

(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
2014 年 7 月 10 日 (10.07.2014)



(10) 国际公布号
WO 2014/106308 A1

- (51) 国际专利分类号:
G01V 3/04 (2006.01) G01V 3/00 (2006.01)
G01V 3/02 (2006.01) G01V 1/00 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2013/000041
- (22) 国际申请日: 2013 年 1 月 17 日 (17.01.2013)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201310005132.9 2013 年 1 月 7 日 (07.01.2013) CN
201320006732.2 2013 年 1 月 7 日 (07.01.2013) CN
- (71) 申请人: 山东大学 (SHANDONG UNIVERSITY)
[CN/CN]; 中国山东省济南市历城区山大南路 27 号,
Shandong 250061 (CN)。
- (72) 发明人: 李术才 (LI, Shucan); 中国山东省济南市历
城区山大南路 27 号, Shandong 250061 (CN)。 刘斌
(LIU, Bin); 中国山东省济南市历城区山大南路 27
号, Shandong 250061 (CN)。 刘征宇 (LIU, Zhengyu);

中国山东省济南市历城区山大南路 27 号, Shandong 250061 (CN)。 聂利超 (NIE, Lichao); 中国山东省济南市历城区山大南路 27 号, Shandong 250061 (CN)。 宋杰 (SONG, Jie); 中国山东省济南市历城区山大南路 27 号, Shandong 250061 (CN)。 孙怀凤 (SUN, Huaifeng); 中国山东省济南市历城区山大南路 27 号, Shandong 250061 (CN)。 林春金 (LIN, Chunjin); 中国山东省济南市历城区山大南路 27 号, Shandong 250061 (CN)。 王传武 (WANG, Chuanwu); 中国山东省济南市历城区山大南路 27 号, Shandong 250061 (CN)。 许新骥 (XU, Xinji); 中国山东省济南市历城区山大南路 27 号, Shandong 250061 (CN)。 徐磊 (XU, Lei); 中国山东省济南市历城区山大南路 27 号, Shandong 250061 (CN)。 郝亭宇 (HAO, Tingyu); 中国山东省济南市历城区山大南路 27 号, Shandong 250061 (CN)。 周浩 (ZHOU, Hao); 中国山东省济南市历城区山大南路 27 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)

[见续页]

(54) Title: ADVANCED DETECTION DEVICE, SYSTEM AND METHOD USING FORWARD THREE-DIMENSIONAL INDUCED POLARIZATION FOR TBM CONSTRUCTION TUNNEL

(54) 发明名称: TBM 施工隧道前向三维激发极化法超前探测装置系统与方法

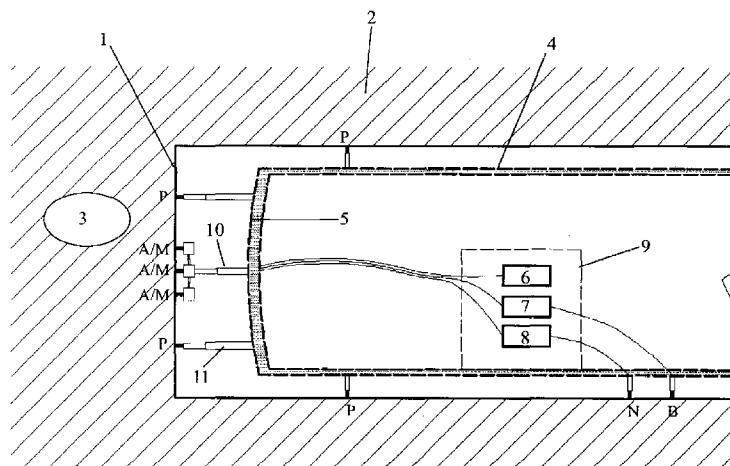


图 1 / FIG. 1

(57) Abstract: An advanced detection device, system and method using a forward three-dimensional induced polarization for a TBM construction tunnel. A narrow detection space of a tunnel is excavated by making good use of a full fracture surface, and a controller (6) is used to control the opening of cabin doors of power supply and detection electrode cabins (15, 16) and a shielding electrode cabin (17), and to control corresponding hydraulic delivery devices (11, 21) to automatically and rapidly arrange a power supply, measurement and shielding electrode system onto a TBM tunneling working face (1) and side wall bottom plates behind same. Under the action of the shielding electrode system, a chromatography detection power supply current points to the front of the working face (1). By means of the forward three-dimensional induced polarization detection method, the three-dimensional geological information about the region in front of the working face (1) can be obtained. Moreover, the water quantity of a water containing body can be quantitatively forecasted using a relationship between induced polarization half-time difference and water quantity. Meanwhile, the parameter of the half-time difference has a stronger capacity to distinguish free water and bound water.

(57) 摘要:

[见续页]



WO 2014/106308 A1



CO., LTD); 中国山东省济南市历下区千佛山路 3 号华特广场山东大学科技园 5 号楼 2 层 3、4 号, 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, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, 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, 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, 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, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

根据细则 4.17 的声明:

- 关于申请人有权申请并被授予专利(细则 4.17(ii))
- 发明人资格(细则 4.17(iv))

本国际公布:

- 包括国际检索报告(条约第 21 条(3))。

一种 TBM 施工隧道前向三维激发极化法超前探测装置系统及方法, 其中充分利用全断面开挖隧道狭小的探测空间, 通过控制器(6)控制供电和探测电极舱(15, 16)、屏蔽电极舱(17)舱门的开启并控制相应液压递送装置(11, 21)将供电、测量和屏蔽电极系统自动快速地布置到 TBM 掘进工作面(1)及其后方的边墙底板上。在屏蔽电极系统的作用下, 层析探测供电电流指向工作面(1)前方。利用这种前向三维激发极化探测方法可以获得工作面(1)前方的三维地质信息, 并可利用激发极化半衰时之差与水量的关系定量预报含水体的水量大小, 同时半衰时之差参数对于自由水和束缚水具有较强的区分能力。

TBM 施工隧道前向三维激发极化法超前探测装置系统及方法

技术领域

本发明涉及 TBM 施工隧道中进行前向三维激发极化法超前预报的领域，尤其涉及一种 TBM 施工隧道前向三维激发极化法超前探测装置系统及方法。

背景技术

近年来，隧道施工中采用全断面隧道掘进机（简称 TBM）机械施工的比例越来越高，全断面隧道掘进机是利用回转刀具开挖，同时破碎洞内围岩及掘进，形成整个隧道断面的一种新型、先进的隧道施工机械。在使用 TBM 掘进时，一个较为突出的问题就是 TBM 机械对地质条件变化的适应性较差，当遭遇断层、破碎带、岩性交界面、含水构造等不良地质情况时，往往造成 TBM 机械被卡、被埋甚至机械报废的严重事故。为了降低 TBM 施工中遭遇上述事故的风险，最为有效的解决方法就是采用超前地质预报技术提前探明掌子面前方不良地质情况，并根据前方的地质情况预先制定合理的处置措施和施工预案。

但是，国内外尚没有十分成熟有效的 TBM 施工隧道专用超前地质预报方法。对于超前地质预报装置和技术而言，TBM 施工与钻爆法施工有着本质性的区别：①TBM 机械是一个庞然大物，TBM 机械占据了隧道掌子面后方的绝大部分空间，无法在隧道边墙布置常用的地震波法超前预报的激发炮点和接收系统，导致钻爆法隧道中常用的 TSP、TGP、TRT 等地震波超前预报技术无法应用在 TBM 施工隧道中；②TBM 机械中存在大量的金属构件和供电电缆对电磁场干扰巨大，导致地质雷达法、瞬变电磁法和激发极化法等普通的基于电磁原理的超前地质预报技术探测效果极不理想，以至于无法用于 TBM 施工隧道中。③TBM 施工时，每天大约有两个小时的机械检修时间，当机械检修时 TBM 刀盘后退 2-5m，这个狭小的空间可被用于实施超前地质预报，其空间狭小且可用时间较短。

就目前 TBM 施工隧道中的地质超前预报技术而言，主要有以下两种方法：①一种是利用 TBM 机械配备的超前钻机进行水平钻探，这种钻机只能揭露钻孔周围的地质情况，对于不与钻孔相交的地质体无法探明，不能反映 TBM 工作面前方整个范围内的地质情况，极易遗漏不良地质，造成误报、错报及灾害隐患，且钻孔经济成本和时间成本较高。②另一种是利用德国研发的 BEAM(Bore-Tunneling Electrical Ahead Monitoring)系统，BEAM 是一种一维聚焦类激发极化法，BEAM 法的缺点一是测试设备安装复杂，测试时间长，严重影响施工进度；二是 BEAM 法利用每次测量结果与隧道里程的曲线来推断掘进面前方的含水情况，探测距离小，未采用层析成像探测，无法获得 TBM 工作面前方地质体的三维信息，也

无法预报水量。此外，从 BEAM 法在我国几个隧道的应用情况来看，预报结果不理想，未得到推广，有待进行提高和完善。

可见，TBM 施工隧道中由于探测空间狭小、电磁干扰巨大、可用时间较短等原因，导致目前尚没有十分有效实用的超前地质预报技术与装置。

发明内容

本发明的目的是为克服上述现有技术的不足，提供一种 TBM 施工隧道前向三维激发极化法超前探测装置系统及方法，其基本原理是在掌子面四周或边墙底板布置屏蔽电极系统，在掌子面上布置层析探测供电与测量系统，在屏蔽电流系统的作用下，层析探测供电电流指向掌子面前方，此时后方的 TBM 机械对探测的电磁干扰很小，可忽略；利用这种前向三维激发极化探测方法可以获得掌子面前方的三维地质信息，并可利用激发极化半衰时之差与水量的关系定量的预报含水体的水量大小。

为实现上述目的，本发明采用下述技术方案：

一种 TBM 施工隧道前向三维激发极化法超前探测装置系统，在 TBM 主体内设有主控室，主控室内设有控制器、前向三维激发极化发射机、前向三维激发极化接收机；在 TBM 主体的刀盘上设有至少一个供电和测量电极舱，其上安装多层岩石耦合集成电极及其支撑装置以及舱门，多层岩石耦合集成电极在工作面上形成相应的侧线；在 TBM 主体工作面后方底板设有供电电极 B 和接收电极 N，岩石耦合集成电极分别通过导线与控制器、前向三维激发极化发射机、前向三维激发极化接收机连接，供电电极 B 和接收电极 N 分别与前向三维激发极化发射机、前向三维激发极化接收机连接；在 TBM 主体前端和四周还设有屏蔽电极舱及其递送装置，屏蔽电极舱安装屏蔽电极 P；在供电和测量电极舱还设有视频监视装置，它与主控室连接。

所述供电和测量电极舱有沿 TBM 主体中心对称分布的左右两个，供电和测量电极舱的舱门分为上下两扇，其中一扇带有凸槽，另一扇带有凹槽；舱门启闭由控制器控制。

所述支撑装置包括平行的三个测线导杆，各测线导杆间通过竖直液压升降装置连接，在各测线导杆两端还设有水平液压扩展装置，中间位置的测线导杆与水平液压递送装置连接；岩石耦合集成电极安装在各测线导杆及两端水平液压扩展装置上；相邻测线导杆之间为 1.5m-2.0m。

所述岩石耦合集成电极包括集成在一起的岩石耦合供电电极 A 和岩石耦合接收电极 M 两部分，其中岩石耦合供电电极 A 包括金属电极，金属电极置于 PVC 外壳内，金属电极顶端为岩石耦合材料，底端与导线连接；岩石耦合接收电极 M 包括不极化电极，它置于另一 PVC 外壳内，其顶端是电极帽，底端与导线连接。

所述视频监视装置由前置摄像机和多视窗显示器构成，前置摄像机安装在供电和测量电极舱内，且带有照明灯，并将画面传输到显示器，显示器安设在 TBM 主控室内，前置摄像机由控制器控制。

所述屏蔽电极舱及其递送装置包括屏蔽电极舱、屏蔽电极 P、液压递送装置，并根据安装位置分工作面屏蔽电极组和护盾屏蔽电极组，工作面屏蔽电极组分布在 TBM 主体刀盘的轮廓线周围，在 TBM 主体前端后方 2-3m 的位置布置一圈护盾屏蔽电极组；屏蔽电极 P 包括金属电极，金属电极置于 PVC 外壳内，金属电极顶端为岩石耦合材料，底端与导线连接，屏蔽电极安装在液压递送装置前端，液压递送装置安装在屏蔽电极舱内，屏蔽电极舱设有舱门，舱门启闭由控制器控制。

所述 TBM 主体工作面后方底板上的供电电极 B 和接收电极 N 距离 TBM 工作面 100-150m。

一种利用 TBM 施工隧道前向三维激发极化法超前探测装置系统的超前探测方法，利用 TBM 施工隧道前向三维激发极化法超前探测装置系统在工作面轮廓线上布置一圈屏蔽电极 P，在掘进工作面后方 2-3m 的边墙底板上布置一圈屏蔽电极，在工作面上布置多条岩石耦合集成电极形成的平行测线；在工作面后方 100-150m 的底板上设供电电极和接收电极；

将供电电极与屏蔽电极供入同向的电流，分别测试多层岩石耦合集成电极与底板接收电极的电势差和半衰时，并改变电流大小测试不同电流下的多层岩石耦合集成电极与底板接收电极的电势差和半衰时；利用测得的电势差数据进行反演，得到工作面前方地质体的三维电阻率图像，实现含水体的三维定位；用测得的半衰时绘出半衰时之差数据与水平距离的关系坐标图，计算半衰时之差与横坐标轴的包络面积，绘制出包络面积的二维剖面图，实现工作面前方水量的估算。

对工作面上的各岩石耦合供电电极 A 供入正电流 I_0 ，底板上的供电电极 B 供入负电流 $-I_0$ ，工作面轮廓线上和工作面后方围岩上的所有屏蔽电极 P 供入与工作面上岩石耦合供电电极 A 同向的正电流，采集工作面上的岩石耦合接收电极 M 同底板上接收电极 N 之间的电势差 U 和半衰时 t ；

各条测线按照上述供电和测量方法采集完数据之后，对工作面上的各单个岩石耦合供电电极 A 供入正电流 $2I_0$ ，对底板上的供电电极 B 供入负电流 $-I_0$ ，重复上述采集数据的步骤。

数据采集完备后，进行含水构造的三维反演成像定位，采用基于障碍函数法不等式约束反演迭代等处理，上述步骤测得的电势差数据 U 进行反演，得到工作面前方地质体的三维电阻率图像，实现含水体的三维定位；采用半衰时数据 t 进行工作面前方水量估算，将上

述步骤中测得的半衰时数据 t ，大小两次电流供电时相同点位的两个半衰时数据做差，分别绘出半衰时之差数据与水平距离的关系坐标图，计算半衰时之差与横坐标轴的包络面积 St ，根据包络面积 St 与水量的大小 V 成线性正相关关系，正值部分为水量的响应，由正值部分的面积估算水量的大小，进而实现对地质灾害源水量的估算。

本发明具有以下有益效果：

1>本发明对 TBM 机械进行了改造设计，提出了一种 TBM 机械上装配的隧道前向三维激发极化法超前探测装置，其包含的主要部件有供电和测量电极舱及其自动支撑装置、屏蔽电极舱及其递送装置、前向三维激发极化发射机、前向三维激发极化接收机、视频监视装置和控制器，均是在对 TBM 现有内部空间环境和装置系统综合考量下的增加和改进，可与 TBM 良好兼容。

2>本发明提出了一种供电和测量电极舱及其自动支撑装置和屏蔽电极舱及其递送装置，能够在控制器的控制下自动快速地完成供电电极系统、测量电极系统和屏蔽电极系统的布置工作，突破了全断面开挖隧道地质超前预报探测空间狭小的难题，并且极大地提高了地质超前预报的工作效率，节约了时间成本和经济成本。

3>本发明提出了一种 TBM 施工隧道前向三维激发极化法超前探测方法，采用了前向探测方式，与现有的 BEAM 法相比，具有更好的超前探测指向性，解决了以往旁侧干扰严重的难题，有效地提高了预报距离；采用层析的方法逐层采集数据，能够探测获得 TBM 掘进工作面前方地质体的三维信息，并且预报含水量、区分自由水和束缚水，解决了以往三维含水体定位和水量预报的难题。

附图说明

图1 是本发明超前探测装置整体安装结构示意图。

图2 是本发明TBM掘进工作面电极系统布置示意图。

图3 是本发明TBM刀盘结构示意图。

图4 是本发明电极舱舱门结构剖面图。

图5 是本发明供电和测量电极舱右舱内部结构示意图。

图6 是本发明供电和测量电极舱右舱舱门打开结构示意图。

图7 是本发明屏蔽电极舱舱门打开结构示意图。

图8 是本发明供电和测量电极舱及其自动支撑装置、屏蔽电极舱及其递送装置（包括工作面屏蔽电极组和护盾屏蔽电极组）地质超前预报工作状态示意图。

图9 是本发明岩石耦合集成电极剖面图。

图10是本发明三维有限元反演网格模型示意图。

图11(a)是本发明半衰时之差数据与探测水平距离关系坐标折线图(已知水量水体1)。

图11(b)是本发明半衰时之差数据与探测水平距离关系坐标折线图(已知水量水体2)。

图11(c)是本发明两次探测已知水量水体所得水量与包络面积关系曲线。

图12 是本发明实际地质超前预报测得的半衰时之差数据与水平距离关系曲线。

图13 是经过水量-激电参数数据库修正得到的水量与包络面积关系曲线。

其中, 1.TBM掘进工作面, 2.围岩, 3.工作面前方不良地质体, 4.TBM主体, 5.刀盘, 6.控制器, 7.前向三维激发极化发射机, 8.前向三维激发极化接收机, 9.主控室, 10.支撑装置, 11.液压递送装置, 12.工作面屏蔽电极组, 13.岩石耦合集成电极, 14.滚刀, 15.供电和测量电极舱左舱, 16.供电和测量电极舱右舱, 17.屏蔽电极舱, 18.电极舱上扇凸槽结构, 19.电极舱下扇凹槽结构, 20.测线导杆, 21.水平液压递送装置, 22.竖直液压升降装置, 23.水平液压扩展装置, 24.前置摄像头, 25.护盾屏蔽电极组, 26.不极化电极, 27.金属电极, 28.导线, 29.电极帽, 30.岩石耦合材料, 31.PVC外壳

另外, 图1中字母含义分别为A(岩石耦合供电电极)、B(供电电极)、M(岩石耦合接收电极)、N(接收电极)、P(屏蔽电极)。

具体实施方式

下面通过具体实例和附图对本发明进行进一步的阐述。

本发明所述的一切工作均在TBM主控室9内实现。首先介绍TBM掘进工作面供电和测量电极系统的布置过程。

如图1、2所示, TBM主体4向前掘进时, 控制器6控制刀盘5上的供电和测量电极舱左舱15和供电和测量电极舱右舱16的舱门处于关闭状态, 以保护舱室内部的三层岩石耦合集成电极及其支撑装置10不受磨损。当TBM主体4停止掘进后, 开始地质超前预报工作前, 控制器6控制供电和测量电极舱左舱15和供电和测量电极舱右舱16的舱门同时开启, 并控制各水平液压递送装置21将嵌有岩石耦合集成电极13的平行的三个测线导杆20推向掘进工作面1。舱门为上下双扇, 电极舱上扇凸槽结构18带有凸槽, 电极舱下扇凹槽结构19带有凹槽, 闭合时严丝合缝, 密闭性好。

在接近工作面1时, 控制器6暂停水平液压递送装置21, 启动竖直液压升降装置22, 将上、下两侧线导杆20分别向上、向下等距离推送1.5m-2.0m。推至预定距离后, 控制器6停止竖直液压升降装置22, 启动水平液压扩展装置23, 将各测线导杆20分别向两侧延伸, 尽可能地保证测线导杆20的长度能够达到整个掘进工作面的断面尺寸。控制器6停止水平液压扩展装置23, 启动水平液压递送装置21, 继续将平行的三个测线导杆20推送至TBM掘进工作面1, 使各测线导杆20上的所有岩石耦合集成电极13完全与工作面1紧密接触。

岩石耦合集成电极 13 是岩石耦合供电电极 A 和岩石耦合接收电极 M 的组合,如图 9 所示,其中岩石耦合供电电极 A 包括金属电极 27,金属电极 27 置于 PVC 外壳 31 内,金属电极 27 顶端为岩石耦合材料 30,底端与导线 28 连接;岩石耦合接收电极 M 包括不极化电极 26,它置于另一 PVC 外壳 31 内,其顶端是电极帽 29,底端与导线 28 连接。

当岩石耦合集成电极 13 与工作面 1 紧密接触时,金属电极 27 和不极化电极 26 就通过耦合材料 30 (一般为导电胶)与岩石良好耦合,耦合材料 30 就储存在电极帽 29 内部,PVC 外壳 31 的设计是为了与平行三测线导杆 20 之间绝缘,保证供电电流只传输到工作面 1。将供电和测量电极舱左舱 15 和供电和测量电极舱右舱 16 中的平行三测线导杆 20 同时推至工作面 1,完成工作面 1 上完整的三条平行测线布置。

前置摄像头 24 安装在供电和测量电极舱左舱 15 和/或供电和测量电极舱右舱 16 内部,设计为防尘、防水和防震动,且带有灯光照明功能,能够清晰地捕捉到电极系统在工作面上布置的过程,并将画面传输到主控室 9 内的多视窗显示器上。在距离工作面 1 无穷远处(如工作面后方 100m-150m)底板上,布置一根岩石耦合供电电极 B 和一根岩石耦合接收电极 N。

控制器 6 安装在主控室 9 内,主要控制供电和测量电极舱舱门的开启和关闭及其自动支撑装置的收放、控制屏蔽电极舱舱门的开启和关闭及其液压递送装置的收放,控制前置摄像机镜头的转动以捕捉电极系统布置的整个过程。

接下来,介绍屏蔽电极系统的布置过程。

屏蔽电极 P 分为工作面屏蔽电极组 12 和护盾屏蔽电极组 25 两部分,它们结构相同,如图 7 所示,均包括一个屏蔽电极舱 17,其内设有液压递送装置 11,液压递送装置 11 前端为屏蔽电极 P。屏蔽电极 P 与岩石耦合供电电极 A 结构相同,包括金属电极 27,金属电极 27 置于 PVC 外壳 31 内,金属电极 27 顶端为岩石耦合材料 30,底端与导线 28 连接。

工作面屏蔽电极组 12 的安装位置靠近刀盘 5 轮廓线(在刀盘 5 上),护盾屏蔽电极组 25 的安装位置则是围绕护盾一圈(在护盾上,距离工作面 1 约 2.0m-3.0m)。TBM 主体 4 向前掘进时,控制器 6 控制屏蔽电极舱 17 舱门处于关闭状态,保护内部的屏蔽电极 P 和液压递送装置 11 不受磨损。当 TBM 主体 4 停止掘进后,开始地质超前预报工作前,控制器 6 控制所有屏蔽电极舱 17 舱门打开,并控制液压递送装置 11 将屏蔽电极 P 推送至工作面 1 或工作面 1 后方(2.0m-3.0m)围岩 2 上,直至所有屏蔽电极 P 与工作面 1 或工作面后方围岩 2 紧密接触。屏蔽电极 P 内只由一根金属电极 27,没有不极化电极 26,属于岩石耦合供电电极。

电极系统布置完成后,便开始数据采集的工作。所有供电电极和屏蔽电极 P 通过导线连接到前向三维激发极化发射机 7 上,所有接收电极通过导线连接到前向三维激发极化接收机 8 上。前向三维激发极化发射机 7 可同时发射多路供电电流,前向三维激发极化接收机 8 用于控制接收电极测量电势差 U 及半衰时 t。数据采集完后,对数据进行解译处理,预报 TBM 掘进工作面 1 前方地质体的三维信息并预测含水量。处理结果可显示在主控室 6 内的多视窗显示器上。

下面,介绍前向三维激发极化法超前探测方法的实现过程。

①采用前向层析的方法逐层采集数据,首先对工作面上 1 的各岩石耦合供电电极 A 供入正电流 I_0 ,底板上的供电电极 B 供入负电流 $-I_0$,工作面 1 轮廓线上和工作面 1 后方围岩上的所有屏蔽电极 P 供入与工作面 1 上岩石耦合供电电极 A 同向的正电流,采集工作面 1 上的岩石耦合接收电极 M 同底板上接收电极 N 之间的电势差 U 和半衰时 t。所有三条测线按照上述供电和测量方法采集完数据之后,对工作面 1 上的各单个岩石耦合供电电极 A 供入正电流 $2I_0$,对底板上的供电电极 B 供入负电流 $-I_0$,重复上述采集数据的步骤。

②数据采集完备后,进行含水构造的三维反演成像定位,采用基于障碍函数法不等式约束反演迭代进行处理,上述步骤测得的电势差数据 U 进行反演,得到工作面前方地质体的三维电阻率图像,实现含水体的三维定位。具体步骤如下:

综合考虑光滑约束和不等式约束,提出如下反演目标函数:

$$\begin{aligned} \Phi &= (d_{obs} - d_m)^T (d_{obs} - d_m) + \lambda (Cm)^T (Cm) \\ \text{subject to } \quad &\rho_{min_i} \leq m_i \leq \rho_{max_i} \end{aligned} \quad (1)$$

式中, d_{obs} 为实际观测数据, d_m 为正演得到的理论观测数据, m 为模型参数向量, C 为光滑度矩阵, λ 为拉格朗日常数,决定了光滑约束的权重, m_i 为第 i 个网格的电阻率, ρ_{min_i} 和 ρ_{max_i} 分别为第 i 个网格的电阻率的下限和上限。需要指出的是,电阻率的变化范围可以根据一般常识获得的较为宽泛的一个范围,也可以是根据钻孔等方式获得的较为精确的一个范围。

求式(1)的极小值问题是一个典型的携带不等式约束的二次规划问题,对不等式约束的处理是求解该问题的关键。采用障碍函数法将不等式约束的信息嵌入到目标函数中,在式(1)的基础上构造增广目标函数,如式(2):

$$\begin{aligned} \Phi' &= \Phi + \mu F \\ &= \Phi - 2\mu \left\{ \sum_{i=1}^M \ln\left(\frac{m_i}{\rho_{min_i}} - 1\right) + \sum_{i=1}^M \ln\left(1 - \frac{m_i}{\rho_{max_i}}\right) \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

式中, μ 恒大于零, 为障碍因子, Φ' 为增广目标函数, Φ 为目标函数, F 为不等式约束变量, M 为网格电阻率参数个数。

采用牛顿法(Newton Method)求解增广目标函数的最优化问题, 得到下式:

$$\begin{aligned} & (A^T A + \lambda C^T C + \mu_k X^{-2} + \mu_k Y^{-2}) \Delta m \\ & = A^T \Delta d - \lambda C^T C m + \mu_k (X^{-1} - Y^{-1}) e \end{aligned} \quad (3)$$

式中, A 为偏导数矩阵, Δm 为模型参数增量向量, Δd 为观测数据, $\Delta d = d_{obs} - d_m$, $e = (1, 1, \dots, 1)^T$, Y 都是对角矩阵, X 矩阵的对角线元素为 $m_i - \rho \min_i$ ($i=1, 2, M$), Y 矩阵的对角线元素为 $\rho \max_i - m_i$ ($i=1, 2, M$), μ_k 为 μ 在计算过程中所取的严格单调递减且趋于零的一个序列。

线性方程组(3)是含有不等式约束的反演成像方程, 障碍函数的施加使得反演搜索范围被限定在可行域内, 由于增加了不等式约束这种重要的先验信息, 使得反演多解性得到改善, 对提高反演效果具有积极作用。

进行反演成像时, 首先建立三维有限元反演模型(如图 10 所示), 设定网格电阻率的初值, 确定网格电阻率的变化范围; 然后, 利用有限单元法进行数值正演, 正演中大型线性方程组利用 cholesky 分解法求解, 得到相应的理论观测数据 d_m ; 进行反演收敛判断, 若理论观测数据与实际观测数据之间的误差满足收敛判据(收敛判据为 $rms < \varepsilon_{inv}$, 其中 rms 为观测数据 d_{obs} 与正演理论值 d_m 之间的均方误差, ε_{inv} 为反演收敛的容许值), 将此时得到的模型参数作为反演结果输出。反之进行下一步计算; 计算偏导数矩阵、光滑度矩阵以及矩阵 X 和 Y , 求解反演方程(3), 得到模型增量 Δm ; 计算得到新一代模型参数, 按照递减数列更新 μ , 执行第(2)步, 进入下一循环。直至正演的理论观测数据与测量数据的方差小于设定值(根据用户所要求反演的精度不同, 设定值不一样, 反演精度高, 则设定值较小, 反之设定值较大), 输出模型参数。从而反演得到工作面前方地质体的三维电阻率图像, 实现含水体的三维定位。

③采用半衰时数据 t 进行工作面前方水量估算, 将上述步骤中测得的半衰时数据 t , 大小两次电流供电时相同点位的两个半衰时数据做差, 分别绘出半衰时之差数据与水平距离的关系坐标图, 计算半衰时之差与横坐标轴的包络面积 St , 根据包络面积 St 与水量的大小

V 成线性正相关关系，正值部分为水量的响应，由正值部分的面积估算水量的大小，进而实现对地质灾害源水量的估算。

在具体的工程中应用时，步骤如下：

首先找到两个以上的已知水量水体，进行试验性探测，如图 11(a)和图 11(b)所示，获得探测结果，并测取实际开挖后的含水构造的水量，建立水量 V 与激电信息 St（半衰时之差与横轴的包络面积）初步的数学线性关系表达式 $y=ax+b$ ，如图 11(c)所示，将实测水量和半衰时之差数据放入水量-激电参数数据库。

在实际地质超前预报工作中，利用水量-激电参数数据库中得到的数学表达式 $y=ax+b$ 和实测半衰时之差数据（如图 12 所示）进行水量估算。

测取实际开挖后的含水体水量，并修正预测数据（如图 13 所示），将实测水量和半衰时之差数据放入水量-激电参数数据库，再根据数据库中的数据修正数学关系式，以便进行后续的水量预报工作。

同时，试验数据还表明，半衰时之差参数对于自由水和束缚水具有较强的区分能力，半衰时之差为正值时，反映的是自由水的水量；半衰时之差为负值时，反映的是束缚水的存在情况。

整个数据采集的过程中，供电电流和屏蔽电流的激发是通过主控室 6 内的前向三维激发极化发射机 7 实现的，电势差和半衰时采集和计算是通过主控室 6 内的前向三维激发极化接收机 8 实现的，经过反演得到的工作面前方地质体的三维电阻率图像以及半衰时之差数据与水平距离的关系坐标图将在操作台上的多屏显示器上显示。

本发明未详述内容均为现有技术，不再赘述。

1.一种 TBM 施工隧道前向三维激发极化法超前探测装置系统,其特征在于,在 TBM 主体内设有主控室,主控室内设有控制器、前向三维激发极化发射机、前向三维激发极化接收机;在 TBM 主体的刀盘上设有至少一个供电和测量电极舱,其上安装多层岩石耦合集成电极及其支撑装置以及舱门,多层岩石耦合集成电极在工作面上形成相应的侧线;在 TBM 主体工作面后方底板设有供电电极 B 和接收电极 N,岩石耦合集成电极分别通过导线与控制器、前向三维激发极化发射机、前向三维激发极化接收机连接,供电电极 B 和接收电极 N 分别与前向三维激发极化发射机、前向三维激发极化接收机连接;在 TBM 主体前端和四周还设有屏蔽电极舱及其递送装置,屏蔽电极舱安装屏蔽电极 P;在供电和测量电极舱还设有视频监视装置,它与主控室连接。

2.如权利要求 1 所述的 TBM 施工隧道前向三维激发极化法超前探测装置系统,其特征在于,所述供电和测量电极舱有沿 TBM 主体中心对称分布的左右两个,供电和测量电极舱的舱门分为上下两扇,其中一扇带有凸槽,另一扇带有凹槽;舱门启闭由控制器控制。

3.如权利要求 1 所述的 TBM 施工隧道前向三维激发极化法超前探测装置系统,其特征在于,所述支撑装置包括平行的三个测线导杆,各测线导杆间通过竖直液压升降装置连接,在各测线导杆两端还设有水平液压扩展装置,中间位置的测线导杆与水平液压递送装置连接;岩石耦合集成电极安装在各测线导杆及两端水平液压扩展装置上;相邻测线导杆之间为 1.5m-2.0m。

4.如权利要求 1 或 3 所述的 TBM 施工隧道前向三维激发极化法超前探测装置系统,其特征在于,所述岩石耦合集成电极包括集成在一起的岩石耦合供电电极 A 和岩石耦合接收电极 M 两部分,其中岩石耦合供电电极 A 包括金属电极,金属电极置于 PVC 外壳内,金属电极顶端为岩石耦合材料,底端与导线连接;岩石耦合接收电极 M 包括不极化电极,它置于另一 PVC 外壳内,其顶端是电极帽,底端与导线连接。

5.如权利要求 1 所述的 TBM 施工隧道前向三维激发极化法超前探测装置系统,其特征在于,所述视频监视装置由前置摄像机和多视窗显示器构成,前置摄像机安装在供电和测量电极舱内,且带有照明灯,并将画面传输到显示器,显示器安设在 TBM 主控室内,前置摄像机由控制器控制。

6.如权利要求 1 所述的 TBM 施工隧道前向三维激发极化法超前探测装置系统,其特征在于,所述屏蔽电极舱及其递送装置包括屏蔽电极舱、屏蔽电极 P、液压递送装置,并根据安装位置分工作面屏蔽电极组和护盾屏蔽电极组,工作面屏蔽电极组分布在 TBM 主体刀盘的轮廓线周围,在 TBM 主体前端后方 2-3m 的位置布置一圈护盾屏蔽电极组;屏蔽电极 P 包括金属电极,金属电极置于 PVC 外壳内,金属电极顶端为岩石耦合材料,底端与导线连

接,屏蔽电极安装在液压递送装置前端,液压递送装置安装在屏蔽电极舱内,屏蔽电极舱设有舱门,舱门启闭由控制器控制。

7.如权利要求1所述的TBM施工隧道前向三维激发极化法超前探测装置系统,其特征在于,所述TBM主体工作面后方底板上的供电电极B和接收电极N距离TBM工作面100-150m。

8.一种利用权利要求1所述的TBM施工隧道前向三维激发极化法超前探测装置系统的超前探测方法,其特征在于,利用TBM施工隧道前向三维激发极化法超前探测装置系统在工作面轮廓线上布置一圈屏蔽电极P,在掘进工作面后方2-3m的边墙底板上布置一圈屏蔽电极,在工作面上布置多条岩石耦合集成电极形成的平行测线;在工作面后方100-150m的底板上设供电电极和接收电极;

将供电电极与屏蔽电极供入同向的电流,分别测试多层岩石耦合集成电极与底板接收电极的电势差和半衰时,并改变电流大小测试不同电流下的多层岩石耦合集成电极与底板接收电极的电势差和半衰时;利用测得的电势差数据进行反演,得到工作面前方地质体的三维电阻率图像,实现含水体的三维定位;用测得的半衰时绘出半衰时之差数据与水平距离的关系坐标图,计算半衰时之差与横坐标轴的包络面积,绘制出包络面积的二维剖面图,实现工作面前方水量的估算。

9.如权利要求8所述的TBM施工隧道前向三维激发极化法超前探测装置系统的超前探测方法,其特征在于,对工作面上的各岩石耦合供电电极A供入正电流 I_0 ,底板上的供电电极B供入负电流 $-I_0$,工作面轮廓线上和工作面后方围岩上的所有屏蔽电极P供入与工作面上岩石耦合供电电极A同向的正电流,采集工作面上的岩石耦合接收电极M同底板上接收电极N之间的电势差U和半衰时t;

各条测线按照上述供电和测量方法采集完数据之后,对工作面上的各单个岩石耦合供电电极A供入正电流 $2I_0$,对底板上的供电电极B供入负电流 $-I_0$,重复上述采集数据的步骤。

10.如权利要求8所述的TBM施工隧道前向三维激发极化法超前探测装置系统的超前探测方法,其特征在于,数据采集完备后,进行含水构造的三维反演成像定位,采用基于光滑约束的最小二乘反演迭代等处理,上述步骤测得的电势差数据U进行反演,得到工作面前方地质体的三维电阻率图像,实现含水体的三维定位;采用半衰时数据t进行工作面前方水量估算,将上述步骤中测得的半衰时数据t,大小两次电流供电时相同点位的两个半衰时数据做差,分别绘出半衰时之差数据与水平距离的关系坐标图,计算半衰时之差与横坐标轴的包络面积 St ,根据包络面积 St 与水量的大小V成线性正相关关系,正值部分为水量

的响应，由正值部分的面积估算水量的大小，进而实现对地质灾害源水量的估算，利用半衰时之差的特性，区分自由水和束缚水，即半衰时之差为正值时，反映的是自由水的水量；半衰时之差为负值时，反映的是束缚水的存在情况。

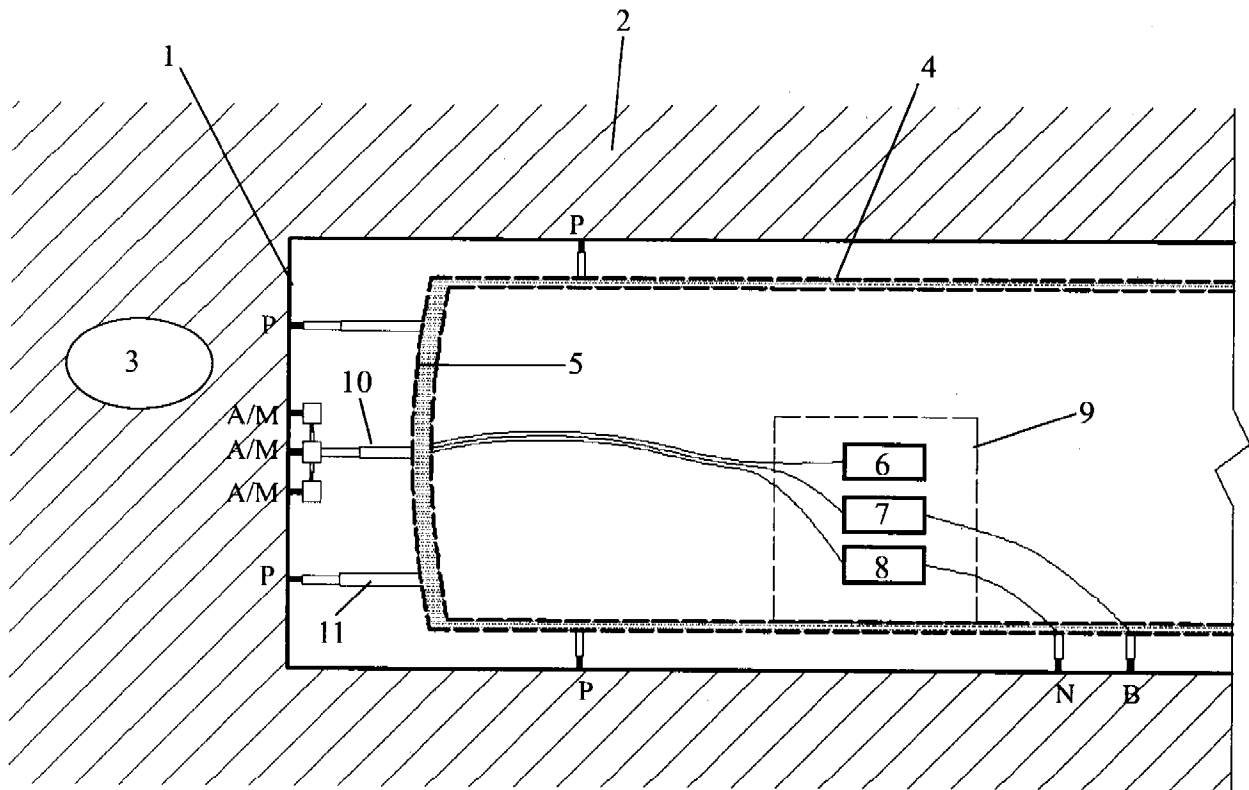


图 1

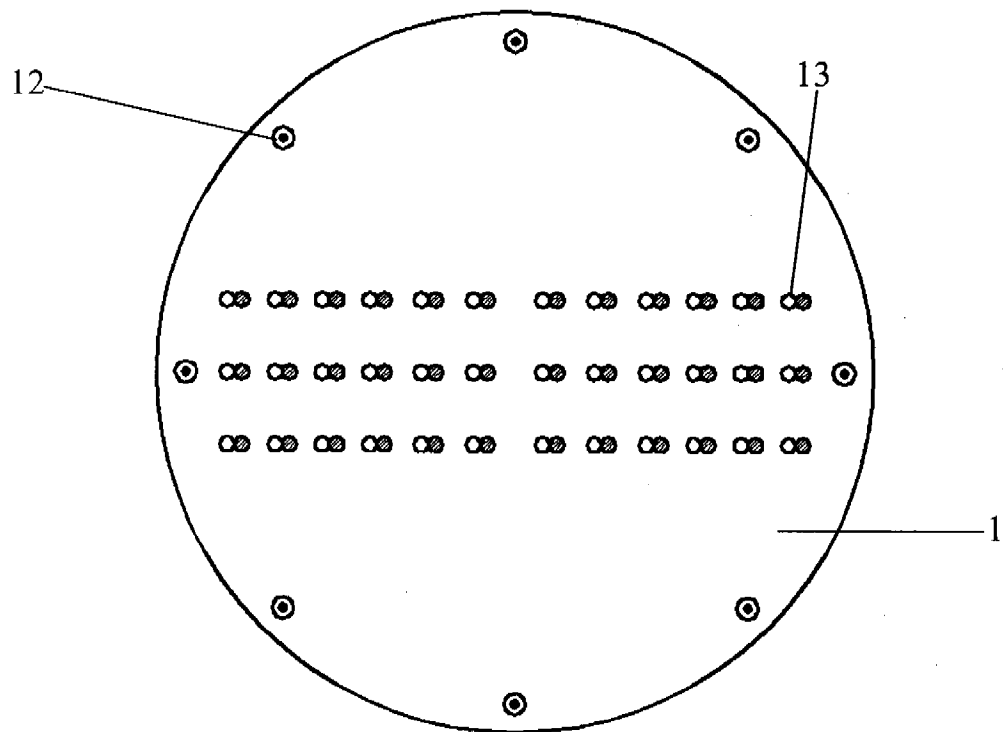


图 2

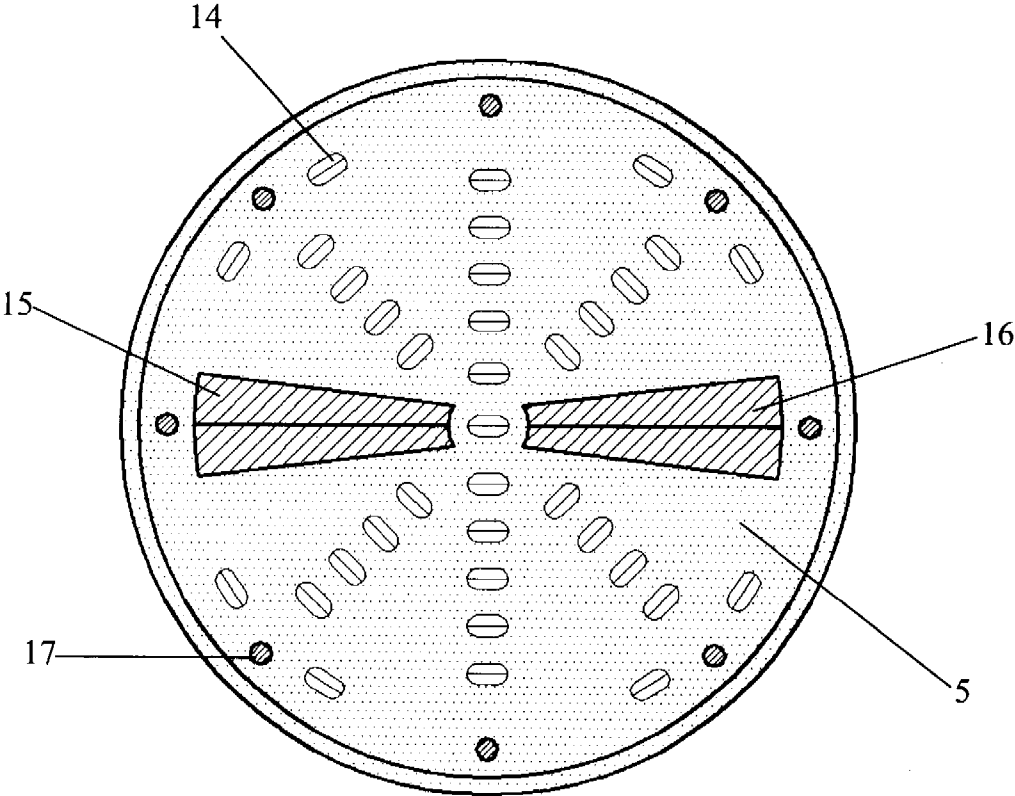


图 3

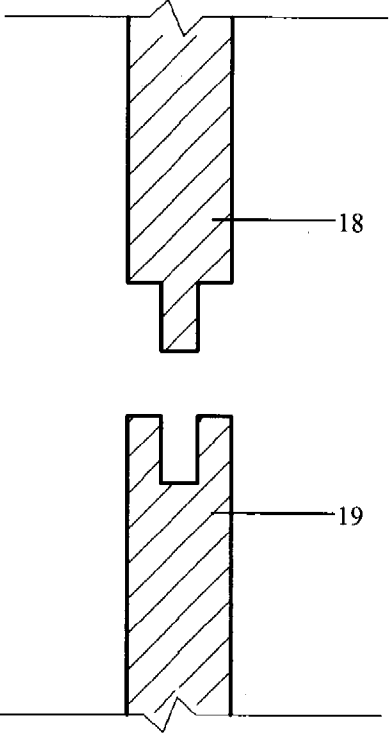


图 4

3/7

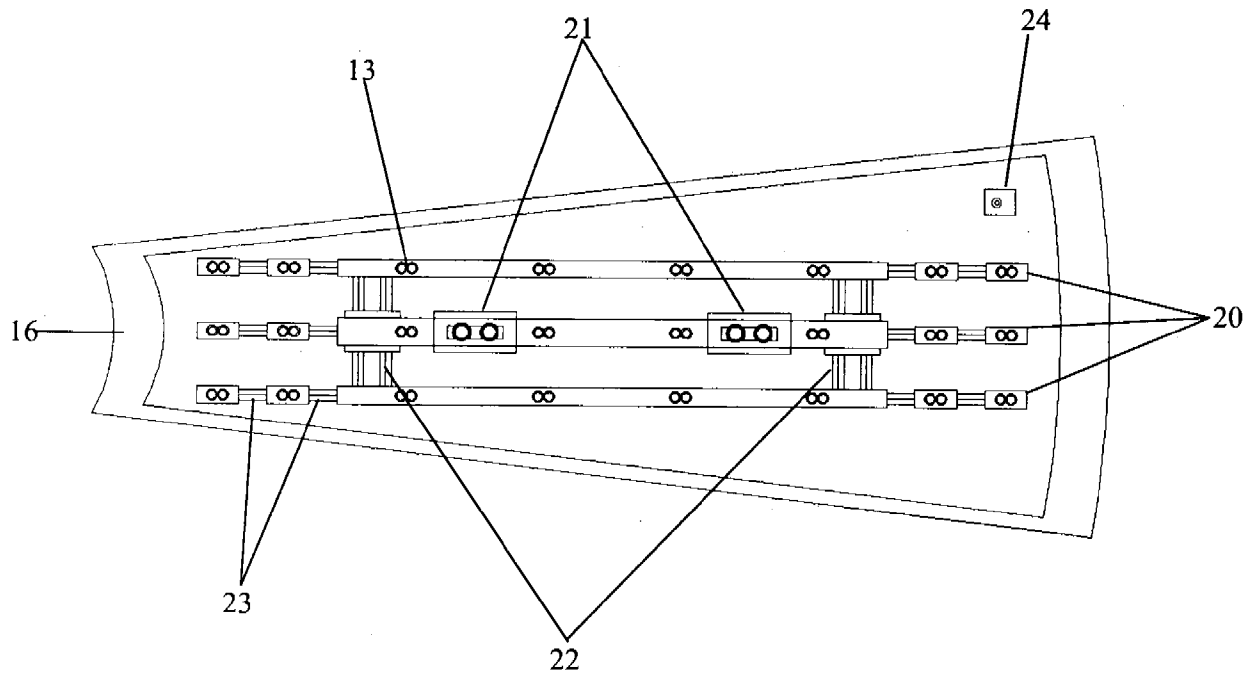


图 5

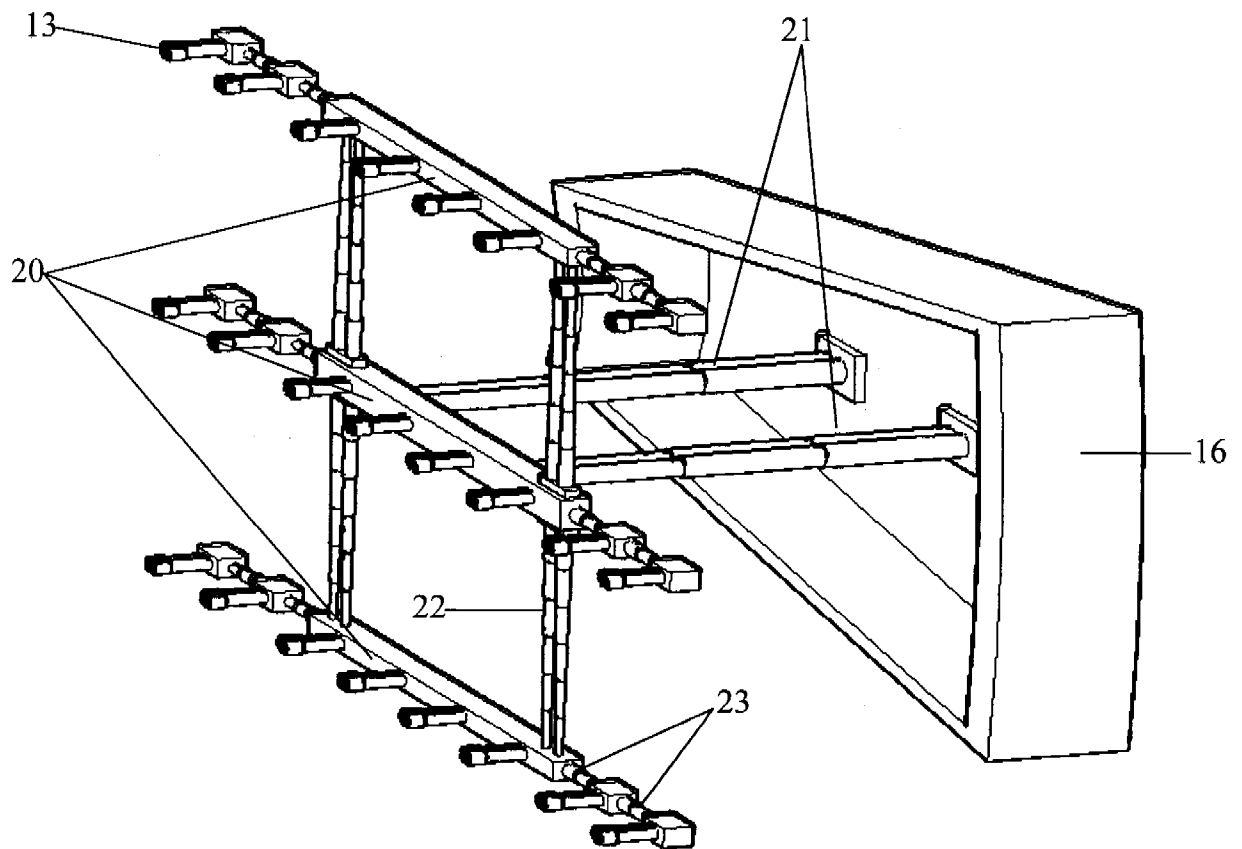


图 6

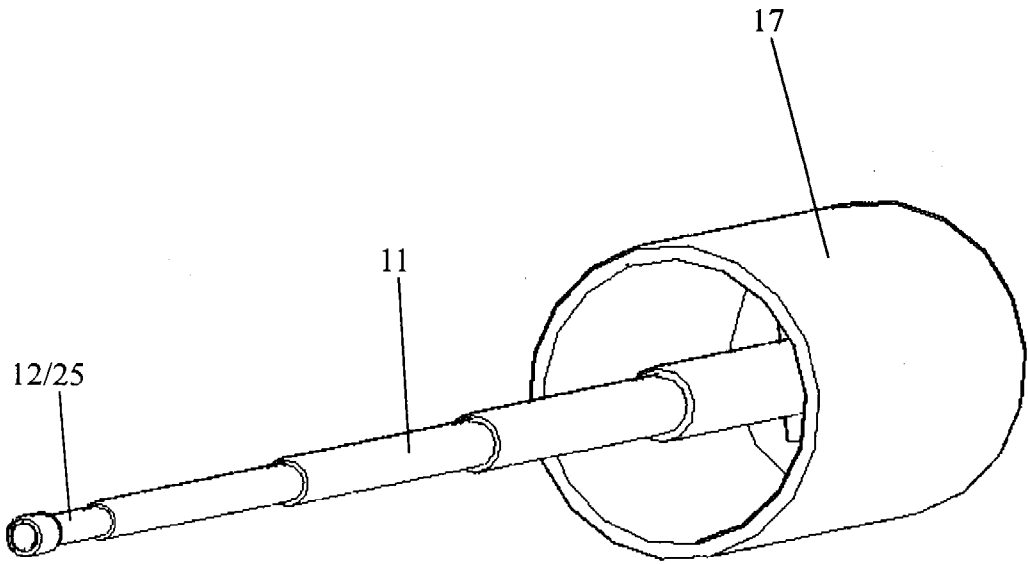


图 7

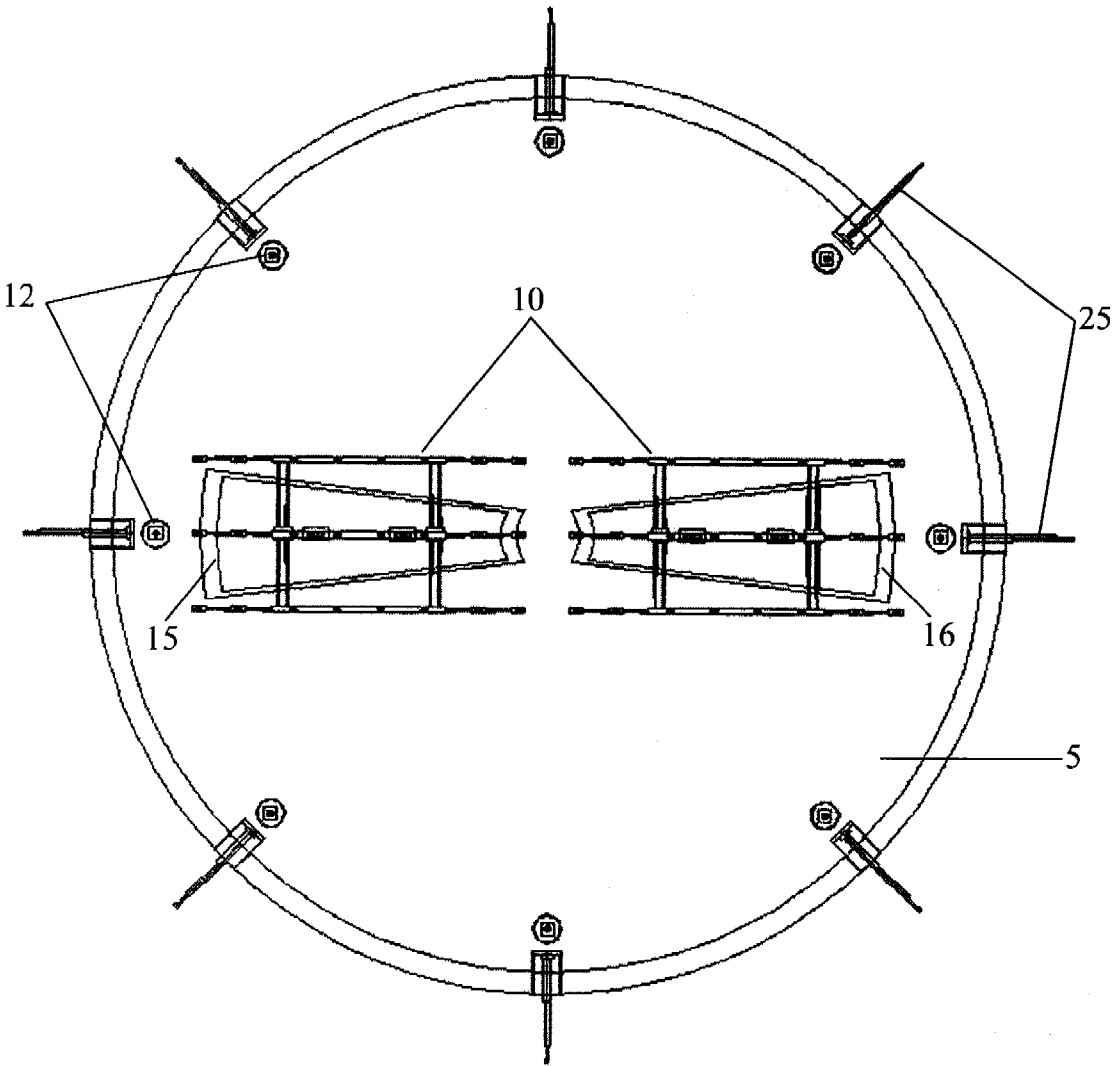


图 8

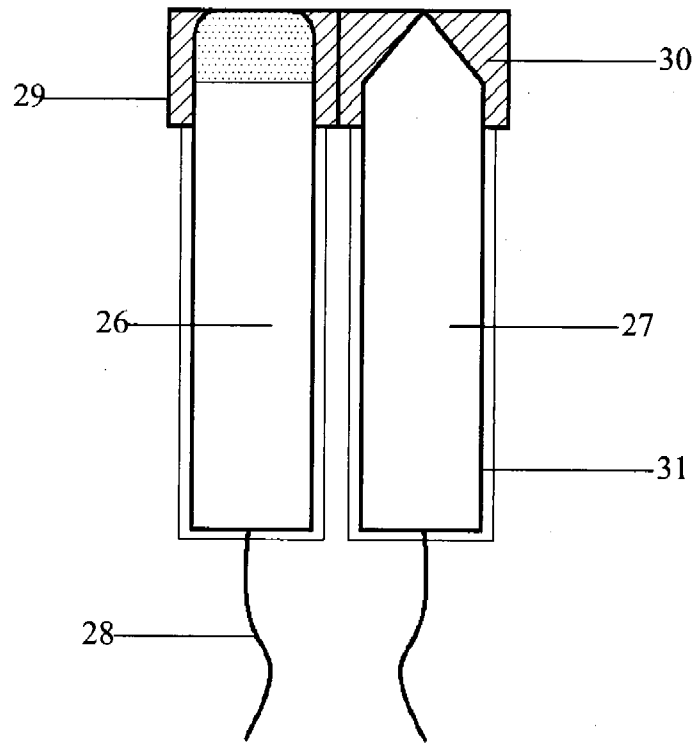


图 9

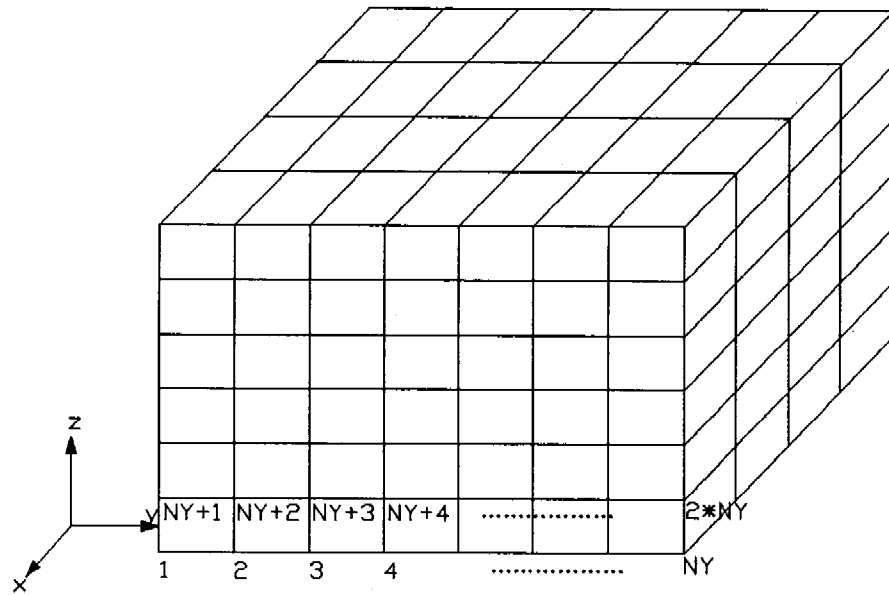


图 10

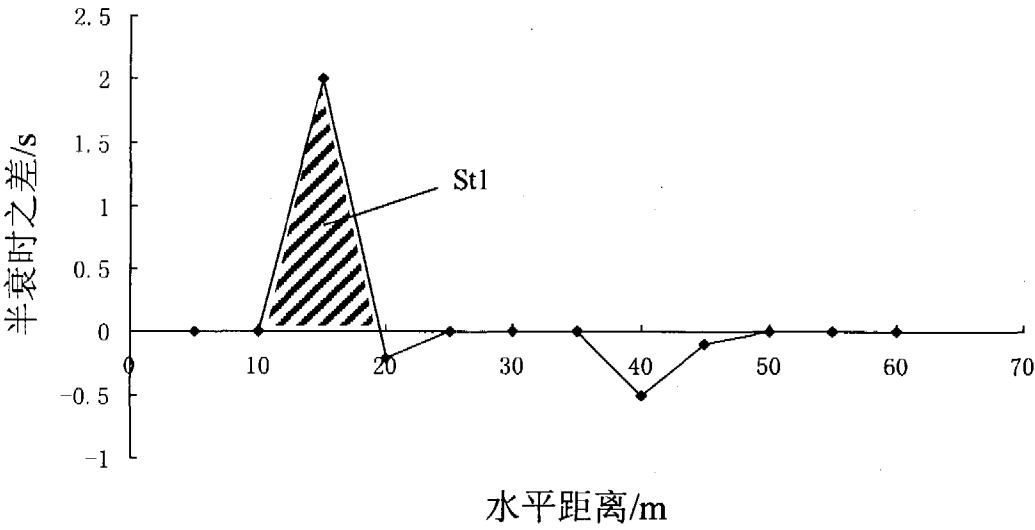


图 11(a)

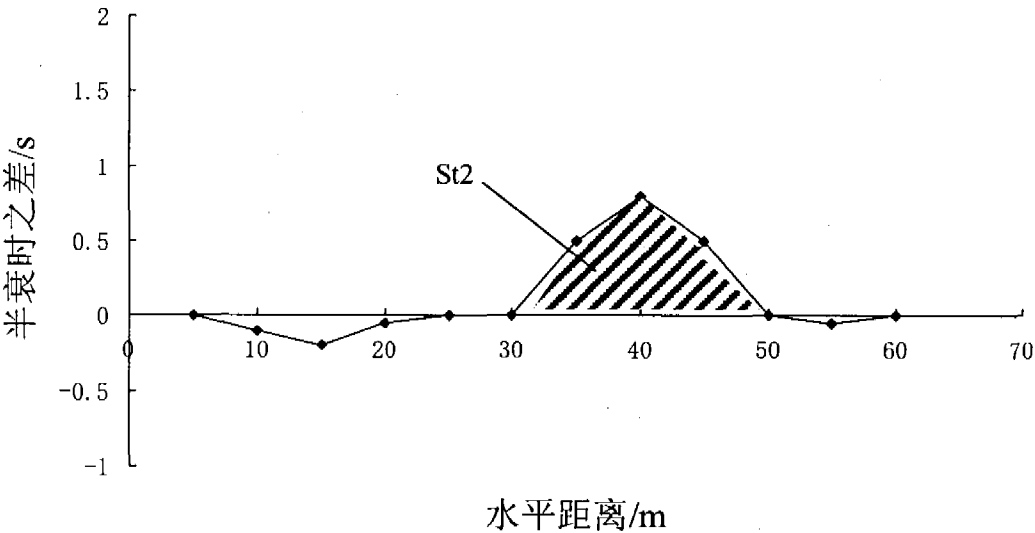


图 11(b)

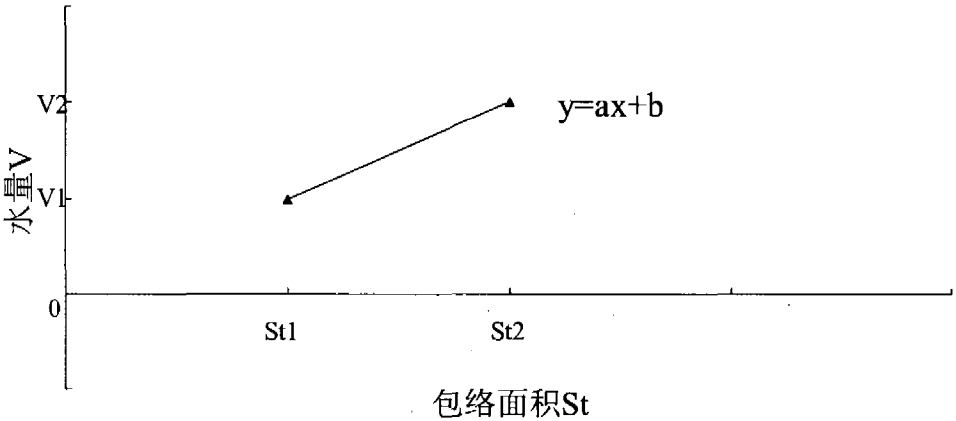


图 11(c)

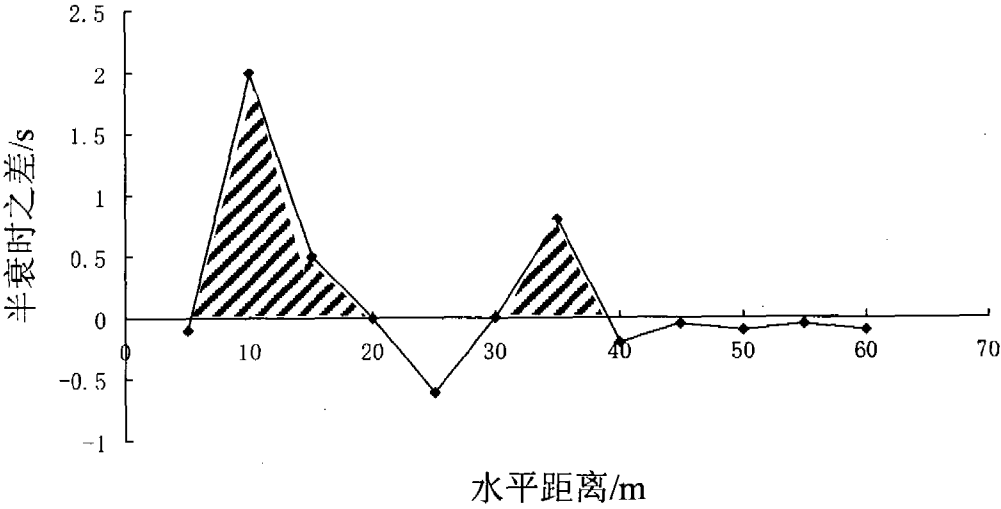


图 12

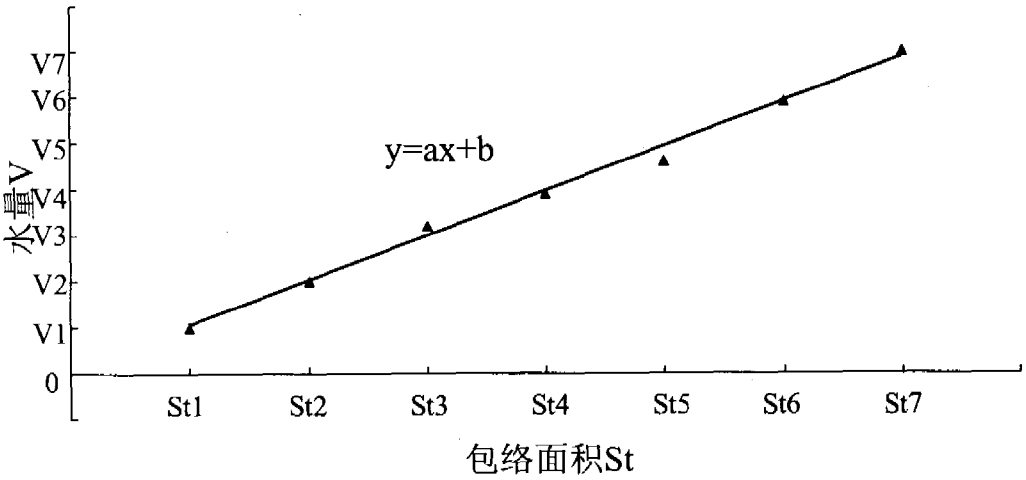


图 13

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2013/000041

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

See the extra sheet

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)

IPC: G01V

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)

CNABS, CNTXT, VEN, CJFD,

TBM, tunnel???, bor???, three dimensional, polarization, electrode, current, shield???, water, half time, resistivity, rock coupling
integrated electrode

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	CN 102508303 A (UNIV SHANDONG) 20 June 2012 (20.06.2012) claims 1-5, description, paragraphs [0041] to [0047] and figures 1, 2(a), 2(b) and 2(c)	1-10
A	CN 102645669 A (UNIV SHANDONG) 22 August 2012 (22.08.2012) the whole document	1-10
A	CN 102419454 A (INSTITUTE OF GEOLOGY AND GEOPHYSICS, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES) 18 April 2012 (18.04.2012) the whole document	1-10
A	CN 102681008 A (INSTITUTE OF GEOLOGY AND GEOPHYSICS, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES) 19 September 2012 (19.09.2012) the whole document	1-10

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"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
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"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
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"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
"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)	"&" document member of the same patent family
"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	

Date of the actual completion of the international search 16 September 2013 (16.09.2013)	Date of mailing of the international search report 10 October 2013 (10.10.2013)
Name and mailing address of the ISA State Intellectual Property Office of the P. R. China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088, China Facsimile No. (86-10) 62019451	Authorized officer HU, Yuelan Telephone No. (86-10) 62085736

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2013/000041

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 101261325 A (ZHONGTIE SOUTHWEST SCI RES INST CO LTD) 10 September 2008 (10.09.2008) the whole document	1-10
A	US 2010/0148566 A1 (ROBBINS CO et al.) 17 June 2010 (17.06.2010) the whole document	1-10

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2013/000041

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 102508303 A	20.06.2012	None	
CN 102645669 A	22.08.2012	None	
CN 102419454 A	18.04.2012	None	
CN 102681008 A	19.09.2012	None	
CN 101261325 A	10.09.2008	CN 101261325 B	09.06.2010
US 2010/0148566 A1	17.06.2010	US 7832960 B	16.11.2010
		WO 2010078033 A	08.07.2010

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2013/000041

CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER:

G01V 3/04 (2006.01) i

G01V 3/02 (2006.01) i

G01V 3/00 (2006.01) i

G01V 1/00 (2006.01) i

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2013/000041

A. 主题的分类

参见附加页

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)

IPC: G01V

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))

CNABS, CNTXT, VEN, CJFD, 全断面隧道掘进机, 隧道, 三维激发极化法, 激电法, 岩石耦合集成电极, 电极, 电流, 屏蔽, 含水, 半衰时, 电阻率

TBM, tunnel???, bor???, three dimensional, polarization, electrode, current, shield???, water, half time, resistivity

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
X	CN 102508303 A (山东大学) 20.6 月 2012 (20.06.2012) 权利要求 1-5, 说明书第【0041】段至第【0047】段, 附图 1, 附图 2(a)、2(b)、2(c)	1-10
A	CN 102645669 A (山东大学) 22.8 月 2012 (22.08.2012) 全文	1-10
A	CN 102419454 A (中国科学院地质与地球物理研究所) 18.4 月 2012 (18.04.2012) 全文	1-10
A	CN 102681008 A (中国科学院地质与地球物理研究所) 19.9 月 2012 (19.09.2012) 全文	1-10
A	CN 101261325 A (中铁西南科学研究院有限公司) 10.9 月 2008 (10.09.2008) 全文	1-10
A	US 2010/0148566 A1 (ROBBINS CO et al.) 17.6 月 2010 (17.06.2010) 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

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

16.9 月 2013 (16.09.2013)

国际检索报告邮寄日期

10.10 月 2013 (10.10.2013)

ISA/CN 的名称和邮寄地址:

中华人民共和国国家知识产权局

中国北京市海淀区蓟门桥西土城路 6 号 100088

传真号: (86-10)62019451

受权官员

胡跃澜

电话号码: (86-10) **62085736**

国际检索报告

关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2013/000041

检索报告中引用的 专利文件	公布日期	同族专利	公布日期
CN 102508303 A	20.06.2012	无	
CN 102645669 A	22.08.2012	无	
CN 102419454 A	18.04.2012	无	
CN 102681008 A	19.09.2012	无	
CN 101261325 A	10.09.2008	CN 101261325 B	09.06.2010
US 2010/0148566 A1	17.06.2010	US 7832960 B	16.11.2010
		WO 2010078033 A	08.07.2010

主题的分类:

G01V 3/04 (2006.01) i

G01V 3/02 (2006.01) i

G01V 3/00 (2006.01) i

G01V 1/00 (2006.01) i