [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(增刊 1): 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(Supp.1): 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]. **Geotechnique**, 1983, 33(4): 355—383.
- [8] VAID Y P, SAYAO A, HOU E, et al. Generalized stress-path-dependent soil behaviour with a new hollow cylinder torsional apparatus[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1990, 27(5): 601—616.
- [9] 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.
- [10] 黄博, 丁浩, 陈云敏, 等. GDS 空心圆柱仪动力试验能力探讨[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 314—320.
- HUANG Bo, DING Hao, CHEN Yun-min, et al. Preliminary study of dynamic testing performance of hollow cylinder apparatus[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(1): 314—320.
- [11] 姚兆明, 毛芬, 李哲, 等. 动态空心圆柱剪切仪模拟复杂应力路径能力[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2012, 32(5): 71—78.
- YAO Zhao-ming, MAO Fen, LI Zhe, et al. Capacity analysis of dynamic hollow cylinder shear apparatus simulating complicated stress path[J]. **Journal of Chang'an University of (Natural Science Edition)**, 2012, 32(5): 71—78.
- [12] 潘华, 陈国兴. 动态围压下空心圆柱扭剪仪模拟主应力轴旋转应力路径能力分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1701—1712.
- PAN Hua, CHEN Guo-xing. Analysis of capabilities of HCA to simulate stress paths for principal stress rotation under dynamic confining pressure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(6): 1701—1712.
- [13] 王常晶, 温日琨, 陈云敏. 交通荷载引起的主应力轴旋转室内试验模拟探讨[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3412—3416.
- WANG Chang-jing, WEN Ri-kun, CHEN Yun-min. Discussion on laboratory test simulation of principal stress axes rotation induced by traffic loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(12): 3412—3416.
- [14] 赵凌. 进行应力路径实验的若干技术问题[J]. 土工基础, 1998, 12(3): 45—47.
- ZHAO Ling. Technical problems about experiments of stress path[J]. **Soil Engineering and Foundation**, 1998, 12(3): 45—47.
- [15] 沈扬, 周健, 龚晓南. 空心圆柱仪(HCA)模拟恒定围压下主应力轴循环旋转应力路径能力分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(3): 281—287.
- SHEN Yang, ZHOU Jian, GONG Xiao-nan. Analysis on ability of HCA to imitate cyclic principal stress rotation under constant confining pressure[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(3): 281—287.
- [16] 王鑫, 沈扬, 陶明安. 空心圆柱仪模拟波浪荷载下主应力轴旋转应力路径能力探讨[J]. 水利水电技术, 2015, 46(10): 124—129.
- WANG Xin, SHEN Yang, TAO Ming-an. Study on ability of hollow cylinder apparatus(HCA) to simulate stress path of principal stress axes rotation under wave load[J]. **Water Resources and Hydropower Engineering**, 2015, 46(10): 124—129.
- [17] 陶明安, 沈扬, 王鑫, 等. 空心圆柱仪模拟列车荷载下土中应力路径能力分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(11): 3166—3172.
- TAO Ming-an, SHEN Yang, WANG Xin, et al. Ability analysis of HCA to imitate stress path of soil caused by train load[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(11): 3166—3172.
- [18] 周正龙, 陈国兴, 吴琪. 四向振动空心圆柱扭剪仪模拟主应力轴旋转应力路径能力分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 1): 126—132.
- ZHOU Zheng-long, CHEN Guo-xing, WU Qi. Analysis of capabilities of stress paths of HCA to simulate principal stress rotation under four-direction dynamic loads[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(Supp.1): 126—132.
- [19] 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.
- [20] 周辉, 姜玥, 卢景景, 等. 岩石空心圆柱扭剪试验系统研制[J]. 岩土力学, 2018, 39(4): 1535—1542.
- ZHOU Hui, JIANG Yue, LU Jing-jing, et al. Development of hollow cylinder apparatus for rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(4): 1535—1542.
- [21] 周辉, 姜玥, 卢景景, 等. 一种空心圆柱岩石试样制备钻头及钻机:中国, 201611066833.3[P].2016-11-25.
- ZHOU Hui, JIANG Yue, LU Jing-jing, et al. A drill bit and machine of hollow cylinder for rock sample preparation: China, 201611066833.3[P]. 2016-11-25.
- [22] 石露, 李小春. 真三轴试验中端部摩擦效应分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 1159—1164.
- SHI Lu, LI Xiao-chun. Analysis of end friction effect in true triaxial test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(4): 1159—1164.