

(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
2022年5月5日 (05.05.2022)



(10) 国际公布号
WO 2022/088454 A1

- (51) 国际专利分类号:
G01N 15/08 (2006.01) *G09B 23/40* (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2020/138899
- (22) 国际申请日: 2020年12月24日 (24.12.2020)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
202011203667.3 2020年11月2日 (02.11.2020) 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: 李术才 (LI, Shucai); 中国山东省济南市历下区经十路17923号, Shandong 250061 (CN)。
薛翊国 (XUE, Yiguo); 中国山东省济南市历下

区经十路17923号, Shandong 250061 (CN)。李志强 (LI, Zhiqiang); 中国山东省济南市历下区经十路17923号, Shandong 250061 (CN)。公惠民 (GONG, Huimin); 中国山东省济南市历下区经十路17923号, Shandong 250061 (CN)。周炳桦 (ZHOU, Binghua); 中国山东省济南市历下区经十路17923号, Shandong 250061 (CN)。马啸寅 (MA, Xiaoyin); 中国山东省济南市历下区经十路17923号, Shandong 250061 (CN)。孔凡猛 (KONG, Fanmeng); 中国山东省济南市历下区经十路17923号, Shandong 250061 (CN)。傅康 (FU, Kang); 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)

(54) Title: TESTING SYSTEM AND METHOD FOR SIMULATING CHANGE IN TUNNEL EXCAVATION SEEPAGE UNDER COMPLEX GEOLOGICAL CONDITIONS

(54) 发明名称: 模拟复杂地质条件下隧道开挖渗流变化的试验系统及方法

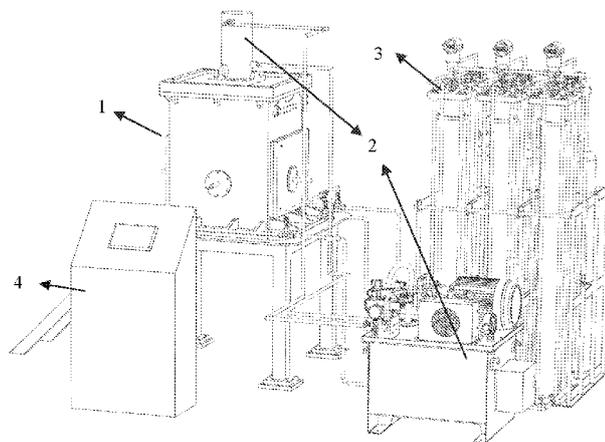


图 1

(57) Abstract: Disclosed is a testing system for simulating change in tunnel excavation seepage under complex geological conditions; the system comprises a test chamber (1); a ground stress loading unit (2) is arranged on top of the test chamber (1); the test chamber (1) may be internally provided with a test piece, and holes (18) are provided on each side of the circumference of the test chamber (1); some of the holes (18) are used as simulations of tunnel excavation holes; plug heads (8) or hollow plug heads (9) are arranged at some of the holes (18), and the side of the test chamber (1) is provided with a water filling tank (20); the water filling tank (20) is connected to a water inlet hole (21) arranged in the chamber; each of the hollow plug heads (9) and the water filling tank (20) are in communication with a seepage pressure loading unit (3). Also disclosed is a testing method for simulating change in tunnel excavation seepage under complex geological conditions. The system can be used to simulate tunneling in complex geological conditions under different "high



WO 2022/088454 A1

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, IT, 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, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, 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))。

ground stress and high water pressure" conditions to study changes in a groundwater seepage field within water barrier rock under the effect of excavation disturbance and high pressure seepage, and then evaluate the hazards of water inrush and mud inrush, providing a basis for engineering disaster prevention and disaster mitigation.

(57) 摘要: 公开了一种模拟复杂地质条件下隧道开挖渗流变化的试验系统, 该系统包括试验箱(1), 试验箱(1)顶部设置地应力加载单元(2), 试验箱(1)内部可设置试件, 且试验箱(1)周向各侧面分别设置孔洞(18), 其中部分孔洞(18)作为隧道开挖孔洞的模拟, 部分孔洞(18)处设置堵头(8)或中空堵头(9), 且试验箱(1)的侧部设置加水箱(20), 加水箱(20)与箱体设置的进水孔(21)连通, 中空堵头(9)、加水箱(20)分别与渗压加载单元(3)连通。还公开了一种模拟复杂地质条件下隧道开挖渗流变化的试验方法。该系统可模拟不同"高地应力、高水压"条件下复杂地质条件下隧道开挖, 研究开挖扰动和高压渗流作用下隔水岩体内地下水渗流场的变化情况, 进而对突水突泥灾害进行评价, 为工程防灾减灾提供依据。

模拟复杂地质条件下隧道开挖渗流变化的试验系统及方法

技术领域

本发明涉及岩土工程领域，尤其是模拟复杂地质条件下隧道开挖渗流变化的试验系统及方法。

背景技术

本部分的陈述仅仅是提供了与本发明相关的背景技术信息，不必然构成在先技术。

随着国家经济的迅猛发展，我国已成为世界上隧道修建速度最快、规模最大、难度最高的国家。2019年交通运输行业发展统计公报显示，截止2020年5月12号，全国公路隧道19,067处、1,896.66千米，其中特长隧道1,175处、521.75千米，长隧道4,784处、826.31千米。为了优化国家交通网络和维护国家安全统一，国家重大工程建设重心向地形地质条件极端复杂的西南山区与强岩溶地区转移，这些隧道工程普遍具有埋深大、洞线长、水文地质条件复杂等显著特点。加之施工前期的地质勘查工作难以查清隧洞沿线的水文地质条件，导致在隧道施工中将面临诸多地质灾害，如岩爆、塌方、瓦斯突出、突水突泥等。其中突水突泥灾害是隧道施工中的主要地质灾害之一。

突水突泥灾害严重的隧道往往处于高地压、高水压和高埋深的复杂地质环境中。施工活动不可避免地破坏围岩原有应力场，造成含水结构与隧道主体之间岩体的损伤劣化，降低岩体的物理力学性质、诱发次生裂隙及既有裂隙贯通和扩展，极大地提高了岩体的渗透性能，导致含水结构的赋存和运移状态发生变化；另一方面，岩体渗流场的改变反过来又会以孔隙水压力（如水力劈裂）和水物理化学作用（如冲刷运移、软化等）等形式作用于岩体，进一步促进岩体损伤破裂的发展。在隧道掘进中，上述耦合效应不断发展演化，最终当隔水岩体中形成了直接沟通含水结构和掌子面的贯通“突水通道”时，就诱发了隧道内的突水灾害。

发明人发现，在隔水岩体破坏诱发的突涌水灾害中，无论是突涌水致灾机理还是超前预报、预测理论、评估预警和灾害治理的研究，都涉及隧道突水隔水岩体渐进破坏过程中应力-渗流现象，由于隧道地质条件越来越复杂，实际的应力-渗流现象是无法直接观测研究的，而通过模拟试验，可对应力-渗流现象进行深入了解，现有技术中对隧道开挖渗流变化的试验装置存在试验功能单一、水压加载形式单一、试验箱体密封性差等方面有着明显的局限性。

发明内容

针对现有技术存在的不足，本发明的目的是提供模拟复杂地质条件下隧道开挖渗流变化的试验系统，可模拟不同“高地应力、高水压”条件下复杂地质条件下隧道开挖，研究开挖扰动和高压渗流作用下隔水岩体内地下水渗流场的变化情况，进而对突水突泥灾害进行评价，为工程防灾减灾提供依据。

为了实现上述目的，本发明是通过如下的技术方案来实现：

模拟复杂地质条件下隧道开挖渗流变化的试验系统，包括试验箱，试验箱顶部设置地应力加载单元，试验箱内部可设置试验材料，且试验箱周向各侧面分别设置孔洞，其中部分孔洞用于模拟隧道开挖，部分孔洞处设置堵头或中空堵头，可模拟不同的地质含水结构，在试验箱的侧部设置加水箱，试验箱设置与加水箱连通的进水孔；中空堵头、加水箱分别与渗压加载单元连通。

上述的试验系统，试验材料为可模拟岩土体材料的相似材料，试验箱用于容纳试验材料和加入试验箱内的水体，地应力加载单元从上方竖向向试验箱施加压力，用于模拟实际地质情况中的地应力，通过设置进水孔的加水箱向试验箱内供水可模拟含不良含水地质构造复杂地层的原始渗流场，通过渗压加载单元的设置及试验箱周向设置的孔洞，配合堵头和中空堵头及开挖工具，可模拟含不良含水地质构造复杂地层中隧道开挖作用下隧道围岩渗流演化规律，从而实现高地应力和高水压联合作用下隧道开挖及其诱发突水灾害相关试验。

如上所述的模拟复杂地质条件下隧道开挖渗流变化的试验系统，所述试验箱包括箱体，箱体具有设定的高度，且箱体通过底座支撑，所述孔洞设于箱体环向四个侧面形成箱体孔洞；

箱体顶部安装试验箱顶盖，试验箱顶盖开有圆形通孔，且在试验箱顶盖圆形通孔的周围设置非贯通螺栓孔，用于固定地应力加载单元，箱体底部安装可拆卸式挡板，可拆卸式挡板的设置有利于试验完成后进行清料，试验箱顶盖和可拆卸式挡板均与箱体密封连接，可通过螺栓密封连接。

如上所述的模拟复杂地质条件下隧道开挖渗流变化的试验系统，所述箱体设置多个传感器孔，用于试验箱内试验材料内设置的多个传感器导线的引出，传感器线依次穿过传感器孔、环形橡胶垫片、中空螺丝导出试验箱外。通过中空螺丝旋进过程中挤压环形橡胶垫片可实现传感器线引出箱体过程中的密封。

在所述箱体的外部固定所述的加水箱，加水箱设于箱体周向的三个侧面，加水箱与

箱体具有共有面，所述进水孔均匀设于加水箱与箱体的共有面；加水箱上部设置排气孔、下部设置进水口，进水孔低于试验材料的高度设置，箱体外设置加水箱可以储存设定量的流体，通过进水口注入流体后，在设定压力的作用下储存的流体通过均匀布置的进水孔进入试验箱内的试验材料，通过均匀布置的进水孔可实现试验材料内流体的均匀加载，进而模拟与实际地质情况相符的地下水渗流场。

如上所述的模拟复杂地质条件下隧道开挖渗流变化的试验系统，所述中空堵头的前段为锥形结构，中部为附有橡胶圈的圆柱形结构，橡胶圈为O型，中空堵头内部中心设置贯通孔。

如上所述的模拟复杂地质条件下隧道开挖渗流变化的试验系统，所述地应力加载单元包括千斤顶，千斤顶固定于所述试验箱的顶部，且千斤顶的顶端设置位移计，位移计用于监测地应力加载过程中千斤顶的位移，可以间接的反映施加地应力过程中箱体内试验材料的竖向变形情况。

如上所述的模拟复杂地质条件下隧道开挖渗流变化的试验系统，所述试验箱内试验材料的顶部上设置给压板，给压板设于试验箱顶盖的下方，千斤顶的加载端穿过试验箱顶盖与给压板接触，给压板上表面设置多个半球形的承力结构，半球形承力结构保证千斤顶加载至给压板过程中地应力的垂直加载。

如上所述的模拟复杂地质条件下隧道开挖渗流变化的试验系统，所述渗压加载单元包括水压加载装置，水压加载装置能够与所述的中空堵头和\或所述的加水箱分别连通；

水压加载装置设置流量计和压力计，流量计用于确认进入试验箱内流体的流量，压力计获取流体进入试验箱的压力，流量计为磁流量计；

如上所述的模拟复杂地质条件下隧道开挖渗流变化的试验系统，所述水压加载装置包括储水罐和气罐，气罐与储水罐连接，储水罐通过出水管路与所述的中空堵头和\或所述的加水箱分别连通；

水压加载装置可设置多组，每一组设置两个储水罐，每一组水压加载装置均与所述试验箱每一侧面所述的中空堵头和\或加水箱连通，通过调节出水管路可实现三组水压加载装置集体或独立供水，通过调控出水管路开关或改变管路接口可实现试验箱多种加水模式，例如，两组水压加载装置连接两个侧面的加水箱可模拟地下水的渗流场，一组水压加载装置连接后侧面的中空堵头，可实现深埋隧道正前方含不良地质结构的模拟。

如上所述的模拟复杂地质条件下隧道开挖渗流变化的试验系统，还包括数据采集单元，数据采集单元包括设于所述箱体试件内的渗压传感器，和设于箱体内的压力传感器，

渗压传感器、压力传感器分别与控制单元连接；

沿着试验箱试件的不同高度依据试验需求埋设多层渗压传感器来监测不同位置的渗压，沿着试验箱试件的不同高度依据试验需求埋设多层压力传感器来监测不同位置的地应力；控制单元还与所述地应力加载单元和所述渗压加载单元分别单独连接。

第二方面，本发明还提供了模拟复杂地质条件下隧道开挖渗流变化的试验系统的试验方法，包括如下内容：

在箱体内试验材料的不同截面设置渗压传感器和\或压力传感器，压力传感器用于监测地应力的加载情况，渗压传感器用于监测试验箱内渗流压力的变化；水压由渗压加载单元在试验箱的一侧提供；通过渗压加载单元提供不同的渗流压力，通过渗压传感器的采集的数据来分析不同渗流压力作用下围岩渗流场分布规律；

渗压传感器及压力传感器均设置于箱体截面水平中心线及向上的位置处。

或者，在试验材料不同断面设置渗压传感器和压力传感器，压力传感器用来监测地应力的加载情况，渗压传感器用来监测模型体内渗流压力的变化；通过将中空堵头插入试验箱部分孔洞来模拟含水结构，含水结构的水压由渗压加载单元提供；通过正面的孔洞来实现隧道开挖；通过分析渗压传感器和压力传感器采集的数据来分析隧道开挖过程中围岩的应力-渗流演化规律。

上述本发明的有益效果如下：

1) 本发明通过整体试验系统的给出，试验箱用于容纳试验材料和加入试验箱内的水体，地应力加载单元从上方向试验箱施加压力，用于模拟实际地质情况中的地应力，通过加水箱向试验箱内供水模拟含不良含水地质构造复杂地层的原始渗流场，通过渗压加载单元配合中空堵头，模拟复杂地层中不良含水地质构造，从而实现高地应力和高水压联合作用下隧道开挖及诱发突水灾害的试验；本发明在模拟水电、交通、能源和矿山等深部工程突水突泥灾害的防控防治方面具有广泛的应用前景。

2) 本发明通过试验箱箱体侧面设置孔洞，以实现隧道多角度的开挖，配合中空堵头，可实现单个、多个地质含水结构（溶洞）的模拟；通过改变开挖方式及地质含水结构的位置、埋入深度，可以模拟隧道开挖及地质含水结构不同空间位置间的影响规律。

3) 本发明通过可拆卸式挡板的设置，可便于在试验结束后对试验箱内试验材料进行清料，通过试验箱顶盖的设置，可便于地应力加载单元向试验箱施加地应力。

4) 本发明通过箱体设置多个传感器孔，配合中空螺丝及环形橡胶片可实现各类型传感器进出箱体时的密封，各类型传感器线依次穿过箱体传感器孔、环形橡胶垫片、中

空螺丝，通过中空螺丝旋进过程中挤压环形橡胶垫片可实现传感器线穿过箱体的密封。

5) 本发明通过设置中空堵头，不仅可实现对试验箱孔洞的封堵，而且可与渗压加载单元连通，从而向箱体内试验材料进行供水，实现多种形式含水构造的模拟。

6) 本发明通过加水箱的设置，在箱体的三处侧面均布置进水孔，这样可实现地下水的均匀加载，形成与实际深部地质情况相符的渗流场。

7) 本发明通过给压板设于试验箱内，千斤顶密封的加载端和给压板密封于箱体之中，实现水中加载，模型上端的密封由试验箱顶盖和箱体实现，水中加载的特殊方式可以防止加载位移诱发的密封失效。

8) 本发明通过多组水压加载装置的设置，调节水压加载装置间出水管路的连接方式，既可实现试验箱每一侧面的单独加载，也可实现多侧面的同时加载。

附图说明

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

图1是本发明根据一个或多个实施方式的模拟复杂地质条件下隧道开挖渗流变化的试验系统的立体图。

图2是本发明根据一个或多个实施方式的模拟复杂地质条件下隧道开挖渗流变化的试验系统中试验箱的示意图一。

图3是本发明根据一个或多个实施方式的模拟复杂地质条件下隧道开挖渗流变化的试验系统中试验箱的示意图二。

图4是本发明根据一个或多个实施方式的模拟复杂地质条件下隧道开挖渗流变化的试验系统中试验箱顶盖示意图。

图5是本发明根据一个或多个实施方式的模拟复杂地质条件下隧道开挖渗流变化的试验系统中可拆卸式挡板示意图。

图6(a)是本发明根据一个或多个实施方式的模拟复杂地质条件下隧道开挖渗流变化的试验系统中箱体示意图。

图6(b)是本发明根据一个或多个实施方式的模拟复杂地质条件下隧道开挖渗流变化的试验系统中箱体侧视图。

图7是本发明根据一个或多个实施方式的模拟复杂地质条件下隧道开挖渗流变化的试验系统中堵头示意图。

图8是本发明根据一个或多个实施方式的模拟复杂地质条件下隧道开挖渗流变化的

试验系统中中空堵头示意图。

图9是本发明根据一个或多个实施方式的模拟复杂地质条件下隧道开挖渗流变化的试验系统中中空螺丝示意图。

图10是本发明根据一个或多个实施方式的模拟复杂地质条件下隧道开挖渗流变化的试验系统中地应力加载单元的示意图。

图11是本发明根据一个或多个实施方式的模拟复杂地质条件下隧道开挖渗流变化的试验系统中渗压加载单元立体图。

图12是本发明根据一个或多个实施方式的模拟复杂地质条件下隧道开挖渗流变化的试验系统中渗压加载单元侧视图。

图13是本发明根据一个或多个实施方式的模拟复杂地质条件下隧道开挖渗流变化的试验系统中数据采集单元示意图。

图14 (a) 是本发明根据一个或多个实施方式的模拟复杂地质条件下隧道开挖渗流变化的试验系统中一种模拟实施中箱体示意图。

图14 (b) 是图14 (a) 截面a布置的示意图。

图14 (c) 是图14 (a) 截面b布置的示意图。

图15 (a) 是本发明根据一个或多个实施方式的模拟复杂地质条件下隧道开挖渗流变化的试验系统中另一种模拟实施中箱体示意图。

图15 (b) 是图15 (a) 断面a布置的示意图。

图中：为显示各部位位置而夸大了互相间间距或尺寸，示意图仅作示意。

其中：1、试验箱，2、地应力加载单元，3、渗压加载单元，4、数据采集单元，5、试验箱顶盖，6、可拆卸式挡板，7、箱体，8、堵头，9、中空堵头，10、底座，11、非贯通螺栓孔，12、贯通螺栓孔，13、橡胶槽，14、顶盖圆孔，15、铰链，16、翼板，17、腹板，18、箱体孔洞，19、传感器孔，20、矩形加水箱，21、进水孔，22、进水口，23、出气孔，24、中空螺丝，25、千斤顶，26、位移计，27、液压站，28、给压板，29、水压加载装置，30、磁流量计，31、进水管路，32、气罐，33、储水罐，34、压力计，35、静态应变测试系统，36、压力传感器，37、渗压传感器，38、贯通孔，39、O型橡胶圈。

具体实施方式

应该指出，以下详细说明都是例示性的，旨在对本发明提供进一步的说明。除非另有指明，本发明使用的所有技术和科学术语具有与本发明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发明的示例性实施方式。如在这里所使用的，除非本发明另外明确指出，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，本发明中如果出现“上”、“下”、“左”、“右”字样，仅表示与附图本身的上、下、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。

术语解释部分：本发明中的术语“安装”、“相连”、“连接”、“固定”等术语应做广义理解，例如，可以是固定连接，也可以是可拆卸连接，或为一体；可以是机械连接，也可以是电连接，可以是直接连接，也可以是通过中间媒介间接相连，可以是两个元件内部连接，或者两个元件的相互作用关系，对于本领域的普通技术人员而言，可以根据具体情况理解上述术语在本发明的具体含义。

正如背景技术所介绍的，现有技术中没有专门针对隧道开挖渗流变化试验装置的问题，为了解决如上的技术问题，本发明提出了模拟复杂地质条件下隧道开挖渗流变化的试验系统。

本发明的一种典型的实施方式中，参考图 1 所示，模拟复杂地质条件下隧道开挖渗流变化的试验系统，包括试验箱 1，地应力加载单元 2，渗压加载单元 3，及数据采集单元 4。

参考图 2 和图 3 所示，试验箱包括箱体，箱体顶部设置试验箱顶盖，其中试验箱 1 放置在底座 10 上，底座 10 配有活动梯，方便实验人员操作及试验后通过可拆卸式挡板 6 设置于试验箱的底部，试验结束后，通过打开可拆卸式挡板 6 向下清除试验材料。

参考图 4 所示，试验箱顶盖 5 中部设置有圆形的顶盖孔洞 14，在顶盖孔洞周围设有均匀布置的非贯通螺栓孔 11，通过非贯通螺栓孔 11 用于地应力加载单元 2 的固定，与试验箱顶盖 5 螺栓结合后，试验箱顶盖 5 与箱体连接后，便可形成试验系统的反力架，试验箱顶盖的周围均匀布置的贯通螺栓孔 12，用于试验箱顶盖 5 与箱体 7 的连接，在试验箱顶盖周围在贯通螺栓孔 12 的内侧设有橡胶槽 13，橡胶槽可设置密封条，密封条为橡胶圈，添加橡胶圈后，通过螺栓提供挤压可以密封试验箱顶盖 5。

参考图 5 所示，试验箱中的可拆卸式挡板 6，使用铰链结构 15 来控制洞门的开闭，便于完成试验后试验材料的清理出渣，可拆卸式挡板 6 具有试验箱顶盖 5 相同的橡胶槽

和贯通的螺栓孔，同样是通过螺栓与箱体 7 固定在一起，通过橡胶槽设置密封条进行试验箱的密封。

为了减少模型试验中边界效应的影响，以及实现试验中均匀施加高压水的设想，箱体 7 整体结构设计为立方体，具有设定的高度，箱体内设置可填充设定高度的试验材料，试验材料为人工配制的满足设定相似比的用于模拟岩土体材料的相似材料，试验箱中箱体 7 的上部和下部都设有伸出的翼板 16，翼板 16 与箱体之间设有均匀布置的多个腹板 17 以增强翼板的强度，翼板上均匀布置螺栓孔 12，实现箱体 7 和试验箱顶盖 5、可拆卸式挡板 6 的连接。

参考图 6 (a) 和 6 (b) 所示，在箱体的四个侧面的中心分别设有圆形的孔洞，具体为箱体孔洞 18，可以实现隧道多角度的开挖，配合堵头 8 和中空堵头 9，可以实现单个、多个地质含水结构（溶洞）的模拟，例如，将正面箱体孔洞作为隧道开挖孔，将两边的箱体孔洞 18 使用堵头 8 堵住，后面的箱体孔洞连接中空堵头 9 可以模拟含水结构。通过改变开挖方式及地质含水结构的位置、埋入深度，可以模拟隧道开挖及地质含水结构不同空间位置间的影响规律。

其中，堵头 8 为常规堵头，堵头 8 与箱体之间设置密封圈，形成类似于机械法兰的结构，通过在箱体和堵头间添加环形橡胶垫，通过拧紧螺栓对堵头的挤压能够有效封堵堵头所在位置处的箱体孔洞。

进一步，箱体的四个侧面中心的箱体孔洞 18 周围环形设置不穿透箱体的螺栓孔，通过螺栓将堵头 8、中空堵头 9 固定在箱体 7 上，实现箱体 7 的密封。同时，在二者之间设置环形橡胶，通过挤压实现四个箱体孔洞 18 的密封。

在箱体 7 的上部钻取一排传感器孔 19，橡胶垫片设于传感器孔的外侧，橡胶垫片中心设置开孔，中空螺丝的一端搭配橡胶垫片与传感器孔连接，这样将传感器线条依次穿过传感器孔 19、橡胶垫片和中空螺丝 24，将中空螺丝拧在箱体上挤压橡胶垫片即可实现传感器线条穿出箱体 7 的密封。

在箱体 7 其中三个被加水箱 20 覆盖的面上设有均匀布置的进水孔 21，进水孔沿着箱体的高度设置多层，但进水孔高度低于填入的试验材料高度，加水箱的面积大于进水孔的布置范围，在箱体外部焊接矩形加水箱 20，加水箱 20 上部设置出气孔 23、下部设置进水口 22，进水口外接球阀可控制水的加载。矩形加水箱 20 可以储存一定量的流体，流体通过均匀布置的进水孔 21 进入试验材料内部，实现地下水的均匀加载，形成与实际地质情况相符的地下水渗流场，实际操作过程中，通过渗压加载装置 3 进行加载，水

通过进水口 22 进入箱体 7 内，内部空气通过出气孔 23 排出。

参考图 7 所示，堵头为圆柱体，堵头的外侧直径增大，在堵头直径变小处设置直径大于堵头圆柱体的环形板，环形板设置多个螺栓孔，用于同箱体的连接。

参考图 8 所示，中空堵头 9 前段为锥形结构，中部为附有 O 型橡胶圈 39 的圆柱形结构，中空堵头中间设置贯通孔 38。在锥形结构周围设置粗粒材料如砂粒，水压透过粗粒结构可以均匀的加载在含水结构中，可以以 O 型橡胶圈抹胶中心在附近抹胶，通过 O 型橡胶圈 39 可以实现箱体 7 和中空堵头 9 间的密封，中空堵头圆柱形结构与后段之间设置尺寸大于圆柱形结构的环形板，该环形板用于同箱体的连接。

参考图 9 所示，中空螺丝为轴向中部贯通的结构件，且中空螺丝相对于其头部的另一端缩径，便于穿过传感器孔同时进行连接。

参考图 10 所示，地应力加载单元 2 包括液压站 27、千斤顶 25、给压板 28。地应力的加载主要由液压站 27 来实现，由高强螺栓将千斤顶 25 透过顶盖圆孔固定在试验箱顶盖 5 上，利于拆卸和更换，千斤顶 25 的行程由一个油压控制管道控制。千斤顶 25 的顶端设置有位移计 26，用于监测地应力加载过程中千斤顶 25 的位移，可以间接的反映模型土体在试验过程中试验材料竖向变形情况。给压板 28 上部设置多个半球形的承力结构，当千斤顶 25 加载至给压板 28 时，半球形承力结构保证千斤顶加载至给压板过程中地应力的垂直加载。这样，试验箱顶盖 5、箱体 7 及千斤顶 25 三者通过螺栓连接后形成反力架。

为了保证试验箱的密封，千斤顶 25 密封的加载端和给压板 28 密封于箱体 7 之中，实现水中加载，试验箱上端的密封由试验箱顶盖 5 和箱体 7 实现，水中加载的特殊方式可防止设计中加载位移诱发的密封失效。

参考图 11 和图 12 所示，渗压加载单元 3 包括储气罐 32、进水管路 31 及水压加载装置 29。水压加载装置 29 包括磁流量计 30、压力计 34 和储水罐 33，渗压加载单元 3 既能手动控制，也可由微电脑自动控制，且自动记录试验过程中水泵水压值，试验结束后用普通外部存储器导出。水压加载装置 29 使用两个串联的储水罐 33 进行加载，通过调节进水管路 31，可以实现两个水罐 33 的交替加载，补充水量以及水压的持续加载，每个水压加载装置都配有磁流量计 30 和压力计 34，来记录水压的流量和压力。

储水罐设置进水管路用于进水，其出水管路与加水箱的进水口 22 和含水堵头 9 分别单独连通，储气罐与储水罐连接，用于向储水罐内流体施加压力，使得储水罐排出流体，磁流量计 30 设置于储水罐的出水管路，用于获取施加流量的体积，压力计 34 设置

于储水罐的出水管路，用于监测水压压力，压力计即为水压压力传感器。

整个渗压加载单元 3 设置三套独立的水压加载装置 29，配合箱体 7，可实现地下水在箱体 7 中三面、均匀的加载。三套水压加载装置 29 通过进水管路 31 合为一个大型供水装置，另外，通过调控各管路的开关可实现三面水压同时加载和单面单独加载。

为了实现自动控制，进水管路设置开关，储气罐的进气管和出气管分别设置开关，各个开关均与控制器分别单独连接，控制器可为 PLC 控制器或其他类型的控制器，控制器与磁流量计 30 和压力计 34 分别单独连接。

参考图 13 所示，数据采集单元 4，包括测试系统 35、渗压传感器 36、压力传感器 37。渗压传感器 36、压力传感器 37 分别与测试系统的控制单元单独连接，控制单元可为计算机，且渗压加载单元的控制单元与控制单元连接，控制单元还与渗压加载单元、地应力加载单元分别单独连接；压力传感器和渗压传感器按试验需要分别安装在试验材料内部，压力传感器和渗压传感器的线路通过中空螺丝 24 进出箱体 7。

本装置可实现的模拟实例一：

参考图 14 (a) -图 14 (c) 所示，模拟不同渗流压力作用下围岩渗流场。在箱体不同截面设置压力传感器 36 和\或渗压传感器 37，比如在截面 a 中设置多个渗压传感器，在截面 b 中设置至少两个压力传感器，在截面 a 的横向中心线设置多个渗压传感器，在竖向中心线设置多个渗压传感器，且有四个渗压传感器设于以箱体中心为圆心（圆心处同样设置渗压传感器），设定半径的圆上；截面 b 中横向中心线设置两个压力传感器，压力传感器 36 用来监测地应力的加载情况，渗压传感器 37 用来监测模型体内渗流压力的变化。

水压由渗压加载单元 3 在一侧提供，水压通过矩形加水箱 20 和进水孔 21 施加进入试验材料内部。通过渗压加载单元 3 提供不同的渗流压力，通过渗压传感器 37 的采集的数据来分析不同渗流压力作用下围岩渗流场分布规律。

本装置可实现的模拟实例二：

如图 15 (a) 和图 15 (b) 所示，模拟隧道开挖过程中围岩渗流演化。在试验材料不同断面设置上下交错布置的渗压传感器 37 和压力传感器 36，压力传感器 36 用来监测地应力的加载情况，渗压传感器 37 用来监测模型体内渗流压力的变化。水压通过将中空堵头 9 插入左边和后边箱体孔洞 18 来模拟含水结构，含水结构的水压由渗压加载单元 3 提供，通过正面的箱体孔洞 18 来实现隧道开挖。通过分析渗压传感器 37 和压力传感器的采集的数据来分析隧道开挖过程中围岩的应力-渗流演化规律。

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

1. 模拟复杂地质条件下隧道开挖渗流变化的试验系统，其特征在于，包括试验箱，试验箱顶部设置地应力加载单元，试验箱内部可设置试验材料，且试验箱周向各侧面分别设置孔洞，其中部分孔洞作为隧道开挖孔洞的模拟，部分孔洞处设置堵头或中空堵头，且试验箱的侧部设置加水箱，试验箱设置与加水箱连通的进水孔，中空堵头、加水箱分别与渗压加载单元连通。

2. 根据权利要求 1 所述的模拟复杂地质条件下隧道开挖渗流变化的试验系统，其特征在于，所述试验箱包括箱体，箱体具有设定的高度，且箱体通过底座支撑，所述孔洞设于箱体侧面形成箱体孔洞；

箱体顶部安装试验箱顶盖，箱体底部安装可拆卸式挡板，试验箱顶盖和可拆卸式挡板均与箱体密封连接。

3. 根据权利要求 2 所述的模拟复杂地质条件下隧道开挖渗流变化的试验系统，其特征在于，所述箱体设置多个传感器孔。

4. 根据权利要求 2 所述的模拟复杂地质条件下隧道开挖渗流变化的试验系统，其特征在于，在所述箱体外部固定所述的加水箱，加水箱与箱体具有共有面，所述进水孔均匀设于加水箱与箱体的共有面，加水箱上部设置排气孔、下部设置进水口。

5. 根据权利要求 1 所述的模拟复杂地质条件下隧道开挖渗流变化的试验系统，其特征在于，所述中空堵头的前段为锥形结构，中部为附有橡胶圈的圆柱形结构，中空堵头内部中心设置贯通孔。

6. 根据权利要求 2 所述的模拟复杂地质条件下隧道开挖渗流变化的试验系统，其特征在于，所述地应力加载单元包括千斤顶，千斤顶固定于所述试验箱的顶部，且千斤顶的顶端设置位移计；

所述试验箱内试验材料的顶部上设置给压板，给压板设于试验箱顶盖的下方，给压板上表面设置多个半球形的承力结构，千斤顶的加载端穿过所述试验箱顶盖与给压板接触。

7. 根据权利要求 4 所述的模拟复杂地质条件下隧道开挖渗流变化的试验系统，其特征在于，所述渗压加载单元包括水压加载装置，水压加载装置能够与所述的中空堵头和\或所述的加水箱分别连通；

水压加载装置设置流量计和压力计。

8. 根据权利要求 7 所述的模拟复杂地质条件下隧道开挖渗流变化的试验系统，其特征在于，所述水压加载装置包括储水罐和气罐，气罐与储水罐连接，储水罐通过出水

管路与所述的中空堵头和\或所述的加水箱分别连通；

水压加载装置可设置多组，每一组设置两个储水罐，每一组水压加载装置均与所述试验箱每一侧面所述的中空堵头和\或加水箱连通。

9. 根据权利要求 1 所述的模拟复杂地质条件下隧道开挖渗流变化的试验系统，其特征在于，还包括数据采集单元，数据采集单元包括设于所述箱体试件内的渗压传感器，和设于箱体内的压力传感器，渗压传感器、压力传感器分别与控制单元连接；

沿着试验箱试件的不同高度依据试验需求埋设多层渗压传感器来监测不同位置的渗压；沿着试验箱试件的不同高度依据试验需求埋设多层压力传感器来监测不同位置的地应力；

控制单元还与所述地应力加载单元和所述渗压加载单元分别单独连接。

10. 根据权利要求 9 所述的模拟复杂地质条件下隧道开挖渗流变化的试验系统的试验方法，其特征在于，包括如下内容：

在箱体内试验材料的不同截面设置渗压传感器和\或压力传感器，压力传感器用于监测地应力的加载情况，渗压传感器用于监测试验箱内渗流压力的变化；水压由渗压加载单元在试验箱的一侧提供；通过渗压加载单元提供不同的渗流压力，通过渗压传感器的采集的数据来分析不同渗流压力作用下围岩渗流场分布规律；

或者，在试验材料不同断面设置渗压传感器和压力传感器，压力传感器用来监测地应力的加载情况，渗压传感器用来监测模型体内渗流压力的变化；通过将中空堵头插入试验箱部分孔洞来模拟含水结构，含水结构的水压由渗压加载单元提供；通过正面的孔洞来实现隧道开挖；通过分析渗压传感器和压力传感器采集的数据来分析隧道开挖过程中围岩的应力-渗流演化规律。

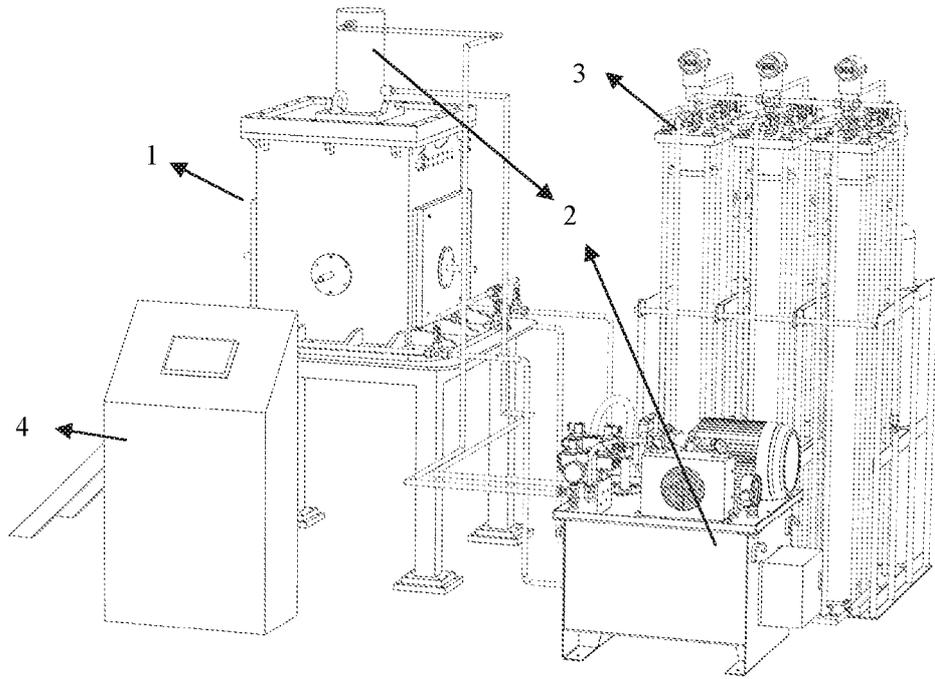


图 1

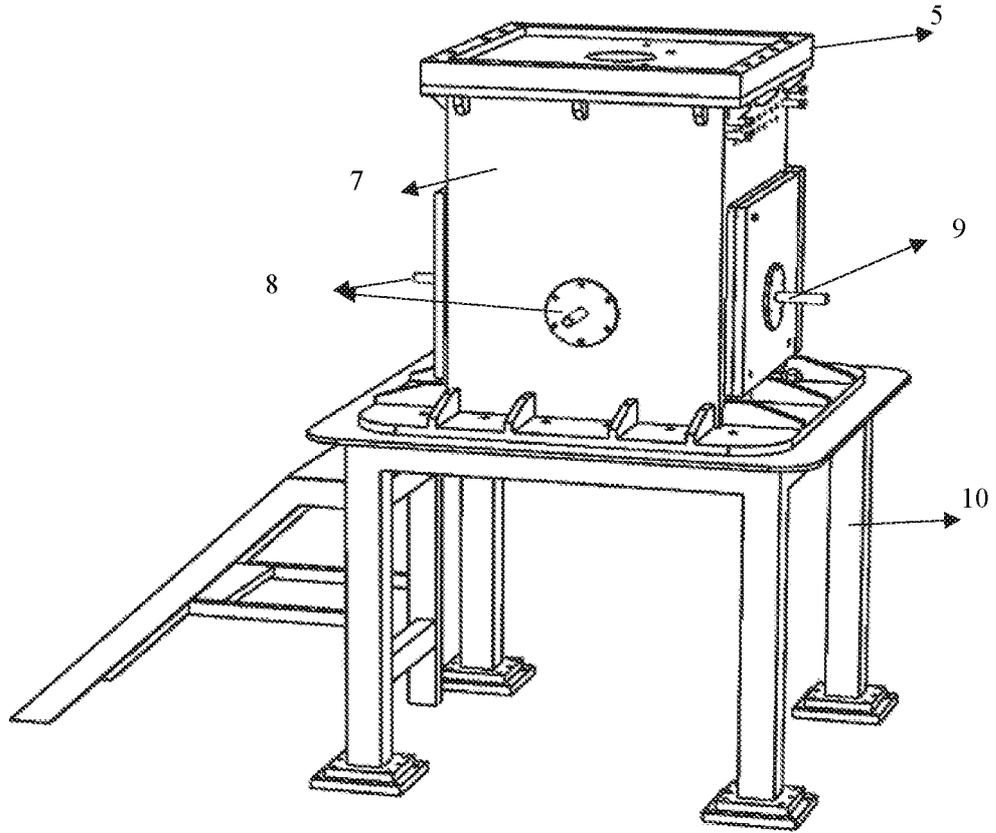


图 2

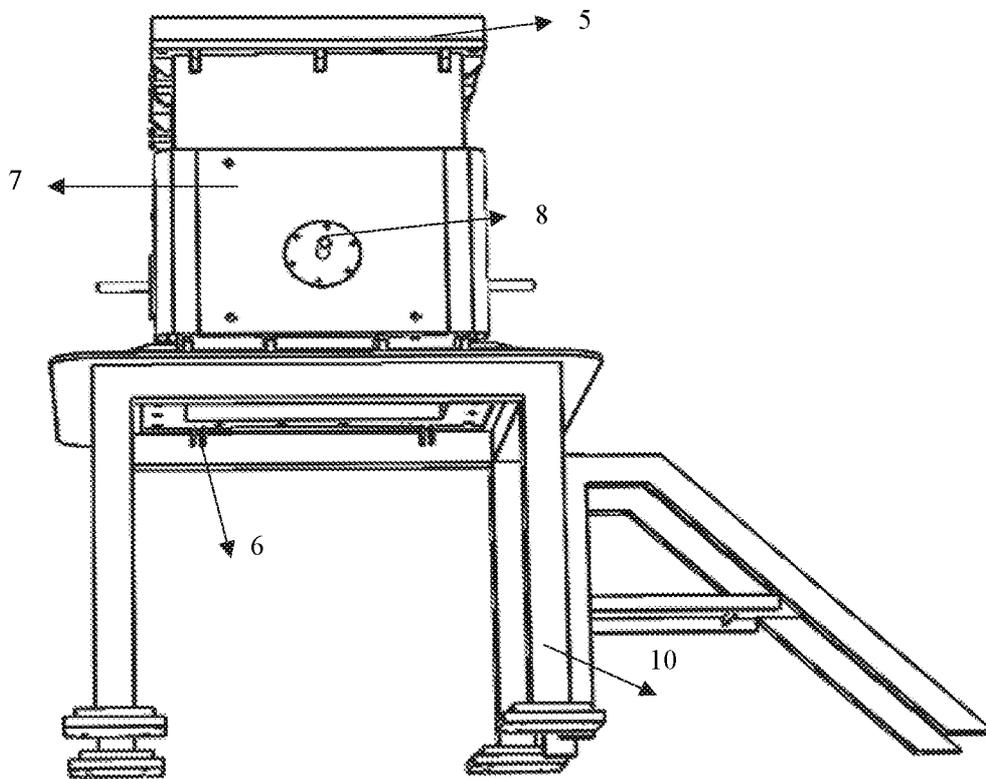


图 3

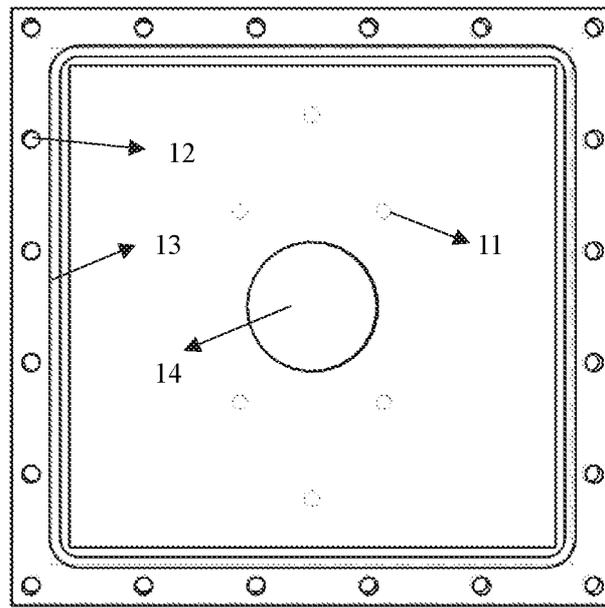


图 4

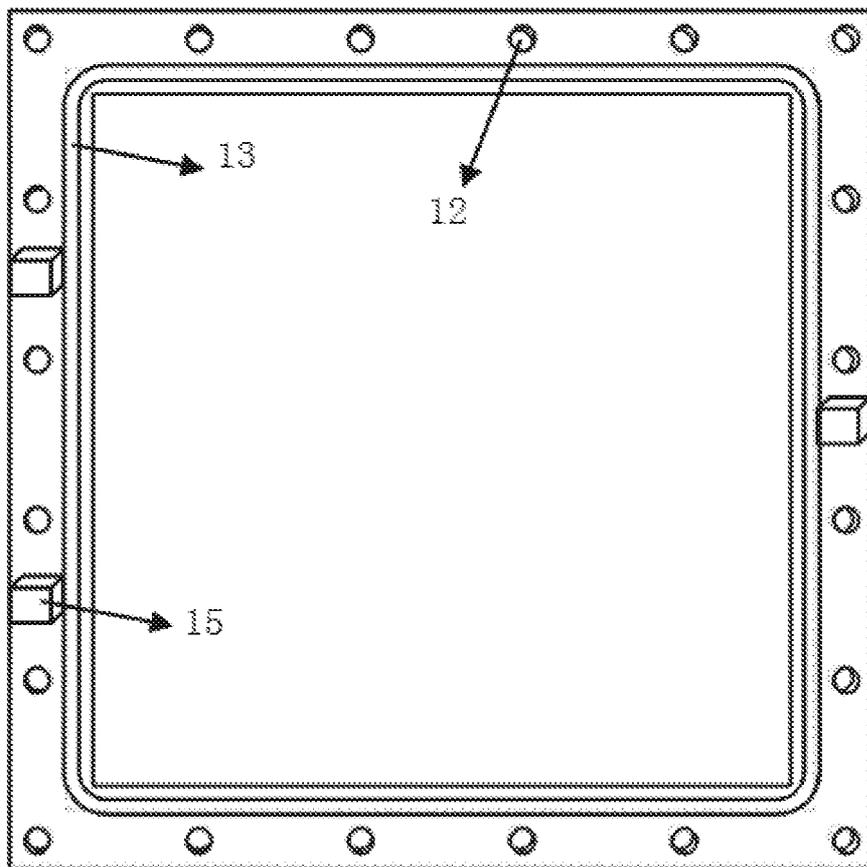


图 5

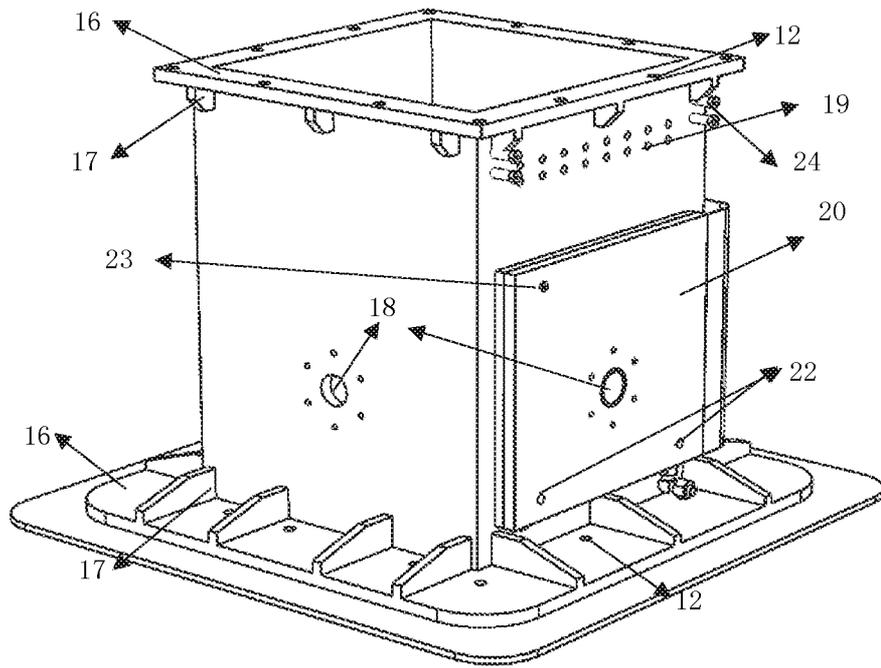


图 6 (a)

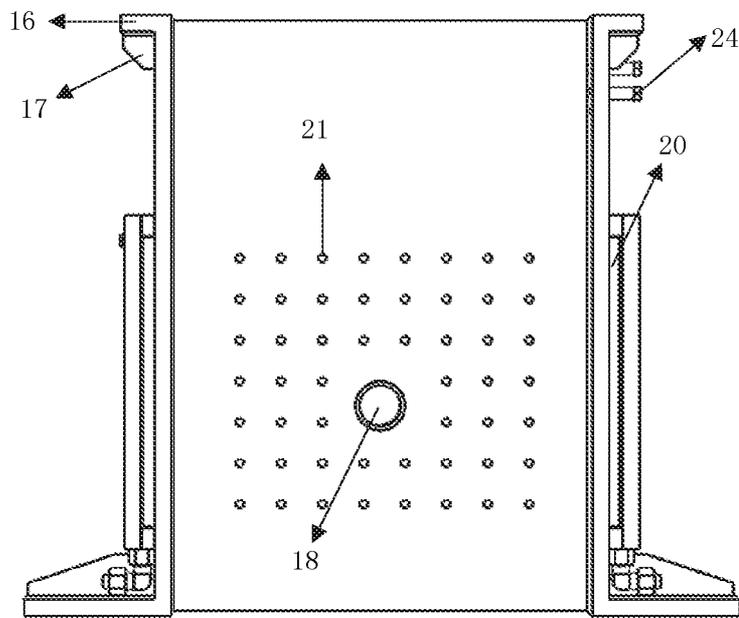


图 6 (b)

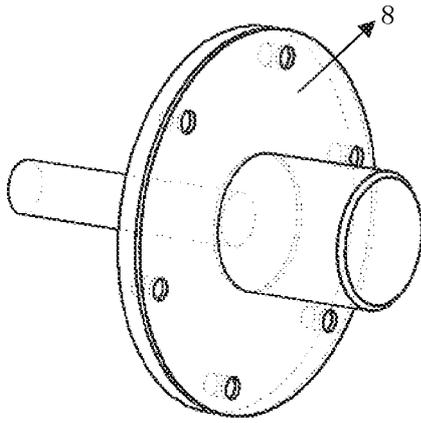


图 7

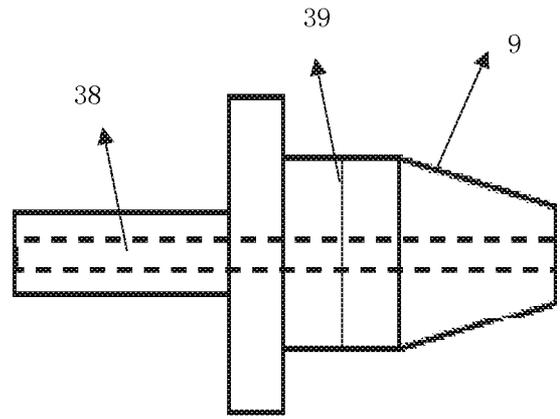


图 8

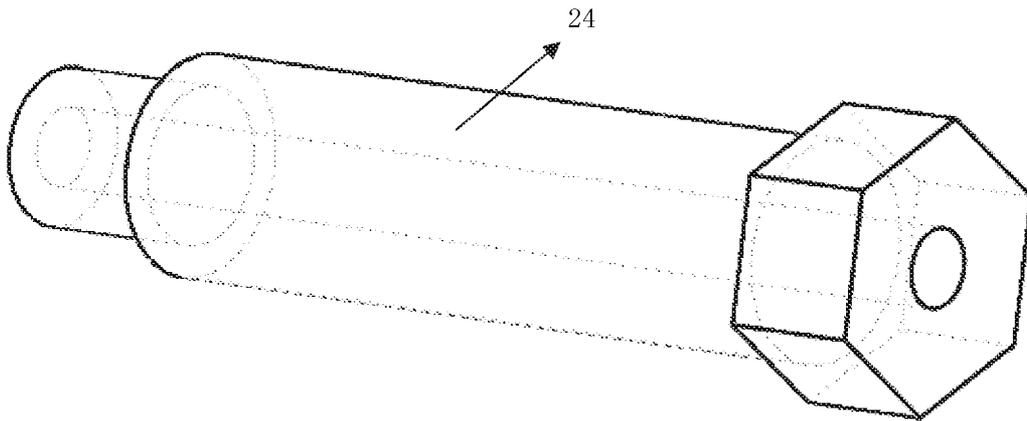


图 9

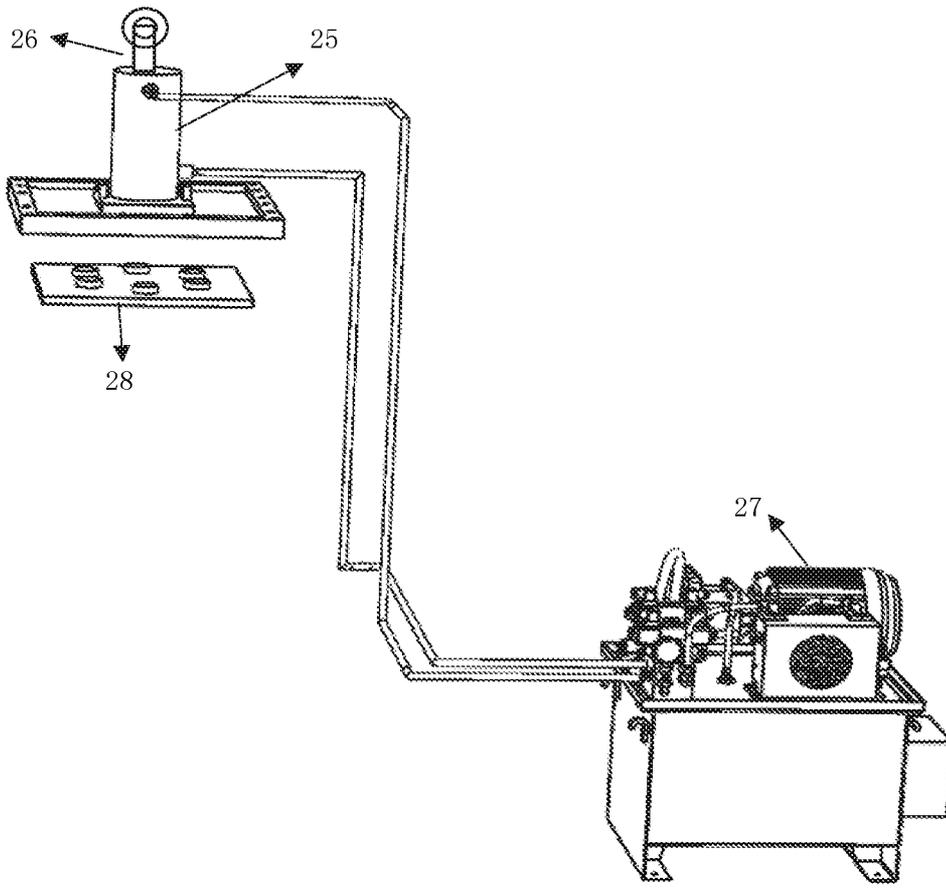


图 10

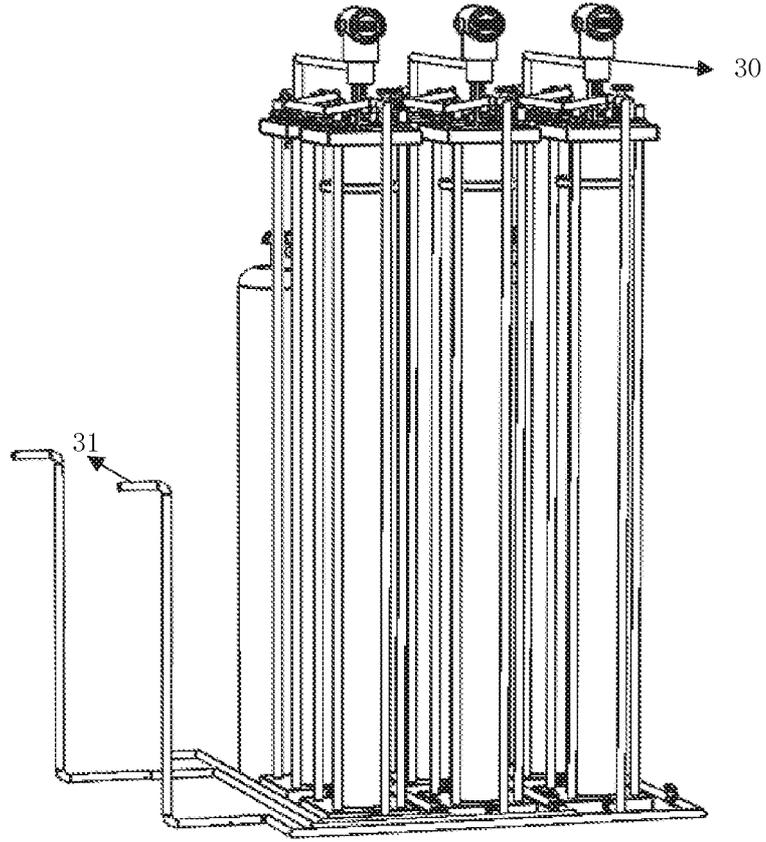


图 11

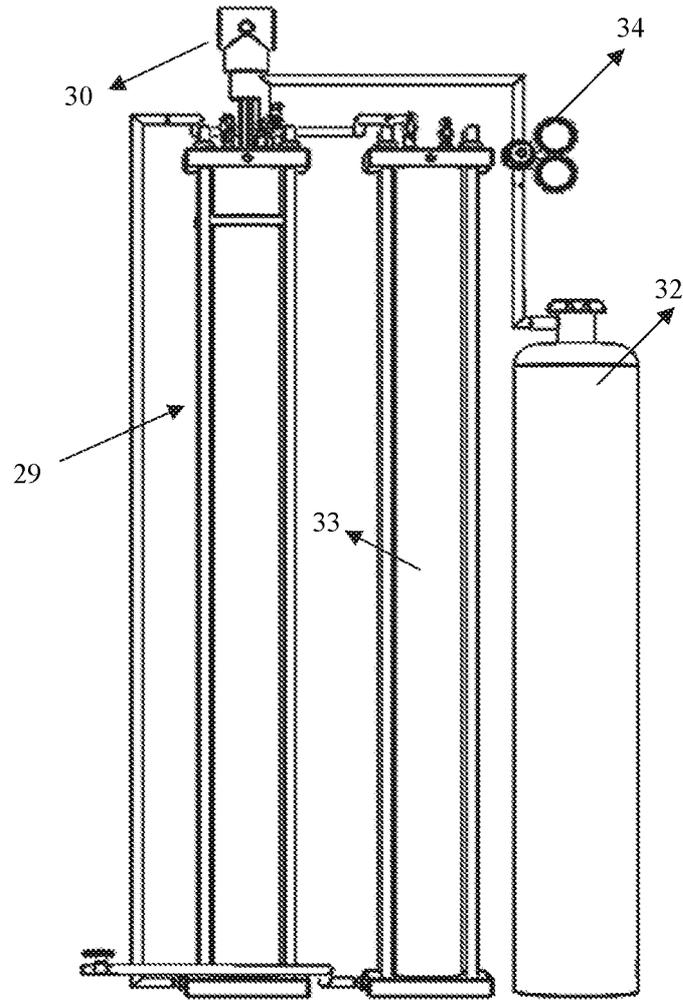


图 12

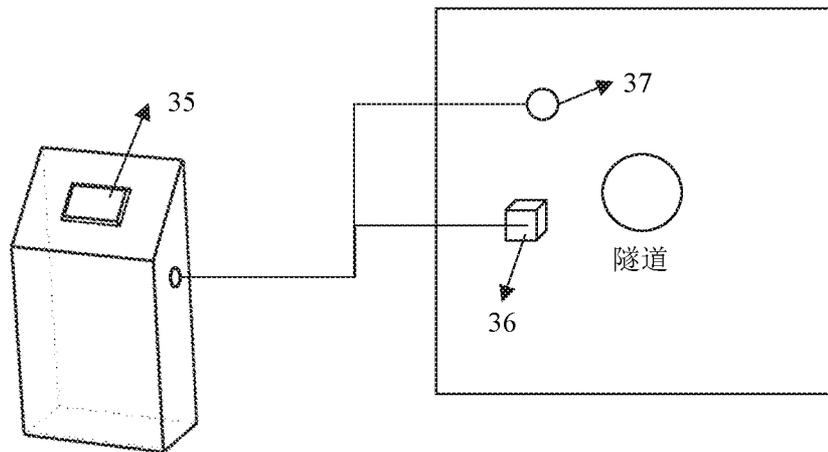


图 13

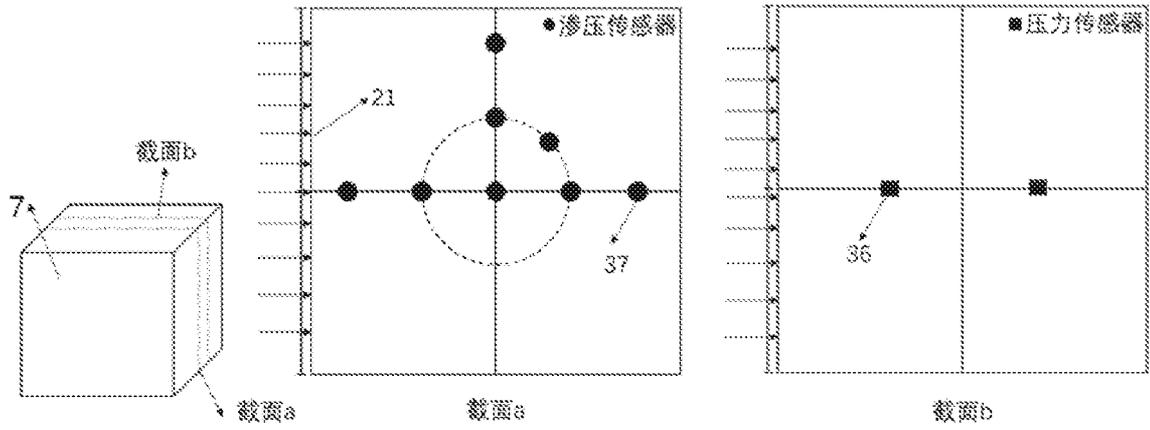


图 14 (a)

图 14 (b)

图 14 (c)

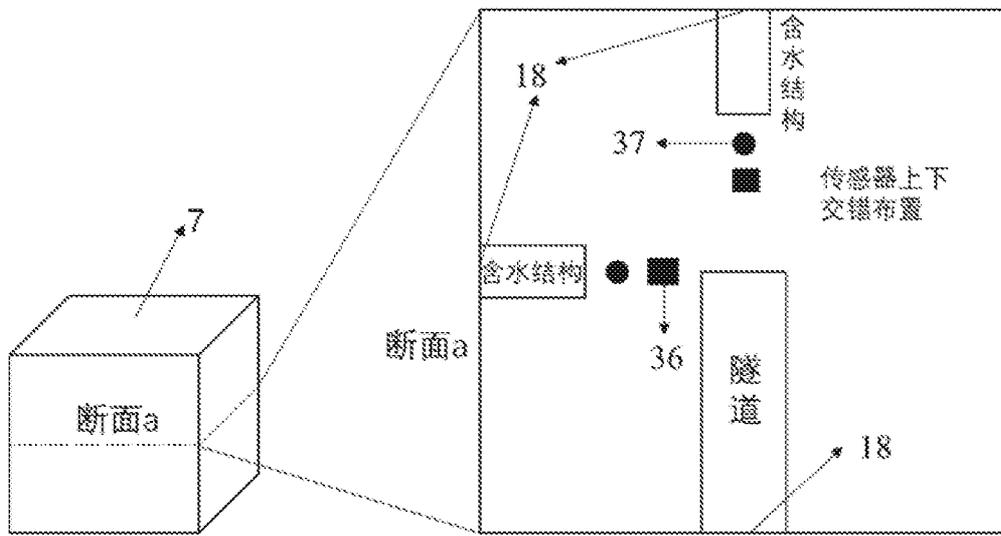


图 15 (a)

图 15 (b)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2020/138899

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER		
G01N 15/08(2006.01)i; G09B 23/40(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)		
G01N, G09B		
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)		
DWPI; SIPOABS; CNABS; CNKI: 隧道, 渗流, 模拟, 实验, 试验, 测试, 加载, tunnel, seepage, percolat+, test+, simulat+, analog+, load+		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	CN 108548763 A (SHANDONG UNIVERSITY) 18 September 2018 (2018-09-18) description paragraphs [0035]-[0050], figures 1-3	1-10
X	CN 108169427 A (INSTITUTE OF ROCK AND SOIL MECHANICS, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES et al.) 15 June 2018 (2018-06-15) description, specific embodiments, and figures 1-4	1-10
A	CN 102589909 A (SHANDONG UNIVERSITY) 18 July 2012 (2012-07-18) entire document	1-10
A	CN 106248409 A (SHENYANG UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 21 December 2016 (2016-12-21) entire document	1-10
A	CN 106197944 A (CHINA UNIVERSITY OF MINING AND TECHNOLOGY) 07 December 2016 (2016-12-07) entire document	1-10
A	JP 03244707 A (SHIMIZU CONSTRUCTION CO., LTD.) 31 October 1991 (1991-10-31) entire document	1-10
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> 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		Date of mailing of the international search report
11 March 2021		28 April 2021
Name and mailing address of the ISA/CN		Authorized officer
China National Intellectual Property Administration (ISA/CN) No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing 100088, China		
Facsimile No. (86-10)62019451		Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No. PCT/CN2020/138899

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
CN	108548763	A	18 September 2018	None	
CN	108169427	A	15 June 2018	None	
CN	102589909	A	18 July 2012	None	
CN	106248409	A	21 December 2016	None	
CN	106197944	A	07 December 2016	None	
JP	03244707	A	31 October 1991	JP 2804995 B2	30 September 1998

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2020/138899

<p>A. 主题的分类</p> <p>G01N 15/08(2006.01)i; G09B 23/40(2006.01)i</p> <p>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</p>																							
<p>B. 检索领域</p> <p>检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)</p> <p>G01N, G09B</p> <p>包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献</p> <p>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))</p> <p>DWPI; SIPOABS; CNABS; CNKI:隧道, 渗流, 模拟, 实验, 试验, 测试, 加载, tunnel, seepage, percolat+, test+, simulat+, analog+, load+</p>																							
<p>C. 相关文件</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>类型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>X</td> <td>CN 108548763 A (山东大学) 2018年 9月 18日 (2018 - 09 - 18) 说明书第【0035】-【0050】段, 附图1-3</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>CN 108169427 A (中国科学院武汉岩土力学研究所 等) 2018年 6月 15日 (2018 - 06 - 15) 说明书具体实施方式, 附图1-4</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 102589909 A (山东大学) 2012年 7月 18日 (2012 - 07 - 18) 全文</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 106248409 A (沈阳工业大学) 2016年 12月 21日 (2016 - 12 - 21) 全文</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 106197944 A (中国矿业大学) 2016年 12月 7日 (2016 - 12 - 07) 全文</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>JP 03244707 A (SHIMIZU CONSTRUCTION CO LTD) 1991年 10月 31日 (1991 - 10 - 31) 全文</td> <td>1-10</td> </tr> </tbody> </table>			类型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	X	CN 108548763 A (山东大学) 2018年 9月 18日 (2018 - 09 - 18) 说明书第【0035】-【0050】段, 附图1-3	1-10	X	CN 108169427 A (中国科学院武汉岩土力学研究所 等) 2018年 6月 15日 (2018 - 06 - 15) 说明书具体实施方式, 附图1-4	1-10	A	CN 102589909 A (山东大学) 2012年 7月 18日 (2012 - 07 - 18) 全文	1-10	A	CN 106248409 A (沈阳工业大学) 2016年 12月 21日 (2016 - 12 - 21) 全文	1-10	A	CN 106197944 A (中国矿业大学) 2016年 12月 7日 (2016 - 12 - 07) 全文	1-10	A	JP 03244707 A (SHIMIZU CONSTRUCTION CO LTD) 1991年 10月 31日 (1991 - 10 - 31) 全文	1-10
类型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求																					
X	CN 108548763 A (山东大学) 2018年 9月 18日 (2018 - 09 - 18) 说明书第【0035】-【0050】段, 附图1-3	1-10																					
X	CN 108169427 A (中国科学院武汉岩土力学研究所 等) 2018年 6月 15日 (2018 - 06 - 15) 说明书具体实施方式, 附图1-4	1-10																					
A	CN 102589909 A (山东大学) 2012年 7月 18日 (2012 - 07 - 18) 全文	1-10																					
A	CN 106248409 A (沈阳工业大学) 2016年 12月 21日 (2016 - 12 - 21) 全文	1-10																					
A	CN 106197944 A (中国矿业大学) 2016年 12月 7日 (2016 - 12 - 07) 全文	1-10																					
A	JP 03244707 A (SHIMIZU CONSTRUCTION CO LTD) 1991年 10月 31日 (1991 - 10 - 31) 全文	1-10																					
<p><input type="checkbox"/> 其余文件在C栏的续页中列出。</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> 见同族专利附件。</p>																							
<p>* 引用文件的具体类型:</p> <p>“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件</p> <p>“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利</p> <p>“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)</p> <p>“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件</p> <p>“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</p> <p>“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</p> <p>“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</p> <p>“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</p> <p>“&” 同族专利的文件</p>																							
<p>国际检索实际完成的日期</p> <p>2021年 3月 11日</p>		<p>国际检索报告邮寄日期</p> <p>2021年 4月 28日</p>																					
<p>ISA/CN的名称和邮寄地址</p> <p>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</p> <p>传真号 (86-10)62019451</p>		<p>受权官员</p> <p>白玉兰</p> <p>电话号码 62085531</p>																					

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2020/138899

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	108548763	A	2018年 9月 18日	无			
CN	108169427	A	2018年 6月 15日	无			
CN	102589909	A	2012年 7月 18日	无			
CN	106248409	A	2016年 12月 21日	无			
CN	106197944	A	2016年 12月 7日	无			
JP	03244707	A	1991年 10月 31日	JP	2804995	B2	1998年 9月 30日