

# (12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织  
国际局

(43) 国际公布日  
2020 年 6 月 18 日 (18.06.2020)



(10) 国际公布号  
**WO 2020/118776 A1**

- (51) 国际专利分类号:  
**G09B 25/00** (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2018/124141
- (22) 国际申请日: 2018 年 12 月 27 日 (27.12.2018)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:  
201811513251.4 2018 年 12 月 11 日 (11.12.2018) CN
- (71) 申请人: 山东大学 (SHANDONG UNIVERSITY)  
[CN/CN]; 中国山东省济南市历下区经十路  
17923 号, Shandong 250061 (CN)。
- (72) 发明人: 张强勇 (ZHANG, Qiangyong); 中国山东省  
济南市历下区经十路 17923 号, Shandong 250061  
(CN)。 张振杰 (ZHANG, Zhenjie); 中国山东省

济南市历下区经十路 17923 号, Shandong 250061 (CN)。 李术才 (LI, Shucan); 中国山东省济南市历下区经十路 17923 号, Shandong 250061 (CN)。 段抗 (DUAN, Kang); 中国山东省济南市历下区经十路 17923 号, Shandong 250061 (CN)。 向文 (XIANG, Wen); 中国山东省济南市历下区经十路 17923 号, Shandong 250061 (CN)。 王汉鹏 (WANG, Hanpeng); 中国山东省济南市历下区经十路 17923 号, Shandong 250061 (CN)。 刘传成 (LIU, Chuancheng); 中国山东省济南市历下区经十路 17923 号, Shandong 250061 (CN)。 李帆 (LI, Fan); 中国山东省济南市历下区经十路 17923 号, Shandong 250061 (CN)。 任明洋 (REN, Mingyang); 中国山东省济南市历下区经十路 17923 号, Shandong 250061 (CN)。 张岳 (ZHANG, Yue); 中国山东省济南市历下区经十路 17923 号, Shandong 250061 (CN)。 丁炎志

(54) **Title:** TRUE THREE-DIMENSIONAL PHYSICAL MODEL TESTING SYSTEM FOR SIMULATING BURST WATER DISASTER IN DEEP CAVERN

(54) 发明名称: 一种模拟深部洞室突涌水灾害的真三维物理模型试验系统

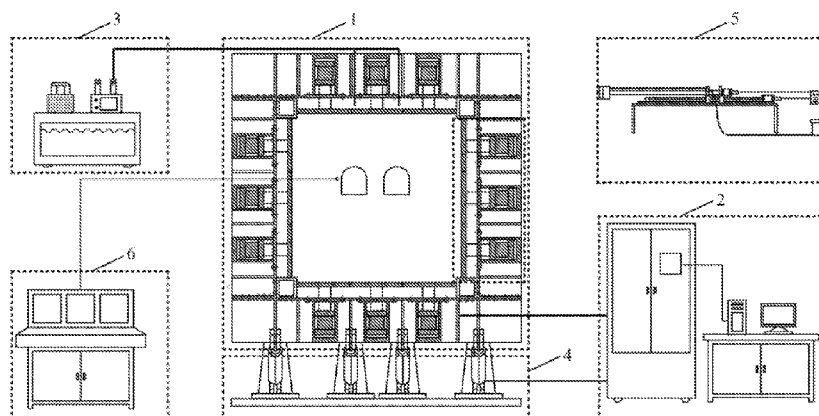


图 1

(57) **Abstract:** A true three-dimensional physical model testing system for simulating a burst water disaster in a deep cavern, comprising a box-type sealed loading reaction device (1), an ultra-high-pressure true three-dimensional loading system (2), a servo control high-permeability hydraulic loading system (3), a tilt geological structure manufacturing system (4), a model cavern automatic excavation system (5), and a model comprehensive testing and analysis system (6). The box-type sealed loading reaction device (1) serves as a model test loading reaction device and is used for accommodating a model body (62) and a high-pressure water body (63); the ultra-high-pressure true three-dimensional loading system (2) performs ultra-high-pressure true three-dimensional loading; the servo control high-permeability hydraulic loading system (3) performs high-permeability hydraulic automatic loading; the tilt geological structure manufacturing system (4) is used for manufacturing the model body (62) containing a tilt geological structure therein; the model cavern automatic excavation system (5) is used for automatically excavating a model cavern; and the model comprehensive

(DING, Yanzhi); 中国山东省济南市历下区经十路17923号, Shandong 250061 (CN)。 余光远 (YU, Guangyuan); 中国山东省济南市历下区经十路17923号, Shandong 250061 (CN)。

(74) 代理人: 济南圣达知识产权代理有限公司(JINAN SHENGDA INTELLECTUAL PROPERTY AGENCY CO.,LTD); 中国山东省济南市经十路17703号华特广场B308室, Shandong 250061 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

testing and analysis system (6) automatically acquires model test data and stores the model test data quickly. The true three-dimensional physical model testing system for simulating a burst water disaster in a deep cavern has wide application prospects in simulating burst water geological disasters in hydropower, transportation, energy, and deep caverns in mines.

(57) 摘要: 一种模拟深部洞室突涌水灾害的真三维物理模型试验系统, 包括盒式密封加载反力装置(1)、超高压真三维加载系统(2)、伺服控制高渗透水压加载系统(3)、倾斜地质构造制作系统(4)、模型洞室自动开挖系统(5)及模型综合测试分析系统(6)。盒式密封加载反力装置(1)作为模型试验加载反力装置并用于容纳模型体(62)和高压水体(63), 超高压真三维加载系统(2)进行超高压真三维加载, 伺服控制高渗透水压加载系统(3)进行高渗透水压自动加载, 倾斜地质构造制作系统(4)用于制备内含倾斜地质构造的模型体(62); 模型洞室自动开挖系统(5)用于自动开挖模型洞室, 模型综合测试分析系统(6)自动采集模型试验数据并快速存储。模拟深部洞室突涌水灾害的真三维物理模型试验系统在模拟水电、交通、能源和矿山深部洞室突涌水地质灾害方面具有广泛的应用前景。

## 一种模拟深部洞室突涌水灾害的真三维物理模型试验系统

### 技术领域

本发明涉及一种在水电、交通、能源和矿山工程领域使用的模拟深部洞室突涌水灾害的真三维物理模型试验系统。

### 背景技术

随着社会和经济的快速发展，中国已发展成为世界上隧洞和地下工程建造数量最多、规模最大、地质条件最复杂、结构形式最多样的国家。近年来，中国水电引水隧洞、交通隧洞、矿山巷道等深部洞室建设蓬勃发展，建设重心向地质条件复杂的西部山区及岩溶地区转移，高地应力、高渗透压、强岩溶、复杂地质构造等导致深部洞室（交通隧洞、引水隧洞、矿山巷道等）施工过程中灾害频发，形成突水、涌泥、塌方等具有隐蔽性和突发性的大型地质灾害，灾害发生部位、规模和动力特征难以准确预测，往往给地下工程建设带来严重危害，轻则造成淹没洞室、冲毁机具等重大经济损失，重则造成重大人员伤亡事故。因此，针对高地应力与高渗透水压耦合作用下深部洞室突涌水地质灾害的致灾机理开展深入研究，对于有效预防灾害性事故发生，保证深部洞室的施工安全和运营稳定具有十分重大的理论意义和工程应用价值。面对深部洞室工程，传统理论方法难以胜任，数值模拟困难重重，现场原位试验条件受限且费用昂贵，相比之下，物理模型试验以其形象、直观、真实的特性成为研究深部工程的重要手段。与 MTS 研究岩芯力学特性不同，物理模型试验是根据相似原理采用缩尺模型研究洞室施工开挖过程与变形破坏特征的物理模拟方法，对于发现新现象，探索新规律、揭示新机理和验证新理论具有理论分析和数值模拟不可替代的重要作用。因此，物理模型试验也成为研究深部洞室突涌水灾害发生机理与产生条件的重要手段，要开展高地应力与高渗透压耦合作用下深部洞室突水灾害物理模型试验，就必须具备相应的物理物理模型试验系统。目前有关物理模型试验系统的研究现状如下：

（1）《Water》2018 年第 9 期介绍了一种模型试验系统，该系统可模拟空腔突水过程，但无法实现真三维高地应力与高渗透压力耦合加载，也无法模拟倾斜地质构造的影响以及模型洞室自动开挖过程。

（2）《International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences》2017 年第 94 卷介绍了一种可模拟深部层状盐岩地层中储气库群长期运营稳定的模型试验系统，但该系统无法模拟高地应力场与高渗流场的耦合作用，无法制备倾斜地质构造，且无法模拟模型洞室自动开

挖过程。

(3)《Energies》2017年第6期介绍了一种智能数控制超高压加载模型试验系统，可模拟深埋洞室的垮塌破坏过程，但该系统无法模拟高地应力场与高渗流场的耦合作用，无法制备倾斜地质构造，且无法模拟模型洞室自动开挖过程。

(4)《Tunnelling and Underground Space Technology》2017年第62卷介绍了一种可模拟流固效应的三轴模型试验系统，该系统以室内三轴试验机为模板开发，实现流固耦合加载，但该装置所能容纳的模型尺寸较小，且无法制作倾斜地质构造，也无法模拟模型洞室自动开挖过程。

(5)《Procedia Engineering》2016年第166卷介绍了一种隧道衬砌受力模拟模型试验系统，以气压模拟水压对衬砌作用，但该系统无法进行真三维高地应力与高渗透压力的耦合加载，无法制备倾斜地质构造，且无法模拟模型洞室自动开挖过程。

(7)《岩土工程学报》2018年第5期介绍了一种可模拟隐伏溶洞突水效应的模型试验系统，但该系统只能进行平面应变试验，无法进行高地应力与高渗透压耦合加载的真三维试验，且无法制作倾斜地质构造，也无法模拟模型洞室自动开挖过程。

(8)《岩石力学与工程学报》2013年第5期介绍了一种海底隧洞流固耦合模型试验系统，由钢结构架、钢化玻璃试验箱和高渗透压力加载装置组成，可进行平面应力和平面应变模型试验，但该系统无法进行高地应力与高渗透压耦合加载的真三维试验，无法制作倾斜地质构造，也无法模拟模型洞室自动开挖过程。

(9)《岩石力学与工程学报》2009年第4期介绍了一种可模拟深部洞室渗透作用的物理模型试验系统，设计了自动供水装置与离散式花管渗流装置，但该系统无法模拟真三维高地应力加载过程，无法制作倾斜地质构造，也无法模拟模型洞室自动开挖过程。

综上所述，目前国内外相关物理模型试验系统存在如下问题：

(1) 国内外模型试验系统多以平面加载和准三维加载为主，较少进行高地应力与高渗透压耦合的真三维加载试验；

(2) 国内外模型试验尚无法模拟高地应力场与高渗流场耦合作用的深部洞室突涌水破坏过程；

(3) 国内外模型试验多以均质材料为主，较少考虑复杂倾斜地质构造的影响；

(4) 国内外模型试验洞室多以人工开挖为主，较难模拟不同形状和尺寸洞室的自动开挖过程。

发明内容

本发明为克服上述现有技术的不足，研制一种模拟深部洞室突涌水灾害的真三维物理模型试验系统。

本发明的目的是采用下述技术方案实现的：

一种模拟深部洞室突涌水灾害的真三维物理模型试验系统，主要由盒式密封加载反力装置、超高压真三维加载系统、伺服控制高渗透水压加载系统、倾斜地质构造制作系统、模型洞室自动开挖系统以及模型综合测试分析系统组成；

所述的盒式密封加载反力装置作为模型试验加载的反力装置并用于容纳试验模型体和高压水体；

所述的超高压真三维加载系统通过控制液压千斤顶对试验模型体进行超高压真三维加载；

所述的伺服控制高渗透水压加载系统用于对试验模型体进行高渗透水压自动加载；

所述的倾斜地质构造制作系统用于制备具有内含倾斜地质构造的模型体；

所述的模型洞室自动开挖系统用于在试验模型体上开挖不同形状和尺寸的模型洞室；

所述的模型综合测试分析系统自动采集模型体内部任意部位的位移、应力、高渗透压力和渗流量试验数据并进行快速存储。

进一步的，所述的盒式密封加载反力装置主要由钢制的顶梁反力墙模块、底梁反力墙模块、左反力墙模块、右反力墙模块、前反力墙模块和后反力墙模块通过高强螺栓连接组合而成，主要作为模型试验加载的反力装置并用于容纳模型体和高压水体；各反力墙模块采用刚度较高的盒式结构型式，使用厚度 40mm 的高强钢板制作，盒式密封加载反力装置外尺寸长度、宽度和高度均为 3.2m，内部空间尺寸长度、宽度和高度均为 2.0m。

进一步的，在各反力墙模块连接的面面接触处设置密封槽，槽内安装橡胶密封垫圈。

进一步的，为保证试验模型体在真三维加载过程中各方向不受相邻加载的干扰，在盒式密封加载反力装置内部设置了三维导向框装置，三维导向框装置由 12 根横断面尺寸为 200mm×200mm 的不锈钢方管通过高强螺栓连接组合而成，模型试验加载前，模型加载钢板紧贴模型体表面并嵌入三维导向框装置内一定深度。

进一步的，在前反力墙模块中部设置了封闭开挖窗口，所述的封闭开挖窗口主要由钢化玻璃板、洞室开挖窗口、钢制空心挡水壳和洞口挡水钢板组成。根据模型试验开挖洞室的尺寸在钢化玻璃板中央设置了洞室开挖窗口，沿洞室开挖窗口中心安装钢制空心挡水壳，钢制空心挡水壳与开挖洞室尺寸相同，并向洞内延伸插入模型体内部一定深度阻止洞室开挖时的水体流出以保证高渗透压力稳定。钢制空心挡水壳与钢化玻璃板之间垫有橡胶密封垫圈，洞

口挡水钢板将洞室开挖窗口罩住以形成封闭腔体。

进一步的，所述的超高压真三维加载系统由油箱、高压油管、驱动装置、油压调节器、压力监测器、液压控制器、液压千斤顶以及加载钢板组成。油箱用于盛放液压油，驱动装置用于将油箱内的液压油泵入高压油管，油压调节器用于控制油路压力的大小和稳定，压力监测器用于监测油路压力大小，液压控制器用于控制驱动装置和油压调节器协同工作，液压千斤顶外嵌于反力墙模块内，千斤顶前端安装加载钢板并紧贴试验模型体。试验模型体上下加载面各紧贴一块加载钢板，试验模型体前、后、左、右面由上而下各紧贴三块加载钢板，利用超高压真三维加载系统和盒式密封加载反力装置可将液压千斤顶的荷载均匀传给加载钢板然后再施加到模型体上，以实现模型试验真三维非均匀加载。

进一步的，所述的伺服控制高渗透水压加载系统主要由水箱、自动变频水泵、高渗透压力流量计、高渗透压力调节器、高渗透压力控制器和高压水管组成。水箱用于承载高压水体，自动变频水泵用于将水箱内水体泵入盒式密封加载反力装置内，高渗透压力流量计用于监测输出的水量与水压，高渗透压力调节器用于控制高渗透压力大小并保持其稳定，高渗透压力控制器用于控制自动变频水泵和高渗透压力调节器协同工作，高压水管将水箱、自动变频水泵、高渗透压力流量计和高渗透压力调节器串连形成通路进行高水压加载。

进一步的，伺服控制高渗透水压加载系统通过盒式密封加载反力装置对模型体进行高渗透压力加载，其中顶部高渗透压力按  $\sigma_{w\text{顶}} = \gamma h_{\text{顶}}$  进行加载，则底部高渗透压力为  $\sigma_{w\text{底}} = \gamma (h_{\text{顶}} + \Delta h)$ ， $h_{\text{顶}}$  为模型顶部地下水位深度， $\gamma$  为水体容重， $\Delta h$  为试验模型体高度。模型体在盒式密封加载反力装置内部达到饱和，并形成梯度高渗透压力，从而实现随深度变化的高渗透压力加载。

进一步的，所述的倾斜地质构造制作系统包括支撑旋转装置、材料容纳装置和材料压实装置。支撑旋转装置用于调节材料容纳装置的倾斜角度，材料容纳装置用来填筑内含倾斜地质构造的模型体，材料压实装置用于分层压实填筑的模型材料。

具体的，所述的支撑旋转装置包括铰支架、可旋转双节千斤顶和底板，四组铰支架将底梁反力墙模块后端固定在底板上，底梁反力墙模块前端与四组可旋转双节千斤顶通过连接件连接，通过可旋转双节千斤顶的伸长与回缩调节材料容纳装置的倾斜角度以制备各种倾斜地质构造。材料容纳装置由反力墙模块组合而成，通过增加和删减反力墙模块的数量来控制模型材料的填筑量。材料压实装置包括材料压实反力架、压实千斤顶、钢制压环和钢制压板，在模型反力装置外部设置材料压实反力架，其底部固定于地面，压实千斤顶后端固定于材料压实反力架上，通过压实千斤顶和其前端放置的钢制压环和钢制压板进行模型材料的分层压

实。

具体的，根据所要制备的倾斜地质构造，首先通过可旋转双节千斤顶将材料容纳装置旋转提升一定高度，然后向材料容纳装置内填筑一定厚度的模型材料，再利用材料压实装置分层压实模型材料，直至完成整个试验模型体的制作，最后将可旋转双节千斤顶回缩，使模型反力装置回到水平状态，从而制作完成内含倾斜地质构造的模型体。

进一步的，所述的模型洞室自动开挖系统主要由刀头开挖装置、刀头旋转驱动装置、刀头前进驱动装置、除尘装置、支撑架以及开挖控制装置组成；刀头开挖装置安装于刀头旋转驱动装置前端，用于开挖切削模型体，刀头旋转驱动装置用于提供刀头开挖装置的旋转切削力，刀头前进驱动装置用于提供刀头开挖装置前进开挖的动力，除尘装置用于清除开挖切削的模型材料，支撑架用于支撑整个开挖系统，开挖控制装置用于控制刀头旋转驱动装置的转速和刀头前进驱动装置的步进速率。

具体的，所述的刀头开挖装置由洞室仿形刀壳、旋转切削刀片和出尘孔组成。洞室仿形刀壳根据开挖洞室形状和尺寸加工制作，旋转切削刀片固定于洞室仿形刀壳中间，与刀头旋转驱动装置连接，用于旋转切削模型体，旋转切削刀片可自由伸缩且时刻紧贴洞室内壁从而开挖出不同形状和尺寸的模型洞室，所述的出尘孔设置于所述的洞室仿形刀壳上，用于将开挖后的材料碎屑运输至装置外面。

具体的，洞室自动开挖过程为：通过开挖控制装置启动刀头旋转驱动装置和刀头前进驱动装置，刀头旋转驱动装置通过旋转驱动连杆带动旋转切削刀片沿着洞室内壁旋转，刀头前进驱动装置通过螺旋驱动连杆带动刀头旋转驱动装置前进，并带动刀头开挖装置前进，从而完成模型洞室开挖。

进一步的，所述的模型综合测试分析系统主要由防水光纤位移传感器、防水应力传感器、防水光纤高渗透压力传感器、流量监测器和数据处理软件系统组成；防水光纤位移传感器用于监测模型体内部任意部位的位移，防水应力传感器用于监测模型体内部任意部位的应力，防水光纤高渗透压力传感器用于监测模型体内部任意部位的高渗透压力，流量监测器用于监测洞室开挖后的渗水量，数据处理软件系统将测得的模型试验数据实时进行处理、存储和显示并自动生成相关时程变化曲线。

本发明具有如下显著的技术优势：

(1) 本发明将液压千斤顶全部外嵌于盒式密封加载反力装置上，改变了现有物理模型试验系统将液压千斤顶安装在加载反力装置内部的技术缺陷，大大节省了加载反力装置与试验模型体的内部空间且有利于对液压千斤顶进行安装、拆卸和维修，更有利于保证模型加载反

力装置的密闭性。

(2) 本发明可进行流固耦合作用下的超高压真三维加载与高渗透水压加载，可精细模拟高地应力和高渗透压力耦合作用下深部洞室开挖的非线性变形破坏过程，解决了现有多场耦合物理模型试验系统只能低压和均匀加载的技术难题。

(3) 本发明可制备具有任意倾角、厚度的倾斜地质构造，可模拟复杂地质条件下深部洞室突涌水地质灾害的形成与演化过程。

(4) 本发明可以自动开挖不同形状和尺寸的模型洞室，解决了目前模型试验洞室多依靠人工开挖且造成洞室开挖误差大和精度低的技术难题。

(5) 本发明在模拟水电、交通、能源和矿山深部洞室突涌水地质灾害方面具有广泛的应用前景。

## 附图说明

构成本申请的一部分的说明书附图用来提供对本申请的进一步理解，本申请的示意性实施例及其说明用于解释本申请，并不构成对本申请的不当限定。

图 1 为本发明整体结构平面示意图；

图 2 为本发明的盒式密封加载反力装置整体三维设计图；

图 3 为本发明的盒式密封加载反力装置正视图；

图 4 为本发明的盒式密封加载反力装置侧视图；

图 5 为本发明的盒式密封加载反力装置俯视图；

图 6 为本发明的盒式密封加载反力装置内部结构图；

图 7(a)、图 7(b)、图 7(c)为本发明的封闭开挖窗口构成图；

图 8 为本发明的封闭开挖窗口安装示意图；

图 9 为本发明的超高压真三维加载系统内部示意图；

图 10 为本发明的超高压真三维加载系统外部示意图；

图 11 为本发明的伺服控制高渗透水压加载系统示意图；

图 12 为本发明的倾斜地质构造制作系统示意图；

图 13(a)、图 13(b)、图 13(c)为本发明的倾斜地质构造制作示意图；

图 14 为本发明的模型洞室自动开挖系统平面示意图；

图 15 为本发明的模型洞室自动开挖系统整体示意图；

图 16 为本发明的模型综合测试分析系统示意图；

图 17 为采用本发明进行试验的流程图；

图 18 为内含倾斜地质构造的模型体示意图；

图 19 为采用本发明进行模型洞室开挖模拟示意图；

图 20 为开挖过程突水灾害示意图；

其中：1.盒式密封加载反力装置，2.超高压真三维加载系统，3.伺服控制高渗透水压加载系统，4.倾斜地质构造制作系统，5.模型洞室自动开挖系统，6.模型综合测试分析系统，7.顶梁反力墙模块，8.底梁反力墙模块，9.左反力墙模块，10.右反力墙模块，11.前反力墙模块，12.后反力墙模块，13.密封槽，14.橡胶密封垫圈，15.高强螺栓，16.三维导向框装置，17.加载钢板，18.封闭开挖窗口，19.钢化玻璃板，20.洞室开挖窗口，21.钢制空心挡水壳，22.洞口挡水钢板，23.油箱，24.高压油管，25.驱动装置，26.油压调节器，27.压力监测器，28.液压控制器，29.液压千斤顶，30.水箱，31.自动变频水泵，32.高渗透压力流量计，33.高渗透压力调节器，34.高渗透压力控制器，35.高压水管，36.支撑旋转装置，37.材料容纳装置，38.材料压实装置，39.铰支架，40.可旋转双节千斤顶，41.底板，42.材料压实反力架，43.压实千斤顶，44.钢制压环，45.钢制压板，46.刀头开挖装置，47.刀头旋转驱动装置，48.刀头前进驱动装置，49.除尘装置，50.支撑架，51.开挖控制装置，52.洞室仿形刀壳，53.旋转切削刀片，54.出尘孔，55.旋转驱动连杆，56.螺旋驱动连杆，57.防水光纤位移传感器，58.防水应力传感器，59.防水光纤高渗透压力传感器，60.流量监测器，61.数据处理软件系统，62.模型体，63.高压水体。

## 具体实施方式

应该指出，以下详细说明都是例示性的，旨在对本申请提供进一步的说明。除非另有指明，本文使用的所有技术和科学术语具有与本申请所属技术领域的普通技术人员通常理解的含义。

需要注意的是，这里所使用的术语仅是为了描述具体实施方式，而非意图限制根据本申请的示例性实施方式。如在这里所使用的，除非上下文另外明确指出，否则单数形式也意图包括复数形式，此外，还应当理解的是，当在本说明书中使用术语“包含”和/或“包括”时，其指明存在特征、步骤、操作、器件、组件和/或它们的组合。

为了方便叙述，本发明中出现“前”、“后”、“左”、“右”字样，仅表示与附图本身的前、后、左、右方向一致，并不对结构起限定作用，仅仅是为了便于描述本发明和简化描述，而不是指示或暗示所指的设备或元件必须具有特定的方位，以特定的方位构造和操作，因此不能理解为对本发明的限制。

下面结合附图和实施例对本发明进一步说明。

如图 1 所示, 一种模拟深部洞室突涌水灾害的真三维物理模型试验系统, 主要由盒式密封加载反力装置 1、超高压真三维加载系统 2、伺服控制高渗透水压加载系统 3、倾斜地质构造制作系统 4、模型洞室自动开挖系统 5 以及模型综合测试分析系统 6 组成。所述的盒式密封加载反力装置 1 作为模型试验加载的反力装置并用于容纳模型体 62 和高压水体 63, 所述的超高压真三维加载系统 2 通过控制液压千斤顶 29 对试验模型体进行超高压真三维加载, 所述的伺服控制高渗透水压加载系统 3 用于对试验模型体进行高渗透水压自动加载, 所述的倾斜地质构造制作系统 4 制备具有内含倾斜地质构造的模型体 62, 所述的模型洞室自动开挖系统 5 用于开挖不同形状和尺寸的模型洞室, 所述的模型综合测试分析系统 6 自动采集模型体 62 内部任意部位的位移、应力、高渗透压力和渗流量试验数据并进行快速存储。

如图 2 至图 5 所示, 所述的盒式密封加载反力装置 1 主要由钢制的顶梁反力墙模块 7、底梁反力墙模块 8、左反力墙模块 9、右反力墙模块 10、前反力墙 11 模块和后反力墙模块 12 构件通过高强螺栓 15 连接组合而成, 主要作为模型试验加载的反力装置并用于容纳模型体 62 和高压水体 63, 各反力墙模块采用刚度较高的盒式结构型式, 使用厚度 40mm 的高强钢板制作。盒式密封加载反力装置 1 外尺寸长度、宽度和高度均为 3.2m, 内部空间尺寸长度、宽度和高度均为 2.0m。在各反力墙模块连接的面面接触处设置密封槽 13, 槽内安装橡胶密封垫圈 14。

如图 6 所示, 为保证试验模型体在真三维加载过程中不受相邻加载的干扰, 在盒式密封加载反力装置 1 内壁设置了三维导向框装置 16, 三维导向框装置 16 由 12 根横断面尺寸为 200mm×200mm 的不锈钢方管通过高强螺栓 15 连接组合而成, 模型试验加载前, 模型加载钢板 17 紧贴模型体 62 表面并嵌入三维导向框装置 16 内一定深度。

如图 3、图 7 (a、b、c) 和图 8 所示, 在前反力墙模块 11 中部设置了封闭开挖窗口 18, 所述的封闭开挖窗口 18 主要由钢化玻璃板 19、洞室开挖窗口 20、钢制空心挡水壳 21 和洞口挡水钢板 22 组成。根据试验开挖洞室的尺寸在钢化玻璃板 19 中央设置了洞室开挖窗口 20, 沿洞室开挖窗口 20 中心安装钢制空心挡水壳 21, 钢制空心挡水壳 21 与开挖洞室口尺寸相同, 并向洞内延伸插入模型体 62 内部一定深度阻止洞室开挖时的水体流出以保证高渗透压力稳定。钢制空心挡水壳 21 与钢化玻璃板 19 之间垫有橡胶密封垫圈 14, 洞口挡水钢板 22 将洞室开挖窗口 20 罩住以形成封闭腔体。

如图 9 和图 10 所示, 所述的超高压真三维加载系统 2 主要由油箱 23、高压油管 24、驱动装置 25、油压调节器 26、压力监测器 27、液压控制器 28、液压千斤顶 29 以及加载钢板 17 组成。油箱 23 用于盛放液压油, 驱动装置 25 用于将油箱 23 内的液压油泵入高压油管 24,

油压调节器 26 用于控制油路压力的大小和稳定, 压力监测器 27 用于监测油路压力大小, 液压控制器 28 用于控制驱动装置 25 和油压调节器 26 协同工作, 液压千斤顶 29 外嵌于反力墙模块内, 千斤顶顶端安装加载钢板 17 并紧贴试验模型体。试验模型体上下加载面各紧贴一块加载钢板 17, 试验模型体前、后、左、右面由上而下各紧贴三块加载钢板 17, 利用超高压真三维加载系统 2 和盒式密封加载反力装置 1 可将液压千斤顶 29 的荷载均匀传给加载钢板 17 然后再施加到模型体 62 上, 以实现模型试验真三维非均匀加载。其中, 超高压真三维加载系统 2 的额定出力为 63.5MPa, 每个液压千斤顶 29 的设计出力为 600KN, 千斤顶的油缸直径 360 mm, 千斤顶活塞行程为 150mm。

如图 11 所示, 所述的伺服控制高渗透水压加载系统 3 主要由水箱 30、自动变频水泵 31、高渗透压力流量计 32、高渗透压力调节器 33、高渗透压力控制器 34 和高压水管 35 组成。水箱 30 用于承载高压水体 63, 自动变频水泵 31 用于将水箱 30 内水体泵入盒式密封加载反力装置 1 内, 高渗透压力流量计 32 用于监测输出的水量与水压, 高渗透压力调节器 33 用于控制高渗透压力大小并保持其稳定, 高渗透压力控制器 34 用于控制自动变频水泵 31 和高渗透压力调节器 33 协同工作, 高压水管 35 将水箱 30、自动变频水泵 31、高渗透压力流量计 32 和高渗透压力调节器 33 串连形成通路进行高水压加载。

伺服控制高渗透水压加载系统 3 通过向盒式密封加载反力装置 1 注入高压水体 63 对模型体 62 进行高渗透压力加载, 其中顶部高渗透压力按  $\sigma_{w\text{顶}} = \gamma h_{\text{顶}}$  进行加载, 则底部高渗透压力为  $\sigma_{w\text{底}} = \gamma (h_{\text{顶}} + \Delta h)$ ,  $h_{\text{顶}}$  为模型顶部地下水位深度,  $\gamma$  为水体容重,  $\Delta h$  为试验模型体高度。模型体 62 在盒式密封加载反力装置 1 内部达到饱和, 并形成梯度高渗透压力, 从而实现随深度变化的高渗透压力加载。伺服控制高渗透水压加载系统 3 最高可施加 50MPa 高渗透水压力。

如图 12 和图 13 (a、b、c) 所示, 所述的倾斜地质构造制作系统 4 包括支撑旋转装置 36、材料容纳装置 37 和材料压实装置 38。支撑旋转装置 36 用于调节材料容纳装置 37 的倾斜角度, 材料容纳装置 37 用来填筑内含倾斜地质构造的模型体 62, 材料压实装置 38 用于分层压实填筑的模型材料。

所述的支撑旋转装置 36 包括铰支架 39、可旋转双节千斤顶 40 和底板 41, 四组铰支架 39 将底梁反力墙模块 8 后端固定在底板 41 上, 底梁反力墙模块 8 的前端与四组可旋转双节千斤顶 40 通过连接件连接, 通过可旋转双节千斤顶 40 的伸长与回缩调节材料容纳装置 37 的倾斜角度以制备各种倾斜地质构造。材料容纳装置 37 由反力墙模块组合而成, 通过增加和删减反力墙模块的数量来控制模型材料的填筑量。材料压实装置 38 包括材料压实反力架

42、压实千斤顶 43、钢制压环 44 和钢制压板 45，在模型反力装置外部设置材料压实反力架 42，其底部固定于地面，压实千斤顶 43 后端固定于材料压实反力架 42 上，通过压实千斤顶 43 和其前端放置的钢制压环 44 和钢制压板 45 进行模型材料的分层压实。

根据所要制备的倾斜地质构造，首先通过可旋转双节千斤顶 40 将材料容纳装置 37 旋转提升一定高度，然后向材料容纳装置 37 内填筑一定厚度的模型材料，再利用材料压实装置 38 分层压实模型材料，直至完成整个试验模型体的制作，最后将可旋转双节千斤顶 40 回缩，使模型反力装置回到水平状态，从而制作完成内含倾斜地质构造的模型体 62。

如图 14 和 15 所示，所述的模型洞室自动开挖系统 5 主要由刀头开挖装置 46、刀头旋转驱动装置 47、刀头前进驱动装置 48、除尘装置 49、支撑架 50 以及开挖控制装置 51 组成；刀头开挖装置 46 安装于刀头旋转驱动装置 47 前端，用于开挖切削模型体 62，刀头旋转驱动装置 47 用于提供刀头开挖装置 46 的旋转切削力，刀头前进驱动装置 48 用于提供刀头开挖装置 46 前进开挖的动力，除尘装置 49 用于清除开挖切削的模型材料，支撑架 50 用于支撑整个开挖系统，开挖控制装置 51 用于控制刀头旋转驱动装置 47 的转速和刀头前进驱动装置 48 的步进速率。

如图 15 所示，所述的刀头开挖装置 46 由洞室仿形刀壳 52、旋转切削刀片 53 和出尘孔 54 组成。洞室仿形刀壳 52 根据开挖洞室形状和尺寸加工制作，旋转切削刀片 53 固定于洞室仿形刀壳 52 中间，与刀头旋转驱动装置 47 连接，用于旋转切削模型体 62，旋转切削刀片 53 可自由伸缩且时刻紧贴洞室内壁从而开挖出不同形状和尺寸的模型洞室，出尘孔 54 用于将开挖后的材料碎屑运输至装置外面。

洞室自动开挖过程为：通过开挖控制装置 51 启动刀头旋转驱动装置 47 和刀头前进驱动装置 48，刀头旋转驱动装置 47 通过旋转驱动连杆 55 带动旋转切削刀片 53 沿着洞室内壁旋转，刀头前进驱动装置 48 通过螺旋驱动连杆 56 带动刀头旋转驱动装置 47 前进，并带动刀头开挖装置 46 前进，从而完成模型洞室开挖。

如图 16 所示，所述的模型综合测试分析系统主要由防水光纤位移传感器 57、防水应力传感器 58、防水光纤高渗透压力传感器 59、流量监测器 60 和数据处理软件系统 61 组成。防水光纤位移传感器 57 用于监测模型体 62 内部任意部位的位移，防水应力传感器 58 用于监测模型体 62 内部任意部位应力，防水光纤高渗透压力传感器 59 用于监测模型体 62 内部任意部位的高渗透压力，流量监测器 60 用于监测洞室开挖后的渗水量，数据处理软件系统 61 将测得的数据进行相应处理，实时存储和显示并自动生成模型位移、应力、高渗透压力和流量的时程曲线。

应用本发明对埋深 2500m 的某大型深埋引水隧洞突涌水进行三维物理模型试验，图 17 为利用本发明开展模型试验的流程图，图 18 是利用本发明制备的内含倾斜地质构造的模型体 62，图 19 为本发明模型洞室开挖模拟示意图，图 20 为利用本发明进行深部洞室开挖隧洞突水现象示意图。

如图 17、图 18、图 19 所示，应用本发明开展深部洞室突涌水模型试验的过程如下：

(1) 根据工程地质构造分布，采用本发明的倾斜地质构造制作系统 4 制备具有内含倾斜地质构造的模型体 62，并在模型体制作过程中分层埋设位移、应力、渗压、渗流测试传感器；

(2) 根据工程地应力分布，按照相似准则，采用本发明的超高压真三维加载系统 2 对所制备的模型体 62 进行真三维非均匀加载；

(3) 根据工程地下水分布，按照相似准则，采用本发明的伺服控制高渗透水压加载系统 3 对所制备的模型体 62 进行水渗透压力加载；

(4) 待洞区地应力和水渗透压力加载稳定后，采用本发明的模型洞室自动开挖系统 5 对所制备的模型体 62 进行洞室自动开挖；

(5) 在模型洞室开挖过程中，采用本发明的模型综合测试分析系统 6 自动采集模型体内部测点的位移、应力、渗压和渗流量等试验数据并进行快速存储；

(6) 分析整理测试数据，并根据模型试验测试分析结果和试验观测现象深入揭示深部洞室的突涌水破坏机制。

如图20所示，本发明的工程应用研究表明：本发明全景再现了倾斜岩层中深埋引水隧洞开挖突水灾害的演变过程，精细模拟了高地应力和高渗透水压耦合作用下深部洞室开挖的非线性变形特征与突涌水灾害演化过程，为研究深部洞室突涌水灾害的发生机理与产生条件提供了重要试验依据。本发明在模拟水电、交通、能源和矿山深部洞室突涌水灾害方面具有广泛的应用前景。

以上所述仅为本申请的优选实施例而已，并不用于限制本申请，对于本领域的技术人员来说，本申请可以有各种更改和变化。凡在本申请的精神和原则之内，所作的任何修改、等同替换、改进等，均应包含在本申请的保护范围之内。

1. 一种模拟深部洞室突涌水灾害的真三维物理模型试验系统，其特征在于，该系统主要由盒式密封加载反力装置、超高压真三维加载系统、伺服控制高渗透水压加载系统、倾斜地质构造制作系统、模型洞室自动开挖系统以及模型综合测试分析系统组成；

所述的盒式密封加载反力装置作为模型试验加载的反力装置并用于容纳试验模型体和高压水体；

所述的超高压真三维加载系统通过控制液压千斤顶对试验模型体进行超高压真三维加载；

所述的伺服控制高渗透水压加载系统用于对试验模型体进行高渗透水压自动加载；

所述的倾斜地质构造制作系统用于制备具有内含倾斜地质构造的模型体；；

所述的模型洞室自动开挖系统用于在试验模型体中开挖不同形状和尺寸的模型洞室；

所述的模型综合测试分析系统自动采集试验模型体内部任意部位的试验数据并进行快速存储。

2. 如权利要求1所述的一种模拟深部洞室突涌水灾害的真三维物理模型试验系统，其特征在于，所述的盒式密封加载反力装置主要由钢制的顶梁反力墙模块、底梁反力墙模块、左反力墙模块、右反力墙模块、前反力墙模块和后反力墙模块通过螺栓连接组合而成，各反力墙模块采用刚度较高的盒式结构型式，其尺寸可任意调整；

进一步的，在各反力墙模块连接的面面接触处设置密封槽，槽内放置橡胶密封垫圈。

3. 如权利要求2所述的一种模拟深部洞室突涌水灾害的真三维物理模型试验系统，其特征在于，在所述的盒式密封加载反力装置内部设置了三维导向框装置。

4. 如权利要求2所述的一种模拟深部洞室突涌水灾害的真三维物理模型试验系统，其特征在于，在所述的前反力墙模块中部设置了封闭开挖窗口，所述的封闭开挖窗口主要由钢化玻璃板、洞室开挖窗口、钢制空心挡水壳和洞口挡水钢板组成；根据模型试验开挖洞室的尺寸在钢化玻璃板中央设置所述的洞室开挖窗口，沿洞室开挖窗口中心安装所述的钢制空心挡水壳，所述的钢制空心挡水壳与开挖洞室尺寸相同，并向洞内延伸插入试验模型体内部一定深度阻止洞室开挖时的水体流出以保证高渗透压力稳定；所述的钢制空心挡水壳与钢化玻璃板之间垫有橡胶密封垫圈，洞口挡水钢板将洞室开挖窗口罩住以形成封闭腔体。

5. 如权利要求1所述的一种模拟深部洞室突涌水灾害的真三维物理模型试验系统，其特征在于，所述的超高压真三维加载系统由油箱、高压油管、驱动装置、油压调节器、压力监测器、液压控制器、液压千斤顶以及加载钢板组成；

所述的油箱用于盛放液压油；

所述的驱动装置用于将油箱内的液压油泵入高压油管；

所述的油压调节器用于控制油路压力的大小和稳定；

所述的压力监测器用于监测油路压力大小；

所述的液压控制器用于控制驱动装置和油压调节器协同工作；

所述的液压千斤顶外嵌于各个反力墙模块内，千斤顶前端安装加载钢板并紧贴试验模型体，从而对试验模型体进行超高压加载。

6. 如权利要求 1 所述的一种模拟深部洞室突涌水灾害的真三维物理模型试验系统，其特征在于，所述的伺服控制高渗透水压加载系统主要由水箱、自动变频水泵、高渗透压力流量计、高渗透压力调节器、高渗透压力控制器和高压水管组成；

所述的水箱用于承载高压水体；

所述的自动变频水泵用于将水箱内水体泵入盒式密封加载反力装置内；

所述的高渗透压力流量计用于监测输出的水量与水压；

所述的高渗透压力调节器用于控制高渗透压力大小并保持其稳定；

所述的高渗透压力控制器用于控制自动变频水泵和高渗透压力调节器协同工作；

所述的高压水管将水箱、自动变频水泵、高渗透压力流量计和高渗透压力调节器串连形成通路进行高水压加载。

7. 如权利要求 1 所述的一种模拟深部洞室突涌水灾害的真三维物理模型试验系统，其特征在于，所述的倾斜地质构造制作系统包括支撑旋转装置、材料容纳装置和材料压实装置；所述的支撑旋转装置用于调节材料容纳装置的倾斜角度；所述的材料容纳装置用来填筑内含倾斜地质构造的试验模型体，材料压实装置用于分层压实填筑的模型材料，得到试验模型体。

8. 如权利要求 1 所述的一种模拟深部洞室突涌水灾害的真三维物理模型试验系统，其特征在于，所述的模型洞室自动开挖系统主要由刀头开挖装置、刀头旋转驱动装置、刀头前进驱动装置、除尘装置、支撑架以及开挖控制装置组成；

所述的刀头开挖装置安装于刀头旋转驱动装置前端，用于开挖切削模型体；

所述的刀头旋转驱动装置用于提供刀头开挖装置的旋转切削力；

所述的刀头前进驱动装置用于提供刀头开挖装置前进开挖动力；

所述的除尘装置用于清除开挖切削的试验模型体材料；

所述的支撑架用于支撑整个开挖系统；

所述的开挖控制装置用于控制刀头切削动力装置的转速和刀头前进动力装置的步进速率。

9. 如权利要求 8 所述的一种模拟深部洞室突涌水灾害的真三维物理模型试验系统，其特征在于，所述的刀头开挖装置由洞室仿形刀壳、旋转切削刀片和出尘孔组成；

所述的洞室仿形刀壳根据开挖洞室形状和尺寸加工制作；

所述的旋转切削刀片固定于洞室仿形刀壳中间，与刀头旋转驱动装置连接，用于旋转切削试验模型体；所述的旋转切削刀片可自由伸缩且时刻紧贴洞室内壁从而开挖出不同形状和尺寸的模型洞室；

所述的出尘孔设置于所述的洞室仿形刀壳上，用于将开挖后的材料碎屑运输至装置外面。

10. 如权利要求 1 所述的一种模拟深部洞室突涌水灾害的真三维物理模型试验系统，其特征在于，所述的模型综合测试分析系统主要由防水光纤位移传感器、防水应力传感器、防水光纤高渗透压力传感器、流量监测器和数据处理软件系统组成；

所述的防水光纤位移传感器用于监测模型体内部任意部位位移；

所述的防水应力传感器用于监测模型体内部任意部位应力；

所述的防水光纤高渗透压力传感器用于监测模型体内部任意部位高渗透压力；

所述的流量监测器用于监测洞室开挖后的渗水量；

所述的数据处理软件系统将测得的模型试验数据实时进行处理、存储和显示并自动生成相关时程变化曲线。

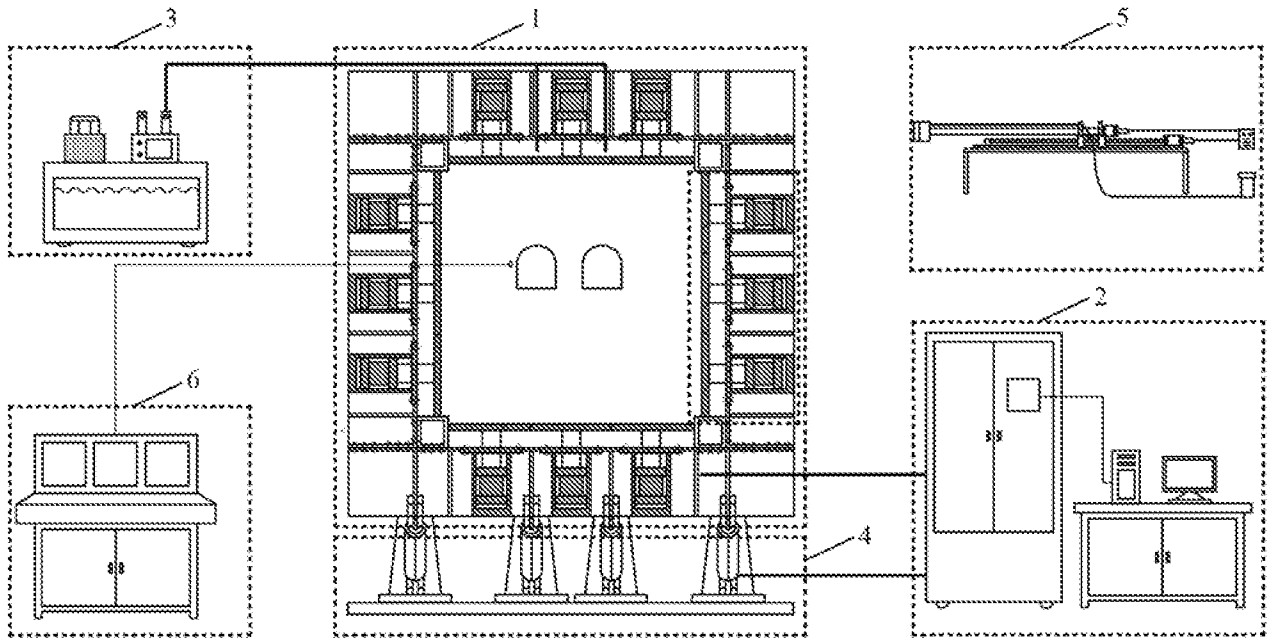


图 1

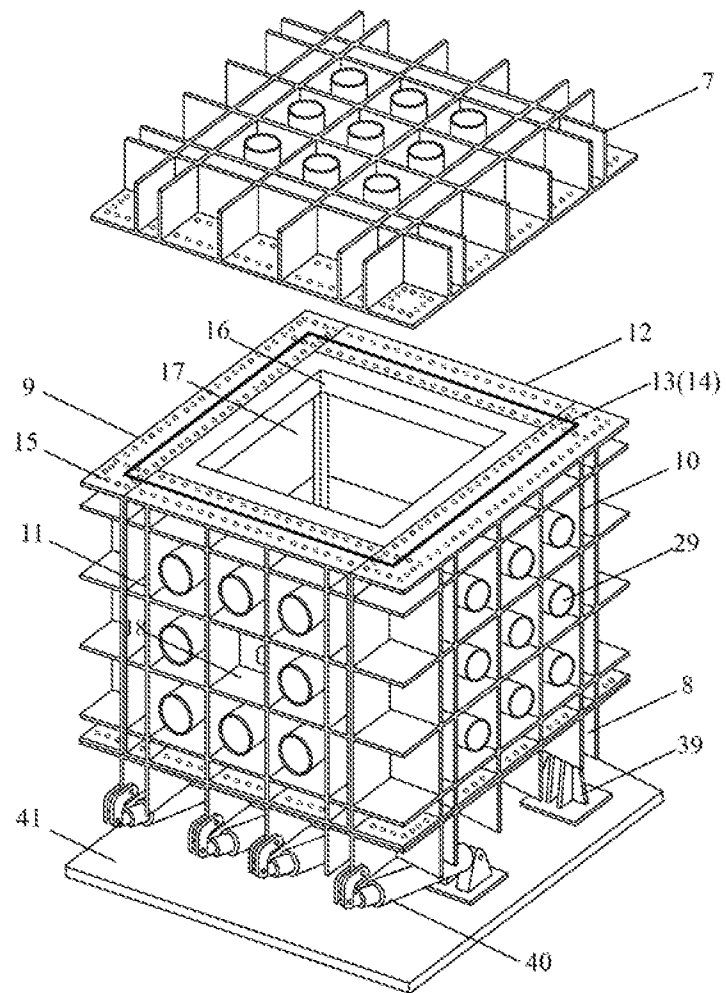


图 2

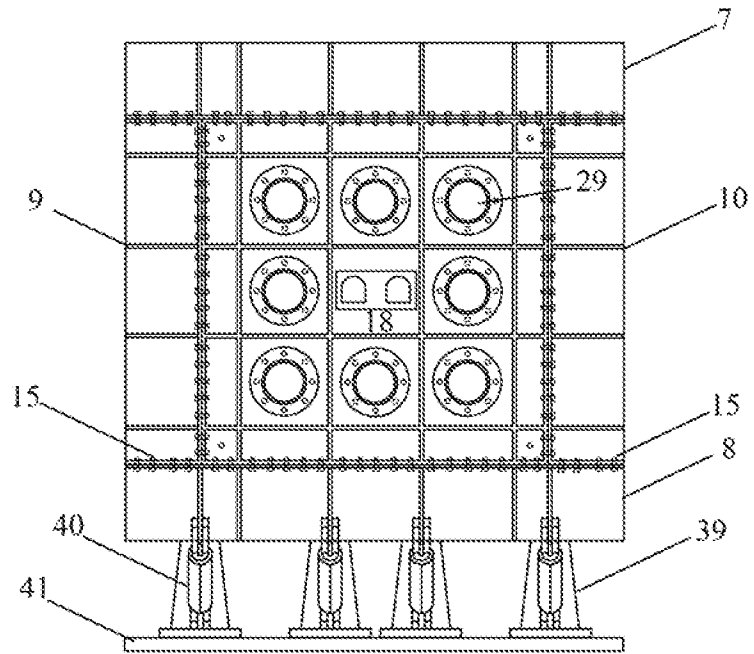


图 3

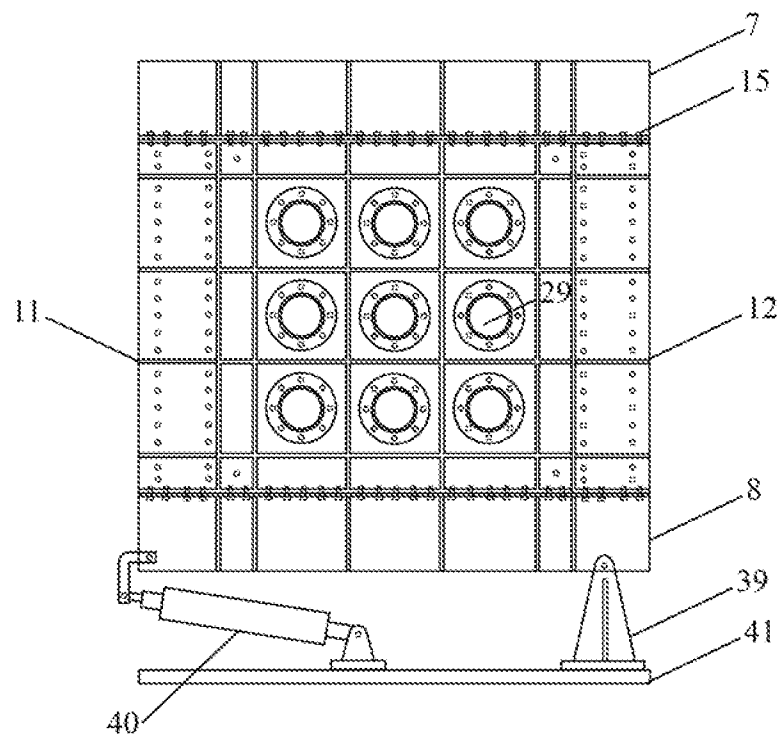


图 4

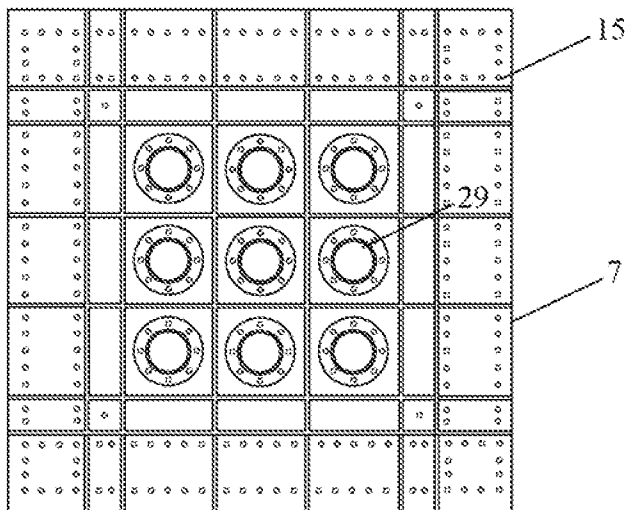


图 5

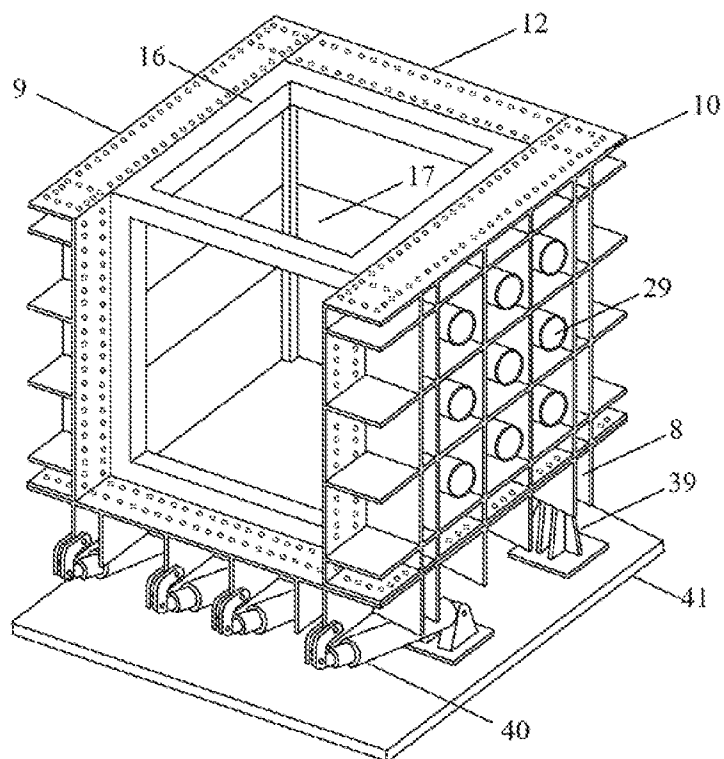


图 6

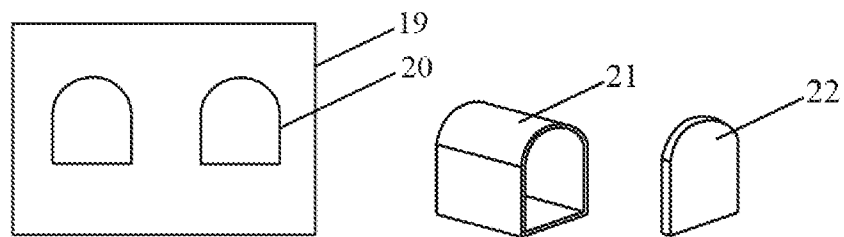


图 7 (a)

图 7 (b)

图 7 (c)

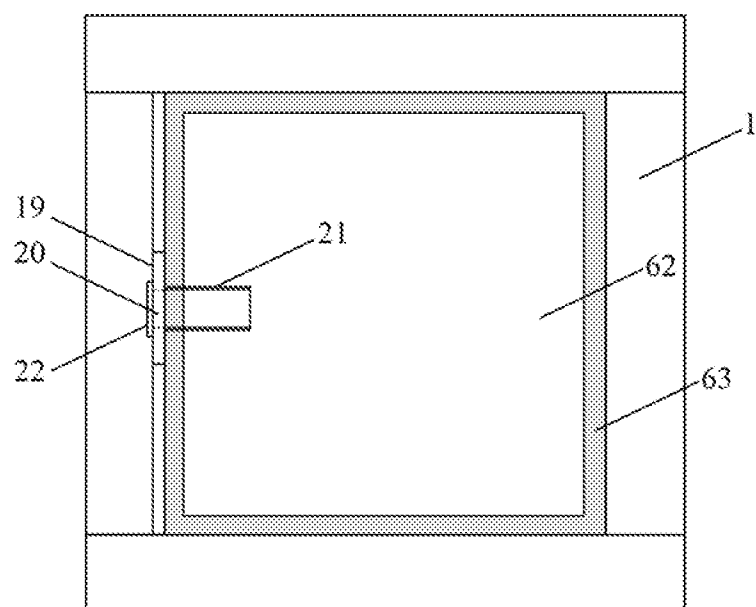


图 8

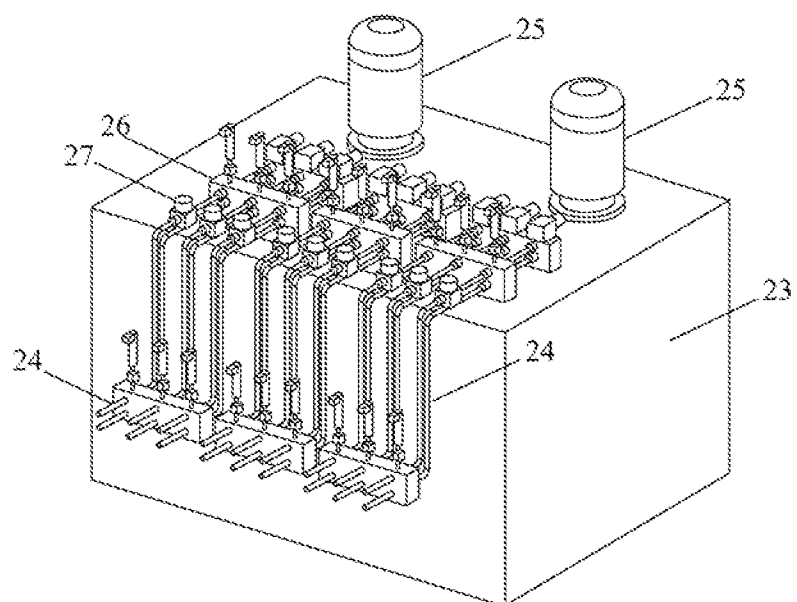


图 9

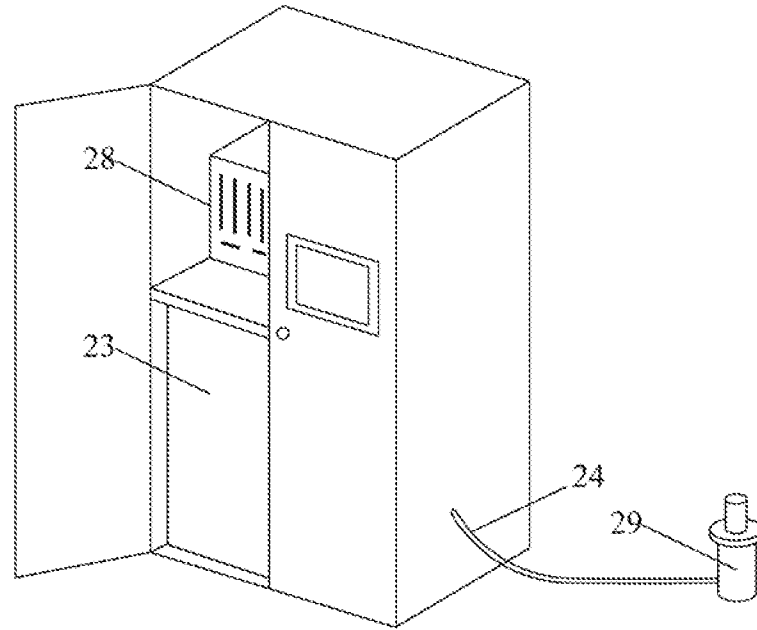


图 10

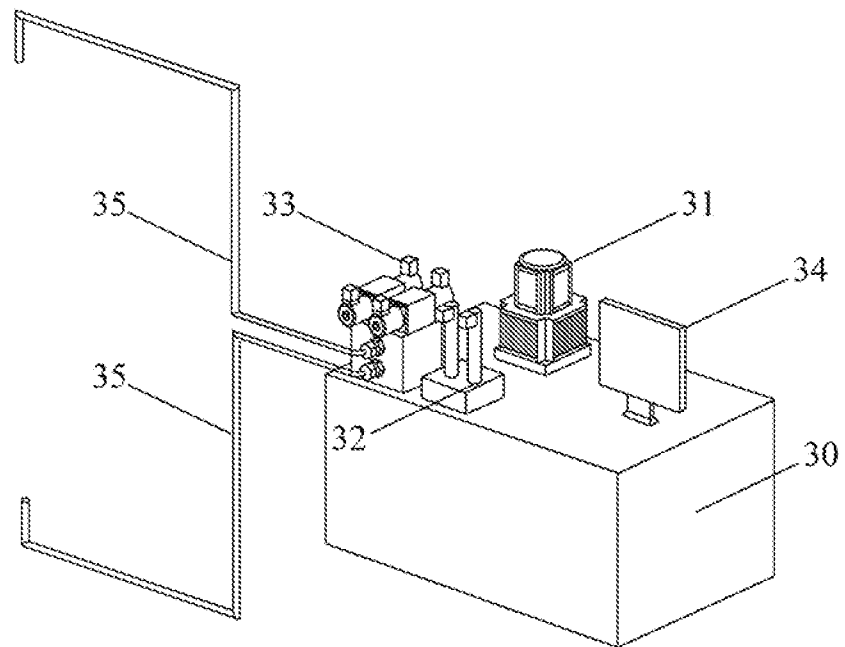


图 11

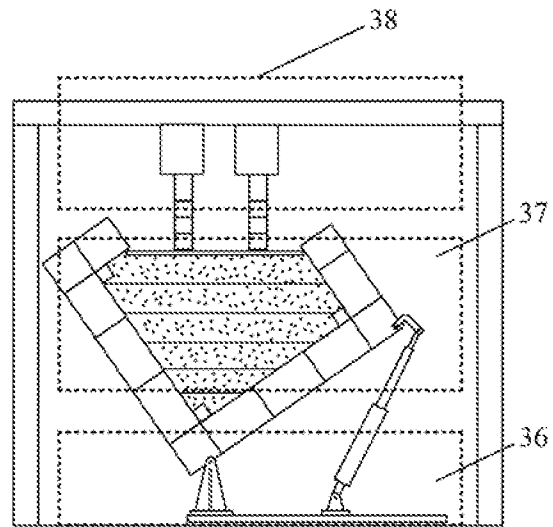


图 12

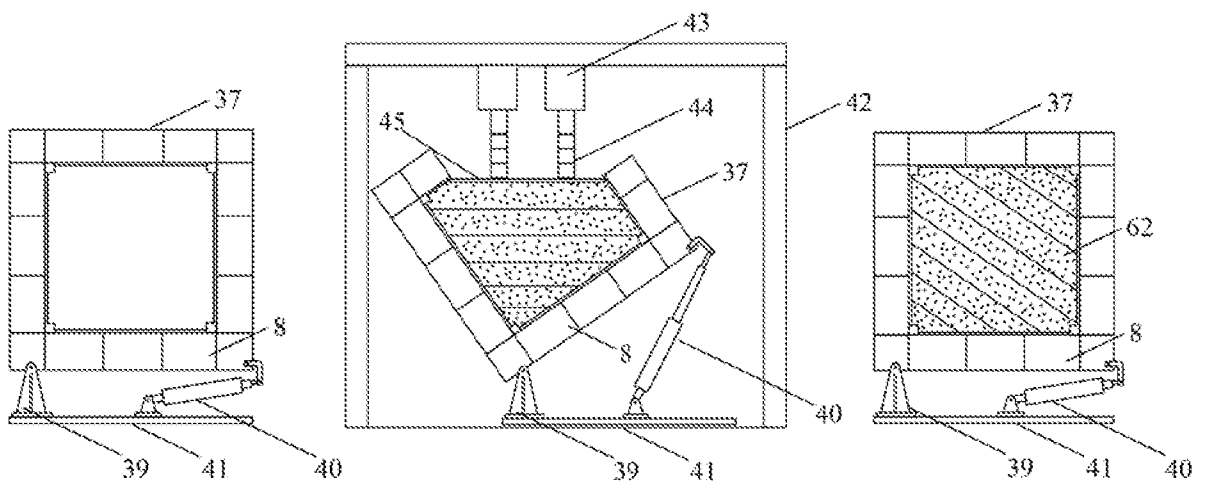


图 13 (a)

图 13 (b)

图 13 (c)

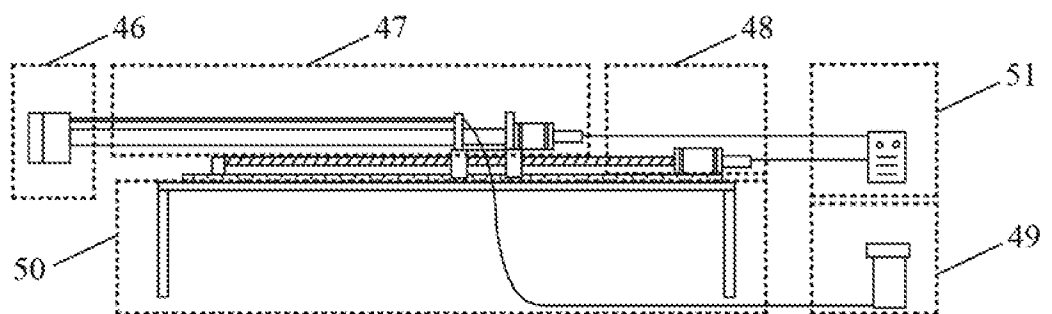


图 14

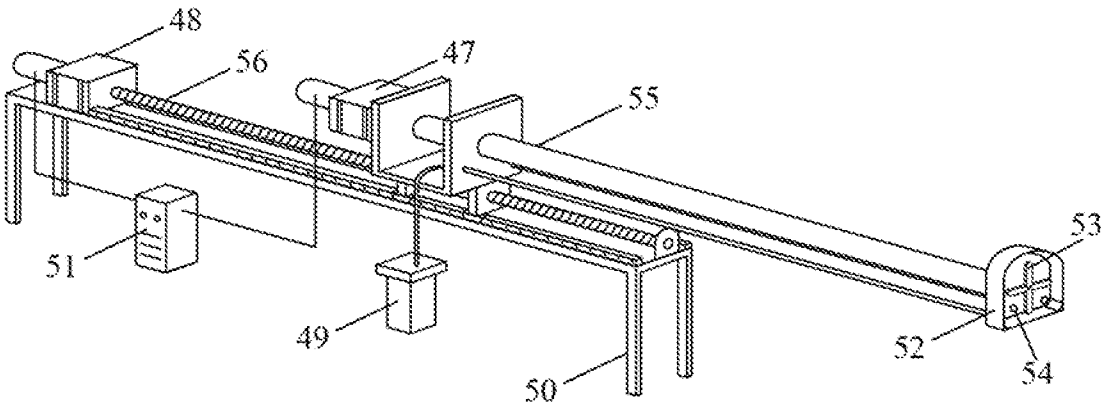


图 15

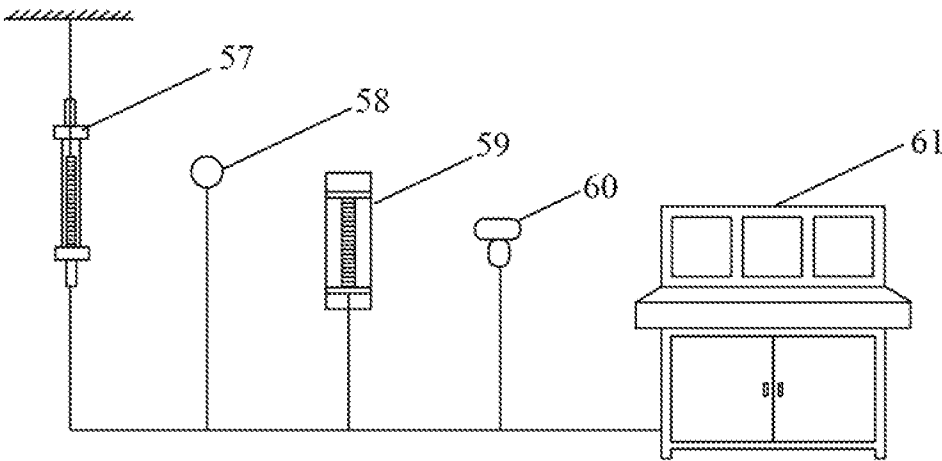


图 16

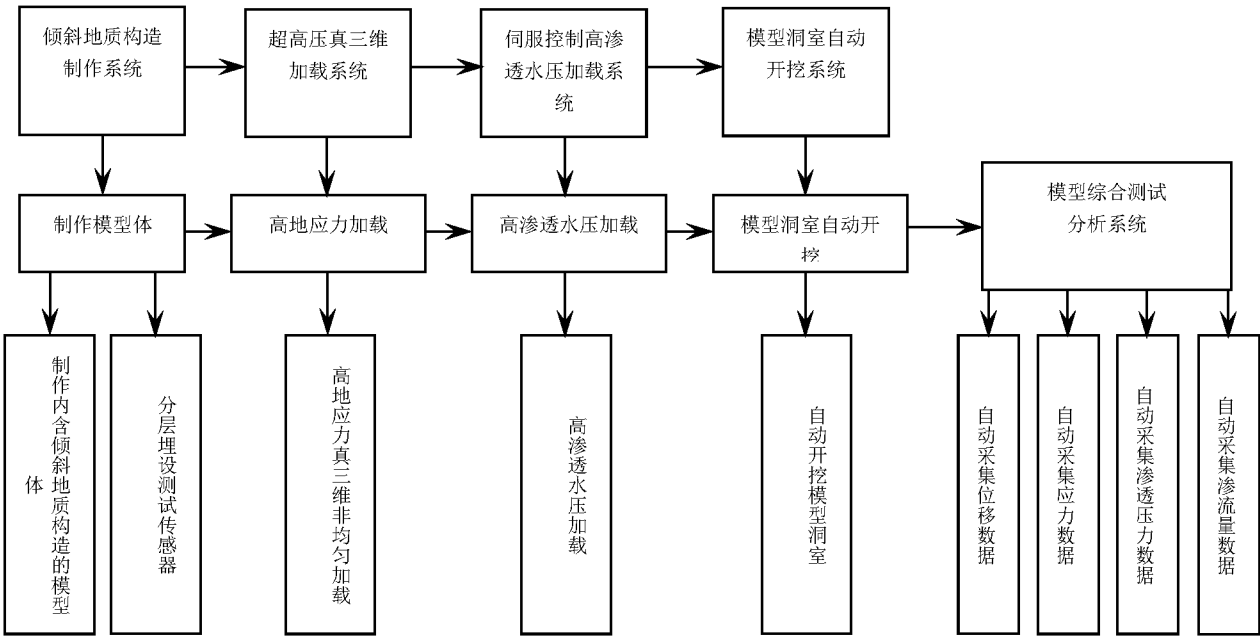


图 17

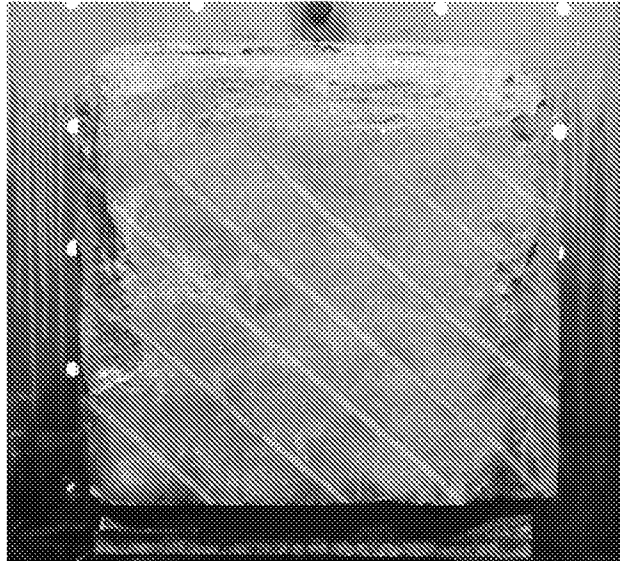


图 18

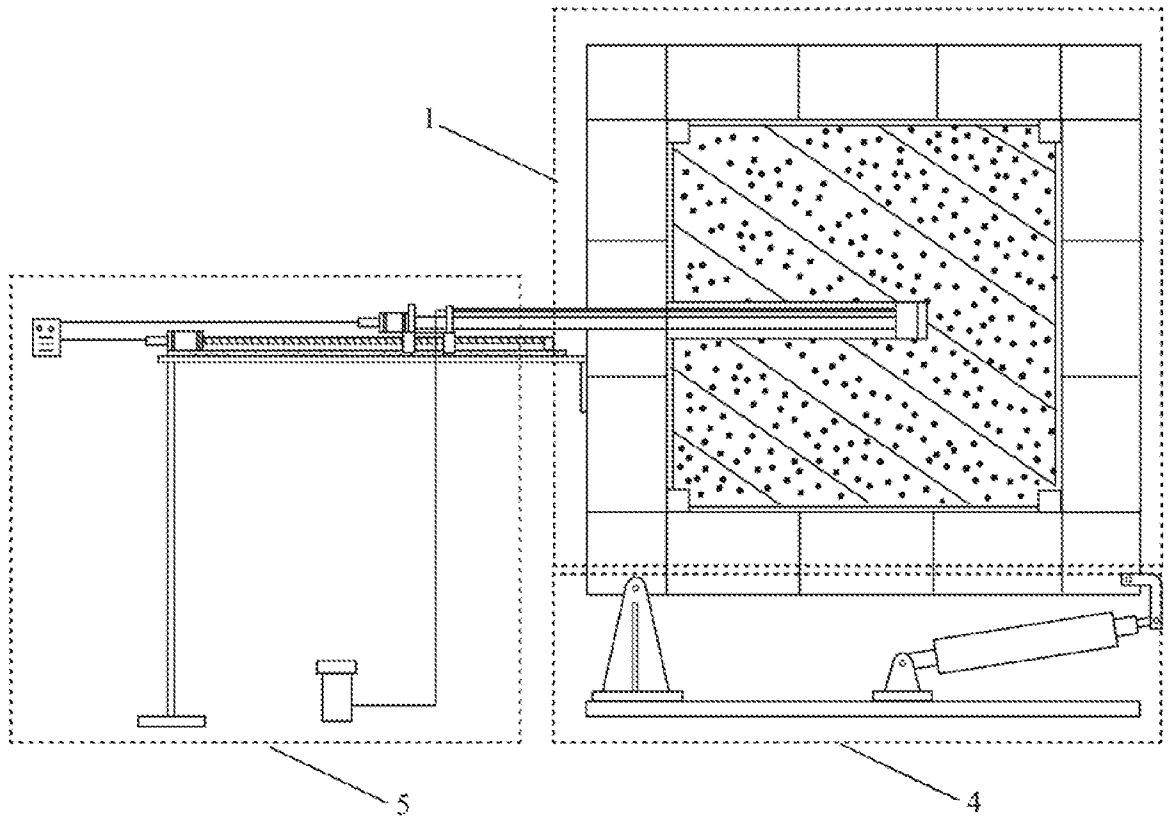


图 19

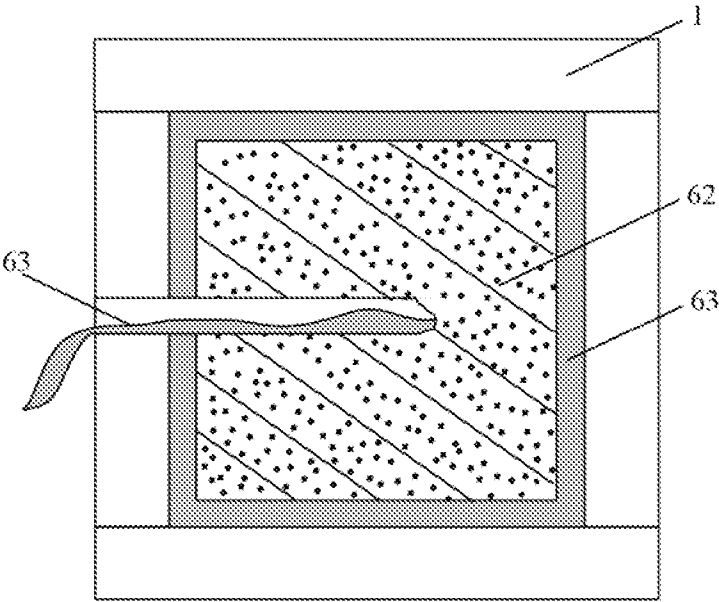


图 20

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2018/124141

**A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**

G09B 25/00(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

**B. FIELDS SEARCHED**

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G09B; G01N; E02D; E21D

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNPAT, CNKI, EPODOC, WPI: 山东大学, 张强勇, 张振杰, 李术才, 段抗, 向文, 王汉鹏, 刘传成, 李帆, 任明洋, 张岳, 丁炎志, 余光远, 洞, 隧道, 巷道, 反力, 框架, 模型, 液压, 加载, 载荷, 荷载, 千斤顶, 三维, 水, 倾斜, 地质, 岩石, 岩层, 刀, 钻, 旋转, 步进, 前进, cavern, hole, tunnel, underground, subterranean, model, simulate, test, three, dimension, load, stress, press, hydraulic, pressure, water, jack, incline, tilt, drill, bore, rotate

**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages                                                                | Relevant to claim No. |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| Y         | CN 1932169 A (BEIJING JIAOTONG UNIVERSITY) 21 March 2007 (2007-03-21)<br>description, page 4, line 6 to page 5, line 7, and figures 1-4           | 1-10                  |
| Y         | CN 101514977 A (SHANDONG UNIVERSITY) 26 August 2009 (2009-08-26)<br>description page 2, paragraph 1, page 3, lines 15-30, and figure 1            | 1-10                  |
| Y         | CN 104596855 A (SHANDONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 06 May 2015 (2015-05-06)<br>description, paragraphs [0043]-[0064], and figures 1-4 | 1-10                  |
| Y         | CN 103075160 A (SHANDONG UNIVERSITY) 01 May 2013 (2013-05-01)<br>description, paragraph [0021], and figures 1-4                                   | 8, 9                  |
| A         | CN 105259334 A (INSTITUTE OF ROCK AND SOIL MECHANICS, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES) 20 January 2016 (2016-01-20)<br>entire document                | 1-10                  |
| A         | CN 108124460 A (SHANDONG UNIVERSITY) 05 June 2018 (2018-06-05)<br>entire document                                                                 | 1-10                  |



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

\* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance  
 “E” earlier application or patent but published on or after the international filing date  
 “L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)  
 “O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means  
 “P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention  
 “X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone  
 “Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art  
 “&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

08 August 2019

Date of mailing of the international search report

30 August 2019

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/  
CN)  
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing  
100088  
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

International application No.

**PCT/CN2018/124141****C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages     | Relevant to claim No. |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| A         | CN 108548712 A (SHANDONG UNIVERSITY) 18 September 2018 (2018-09-18)<br>entire document | 1-10                  |
| A         | JP 2003050188 A (SHIMIZU, Ichiro) 21 February 2003 (2003-02-21)<br>entire document     | 1-10                  |

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**  
**Information on patent family members**

International application No.

**PCT/CN2018/124141**

| Patent document<br>cited in search report |            |   | Publication date<br>(day/month/year) | Patent family member(s) |            |    | Publication date<br>(day/month/year) |
|-------------------------------------------|------------|---|--------------------------------------|-------------------------|------------|----|--------------------------------------|
| CN                                        | 1932169    | A | 21 March 2007                        | CN                      | 100390357  | C  | 28 May 2008                          |
| CN                                        | 101514977  | A | 26 August 2009                       | CN                      | 101514977  | B  | 22 February 2012                     |
| CN                                        | 104596855  | A | 06 May 2015                          | CN                      | 104596855  | B  | 08 March 2017                        |
| CN                                        | 103075160  | A | 01 May 2013                          | CN                      | 103075160  | B  | 08 April 2015                        |
| CN                                        | 105259334  | A | 20 January 2016                      | CN                      | 105259334  | B  | 08 March 2017                        |
| CN                                        | 108124460  | A | 05 June 2018                         | US                      | 2019078987 | A1 | 14 March 2019                        |
|                                           |            |   |                                      | AU                      | 2017329096 | B2 | 31 January 2019                      |
|                                           |            |   |                                      | CN                      | 108124460  | B  | 14 December 2018                     |
|                                           |            |   |                                      | WO                      | 2018195919 | A1 | 01 November 2018                     |
|                                           |            |   |                                      | AU                      | 2017329096 | A1 | 08 November 2018                     |
| CN                                        | 108548712  | A | 18 September 2018                    | CN                      | 108548712  | B  | 19 March 2019                        |
| JP                                        | 2003050188 | A | 21 February 2003                     | None                    |            |    |                                      |

## 国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2018/124141

## A. 主题的分类

G09B 25/00 (2006.01) i

按照国际专利分类 (IPC) 或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类

## B. 检索领域

检索的最低限度文献 (标明分类系统和分类号)

G09B; G01N; E02D; E21D

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库 (数据库的名称, 和使用的检索词 (如使用))

CNPAT, CNKI, EP0DOC, WPI: 山东大学, 张强勇, 张振杰, 李术才, 段抗, 向文, 王汉鹏, 刘传成, 李帆, 任明洋, 张岳, 丁炎志, 余光远, 洞, 隧道, 巷道, 反力, 框架, 模型, 液压, 加载, 载荷, 荷载, 千斤顶, 三维, 水, 倾斜, 地质, 岩石, 岩层, 刀, 钻, 旋转, 步进, 前进, cavern, hole, tunnel, underground, subterranean, model, simulate, test, three, dimension, load, stress, press, hydraulic, pressure, water, jack, incline, tilt, drill, bore, rotate

## C. 相关文件

| 类 型* | 引用文件, 必要时, 指明相关段落                                                                | 相关的权利要求 |
|------|----------------------------------------------------------------------------------|---------|
| Y    | CN 1932169 A (北京交通大学) 2007年 3月 21日 (2007 - 03 - 21)<br>说明书第4页第6行-第5页第7行, 图1-4    | 1-10    |
| Y    | CN 101514977 A (山东大学) 2009年 8月 26日 (2009 - 08 - 26)<br>说明书第2页第4段、第3页第15-30行, 图1  | 1-10    |
| Y    | CN 104596855 A (山东科技大学) 2015年 5月 6日 (2015 - 05 - 06)<br>说明书第[0043]-[0064]段, 图1-4 | 1-10    |
| Y    | CN 103075160 A (山东大学) 2013年 5月 1日 (2013 - 05 - 01)<br>说明书第[0021]段, 图1-4          | 8-9     |
| A    | CN 105259334 A (中国科学院武汉岩土力学研究所) 2016年 1月 20日 (2016 - 01 - 20)<br>全文              | 1-10    |
| A    | CN 108124460 A (山东大学) 2018年 6月 5日 (2018 - 06 - 05)<br>全文                         | 1-10    |
| A    | CN 108548712 A (山东大学) 2018年 9月 18日 (2018 - 09 - 18)<br>全文                        | 1-10    |

☒ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

\* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&amp;” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2019年 8月 8日

国际检索报告邮寄日期

2019年 8月 30日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局 (ISA/CN)

中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

传真号 (86-10)62019451

授权官员

朱磊

电话号码 86-(10)-53962379

| C. 相关文件 |                                                                       |         |
|---------|-----------------------------------------------------------------------|---------|
| 类 型*    | 引用文件，必要时，指明相关段落                                                       | 相关的权利要求 |
| A       | JP 2003050188 A (SHIMIZU, ICHIRO) 2003年 2月 21日 (2003 - 02 - 21)<br>全文 | 1-10    |
|         |                                                                       |         |

国际检索报告  
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2018/124141

| 检索报告引用的专利文件 |            |   | 公布日<br>(年/月/日) | 同族专利             | 公布日<br>(年/月/日) |
|-------------|------------|---|----------------|------------------|----------------|
| CN          | 1932169    | A | 2007年 3月 21日   | CN 100390357 C   | 2008年 5月 28日   |
| CN          | 101514977  | A | 2009年 8月 26日   | CN 101514977 B   | 2012年 2月 22日   |
| CN          | 104596855  | A | 2015年 5月 6日    | CN 104596855 B   | 2017年 3月 8日    |
| CN          | 103075160  | A | 2013年 5月 1日    | CN 103075160 B   | 2015年 4月 8日    |
| CN          | 105259334  | A | 2016年 1月 20日   | CN 105259334 B   | 2017年 3月 8日    |
| CN          | 108124460  | A | 2018年 6月 5日    | US 2019078987 A1 | 2019年 3月 14日   |
|             |            |   |                | AU 2017329096 B2 | 2019年 1月 31日   |
|             |            |   |                | CN 108124460 B   | 2018年 12月 14日  |
|             |            |   |                | WO 2018195919 A1 | 2018年 11月 1日   |
|             |            |   |                | AU 2017329096 A1 | 2018年 11月 8日   |
| CN          | 108548712  | A | 2018年 9月 18日   | CN 108548712 B   | 2019年 3月 19日   |
| JP          | 2003050188 | A | 2003年 2月 21日   | 无                |                |