(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
2025 年 6 月 19 日 (19.06.2025)

WIPO | PCT

(10) 国际公布号
WO 2025/124394 A1

(51) 国际专利分类号:
*G01N 15/08* (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2024/138229

(22) 国际申请日: 2024 年 12 月 10 日 (10.12.2024)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
202311705174.3 2023年12月11日 (11.12.2023) 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 250061 (CN)。

(72) 发明人: 许振浩 (**XU, Zhenhao**); 中国山东省济南市历下区经十路17923号 250061 (CN)。 潘东东 (**PAN, Dongdong**); 中国山东省济南市历下区经十路17923号 250061 (CN)。 赵晟喆 (**ZHAO, Shengzhe**); 中国山东省济南市历下区经十路17923号 250061 (CN)。 卜泽华 (**BU, Zehua**); 中国山东省济南市历下区经十路17923号 250061 (CN)。 韦仙松 (**WEI, Xiansong**); 中国山东省济南市历下区经十路17923号 250061 (CN)。 张一驰 (**ZHANG, Yichi**); 中国山东省济南市历下区经十路17923号 250061 (CN)。 杨梦宇 (**YANG, Mengyu**); 中国山东省济南市历下区经十路17923号 250061 (CN)。 葛帅飞 (**GE, Shuaifei**); 中国山东省济南市历下区经十路17923号 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.**); 中国山东省济南市历下区经十路17703号华特广场B510室 250014 (CN)。

(54) **Title:** POROUS MEDIA GROUTING TEST SYSTEM AND METHOD TAKING TEMPERATURE EFFECTS INTO CONSIDERATION

(54) 发明名称: 一种考虑温度效应的孔隙介质注浆试验系统及方法

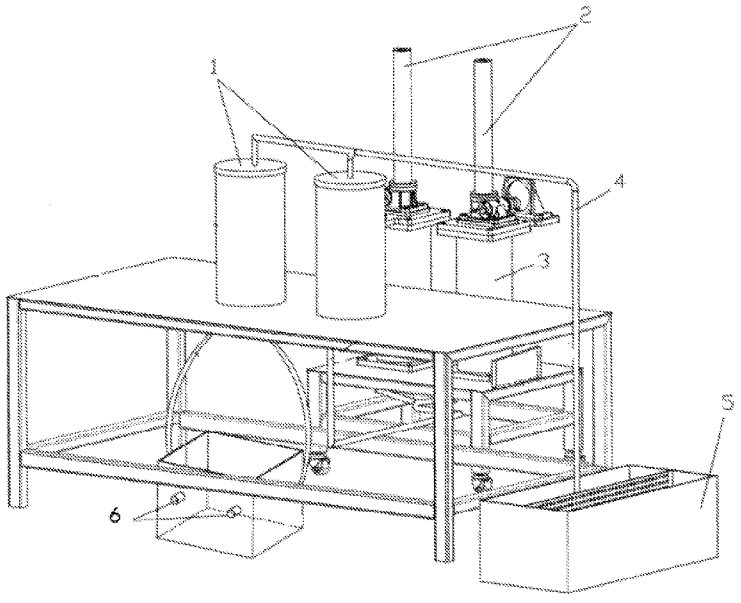


图 1

(57) **Abstract:** A porous media grouting test system and method taking temperature effects into consideration. The system comprises a porous media formation simulation model (1), a grouting system (2), a water level adjustment system, a formation temperature control system and a data analysis system, wherein the porous media formation simulation model (1) is used for simulating a porous media formation; the water level adjustment system and the formation temperature control system are used for simulating the conditions of different water saturation levels and different water temperatures and ground temperatures; and the data analysis system is used for comparing different time-series data collected by sensors such as a temperature sensor and a pressure sensor with data such as

WO 2025/124394 A1

[见续页]

**(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, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, 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, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, 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, ME, 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))。

temperature data and pressure data that is obtained by means of coupled solving of a heat transfer equation and a momentum equation, so as to verify and analyze a grouting diffusion path. Free simulation of different water saturation levels is realized by means of a water level adjustment system, and simulation of different ground temperatures is realized by means of a formation temperature control system, thereby realizing the research on grouting diffusion under different water levels and different water temperatures and ground temperatures.

**(57)** 摘要: 一种考虑温度效应的孔隙介质注浆试验系统及方法，包括：孔隙介质地层模拟模型（1）、注浆系统（2）、水位调节系统、地层温控系统和数据分析系统；孔隙介质地层模拟模型（1）用于模拟孔隙介质地层，水位调节系统和地层温控系统用于模拟不同富水程度、不同水温和地温的情况，数据分析系统用于根据温度、压力等传感器采集的不同时序数据与通过传热方程与动量方程耦合求解的温度、压力等数据进行对比，实现对注浆扩散路径进行验证分析。通过水位调节系统实现不同富水程度的自由模拟，通过地层温控系统实现不同地温的模拟，可以实现不同水位、水温-地温下的注浆扩散的研究。

# 一种考虑温度效应的孔隙介质注浆试验系统及方法

## 相关申请的交叉引用

本发明要求于2023年12月11日提交中国国家知识产权局、申请号为202311705174.3、发明名称为“一种考虑温度效应的孔隙介质注浆试验系统及方法”的中国专利申请的优先权，其全部内容通过引用结合在本发明中并构成本发明的一部分，用于所有目的。

## 技术领域

本发明属于孔隙介质注浆试验相关技术领域，尤其涉及一种考虑温度效应的孔隙介质注浆试验系统及方法。

## 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。

在隧道施工过程中，水害问题普遍且突出，不但影响施工质量、延误进度、增加成本，甚至酿成严重工程事故。注浆是当前水害防控最常用的方法，浆液随着时间逐步完成由液相向固相的转变进而实现赋水通道封堵以及地层的有效加固，在隧道施工中发挥着至关重要的作用。

各地地质环境差异较大，针对不同地质地层条件的突涌水害治理，要根据地质地层特点进行方案设计。砂卵石等孔隙介质充填的漏失地层，普遍于成都平原、北京小平原等冲积扇平原，此类孔隙介质地层力学性质不稳定，注浆加固时容易漏失浆液，常导致浆液用量明显提升却不能有效稳固地层，目前对此尚无令人满意的处理办法，只能通过多开孔、多注浆或采用固化快的浆液来尽量满足要求。局部地区的孔隙介质地层受高温热泉以及高地温的影响，常规的浆液材料在此种环境下注浆易失效，而高温水的存在导致水害治理难度更大。因此，探明此类介质环境中的浆液封堵扩散机理尤为重要。目前针对孔隙介质注浆开展的模型试验尚未能充分考虑孔隙地层富水程度以及水温、地温效应等多因素耦合条件下的浆液扩散机

理探究，且不能实现孔隙介质地层注浆浆液扩散过程的精确可视化。在开展模型试验方面，现有的注浆设备同样无法满足可控恒速注浆以及储浆与清洗的便捷性。

**发明内容**

为克服上述现有技术的不足，本发明提供了一种考虑水地热效应的孔隙介质注浆试验系统及方法，通过水位调节系统实现不同富水程度、不同水温的自由模拟，通过地层温控系统实现不同地温的模拟，进而实现不同水位、水温、地温下的注浆扩散的研究。

为实现上述目的，本发明的第一个方面提供一种考虑温度效应的孔隙介质注浆试验系统，包括：孔隙介质地层模拟模型、注浆系统、水位调节系统、地层温控系统和数据分析系统；

所述孔隙介质地层模拟模型，包括试验箱，在所述试验箱内填充有孔隙介质；

所述注浆系统，与所述孔隙介质地层模拟模型的注浆口管路连通，为所述孔隙介质地层模拟模型提供注浆速率、注浆压力可控的注浆方式；

所述水位调节系统，与所述孔隙介质地层模拟模型管路连通，为所述孔隙介质地层模拟模型提供水量可调、水温可控的注水方式；

所述地层温控系统，包括加热装置和温度监测传感器，所述温度监测传感器设置在所述孔隙介质地层模拟模型内部，所述加热装置用于为所述孔隙介质地层模拟模型内部进行加热，以模拟不同地温；

所述数据采集装置，包括多个温度传感器和压力传感器，所述温度传感器和压力传感器分别布设在所述孔隙介质地层模拟模型内不同位置；

所述数据分析系统，与所述数据采集装置信号连接，用于根据所述温度传感器和压力传感器采集的不同时序数据与通过传热方程与动量方程耦合求解的温度数据、压力数据进行对比，实现对注浆扩散路径进行验证分析。

本发明的第二个方面提供一种考虑温度效应的孔隙介质注浆试验方法，

包括：

通过水位调节系统向所述孔隙介质地层模拟模型注入预设富水程度和预设水温的水；其中，所述孔隙介质地层模拟模型内填充有孔隙介质；

通过地层温控系统对所述孔隙介质地层模拟模型内部加热到预设地温；

通过注浆系统从设置在孔隙介质地层模拟模型下方的注浆口，向所述孔隙介质地层模拟模型进行注浆；

通过数据采集系统采集注浆过程中的温度数据、压力数据，并传输给数据分析系统；

通过数据分析系统根据所述温度传感器和压力传感器采集的不同时序的温度数据和压力数据，与通过传热方程与动量方程耦合求解的温度数据和压力数据进行对比，实现对注浆扩散路径进行验证分析。

以上一个或多个技术方案存在以下有益效果：

在本发明中，通过水位调节系统实现不同富水程度的自由模拟，通过地层水浴温控系统实现不同地温的模拟，可以实现不同水位、水温-地温下的注浆扩散的研究。

在本发明中，通过引入传热方程与动量方程耦合实现注浆温度、浆液速度以及浆液扩散形态的模拟，根据模拟数据与试验实测数据的对比以及对结石体的切片分析，实现孔隙地层浆液扩散路径的精确演化。

在本发明中，通过螺杆连接活塞配合速度控制模块及气压调节模块实现快速储浆、清洗与恒定速率注浆。相较于传统的气压驱动恒速注浆方式，能够实现全过程精准地恒速浆液注入与储浆及清洗过程的便利化。

本发明附加方面的优点将在下面的描述中部分给出，部分将从下面的描述中变得明显，或通过本发明的实践了解到。

**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 是本发明实施例一中一种考虑温度效应的孔隙介质注浆试验装置图；

图 2 是本发明实施例一中一种考虑温度效应的孔隙介质注浆试验模型布置图；

图 3 是本发明实施例一中一种考虑温度效应的孔隙介质注浆试验装置注浆系统升降器结构图；

图 4 是本发明实施例二中一种考虑温度效应的孔隙介质注浆试验方法流程图；

其中，1、孔隙介质地层模拟系统；2、双液注浆系统；3、储浆罐；4、废液流出管道；5、废液收集容器；6、加热装置；7、上部挡板；8、排废液管道；9、鹅卵石垫层；10、压力传感器；11、渗压传感器；12、橡胶垫层；13、电机；14、速度调节阀；15、第一气压阀；16、螺杆平台处气压调节通道；17、螺杆平台；18、第二气压阀；19、螺杆；20、活塞处气压调节通道；21、活塞。

**具体实施方式**

应该指出，以下详细说明都是示例性的，旨在对本发明提供进一步的说明。除非另有指明，本文使用的所有技术和科学术语具有与本发明所属技术领域的普通技术人员通常理解的相同含义。

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。

在不冲突的情况下，本发明中的实施例及实施例中的特征可以相互组合。

实施例一

如图 1 所述，本实施例公开了一种考虑温度效应的孔隙介质注浆试验系统，包括：孔隙介质地层模拟模型、注浆系统、水位调节系统、地层温控系统和数据分析系统；

所述孔隙介质地层模拟模型，包括试验箱，在所述试验箱内填充有孔

隙介质；

所述注浆系统，与所述隙介质地层模拟模型的注浆口管路连通，为所述孔隙介质地层模拟模型提供注浆速率、注浆压力可控的注浆方式；

所述水位调节系统，与所述孔隙介质地层模拟模型管路连通，为所述孔隙介质地层模拟模型提供水量可调、水温可控的注水方式；

所述地层温控系统，包括加热装置和温度监测传感器，所述温度监测传感器设置在所述孔隙介质地层模拟模型内部，所述加热装置用于为所述孔隙介质地层模拟模型内部进行加热，以模拟不同地温；

所述数据采集装置，包括多个温度传感器和压力传感器，所述温度传感器和压力传感器分别布设在所述孔隙介质地层模拟模型内不同位置；

所述数据分析系统，与所述数据采集装置信号连接，用于根据所述温度传感器和压力传感器采集的不同时序数据与通过传热方程与动量方程耦合求解的温度数据、压力数据进行对比，实现对注浆扩散路径进行验证分析。

下面结合图 1 对本实施例的一种考虑温度效应的孔隙介质注浆试验系统进行详细说明。

本实施例的一种考虑温度效应的孔隙介质注浆试验系统，包括试验平台、孔隙介质地层模拟系统 1、双液注浆系统 2、水位调节系统、地层温控系统、废液处理系统、数据采集系统、数据分析系统和可视化系统。

具体的，如图 2 所示，孔隙介质地层模拟系统 1，包括试验箱/桶体及孔隙介质，为注浆试验提供环境及介质可充填基础；试验箱/桶体上下分别为上部挡板 7 和下部底板，试验箱/桶体内部靠上位置设置有可透浆液隔板，浆液出口位于上部挡板 7 的中间位置，可透浆液隔板与上部挡板 7 间填充有鹅卵石垫层 9，鹅卵石垫层 9 的作用是防止在注浆过程中，浆液的扩散带动介质从出口流失，并保证浆液有流出通道，避免内部压力过大；上部挡板 7 中部为出浆口，出浆口位置可根据实际需要调整，出浆口周围开设传感器放置孔以及内部传感器出线孔；下部底板中间设有注浆孔与注水口，

注水口实现富水程度水位调节；试验箱/桶体内壁设置有橡胶垫层 12，作用在于完成注浆后利于脱模。

如图 3 所示，双液注浆系统 2 包括注浆模块及控制模块，注浆模块包括：螺杆 19、活塞 21、速度调节阀 14、电机 13、气压调节模块和储浆罐 3；螺杆 19 的上部分穿过螺杆平台 17 设置，螺杆 19 的下端部连接活塞 21，螺杆 19 位于装置内部中心，且伸入储浆罐 3 内；螺杆 19 在电机 13 与速度调节阀 14 的驱动作用下对储浆罐 3 中浆液施加稳定压力实现恒速排浆，活塞 21 要保证气密性好；速度调节阀 14 设置于螺杆平台 17 上，用于调节螺杆 19 的升降速率；电机 13 连接速度调节阀 14 为注浆系统的运行提供稳定动力。

气压调节模块设置于活塞 21 与螺杆平台 17 的开口上，实现注浆过程与储浆过程的气压调节，同时可作为储浆通道以及注浆完成后的清洗通道。具体的，活塞 21 的第一开口与螺杆平台 17 开口处用管道连接，形成螺杆平台处气压调节通道 16，活塞 21 的第二开口处形成活塞处气压调节通道 20，在螺杆平台处气压调节通道 16 上设置第一气压阀 15，在活塞处气压调节通道 20 上设置第二气压阀 18，储浆时打开两处气压阀，将浆液从上部灌入，待注入浆液到达指定位置稳定后完成储浆，注浆时则关闭两处气压阀实现注浆过程的密封环境，电机 13 带动活塞 21 将储浆罐 3 中的浆液推出完成注浆，并配合速度调节阀满足不同的注浆速率要求实现注浆过程密闭以顺利实现注浆，储浆罐 3 位于螺杆平台 17 下方，固定于螺杆平台 17 上，用于储备浆液。注浆完成后，打开气压调节模块，通过开口注入高压水实现储浆罐内的便利清洗。利用控制模块实现对注浆模块各项功能的启停及档位调节，最终实现试验全过程的精准注浆。

水位调节系统，包括注水模块及水位控制模块，注水模块包括水箱、通水管道、水泵、注水口阀门和水位传感器，孔隙介质地层模拟系统中试验箱/桶体的注水口通过通水管道连接水箱，水箱中的水泵将水注入孔隙介质地层模拟系统 1 中。水位控制模块包括水位传感器、水位控制装置及注

水启停阀，水位传感器设置于试验箱/桶体的四周，感应水位变化，将水位信息传递到水位控制装置内，通过注水口阀门实现水的实时注入与停止。

地层温控系统，包括加热装置 6、温度监测装置、温度控制装置；加热装置 6 可采用模型外采用循环水浴温控方式，循环水加热装置进口连接恒温水箱，出口处连接管道，管道连接加热水箱，加热水箱实现水温的加热位置靠近于恒温水箱，用于防止水在管道流动过程中的温度丧失，将水温加热至设定温度后，注入恒温水箱保持水温恒定，循环以上步骤，实现水浴控温实现孔隙介质的温度控制，通过内部温度监测传感器实时记录温度数据，待达到指定温度后受温度控制装置指示，以维持当前温度。

废液处理系统，包括废液流出管道 4 及废液收集容器 5；废液收集容器 5 可实现水与浆液的有序分离；试验箱/桶体内的废液经过排废液管道 8 和废液流出管道 4 流入废液收集容器 5 后，通过废液收集容器 5 内的过滤板实现浆-水的固液分离。

数据采集系统，包括温度传感器、压力传感器 10；温度传感器布设在孔隙介质内，起到温度监测的作用，保证模型内温度符合预设温度，传输温度实时数据至数据分析系统；压力传感器 10 分为土压力传感器与渗压传感器 11，土压力传感器布设在模型内部四周以及可透浆液隔板上，用于监测模型内压力变化；渗压传感器 11 埋设在孔隙介质内，用于实时监测介质内部孔隙水压力，并均将实时数据传输至数据分析系统中，获取注浆过程内部压力变化规律。

数据分析系统，包括热力分析模块、压力分析模块；热力分析模块基于地下介质的热导率、热扩散系数、初始边界条件和浆液注入的温度等参数，通过传热方程与能量方程耦合求解温度与注浆速度并与温度、压力传感器捕捉的温度、压力时序变化等数据进行对比，实现扩散路径验证分析；压力分析模块可以实现介质内的浆液压力分析，分析介质内部围压及渗压变化规律，获取适用于温度效应及富水程度影响下的孔隙介质注浆封堵合适压力范围。

可视化系统，包括浆液扩散可视化模块、温度场可视化展示模块、压力场可视化展示模块；浆液扩散可视化模块，实现浆液扩散路径的动态展示，以及温度场与压力场的动态展示。

实施例二

如图 4 所示，本实施例提供一种考虑温度效应的孔隙介质注浆试验方法，包括：

通过水位调节系统向所述孔隙介质地层模拟模型注入预设富水程度和预设水温的水；其中，所述孔隙介质地层模拟模型内填充有孔隙介质；

通过地层温控系统对所述孔隙介质地层模拟模型内部加热到预设地温；

通过注浆系统从设置在孔隙介质地层模拟模型下方的注浆口，向所述孔隙介质地层模拟模型进行注浆；

通过数据采集系统采集注浆过程中的温度数据、压力数据，并传输给数据分析系统；

通过数据分析系统根据所述温度传感器和压力传感器采集的不同时序的温度数据和压力数据，与通过传热方程与动量方程耦合求解的温度数据和压力数据进行对比，实现对注浆扩散路径进行验证分析。

具体的，试验方法包括如下步骤：

步骤 1：根据开展试验所需地层富水程度，将水位注至指定位置，其上有水位控制装置，保证水位稳定，实现水位的自主调节；

步骤 2：将试验模型内的温度加热到指定温度，并保持温度恒定，为保证内部注浆过程可视以及恒温控温效果，加热采用模型外循环水浴温控方式，循环水加热装置进口连接恒温水箱，出口处连接管道，管道连接加热水箱，加热水箱位置靠近于恒温水箱，用于防止水在管道流动过程中的温度丧失，将水温加热至原设定温度后，注入恒温水箱保持水温恒定，循环以上步骤，实现水浴控温；

步骤 3：待温度恒定后，根据实验需求及材料配比制备注浆单液或注浆双液，材料根据需求可选择水泥浆液，或指定材料如水玻璃以及新材料等；

步骤4：将制备完成的浆液注入注浆系统内，打开注浆系统储浆罐气压控制阀以及注浆入口阀门，将浆液从螺杆内部注浆通道上端注入储浆罐中，待注入浆液到达指定位置后，关闭注浆入口阀门并关闭气压控制阀，采用同样的方式将水玻璃或新材料等注入另一套注浆系统中；

步骤5：调整好双液注浆系统速率，开启开关将双液或单液注入孔隙介质模型中，注入过程实时跟踪记录压力监测数据，记录注浆口及模型侧壁压力，同时避免介质模型内部的压力过大产生危险。

步骤6：根据试验模型情况，构建流体域网格，并设置初始边界条件，初始边界条件有注浆速度、注浆压力、浆液温度和浆液粘度；根据注浆速度、注浆压力、相分数和浆液粘度组建动量预测方程，通过求解动量预测注浆速度；

动量方程为：

$$\frac{\partial(\rho\mathbf{v})}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho\mathbf{v}\mathbf{v})=-\nabla p+\nabla\cdot(\mu\nabla\mathbf{v})+\rho\mathbf{g}+\mathbf{F}_{\mathrm{st}}$$

其中，$\rho$为密度，$p$为压力，μ为关于时间t与浆液温度T表征的粘度函数，可通过试验获取，g为重力加速度，$\mathbf{F}_{\mathrm{st}}$为表面张力。

离散后的动量预测方程求解预测注浆速度为：

$$\frac{\rho^{n+1}\mathbf{v}^{n+1}-\rho^{n}\mathbf{v}^{n}}{\Delta t}\cdot V_{\mathrm{CV}}+\sum_{\mathrm{faces}}(\rho\mathbf{v}\mathbf{v})^{n}\cdot\mathbf{S}_{\mathrm{face}}=-\sum_{\mathrm{faces}}p^{n}\mathbf{S}_{\mathrm{face}}+\sum_{\mathrm{faces}}(\mu\nabla\mathbf{v})^{n}\cdot\mathbf{S}_{\mathrm{face}}+\rho^{n}\mathbf{g}\cdot V_{\mathrm{CV}}+\mathbf{F}_{\mathrm{st}}^{n}\cdot V_{\mathrm{CV}}$$

其中，$\rho^{n+1}\mathbf{v}^{n+1}$与$\rho^{n}\mathbf{v}^{n}$分别是新旧时间步的密度与速度乘积，$V_{\mathrm{CV}}$是控制体积的体积，$\mathbf{S}_{\mathrm{face}}$控制体积面的面积向量，$p^{n}$是当前时间步的压力，$(\mu\nabla\mathbf{v})^{n}$是当前时间步的粘性应力，$\mathbf{g}$是重力加速度，$\mathbf{F}_{\mathrm{st}}^{n}$为表面张力，$\Delta t$为时间步长。

进一步的，浆水连续性方程为：

$$(\nabla\cdot\mathbf{v}=0)$$

其中，$\mathbf{v}$为流体速度矢量。

离散后的连续性方程与动量方程耦合，实现浆液压力与注浆速度的反

复求解与迭代，直至达到迭代次数后，求得的注浆压力和注浆速度即为当前时间步的注浆压力和注浆速度$\mathbf{v}$。

进一步的，根据当前时间步的注浆速度$\mathbf{v}$建立浆水传热方程：

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \mathbf{v} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q$$

$$Q = -\Delta H_{\text{rxn}} r$$

其中，$T$为温度，$c_p$为流体的比热容，$k$为孔隙介质热导率，$Q$表示浆液固化相变过程中产生并释放的热量，$\Delta H_{\text{rxn}}$为每摩尔反应释放的热量可采用经验值，$r$为化学反应的速率可采用经验值，$\mathbf{v}$为流体速度矢量。

离散后的预测方程求解预测浆液温度为：

$$\frac{\rho c_p (T_{\text{new}} - T_{\text{old}})}{\Delta t} \cdot V_{\text{CV}} + \sum_{\text{faces}} \rho c_p \mathbf{v} T \cdot \mathbf{S}_{\text{face}} = \sum_{\text{faces}} k \nabla T \cdot \mathbf{S}_{\text{face}}$$

其中，$T_{\text{new}}$与$T_{\text{old}}$分别是新旧时间步的温度，$\Delta t$为时间步长，$V_{\text{CV}}$是控制体积的体积，$\mathbf{S}_{\text{face}}$是控制体积面的面积向量，方向垂直于面且指向外部。

离散后的传热方程与动量方程耦合，实现浆液温度与注浆速度的反复求解与迭代，直至达到迭代次数后，求得的浆液温度和注浆速度$\mathbf{v}$。

根据当前时间步的注浆速度$\mathbf{v}$构建离散后的浆水两相相分数方程，通过求解相分数方程得到孔隙介质中的浆液扩散形态，浆水两相相分数方程为：

$$\left(\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \mathbf{v}) = 0\right)$$

其中，$\alpha$表示在给定体积内，某一特定相占据的体积比例。

根据上述方程的反复迭代最终通过相分数方程实现浆液扩散路径的可视化展现。

模拟结束后，通过当前时间步的温度场数据、注浆压力数据与试验实测数据进行对比，若温度场数据和注浆压力、速度数据与测试数据一致，则实现了浆液扩散形态的精准模拟以及孔隙介质内的浆液扩散路径捕捉。

步骤7：注浆完成以后，将获取得到的压力数据与温度场数据进行数据展示以及进一步分析，进一步分析压力数据获取适用于温度效应及富水程

度影响下的孔隙介质注浆封堵材料配比及注浆压力范围。

步骤 8：对模型内部的结石体进行脱模取出，并对整体进行三维扫描，预标记切片位置进行结石体的切片，进一步比对结石体各横切面的浆液扩散路径图像，若切面呈现浆液的全部渗透形态，则通过渗透速率推算的渗透时间与模拟结果进行时间匹配，若一致则可认为此段模拟的扩散结果为浆液扩散形态；若切面存在部分浆液未入渗区域，则存在挤密浆液扩散行为，在切片中表现为空洞，通过三维扫描技术对空洞形态进行空间点云数据获取，对空洞位置点云坐标进行聚类分析实现不连续点的提取与拟合，根据空洞所在切片的标记位置与结石体三维模型进行坐标的对应，实现挤密注浆位置与范围的确定，进一步结合空洞形态与模拟形态以及对应浆液渗透时间对比确定挤密注浆部分最终扩散形态；若切面存在裂痕，则对裂痕与对应切片进行三维扫描，对裂痕处点云坐标进行聚类分析实现不连续点的提取与拟合，提取裂痕位于结石体的空间坐标进行劈裂注浆扩散形态的确定；通过以上步骤，实现孔隙介质地层浆液多模式扩散的精准捕捉。在获取的可视化展示基础上，根据扩散结果与数据，对孔隙介质注浆的挤密注浆影响因素与起劈压力分界点以及影响因素进行有效分析，获取不同因素作用下的起劈压力值、起劈与压密固结体形态与起劈、压密注浆等规律。

本领域技术人员应该明白，上述本发明的各模块或各步骤可以用通用的计算机装置来实现，可选地，它们可以用计算装置可执行的程序代码来实现，从而，可以将它们存储在存储装置中由计算装置来执行，或者将它们分别制作成各个集成电路模块，或者将它们中的多个模块或步骤制作成单个集成电路模块来实现。本发明不限制于任何特定的硬件和软件的结合。

上述虽然结合附图对本发明的具体实施方式进行了描述，但并非对本发明保护范围的限制，所属领域技术人员应该明白，在本发明的技术方案的基础上，本领域技术人员不需要付出创造性劳动即可做出的各种修改或变形仍在本发明的保护范围以内。

# 权利要求书

1、一种考虑温度效应的孔隙介质注浆试验系统，其特征在于，包括：孔隙介质地层模拟模型、注浆系统、水位调节系统、地层温控系统、数据采集系统和数据分析系统；

所述孔隙介质地层模拟模型，包括试验箱，在所述试验箱内填充有孔隙介质；

所述注浆系统，与所述孔隙介质地层模拟模型的注浆口管路连通，为所述孔隙介质地层模拟模型提供注浆速率和注浆压力可控的注浆方式；

所述水位调节系统，与所述孔隙介质地层模拟模型管路连通，为所述孔隙介质地层模拟模型提供水量可调和水温可控的注水方式；

所述地层温控系统，包括加热装置和温度监测传感器，所述温度监测传感器设置在所述孔隙介质地层模拟模型内部，所述加热装置用于为所述孔隙介质地层模拟模型内部进行加热，以模拟不同地温；

所述数据采集系统，包括多个温度传感器和压力传感器，所述温度传感器和压力传感器分别布设在所述孔隙介质地层模拟模型内不同位置；

所述数据分析系统，与所述数据采集系统信号连接，用于根据所述温度传感器和压力传感器采集的不同时序数据与通过传热方程与动量方程耦合求解的温度数据和压力数据进行对比，实现对注浆扩散路径进行验证分析，具体为：

根据试验模型情况，构建流体域网格，并设置初始边界条件，初始边界条件有注浆速度、注浆压力、浆液温度和浆液粘度；根据注浆速度、注浆压力、相分数和浆液粘度组建动量预测方程，通过求解动量预测注浆速度；

动量方程为：

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}\mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{v}) + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}_{\text{st}}$$

其中，$\rho$为密度，$p$为压力，μ为关于时间 t 与浆液温度 T 表征的粘度函数，可通过试验获取，g 为重力加速度，$\mathbf{F}_{\text{st}}$为表面张力；

离散后的动量预测方程求解预测注浆速度为：

$$\frac{\rho^{n+1}\mathbf{v}^{n+1} - \rho^{n}\mathbf{v}^{n}}{\Delta t} \cdot V_{\text{CV}} + \sum_{\text{faces}} (\rho \mathbf{v}\mathbf{v})^{n} \cdot \mathbf{S}_{\text{face}} = -\sum_{\text{faces}} p^{n}\mathbf{S}_{\text{face}} + \sum_{\text{faces}} (\mu \nabla \mathbf{v})^{n} \cdot \mathbf{S}_{\text{face}} + \rho^{n}\mathbf{g} \cdot V_{\text{CV}} + \mathbf{F}_{\text{st}}^{n} \cdot V_{\text{CV}}$$

其中，$\rho^{n+1}\mathbf{v}^{n+1}$与$\rho^{n}\mathbf{v}^{n}$分别是新旧时间步的密度与速度乘积，$V_{\text{CV}}$是控制体积的体积，$\mathbf{S}_{\text{face}}$控制体积面的面积向量，$p^{n}$是当前时间步的压力，$(\mu \nabla \mathbf{v})^{n}$是当前时间步的粘性应力，$\mathbf{g}$是重力加速度，$\mathbf{F}_{\text{st}}^{n}$为表面张力，$\Delta t$为时间步长；

浆水连续性方程为：

$$(\nabla \cdot \mathbf{v} = 0)$$

其中，$\mathbf{v}$为流体速度矢量，

离散后的连续性方程与动量方程耦合，实现浆液压力与注浆速度的反复求解与迭代，直至达到迭代次数后，求得的注浆压力和注浆速度即为当前时间步的注浆压力和注浆速度$\mathbf{v}$，

根据当前时间步的注浆速度$\mathbf{v}$建立浆水传热方程：

$$\rho c_{p} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_{p} \mathbf{v} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q$$

$$Q = -\Delta H_{\text{rxn}} r$$

其中，$T$为温度，$c_{p}$为流体的比热容，$k$为孔隙介质热导率，$Q$表示浆液固化相变过程中产生并释放的热量，$\Delta H_{\text{rxn}}$为每摩尔反应释放的热量可采用经验值，$r$为化学反应的速率可采用经验值，$\mathbf{v}$为流体速度矢量；

离散后的预测方程求解预测浆液温度为：

$$\frac{\rho c_p(T_{\text{new}} - T_{\text{old}})}{\Delta t} \cdot V_{\text{CV}} + \sum_{\text{faces}} \rho c_p \mathbf{v} T \cdot \mathbf{S}_{\text{face}} = \sum_{\text{faces}} k \nabla T \cdot \mathbf{S}_{\text{face}}$$

其中，$T_{\text{new}}$与$T_{\text{old}}$分别是新旧时间步的温度，$\Delta t$为时间步长，$V_{\text{CV}}$是控制体积的体积，$\mathbf{S}_{\text{face}}$是控制体积面的面积向量，方向垂直于面且指向外部；

离散后的传热方程与动量方程耦合，实现浆液温度与注浆速度的反复求解与迭代，直至达到迭代次数后，求得的浆液温度和注浆速度$\mathbf{v}$；

根据当前时间步的注浆速度$\mathbf{v}$构建离散后的浆水两相相分数方程，通过求解相分数方程得到孔隙介质中的浆液扩散形态，浆水两相相分数方程为：

$$(\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \mathbf{v}) = 0)$$

其中，$\alpha$表示在给定体积内，某一相占据的体积比例；

根据上述方程的反复迭代最终通过相分数方程实现浆液扩散路径的可视化展现；

模拟结束后，通过当前时间步的温度场数据、注浆压力数据与试验实测数据进行对比，若温度场数据和注浆压力、速度数据与测试数据一致，则实现了浆液扩散形态的精准模拟以及孔隙介质内的浆液扩散路径捕捉。

2、如权利要求 1 所述的一种考虑温度效应的孔隙介质注浆试验系统，其特征在于，所述试验箱内设置有可透浆液隔板，在所述试验箱内且在所述可透浆液隔板下方填充有孔隙介质，在所述试验箱内且在所述可透浆液隔板上方填充有鹅卵石垫层。

3、如权利要求 1 所述的一种考虑温度效应的孔隙介质注浆试验系统，其特征在于，所述注浆系统包括储浆罐、螺杆、活塞和气压调节阀，所述储浆罐用于存储浆液，所述螺杆设置在螺杆平台上且位于所述储浆罐内，

所述活塞设置在所述螺杆下方，所述螺杆平台与所述活塞之间设置气压调节通道，所述活塞上设置有气压阀。

4、如权利要求 1 所述的一种考虑温度效应的孔隙介质注浆试验系统，其特征在于，所述水位调节系统包括水位传感器、水箱和水位控制器；所述水位传感器设置在所述试验箱内，所述水箱与所述孔隙介质地层模拟模型管路连通；所述水位控制器根据所述水位传感器所检测的所述试验箱内的水位情况，控制所述水箱为所述孔隙介质地层模拟模型注水的启停。

5、如权利要求 1 所述的一种考虑温度效应的孔隙介质注浆试验系统，其特征在于，所述数据采集系统还包括土压力传感器和渗压传感器，所述土压力传感器设置在所述试验箱内部周围和出浆口处，用于监测注浆过程的压力变化；所述渗压传感器设置在孔隙介质内部，用于监测孔隙介质内部孔隙水压力。

6、如权利要求 5 所述的一种考虑温度效应的孔隙介质注浆试验系统，其特征在于，所述数据分析系统，还用于根据所述土压力传感器监测的注浆过程的压力数据进行分析，得到适用于温度效应及富水程度影响下的孔隙介质注浆封堵的压力范围；所述加热装置采用外循环水浴温控方式，用于为孔隙模型提供所需的恒温环境。

7、如权利要求 1 所述的一种考虑温度效应的孔隙介质注浆试验系统，其特征在于，还包括废液处理系统，所述废液处理系统与所述孔隙介质地层模拟模型管路连通，用于对孔隙介质地层模拟模型流出的废液进行浆-水的固液分离。

8、一种考虑温度效应的孔隙介质注浆试验方法，其特征在于，包括：

通过水位调节系统向所述孔隙介质地层模拟模型注入预设富水程度和

预设水温的水；其中，所述孔隙介质地层模拟模型内填充有孔隙介质；

通过地层温控系统对所述孔隙介质地层模拟模型内部加热到预设地温；

通过注浆系统从设置在孔隙介质地层模拟模型下方的注浆口，向所述孔隙介质地层模拟模型进行注浆；

通过数据采集系统采集注浆过程中的温度数据和压力数据，并传输给数据分析系统；

通过数据分析系统根据温度传感器和压力传感器采集的不同时序的温度数据和压力数据，与通过传热方程与动量方程耦合求解的温度数据和压力数据进行对比，实现对注浆扩散路径进行验证分析，具体为：

根据试验模型情况，构建流体域网格，并设置初始边界条件，初始边界条件有注浆速度、注浆压力、浆液温度和浆液粘度；根据注浆速度、注浆压力、相分数和浆液粘度组建动量预测方程，通过求解动量预测注浆速度；

动量方程为：

$$\frac{\partial(\rho\mathbf{v})}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho\mathbf{v}\mathbf{v})=-\nabla p+\nabla\cdot(\mu\nabla\mathbf{v})+\rho\mathbf{g}+\mathbf{F}_{\mathrm{st}}$$

其中，$\rho$为密度，$p$为压力，μ为关于时间 t 与浆液温度 T 表征的粘度函数，可通过试验获取，g 为重力加速度，$\mathbf{F}_{\mathrm{st}}$为表面张力；

离散后的动量预测方程求解预测注浆速度为：

$$\frac{\rho^{n+1}\mathbf{v}^{n+1}-\rho^{n}\mathbf{v}^{n}}{\Delta t}\cdot V_{\mathrm{CV}}+\sum_{\mathrm{faces}}(\rho\mathbf{v}\mathbf{v})^{n}\cdot\mathbf{S}_{\mathrm{face}}=-\sum_{\mathrm{faces}}p^{n}\mathbf{S}_{\mathrm{face}}+\sum_{\mathrm{faces}}(\mu\nabla\mathbf{v})^{n}\cdot\mathbf{S}_{\mathrm{face}}+\rho^{n}\mathbf{g}\cdot V_{\mathrm{CV}}+\mathbf{F}_{\mathrm{st}}^{n}\cdot V_{\mathrm{CV}}$$

其中，$\rho^{n+1}\mathbf{v}^{n+1}$与$\rho^{n}\mathbf{v}^{n}$分别是新旧时间步的密度与速度乘积，$V_{\mathrm{CV}}$是控制体积的体积，$\mathbf{S}_{\mathrm{face}}$控制体积面的面积向量，$p^{n}$是当前时间步的压力，

$(\mu\nabla\mathbf{v})^n$是当前时间步的粘性应力，$\mathbf{g}$是重力加速度，$\mathbf{F}_{\mathrm{st}}^n$为表面张力，$\Delta t$为时间步长；

浆水连续性方程为：

$$(\nabla\cdot\mathbf{v}=0)$$

其中，$\mathbf{v}$为流体速度矢量，

离散后的连续性方程与动量方程耦合，实现浆液压力与注浆速度的反复求解与迭代，直至达到迭代次数后，求得的注浆压力和注浆速度即为当前时间步的注浆压力和注浆速度$\mathbf{v}$，

根据当前时间步的注浆速度$\mathbf{v}$建立浆水传热方程：

$$\rho c_p\frac{\partial T}{\partial t}+\rho c_p\mathbf{v}\cdot\nabla T=\nabla\cdot(k\nabla T)+Q$$

$$Q=-\Delta H_{\mathrm{rxn}}r$$

其中，$T$为温度，$c_p$为流体的比热容，$k$为孔隙介质热导率，$Q$表示浆液固化相变过程中产生并释放的热量，$\Delta H_{\mathrm{rxn}}$为每摩尔反应释放的热量可采用经验值，$r$为化学反应的速率可采用经验值，$\mathbf{v}$为流体速度矢量；

离散后的预测方程求解预测浆液温度为：

$$\frac{\rho c_p(T_{\mathrm{new}}-T_{\mathrm{old}})}{\Delta t}\cdot V_{\mathrm{CV}}+\sum_{\mathrm{faces}}\rho c_p\mathbf{v}T\cdot\mathbf{S}_{\mathrm{face}}=\sum_{\mathrm{faces}}k\nabla T\cdot\mathbf{S}_{\mathrm{face}}$$

其中，$T_{\mathrm{new}}$与$T_{\mathrm{old}}$分别是新旧时间步的温度，$\Delta t$为时间步长，$V_{\mathrm{CV}}$是控制体积的体积，$\mathbf{S}_{\mathrm{face}}$是控制体积面的面积向量，方向垂直于面且指向外部；

离散后的传热方程与动量方程耦合，实现浆液温度与注浆速度的反复求解与迭代，直至达到迭代次数后，求得的浆液温度和注浆速度$\mathbf{v}$；

根据当前时间步的注浆速度$\mathbf{v}$构建离散后的浆水两相相分数方程，通过求解相分数方程得到孔隙介质中的浆液扩散形态，浆水两相相分数方程为：

$$(\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \mathbf{v}) = 0)$$

其中，$\alpha$表示在给定体积内，某一相占据的体积比例；

根据上述方程的反复迭代最终通过相分数方程实现浆液扩散路径的可视化展现；

模拟结束后，通过当前时间步的温度场数据、注浆压力数据与试验实测数据进行对比，若温度场数据和注浆压力、速度数据与测试数据一致，则实现了浆液扩散形态的精准模拟以及孔隙介质内的浆液扩散路径捕捉。

9、如权利要求 8 所述的一种考虑温度效应的孔隙介质注浆试验方法，其特征在于，通过传热方程与动量方程耦合求解温度、注浆速度与浆液扩散路径，具体为：

根据孔隙介质注浆试验模型构建流体域网格，并进行初始化；

根据注浆速度、注浆压力、相分数和浆液粘度构建动量预测方程，根据动量预测方程预测当前时间步注浆速度；

根据预测的当前时间步的注浆速度建立浆水传热预测方程，根据浆水传热预测方程预测当前时间步的浆液温度和注浆速度；

根据当前时间步的注浆速度构建浆水两相相分数方程，迭代计算直至达到迭代次数，实现浆液扩散路径分析。

10、如权利要求 9 所述的一种考虑温度效应的孔隙介质注浆试验方法，其特征在于，还包括：通过获取的当前时间步的温度数据和压力数据以实测的温度数据和压力数据进行对比，根据对比结果确定浆液扩散模拟的准确性；获取模拟试验内部的结石体，对结石体切片的浆液扩散路径图像进行分析，根据浆液扩散路径图像的浆液渗透的表现形式，以及空洞和裂痕

形态，对浆液扩散形态进行验证与捕捉。

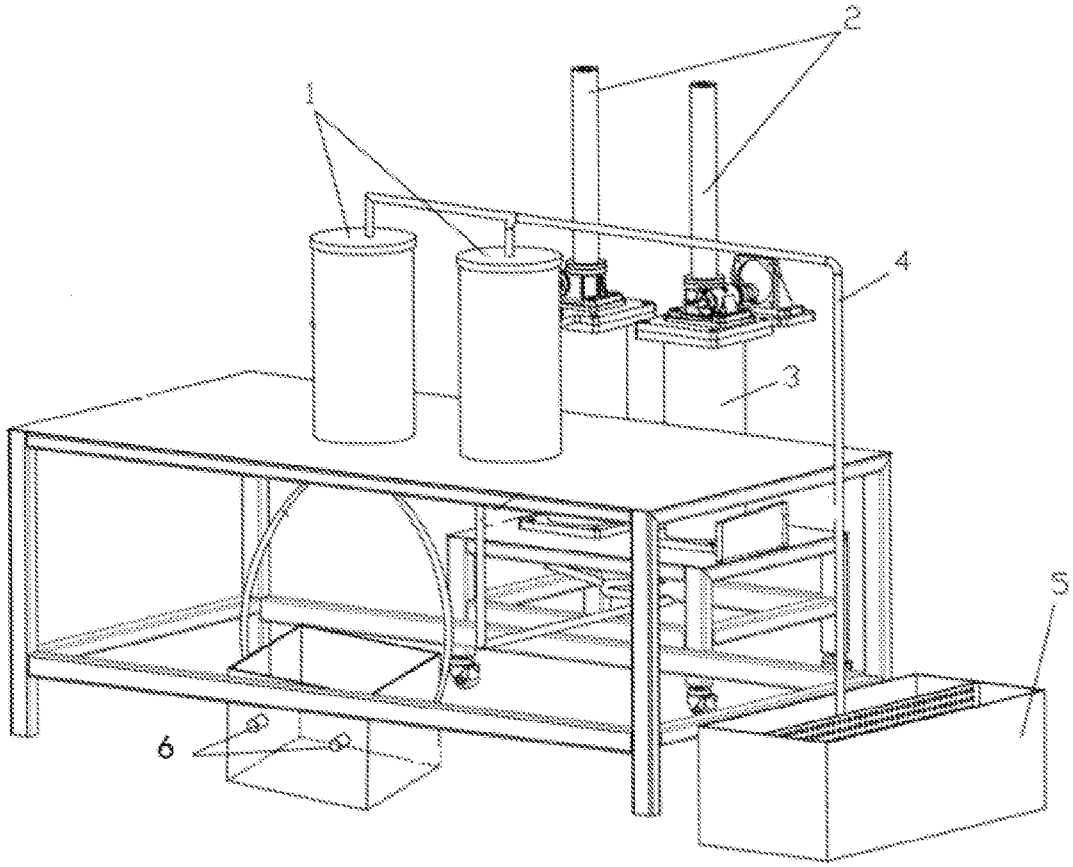


图 1

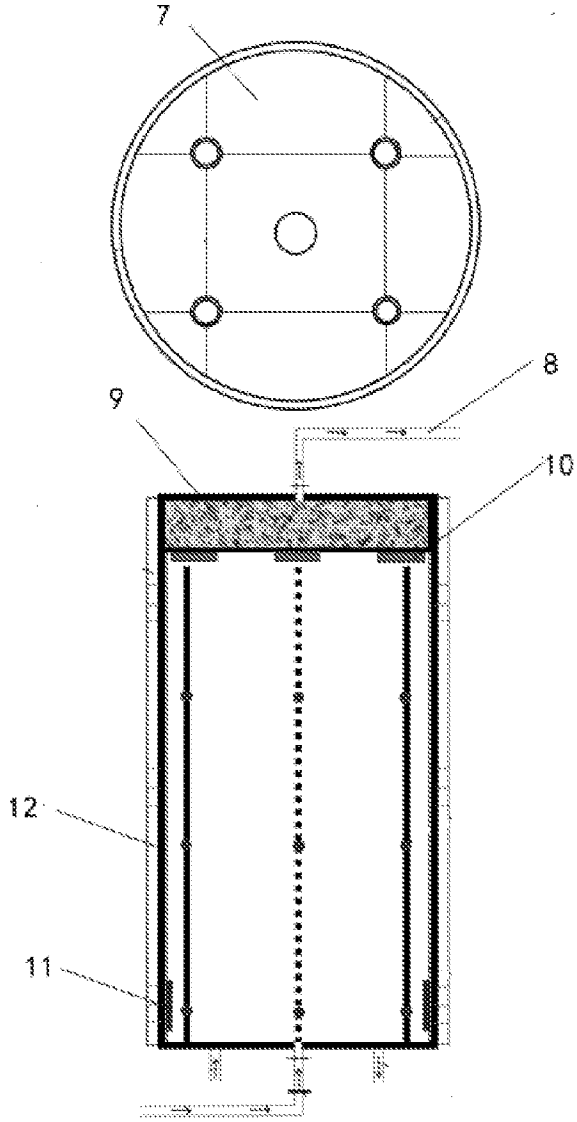


图 2

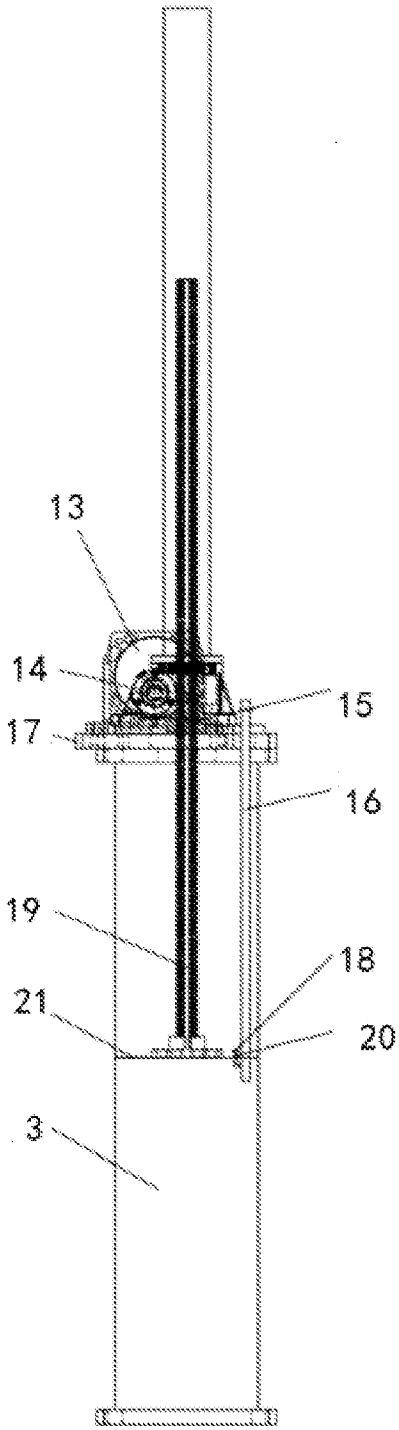


图 3

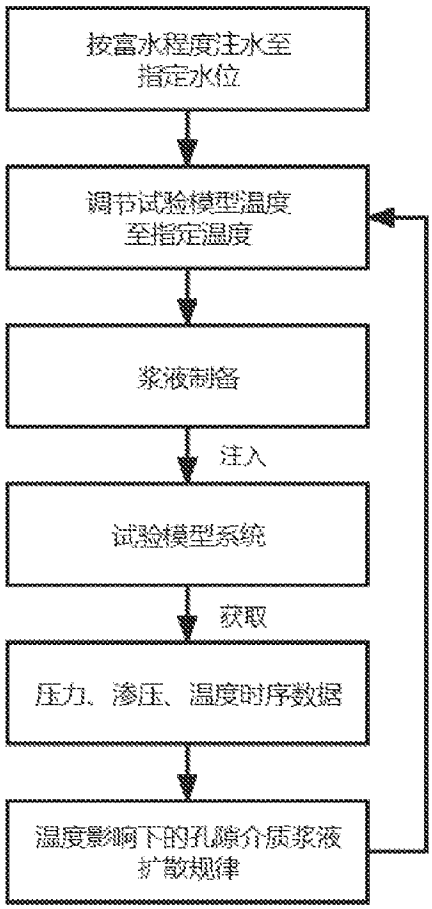
按富水程度注水至
指定水位
调节试验模型温度
至指定温度
浆液制备
注入
试验模型系统
获取
压力、渗压、温度时序数据
温度影响下的孔隙介质浆液
扩散规律

图 4

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
**PCT/CN2024/138229**

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01N15/08(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)

IPC: G01N15, G01N13

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)

CNTXT, ENTXTC, VEN, CNKI, SPRINGLINK: 孔隙, 注浆, 灌浆, 水位, 温度, 地温, 动量方程, 传热方程, temperature, heat, grouting, filling, inject, liquid, momentum equation, heat, thermal, transfer, conduct

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
|---|---|---|
| PX | CN 117825231 A (SHANDONG UNIVERSITY) 05 April 2024 (2024-04-05)<br>description, paragraphs 41-90, and figures 1-4 | 1-10 |
| A | CN 115791896 A (SHANDONG UNIVERSITY) 14 March 2023 (2023-03-14)<br>description, paragraphs 46-87, and figures 1-3 | 1-10 |
| A | CN 112798497 A (SGIDI ENGINEERING CONSULTING (GROUP) CO., LTD.) 14 May 2021 (2021-05-14)<br>description, paragraphs 36-52, and figures 1-4 | 1-10 |
| A | CN 116448620 A (SHANDONG UNIVERSITY) 18 July 2023 (2023-07-18)<br>description, paragraphs 46-74, and figures 1-4 | 1-10 |
| A | CN 116127859 A (SHANDONG UNIVERSITY) 16 May 2023 (2023-05-16)<br>entire document | 1-10 |
| A | US 2023335014 A1 (OCEAN UNIVERSITY OF CHINA) 19 October 2023 (2023-10-19)<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
"D" document cited by the applicant in the international application
"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 |
|---|---|
| **02 April 2025** | **02 April 2025** |

| Name and mailing address of the ISA/CN | Authorized officer |
|---|---|
| **China National Intellectual Property Administration (ISA/CN)**<br>**China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing 100088** | Telephone No. |

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

International application No.
**PCT/CN2024/138229**

| Patent document cited in search report | Publication date (day/month/year) | Patent family member(s) | Publication date (day/month/year) |
|---|---|---|---|
| CN 117825231 A | 05 April 2024 | None | |
| CN 115791896 A | 14 March 2023 | None | |
| CN 112798497 A | 14 May 2021 | None | |
| CN 116448620 A | 18 July 2023 | None | |
| CN 116127859 A | 16 May 2023 | None | |
| US 2023335014 A1 | 19 October 2023 | None | |

# 国际检索报告

国际申请号
PCT/CN2024/138229

A. 主题的分类

G01N15/08(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)

IPC：G01N15，G01N13

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））

CNTXT,ENTXTC,VEN,CNKI,SPRINGLINK,孔隙，注浆，灌浆，水位，温度，地温，动量方程，传热方程，temperature,heat,grouting,filling,inject,liquid,momentum equation,heat,thermal,transfer,conduct

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 |
|---|---|---|
| PX | CN 117825231 A (山东大学) 2024年4月5日 (2024 - 04 - 05)<br>说明书第41-90段及附图1-4 | 1-10 |
| A | CN 115791896 A (山东大学) 2023年3月14日 (2023 - 03 - 14)<br>说明书第46-87段及附图1-3 | 1-10 |
| A | CN 112798497 A (上海勘察设计研究院（集团）有限公司) 2021年5月14日 (2021 - 05 - 14)<br>说明书第36-52段及附图1-4 | 1-10 |
| A | CN 116448620 A (山东大学) 2023年7月18日 (2023 - 07 - 18)<br>说明书第46-74段及附图1-4 | 1-10 |
| A | CN 116127859 A (山东大学) 2023年5月16日 (2023 - 05 - 16)<br>全文 | 1-10 |
| A | US 2023335014 A1 (OCEAN UNIV CHINA) 2023年10月19日 (2023 - 10 - 19)<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

“D” 申请人在国际申请中引证的文件

“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 | 国际检索报告邮寄日期 |
|---|---|
| 2025年4月2日 | 2025年4月2日 |
| ISA/CN的名称和邮寄地址<br>中国国家知识产权局<br>中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 | 受权官员<br>刘文颖<br>电话号码 (+86) 010-62085536 |

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2024/138229

| 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 | 117825231 | A | 2024年4月5日 | 无 | |
| CN | 115791896 | A | 2023年3月14日 | 无 | |
| CN | 112798497 | A | 2021年5月14日 | 无 | |
| CN | 116448620 | A | 2023年7月18日 | 无 | |
| CN | 116127859 | A | 2023年5月16日 | 无 | |
| US | 2023335014 | A1 | 2023年10月19日 | 无 | |