



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113252467 B

(45) 授权公告日 2022.04.15

(21) 申请号 202110631410.6

CN 212614665 U, 2021.02.26

(22) 申请日 2021.06.07

CN 102011582 A, 2011.04.13

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 105938070 A, 2016.09.14

申请公布号 CN 113252467 A

CN 108952671 A, 2018.12.07

(43) 申请公布日 2021.08.13

CN 107505207 A, 2017.12.22

(73) 专利权人 西南石油大学

GB 2201790 A, 1988.09.07

地址 610500 四川省成都市新都区新都大道8号

FR 2937133 B1, 2010.04.16

CN 210264683 U, 2020.04.07

(72) 发明人 石祥超 杨昕昊 陈帅 陈彦州

李泽. 川西须家河组二段岩石可钻性实验分析.《科学技术与工程》.2018,1671—1815.

(74) 专利代理机构 成都金英专利代理事务所 (普通合伙) 51218

沈海超. 模拟地层条件的岩石抗钻特性.《西安石油大学学报(自然科学版)》.2015,22—25.

代理人 袁英

唐鹏飞. 致密油水平井裂缝穿层及延伸规律.《大庆石油地质与开发》.2019,169—174.

(51) Int. Cl.

G01N 3/18 (2006.01)

Shuai Chen. Experimental study of shale drillability with diferent bedding inclinations under varying wellbore pressure conditions.《Journal of Petroleum Exploration and Production》.2021,1751-1759.

E21B 44/00 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 102221501 A, 2011.10.19

CN 212658548 U, 2021.03.05

CN 112525671 A, 2021.03.19

CN 106323788 A, 2017.01.11

审查员 刘昌硕

权利要求书3页 说明书8页 附图6页

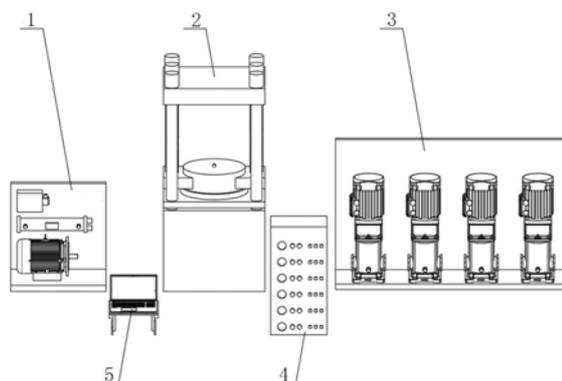
(54) 发明名称

一种模拟深井钻井真三轴条件的岩石钻进实验装置与方法

压力、孔隙压力和高温条件,提高可钻性评价的准确性。

(57) 摘要

本发明公开了一种模拟深井钻井真三轴条件的岩石钻进实验装置与方法,所述装置包括:能源供应模块(1)、实验加载模块(2)、液压供应模块(3)、参数控制模块(4)和数据采集模块(5)。本发明通过能源供应模块(1)提供动力;实验加载模块(2)模拟地层环境向岩石试件施加三向应力、液柱压力和孔隙压力,同时用钻头(18)钻进岩石试件;液压供应模块(3)向实验加载装置中的液柱压力、孔隙压力和三向应力提供液压;参数控制模块(4)用来控制实验加载模块(2)的位移模块进行位移,并且调节位移、压力、温度至目标值;模拟地层真三轴应力、钻头钻进井筒液柱



CN 113252467 B

1. 一种模拟深井钻井真三轴条件的岩石钻进实验装置,其特征在于,包括能源供应模块(1)、实验加载模块(2)、液压供应模块(3)、参数控制模块(4)和数据采集模块(5);所述能源供应模块(1)、实验加载模块(2)和液压供应模块(3)通过管道互相连接;所述参数控制模块(4)和数据采集模块(5)通过电缆与实验加载模块(2)连接;所述实验加载模块(2)包括立柱支撑结构(10)、套筒升降结构(11)、套筒(12)、加载室(13)、支撑板升降机构(14)、支撑板(15)、底座(16)和钻进结构(17);所述立柱支撑结构(10)包含多根光滑立柱和螺纹立柱并对称设于底座(16)上方两侧;所述套筒(12)连接套筒升降结构(11);所述支撑板(15)连接支撑板升降机构(14);所述套筒升降结构(11)和支撑板升降机构(14)通过螺纹与立柱支撑结构(10)两侧螺纹立柱连接;所述套筒升降结构(11)设于支撑板升降机构(14)上方;所述钻进结构(17)包括钻头(18)、钻杆(19)、传动链(20)和伺服电机(21);所述钻头(18)与钻杆(19)通过螺纹连接配合;所述伺服电机(21)固定安装在底座(16)的内壁面上;所述钻杆(19)一端通过传动链(20)与伺服电机(21)连接;所述钻杆(19)另一端穿过支撑板升降结构(14)底部的通孔安装在凹槽上。

2. 如权利要求1所述的一种模拟深井钻井真三轴条件的岩石钻进实验装置,其特征在于,所述能源供应模块(1)包括三相异步电机(6)、油冷却器(7)、压差发讯器(8)和L型支撑架(9);所述三相异步电机(6)设于L型支撑架(9)底板;所述油冷却器(7)和压差发讯器(8)设于L型支撑架(9)侧壁;所述压差发讯器(8)设于油冷却器(7)上方;所述压差发讯器(8)、油冷却器(7)和三相异步电机(6)通过管道依次连接。

3. 如权利要求1所述的一种模拟深井钻井真三轴条件的岩石钻进实验装置,其特征在于,所述套筒(12)顶端中心设有孔隙压力孔(22);所述钻杆(19)底端设有液柱压力孔(23)。

4. 如权利要求1所述的一种模拟深井钻井真三轴条件的岩石钻进实验装置,其特征在于,所述加载室(13)内包含多个加热电阻片(24)、立方体岩石试件(25)、第一X向加载板(26)、第二X向加载板(27)、第一Y向加载板(28)、第二Y向加载板(29)、各加载板尾部均布两个受力杆和多个水平应力孔(30)。

5. 如权利要求1所述的一种模拟深井钻井真三轴条件的岩石钻进实验装置,其特征在于,所述加载室(13)顶部和底部均设有密封圈。

6. 如权利要求5所述的一种模拟深井钻井真三轴条件的岩石钻进实验装置,其特征在于,所述加载室(13)为圆形结构;所述加载室(13)中间留有安装加热电阻片(24)、放置立方体岩石试件(25)、第一X向加载板(26)、第二X向加载板(27)、第一Y向加载板(28)、第二Y向加载板(29)往复运动的方形空余空间;所述加热电阻片(24)均匀分布在加载室(13)的周向内壁;所述加载室(13)的周向内壁四面上分别均匀布置有两个水平应力孔(30);所述第一X向加载板(26)、第二X向加载板(27)、第一Y向加载板(28)、第二Y向加载板(29)分别通过各面的水平应力孔(30)与加载室(13)连接。

7. 如权利要求6所述的一种模拟深井钻井真三轴条件的岩石钻进实验装置,其特征在于,所述第一X向加载板(26)、第二X向加载板(27)、第一Y向加载板(28)、第二Y向加载板(29)分别朝向四个方向;所述两两相邻加载板之间互相垂直,且两垂直加载板的接触部分处,为端面与正面的交错接触方式;所述第一X向加载板(26)、第二X向加载板(27)、第一Y向加载板(28)、第二Y向加载板(29)围成一个中心具有空余空间的结构,所述空余空间用来放置立方体岩石试件(25)。

8. 如权利要求1所述的一种模拟深井钻井真三轴条件的岩石钻进实验装置,其特征在于,所述液压供应模块(3)共有四组液压泵与油箱的组合;所述液压泵包含液柱液压泵(31)、孔隙液压泵(32)、X向液压泵(33)和Y向液压泵(34);所述油箱包含液柱压力油箱(35)、孔隙压力油箱(36)、X向压力油箱(37)和Y向压力油箱(38);所述液压泵与油箱之间均通过法兰进行连接,然后固定安装在支撑板上。

9. 如权利要求1所述的一种模拟深井钻井真三轴条件的岩石钻进实验装置,其特征在于,所述参数控制模块(4)包括多个控制器和传感器;所述控制器包括控制钻头(18)按指定转速旋转的转速控制器,控制套筒升降机构(11)、支撑板升降机构(14)、加载板实现位移变化的位移控制器,控制孔隙压力、液柱压力、加载板、套筒升降机构(11)实现压力变化的压力控制器,控制加载室(13)内部加热电阻片(24)温度变化的温度控制器;所述传感器包括检测套筒升降机构(11)压力变化的轴向压力传感器、检测轴向孔隙压力变化的孔隙压力传感器、检测每个加载板移动距离的第一位移传感器、检测每个加载板压力变化的第一压力传感器、检测每个加热电阻片(24)温度变化的温度传感器、检测钻头(18)相对移动距离的第二位移传感器、检测钻头(18)压力变化的第二压力传感器。

10. 一种模拟深井钻井真三轴条件的岩石钻进实验方法,采用权利要求1-9任意一项一种模拟深井钻井真三轴条件的岩石钻进实验装置,其特征在於:包括以下步骤:

步骤一:制备立方体岩石试件(25),选取实验钻头(18),将钻头(18)通过螺纹连接的方式安装在钻杆(19)上,开启数据采集装置,收集实时数据;

步骤二:启动能源供应模块(1),利用三相异步电机(6)为岩石钻进实验装置提供能源动力,并利用油冷却器(7)为三相异步电机(6)降温,同时利用压差发讯器(8)检查岩石钻进实验装置的压差值是否在设定值以内;

步骤三:将立方体岩石试件(25)放置于加载室(13)底部的方孔内;

步骤四:启动参数控制模块(4),按照先用位移控制器进行粗调,后用压力控制器进行精准调整的顺序进行操作,控制四个加载板慢慢向立方体岩石试件(25)移动至完全接触,并施加载荷至设定值;

步骤五:利用位移控制器将套筒升降机构(11)缓缓下放,调节方式按照先用位移传感器进行粗调,后用压力传感器进行精准调整的顺序进行操作,以确保套筒升降机构(11)的底部能够紧密贴合于立方体岩石试件(25)上方,然后利用温度控制器开启加热电阻片(24),对加载板与立方体岩石试件(25)进行预热,直到温度传感器达到预定数值并保持一段时间;

步骤六:利用位移控制器操控支撑板升降机构(14)向下运动,该过程不启动转速控制器为钻头(18)提供旋转力,与步骤四中的调整方式相同,按照先用位移传感器进行粗调,后用压力传感器进行精准调整的顺序进行操作,以钻头(18)顶部能够与立方体岩石试件(25)底部发生接触为准;

步骤七:启动压力控制器,使液柱压力油箱(35)内的液压油注入液柱压力孔(23)内,使孔隙压力油箱(36)内的液压油注入孔隙压力孔(22)内,然后开启钻速控制器和位移控制器,控制钻头(18)按设定值钻进;

步骤八:利用数据采集模块(5),对实验过程中的时间、温度、压力、转速和钻进深度数据进行采集并输出保存,结束实验数据的采集处理;

步骤九：首先关闭转速控制器停止钻头(18)钻进，然后关闭压力控制器并利用管道将氮气瓶连接到加载室(13)上，将液压油从孔隙压力孔(22)流回孔隙压力油箱(36)、从液柱压力孔(23)流回液柱压力油箱(35)，然后开启位移控制器使加载板向远离立方体岩石试件(25)的方向移动，然后控制套筒升降机构(11)向上移动，最后取出立方体岩石试件(25)；

步骤十：开启氮气瓶，将氮气瓶连接的管道对准实验加载装置喷射清理，对真三轴岩石钻进实验装置进行打扫，完成真三轴岩石钻进的实验。

## 一种模拟深井钻井真三轴条件的岩石钻进实验装置与方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及深井钻井提速的技术领域,尤其涉及一种模拟深井钻井真三轴条件的岩石钻进实验装置与方法。

### 背景技术

[0002] 在石油与天然气钻井工程中,如何实现高效破碎岩石、提升钻进效率是永恒的主题。然而深井钻井真实井底环境复杂,高温、高压、高地应力等因素对工具的岩石破碎效率影响规律不清楚,严重影响了深井钻井提速技术创新。现有的岩石可钻性实验评价方法与标准中,通常采用不模拟任何井底环境开展岩石可钻性测试,与深井真实钻井井底条件相差甚远,不能为钻井提速技术提升提供有效支撑。

[0003] 在专利号为CN103806907B的发明中提出了一种深井、超深井钻井岩石可钻性测试装置及测试方法,这种装置实现了常规三轴(两个水平主应力相等)条件下的岩石可钻性测试,但仍然无法表征地层复杂环境下水平主应力不等对岩石可钻性的影响。

[0004] 综上所述,目前亟需设计一种模拟深井钻井真三轴条件的岩石钻进实验装置与方法,进而得出深井钻井真实井底的高温、高压、高地应力对岩石破碎效率的影响规律。

### 发明内容

[0005] 本发明的主要目的在于提供一种模拟深井钻井真三轴条件的岩石钻进实验装置与方法,通过模拟地层真三轴应力、钻头钻进井筒液柱压力、孔隙压力和高温条件,提高可钻性评价的准确性。

[0006] 为实现上述目的,本发明提出一种模拟深井钻井真三轴条件的岩石钻进实验装置与方法,本装置包括能源供应模块、实验加载模块、液压供应模块、参数控制模块和数据采集模块;所述能源供应模块、实验加载模块和液压供应模块通过管道互相连接;所述参数控制模块和数据采集模块通过电缆与实验加载模块连接。

[0007] 优选的,所述能源供应模块包括三相异步电机、油冷却器、压差发讯器和L型支撑架;所述三相异步电机设于L型支撑架底板;所述油冷却器和压差发讯器设于L型支撑架侧壁;所述压差发讯器设于油冷却器上方;所述压差发讯器、油冷却器和三相异步电机通过管道依次连接。

[0008] 优选的,所述实验加载模块包括立柱支撑结构、套筒升降结构、套筒、加载室、支撑板升降机构、支撑板、底座和钻进结构;所述立柱支撑结构包含多根光滑立柱和螺纹立柱并对称设于底座上方两侧;所述套筒连接套筒升降结构;所述支撑板连接支撑板升降机构;所述套筒升降结构和支撑板升降机构通过螺纹与立柱支撑结构两侧螺纹立柱连接;所述套筒升降结构设于支撑板升降机构上方;所述钻进结构包括钻头、钻杆、传动链和伺服电机;所述钻头与钻杆通过螺纹连接配合,适用于多种不同类型钻头破岩机理的研究,可以使用包括PDC钻头和牙轮钻头在内的多种钻头,螺纹连接使钻头的更换简单方便;所述伺服电机固定安装在底座的内壁面上;所述钻杆一端通过传动链与伺服电机连接,钻头通过钻杆由下

向上钻进岩石,利用破碎岩屑本身的重力作用实现岩屑与岩体的分离,及时排出岩屑,减小岩屑对实验过程的影响;所述钻杆另一端穿过支撑板升降结构底部的通孔安装在凹槽上。

[0009] 优选的,所述套筒顶端中心设有孔隙压力孔;所述钻杆底端设有液柱压力孔。

[0010] 优选的,所述加载室内包含多个加热电阻片、立方体岩石试件、第一X向加载板、第二X向加载板、第一Y向加载板、第二Y向加载板、各加载板尾部均布两个受力杆和多个水平应力孔,各加载板上的双杆件可以避免施压过程中受力不均和应力集中的情况出现。

[0011] 优选的,所述加载室顶部和底部均设有密封圈。

[0012] 优选的,所述加载室为圆形结构;所述加载室中间留有安装加热电阻片、放置立方体岩石试件、第一X向加载板、第二X向加载板、第一Y向加载板、第二Y向加载板往复运动的方形空余空间;所述加热电阻片均匀分布在加载室的周向内壁;所述加载室的周向内壁四面上分别均匀布置有两个水平应力孔;所述第一X向加载板、第二X向加载板、第一Y向加载板、第二Y向加载板分别通过各面的水平应力孔与加载室连接,能够独立改变岩石试件的三个方向主应力的大小,解决了常规三轴实验的短板。

[0013] 优选的,所述第一X向加载板、第二X向加载板、第一Y向加载板、第二Y向加载板分别朝向四个方向;所述两两相邻加载板之间互相垂直,且两垂直加载板的接触部分处,为端面与正面的交错接触方式,能够紧密压紧岩石试件,同时避免加载板之间的摩擦与错位;所述第一X向加载板、第二X向加载板、第一Y向加载板、第二Y向加载板围成一个中心具有空余空间的结构,所述空余空间用来放置立方体岩石试件。

[0014] 优选的,所述液压供应模块共有四组液压泵与油箱的组合;所述液压泵包含液柱液压泵、孔隙液压泵、X向液压泵和Y向液压泵;所述油箱包含液柱压力油箱、孔隙压力油箱、X向压力油箱和Y向压力油箱;所述液压泵与油箱之间均通过法兰进行连接,然后固定安装在支撑板上。

[0015] 优选的,所述参数控制模块包括多个控制器和传感器;所述控制器包括控制钻头按指定转速旋转的转速控制器,控制套筒升降机构、支撑板升降机构、加载板实现位移变化的位移控制器,控制孔隙压力、液柱压力、加载板、套筒升降机构实现压力变化的压力控制器,控制加载室内部加热电阻片温度变化的温度控制器;所述传感器包括检测套筒升降机构压力变化的轴向压力传感器、检测轴向孔隙压力变化的孔隙压力传感器、检测每个加载板移动距离的第一位移传感器、检测每个加载板压力变化的第一压力传感器、检测每个加热电阻片温度变化的温度传感器、检测钻头相对移动距离的第二位移传感器、检测钻头压力变化的第二压力传感器。

[0016] 一种模拟深井钻井真三轴条件的岩石钻进实验方法,采用上述任意一项一种模拟深井钻井真三轴条件的岩石钻进实验装置,其特征在于包括以下步骤:

[0017] 步骤一:制备立方体岩石试件,选取实验钻头,将钻头通过螺纹连接的方式安装在钻杆上,开启数据采集装置,收集实时数据;

[0018] 步骤二:启动能源供应模块,利用三相异步电机为岩石钻进实验装置提供能源动力,并利用油冷却器为三相异步电机降温,同时利用压差发讯器检查岩石钻进实验装置的压差值是否在设定值以内;

[0019] 步骤三:将立方体岩石试件放置于加载室底部的方孔内;

[0020] 步骤四:启动参数控制模块,按照先用位移控制器进行粗调,后用压力控制器进行

精准调整的顺序进行操作,控制四个加载板慢慢向立方体岩石试件移动至完全接触,并施加载荷至设定值;

[0021] 步骤五:利用位移控制器将套筒升降机构缓缓下放,调节方式按照先用位移传感器进行粗调,后用压力传感器进行精准调整的顺序进行操作,以确保套筒升降机构的底部能够紧密贴合于立方体岩石试件上方,然后利用温度控制器开启加热电阻片,对加载板与立方体岩石试件进行预热,直到温度传感器达到预定数值并保持一段时间;

[0022] 步骤六:利用位移控制器操控支撑板升降机构向下运动,该过程不启动转速控制器为钻头提供旋转力,与步骤四中的调整方式相同,按照先用位移传感器进行粗调,后用压力传感器进行精准调整的顺序进行操作,以钻头顶部能够与立方体岩石试件底部发生接触为准;

[0023] 步骤七:启动压力控制器,使液柱压力油箱内的液压油注入液柱压力孔内,使孔隙压力油箱内的液压油注入孔隙压力孔内,然后开启钻速控制器和位移控制器,控制钻头按设定值钻进;

[0024] 步骤八:利用数据采集模块,对实验过程中的时间、温度、压力、转速和钻进深度数据进行采集并输出保存,结束实验数据的采集处理;

[0025] 步骤九:首先关闭转速控制器停止钻头钻进,然后关闭压力控制器并利用管道将氮气瓶连接到加载室上,将液压油从孔隙压力孔流回孔隙压力油箱、从液柱压力孔流回液柱压力油箱,然后开启位移控制器使加载板向远离立方体岩石试件的方向移动,然后控制套筒升降机构向上移动,最后取出立方体岩石试件;

[0026] 步骤十:开启氮气瓶,将氮气瓶连接的管道对准实验加载装置喷射清理,对真三轴岩石钻进实验装置进行打扫,完成真三轴岩石钻进的实验。

[0027] 本发明的有益效果为:

[0028] (1)可以提供三向应力,能够独立改变岩石试件的三个主应力大小,解决了常规三轴实验装置只能在第二主应力恒等于第三主应力的状态下进行实验的短板;

[0029] (2)不但能模拟地层的高温高压环境,而且能模拟出钻头在地层钻进时的五压力状态,包括垂向应力、两向水平应力、液柱压力和孔隙压力,提高了模拟的准确性,更加贴近真实条件;

[0030] (3)加载板的布置方式可紧密压紧岩石试件,同时避免加载板之间的摩擦与错位,两两相邻加载板之间互相垂直,接触方式为端面与正面的相互交错,同时加载板上双杆件的施压方式可以避免受力不均和应力集中的情况出现;

[0031] (4)钻头由下向上钻进岩石,利用破碎岩屑本身的重力作用实现岩屑与岩体的分离,相对于传统实验装置由上向下的钻进方式,更能及时排出岩屑,减小岩屑对实验过程的影响;

[0032] (5)可研究多种钻头对破岩机理的影响,可以使用包括PDC钻头和牙轮钻头在内的多种钻头,螺纹连接使钻头的更换简单方便,适用于多种不同类型钻头破岩机理的研究;

[0033] (6)本发明可研究三向应力条件下转速、钻深、温度、压力和时间之间的关系,填补了目前岩石可钻性评价领域有关真三轴模拟实验装置的空白。

## 附图说明

[0034] 图1为一种模拟深井钻井真三轴条件的岩石钻进实验装置的结构示意图；

[0035] 图2为一种模拟深井钻井真三轴条件的岩石钻进实验装置的原理示意图；

[0036] 图3为能源供应模块的斜二等轴测结构示意图；

[0037] 图4为实验加载模块的斜二等轴测结构示意图；

[0038] 图5为实验加载模块中加载室和加载板的仰视图；

[0039] 图6为实验加载模块中钻头、钻杆、传动链和伺服电机的结构示意图；

[0040] 图7为实验加载模块加载三向应力、液柱压力和孔隙压力的剖面示意图；

[0041] 图8为液压供应模块的正视图。

[0042] 附图标号说明：

[0043] 1-能源供应模块,2-实验加载模块,3-液压供应模块,4-参数控制模块,5-数据采集模块,6-三相异步电机,7-油冷却器,8-压差发讯器,9-L型支撑架,10-立柱支撑结构,11-套筒升降结构,12-套筒,13-加载室,14-支撑板升降结构,15-支撑板,16-底座,17-钻进结构,18-钻头,19-钻杆,20-传动链,21-伺服电机,22-孔隙压力孔,23-液柱压力孔,24-加热电阻片,25-立方体岩石试件,26-第一X向加载板,27-第二X向加载板,28-第一Y向加载板,29-第二Y向加载板,30-水平应力孔,31-液柱液压泵,32-孔隙液压泵,33-X向液压泵,34-Y向液压泵,35-液柱压力油箱,36-孔隙压力油箱,37-X向压力油箱,38-Y向压力油箱。

## 具体实施方式

[0044] 为了更好的解释本发明,下面结合附图和具体实施例对本发明作进一步说明。其中“X方向”、“Y方向”等方位术语均在水平方向平面内,且以图5的定向标识作为参考。

[0045] 本发明提出了一种实施例,参照图1,图1为本发明提出的一种模拟深井钻井真三轴条件的岩石钻进实验装置的结构示意图。

[0046] 如图1所示,在本实施例中,一种模拟深井钻井真三轴条件的岩石钻进实验装置,主要包括能源供应模块1、实验加载模块2、液压供应模块3、参数控制模块4和数据采集模块5。

[0047] 在本实施例中,能源供应模块1、实验加载模块2和液压供应模块3通过管道互相连接,参数控制模块4和数据采集模块5通过电缆与实验加载模块2连接,参数控制模块4设置有控制器。

[0048] 如图2所示,图2为一种模拟深井钻井真三轴条件的岩石钻进实验装置的原理示意图。

[0049] 在本实施例中,通过设置参数控制模块4的温度、压力、转速、位移参数,控制液压泵和伺服电机进行工作,实验加载模块2设置有传感器,传感器将实验加载模块2的三向应力、液柱压力、孔隙压力和温度进行反馈,实验加载模块2利用电缆将信号反馈至数据采集模块5当中进行数据采集输出。

[0050] 如图3所示,图3为能源供应模块的斜二等轴测结构示意图。

[0051] 在本实施例中,能源供应模块1包括三相异步电机6、油冷却器7、压差发讯器8和L型支撑架9;三相异步电机6设于L型支撑架9底板;油冷却器7和压差发讯器8设于L型支撑架9侧壁;压差发讯器8设于油冷却器7上方;压差发讯器8、油冷却器7和三相异步电机6通过管

道依次连接。

[0052] 如图4所示,图4为实验加载模块的斜二等轴测结构示意图。

[0053] 在本实施例中,实验加载模块2包括立柱支撑结构10、套筒升降结构11、套筒12、加载室13、支撑板升降机构14、支撑板15、底座16和钻进结构17;立柱支撑结构10包含多根光滑立柱和螺纹立柱并对称设于底座16上方两侧;套筒12连接套筒升降结构11;支撑板15连接支撑板升降机构14;套筒升降结构11和支撑板升降机构14通过螺纹与立柱支撑结构10两侧螺纹立柱连接;套筒升降结构11设于支撑板升降机构14上方;钻进结构17包括钻头18、钻杆19、传动链20和伺服电机21;钻头18与钻杆19通过螺纹连接配合;伺服电机21固定安装在底座16的内壁面上;钻杆19一端通过传动链20与伺服电机21连接;钻杆19另一端穿过支撑板升降结构14底部的通孔安装在凹槽上。

[0054] 进一步的,套筒12顶端中心设有孔隙压力孔22;钻杆19底端设有液柱压力孔23。

[0055] 在具体实施例中,需要给定设计压力、设计温度、最小壁厚、腐蚀余量和选材要求。结合实验需要和现行国家标准,给出实验加载装置102的设计参数如下:

[0056] 设计实验加载模块2的设计压力和设计温度时,将模拟深井钻井真三轴条件的岩石钻进实验装置的设计压力定为200MPa,参照标准TSG 21-2016《固定式压力容器安全技术监察规程》,模拟深井钻井真三轴条件的岩石钻进实验装置的压力等级定为超高压(代号U,  $p \geq 100.0\text{MPa}$ ),结合标准GB/T 150.1-2011《压力容器 第1部分:通用要求》,可得最大工作压力为180MPa,参照标准SH/T 3074-2018《石油化工钢制压力容器》,可以将模拟深井钻井真三轴条件的岩石钻进实验装置的设计温度定为 $-20^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$ 。

[0057] 耐压试验压力 $p_T$ 应满足公式:

$$[0058] \quad p_T = 1.25p \frac{[\sigma]}{[\sigma]^t}$$

[0059] 式中:

[0060]  $p_T$ —耐压试验压力,MPa;

[0061]  $p$ —压力容器的设计压力或者压力容器铭牌上规定的最高允许工作压力,MPa;

[0062]  $[\sigma]$ —试验温度下材料的许用应力,MPa;

[0063]  $[\sigma]^t$ —设计温度下材料的许用应力,MPa。

[0064] 由下述材料在实验温度和设计温度下的许用应力值和压力容器的设计压力,求得耐压实验压力:

$$[0065] \quad p_T = 1.25p \frac{[\sigma]}{[\sigma]^t} = 1.25 \times 200 \times \frac{230}{230} = 250(\text{MPa})$$

[0066] 设计实验加载模块2的腐蚀余量和最小厚度时,考虑模拟深井钻井真三轴条件的岩石钻进实验装置可能发生的腐蚀情况包括:液压油的油泥产生微酸性腐蚀、长时间暴露在大气自然环境种的大气腐蚀和液压油裹挟破碎岩石颗粒产生的磨损腐蚀,参照标准GB/T 150.1-2011《压力容器 第1部分:通用要求》,应保证材料腐蚀余量不小于1mm,参照标准GB/T 709-2019《热轧钢板和钢带的尺寸、外形、重量及允许偏差》,应保证公称厚度在8.00~15.0范围内时,材料厚度负偏差为-0.55mm,壳体加工成形后不包括腐蚀余量的低合金钢制容器最小厚度不小于3mm,满足上述条件后确定设计厚度需满足 $\geq 4.55\text{mm}$ ,圆整后真三轴岩石钻进实验装置最小厚度可取5mm。

[0067] 选取实验加载模块2的材料时,考虑模拟深井钻井真三轴条件的岩石钻进实验装置的加载室13部分需要由金属胚料锻造加工获得,同时模拟深井钻井真三轴条件的岩石钻进实验装置还需要承受较高载荷且具备上述耐腐蚀能力,参照标准GB/T 150.1-2011《压力容器 第2部分:材料》,选取钢号35CrMo(属低合金钢),该钢种在公称厚度 $\leq 300\text{mm}$ ,温度 $200^\circ\text{C}$ 的许用应力为 $230\text{MPa}$ ,温度 $\leq 20^\circ\text{C}$ 的许用应力为 $230\text{MPa}$ ,在设计压力 $200\text{MPa}$ 的条件下可以正常使用。

[0068] 如图5所示,图5为实验加载模块中加载室和加载板的仰视图。

[0069] 在本实施例中,加载室13内包含多个加热电阻片24、立方体岩石试件25、第一X向加载板26、第二X向加载板27、第一Y向加载板28、第二Y向加载板29和多个水平应力孔30。

[0070] 进一步的,加载室13为圆形结构;加载室13中间留有安装加热电阻片24、放置立方体岩石试件25、第一X向加载板26、第二X向加载板27、第一Y向加载板28、第二Y向加载板29往复运动的方形空余空间;加热电阻片24均匀分布在加载室13的周向内壁;加载室13的周向内壁四面上分别均匀布置有两个水平应力孔30;第一X向加载板26、第二X向加载板27、第一Y向加载板28、第二Y向加载板29分别通过各面的水平应力孔30与加载室13连接。

[0071] 进一步的,第一X向加载板26、第二X向加载板27、第一Y向加载板28、第二Y向加载板29分别朝向四个方向;两两相邻加载板之间互相垂直,且两垂直加载板的接触部分处,为端面与正面的交错接触方式;第一X向加载板26、第二X向加载板27、第一Y向加载板28、第二Y向加载板29围成一个中心具有空余空间的结构,空余空间用来放置立方体岩石试件25;

[0072] 进一步的,液压油通过八个水平应力孔30向第一X向加载板26、第二X向加载板27、第一Y向加载板28、第二Y向加载板29施加液压,第一X向加载板26、第二X向加载板27和第一Y向加载板28、第二Y向加载板29可在液压作用下实现彼此的相对滑动,使加载板向所述立方体岩石试件25水平方向的四个平面靠近直至完全接触,使载荷能够持续施加在立方体岩石试件25上,加载室13顶部和底部均设有密封圈,用来提高加载室13和套筒升降机构11之间的密封性。

[0073] 在具体实施例中,需要给定加载室13的设计壁厚,结合实验需要和现行国家标准,给出加载室13的设计参数如下:

[0074] 参照标准GB/T 150.3-2011《压力容器 第3部分:设计》,设计温度下加载室13的计算厚度 $\delta$ 的公式为:

$$[0075] \quad \delta = \frac{p_c D_i}{2[\sigma]_t \phi - p_c}$$

[0076] 式中:

[0077]  $p_c$ —计算压力,MPa;

[0078]  $D_i$ —内直径,mm;

[0079]  $[\sigma]_t$ —材料在设计温度下的许用应力,MPa;

[0080]  $\phi$ —焊接接头系数;

[0081]  $\delta$ —壁厚,mm;

[0082] 求得壁厚 $\delta$ 为:

$$[0083] \quad \delta = \frac{200 \times 156}{2 \times 230 \times 1 - 100} = 86.6667 \text{ (mm)}$$

[0084] 对壁厚 $\delta$ 进行圆整后,加载室13的壁厚取 $\delta_1=90\text{mm}$ 。

[0085] 如图6所示,图6为实验加载模块中钻头、钻杆、传动链和伺服电机的结构示意图。

[0086] 在本实施例中,伺服电机21的齿轮与钻杆19的齿轮通过传动链20构成链传动,钻杆19与钻头18采用螺纹连接进行配合,伺服电机21固定安装在底座16上,伺服电机21启动后带动钻杆19与钻头18实现同步旋转。

[0087] 在具体实施例中,需要给定转速要求,结合实验需要和现行国家标准,给出伺服电机21的设计参数如下:

[0088] 参照标准SY/T 5426-2016《石油天然气钻井工程岩石可钻性测定与分级》,主轴旋转速度为 $n=55\text{r/min}\pm 1\text{r/min}$ ,参照JB/T 1009-2016《YS系列三相异步电动机》,从电动机到传送带的总效率为 $\eta=0.96\times 0.994\times 0.972\times 0.99\times 0.99=0.85$ ,电动机所需工作效率 $P_d$ 为:

$$[0089] \quad P_d = \frac{P_w}{0.96\eta_t}$$

[0090] 式中:

[0091]  $P_d$ —电动机的输出功率,Kw;

[0092]  $P_w$ —电动机至工作机之间传动装置的总功率,Kw;

[0093]  $\eta_t$ —电动机到各级传送带之间传动效率的乘积,无量纲。

[0094] 求得 $P_d=0.96\text{kW}$ ,取 $P_d=1\text{kW}$ ,根据传动比合理范围,取圆柱齿轮传动一级减速器传动比范围 $I_1=2\sim 5$ ,V带传动比 $I_2=3\sim 4$ ,则传动比范围 $I=I_1\times I_2$ ,可取 $I=6\sim 20$ ,则电动机转速的可选范围为:

$$[0095] \quad n_d = I \times n = (6\sim 20) \times 55 = (330\sim 1100)\text{r/min}$$

[0096] 式中:

[0097]  $n_d$ —电动机转速,r/min;

[0098]  $I$ —转动构件的传动比,无量纲;

[0099]  $n$ —主轴旋转速度,r/min。

[0100] 符合范围的同步转速有750r/min,1000r/min,选定电动机型号为YS100L-6,其额定转速960r/min,额定功率1.5kW。

[0101] 如图7所示,图7为实验加载模块加载三向应力、液柱压力和孔隙压力的剖面示意图。

[0102] 在本实施例中,在套筒升降机构11沿轴向向下运动盖紧加载室13后,套筒升降机构11会沿轴线方向继续向下运动压紧立方体岩石试件25并向立方体岩石试件25持续施加垂向应力。

[0103] 同时,液压油可以通过套筒升降机构11顶部的孔隙压力孔22进入流道内,给立方体岩石试件25施加孔隙压力,套筒升降机构11内壁面设有密封圈,用来提高套筒升降机构11和加载室13之间的密封性。

[0104] 如图8所示,图8为液压供应模块的正视图。

[0105] 在本实施例中,液压供应模块3共有四组液压泵与油箱的组合;液压泵包含液柱液压泵31、孔隙液压泵32、X向液压泵33和Y向液压泵34;油箱包含液柱压力油箱35、孔隙压力油箱36、X向压力油箱37和Y向压力油箱38;液压泵与油箱之间均通过法兰进行连接,然后固

定安装在支撑板上。

[0106] 采用上述一种模拟深井钻井真三轴条件的岩石钻进实验装置进行的实验方法,包括以下步骤:

[0107] 步骤一:制备立方体岩石试件25,选取实验钻头18,将钻头18通过螺纹连接的方式安装在钻杆19上,开启数据采集装置,收集实时数据;

[0108] 步骤二:启动能源供应模块1,利用三相异步电动机6为岩石钻进实验装置提供能源动力,并利用油冷却器7为三相异步电动机6降温,同时利用压差发讯器8检查岩石钻进实验装置的压差值是否在设定值以内;

[0109] 步骤三:将立方体岩石试件25放置于加载室13底部的方孔内;

[0110] 步骤四:启动参数控制模块4,按照先用位移控制器进行粗调,后用压力控制器进行精准调整的顺序进行操作,控制四个加载板慢慢向立方体岩石试件25移动至完全接触,并施加载荷至设定值;

[0111] 步骤五:利用位移控制器将套筒升降机构11缓缓下放,调节方式按照先用位移传感器进行粗调,后用压力传感器进行精准调整的顺序进行操作,以确保套筒升降机构11的底部能够紧密贴合于立方体岩石试件25上方,然后利用温度控制器开启加热电阻片24,对加载板与立方体岩石试件25进行预热,直到温度传感器达到预定数值并保持一段时间;

[0112] 步骤六:利用位移控制器操控支撑板升降机构14向下运动,该过程不启动转速控制器为钻头18提供旋转力,与步骤四中的调整方式相同,按照先用位移传感器进行粗调,后用压力传感器进行精准调整的顺序进行操作,以钻头18顶部能够与立方体岩石试件25底部发生接触为准;

[0113] 步骤七:启动压力控制器,使液柱压力油箱35内的液压油注入液柱压力孔23内,使孔隙压力油箱36内的液压油注入孔隙压力孔22内,然后开启钻速控制器和位移控制器,控制钻头18按设定值钻进;

[0114] 步骤八:利用数据采集模块5,对实验过程中的时间、温度、压力、转速和钻进深度数据进行采集并输出保存,结束实验数据的采集处理;

[0115] 步骤九:首先关闭转速控制器停止钻头18钻进,然后关闭压力控制器并利用管道将氮气瓶连接到加载室13上,将液压油从孔隙压力孔22流回孔隙压力油箱36、从液柱压力孔23流回液柱压力油箱35,然后开启位移控制器使加载板向远离立方体岩石试件25的方向移动,然后控制套筒升降机构11向上移动,最后取出立方体岩石试件25;

[0116] 步骤十:开启氮气瓶,将氮气瓶连接的管道对准实验加载装置喷射清理,对真三轴岩石钻进实验装置进行打扫,完成真三轴岩石钻进的实验。

[0117] 最后要说明的是,以上实施例仅用以说明本发明的技术方案而非限制,尽管参照实施例对本发明进行了详细说明,本领域的普通技术人员应当理解,对本发明的技术方案进行修改或者等同替换,都不脱离本发明技术方案的精神和范围,其均应涵盖在本发明的权利要求范围当中。

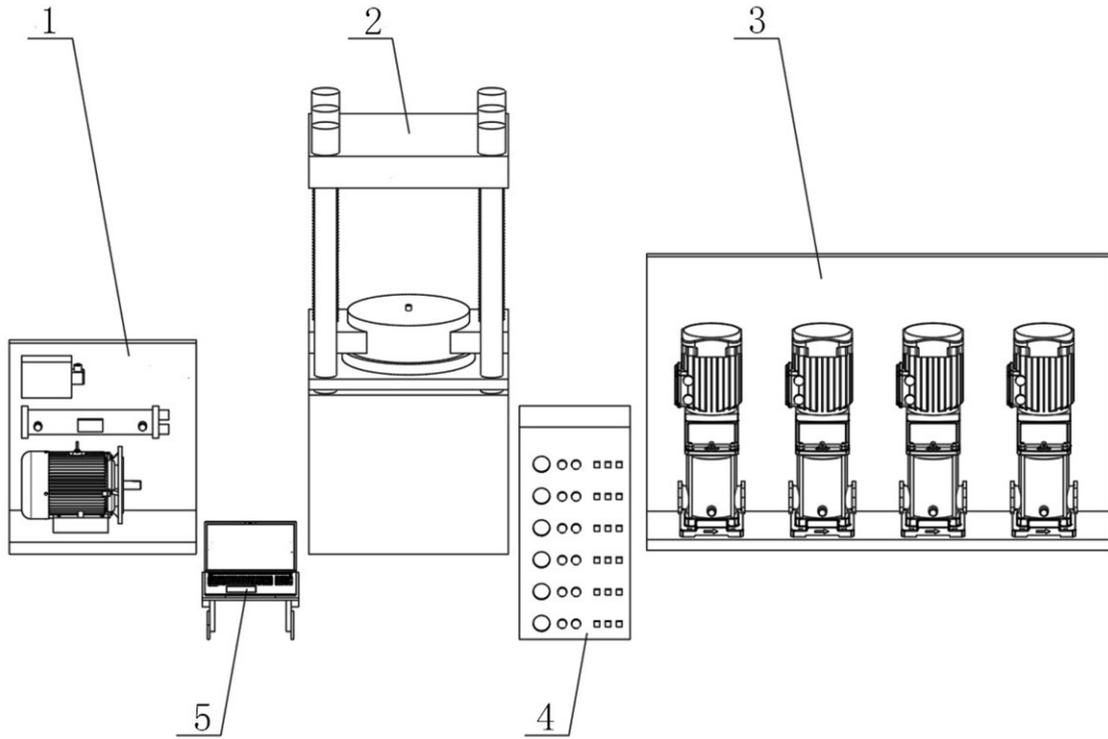


图1

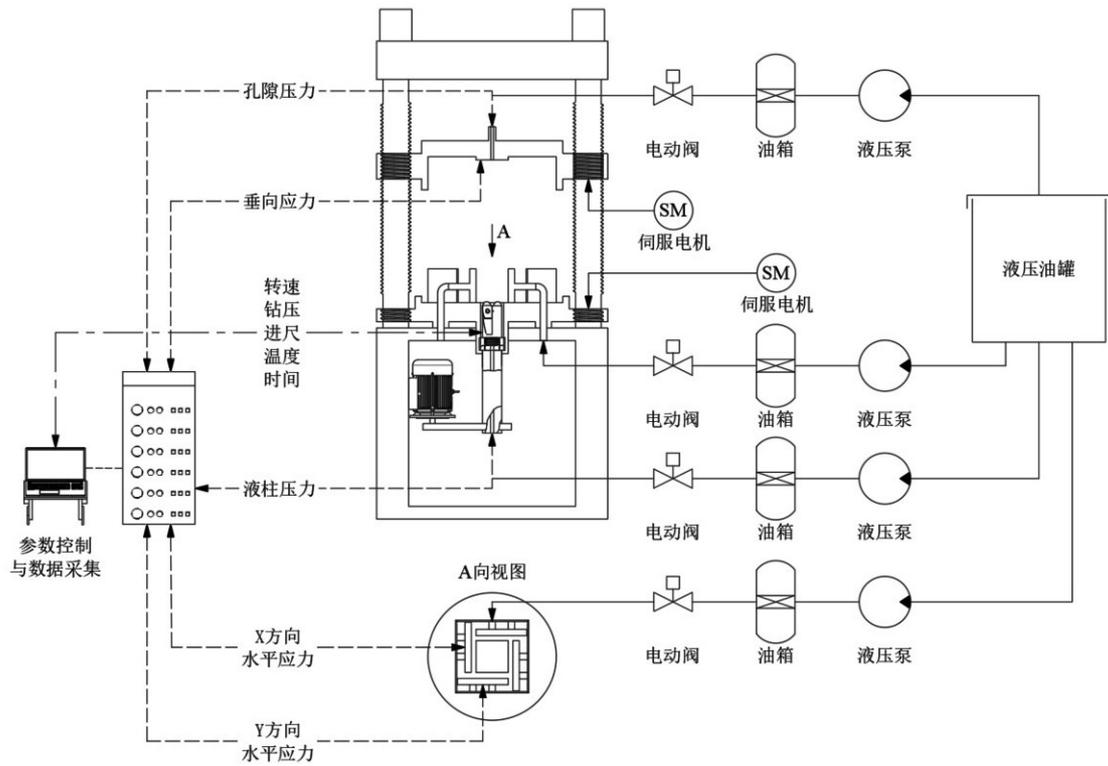


图2

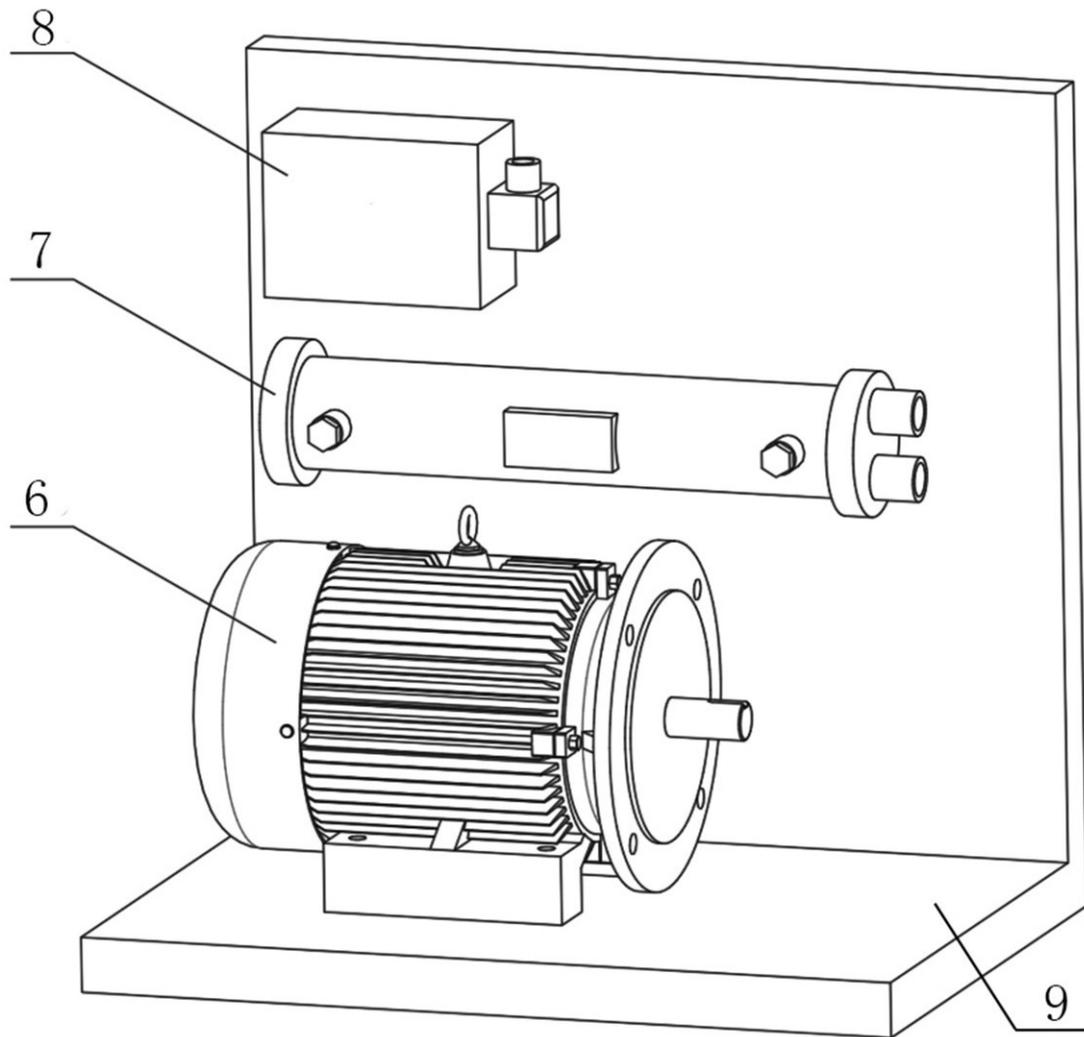


图3

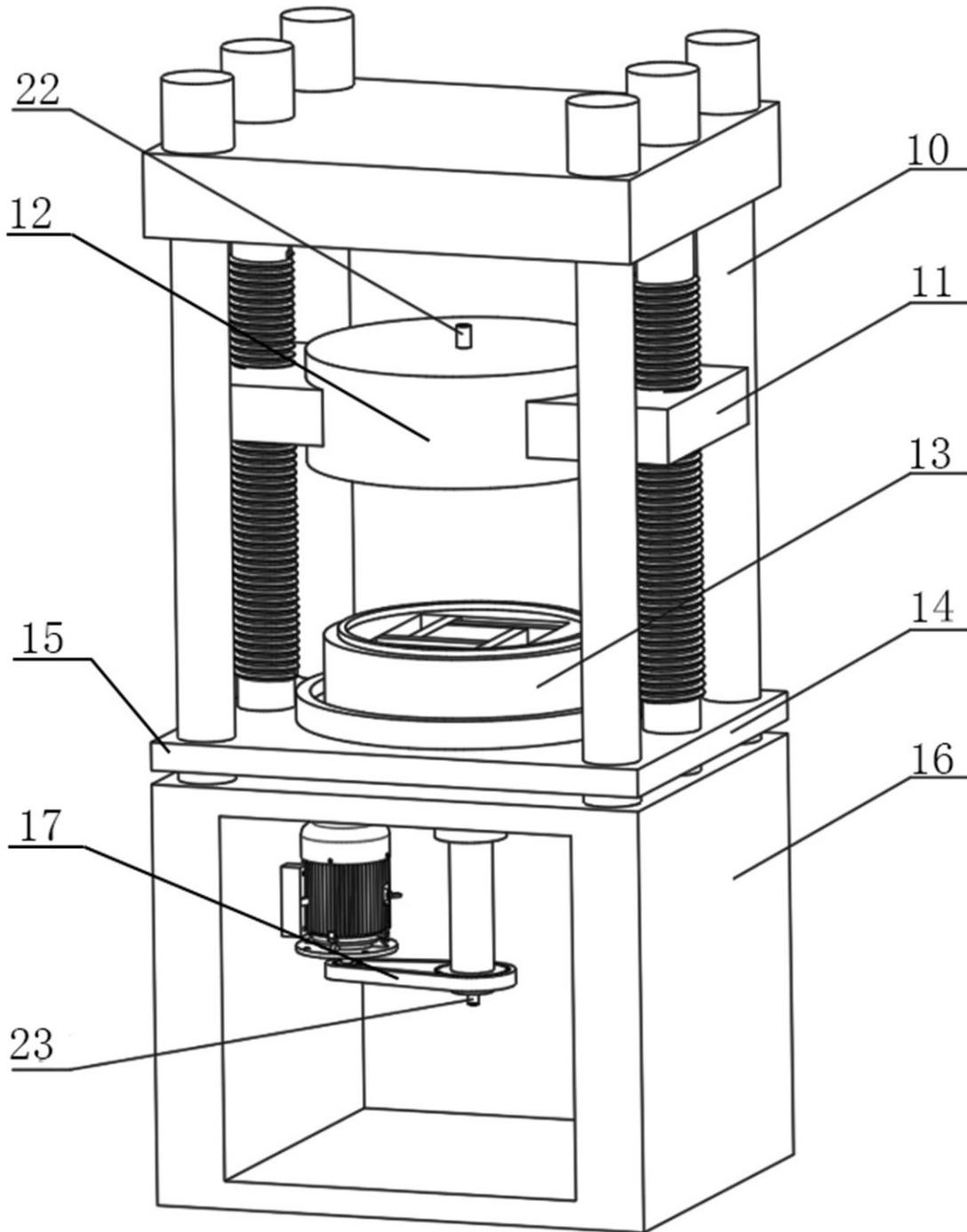


图4

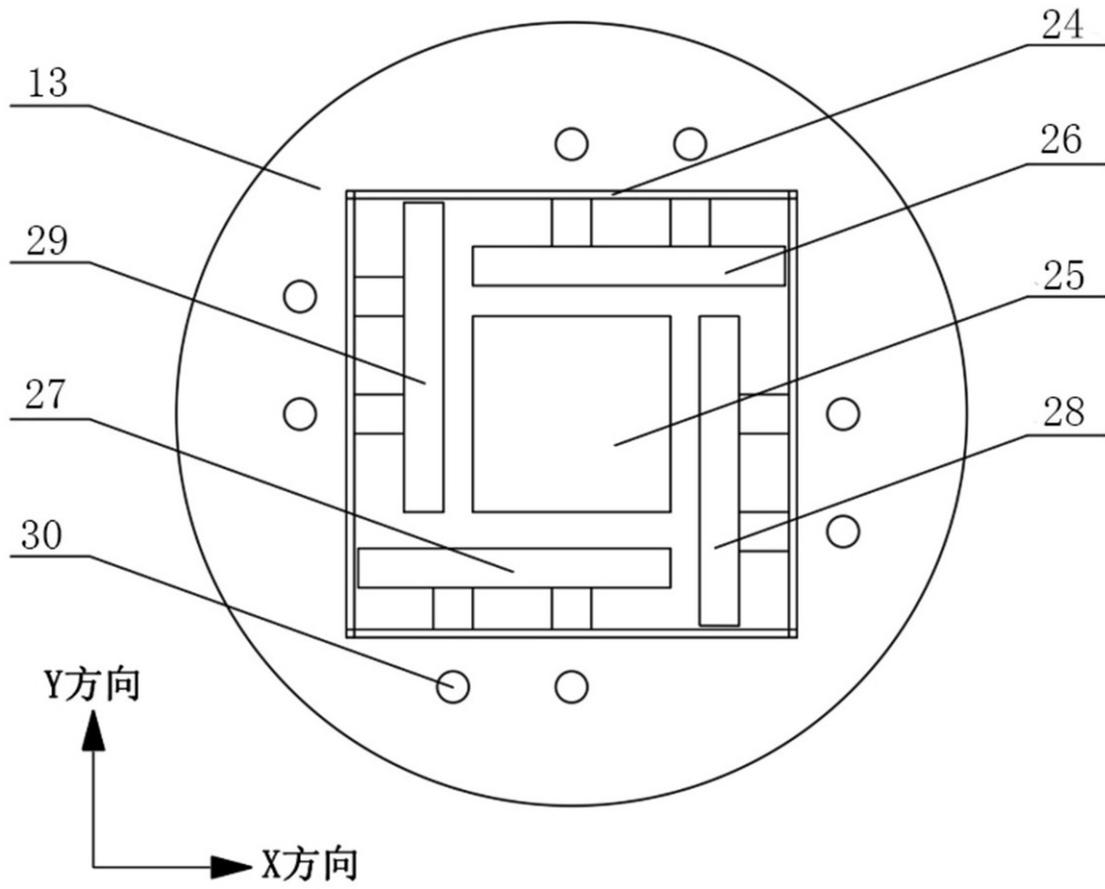


图5

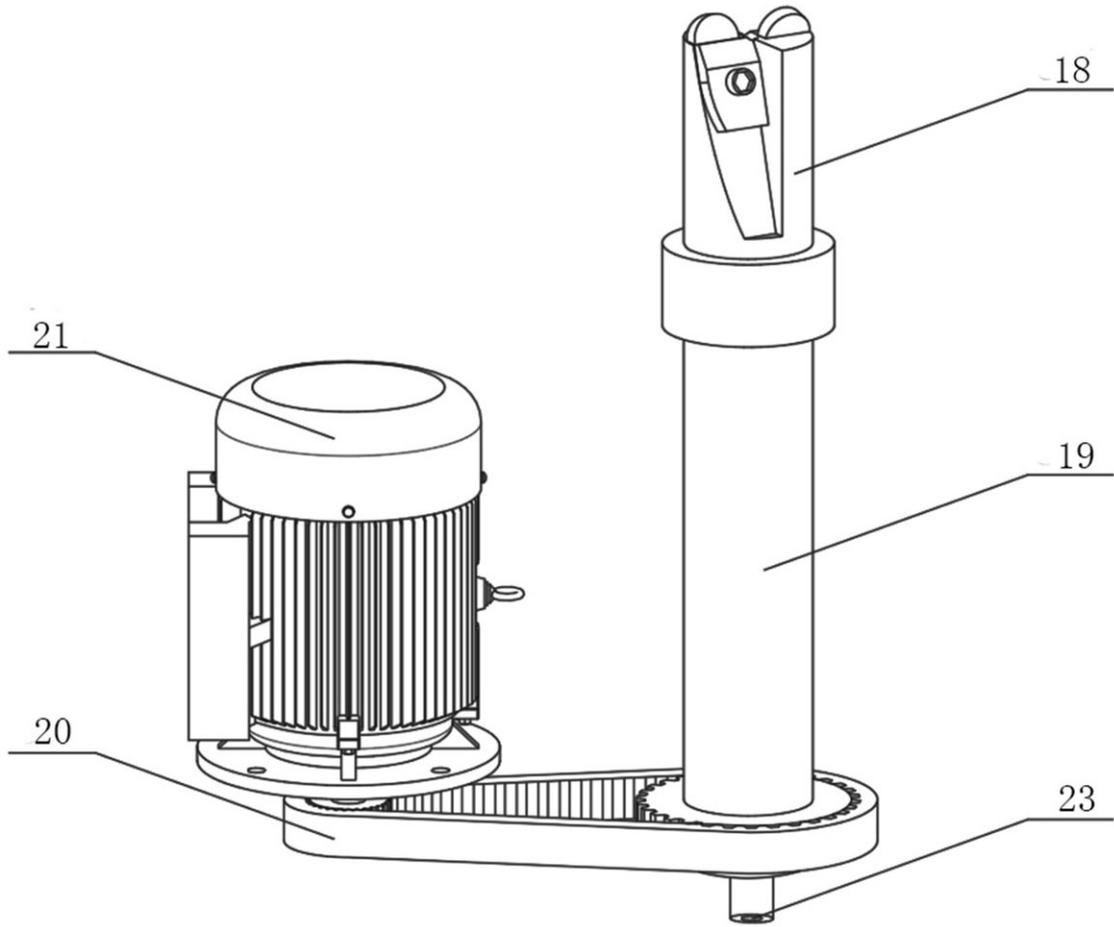


图6

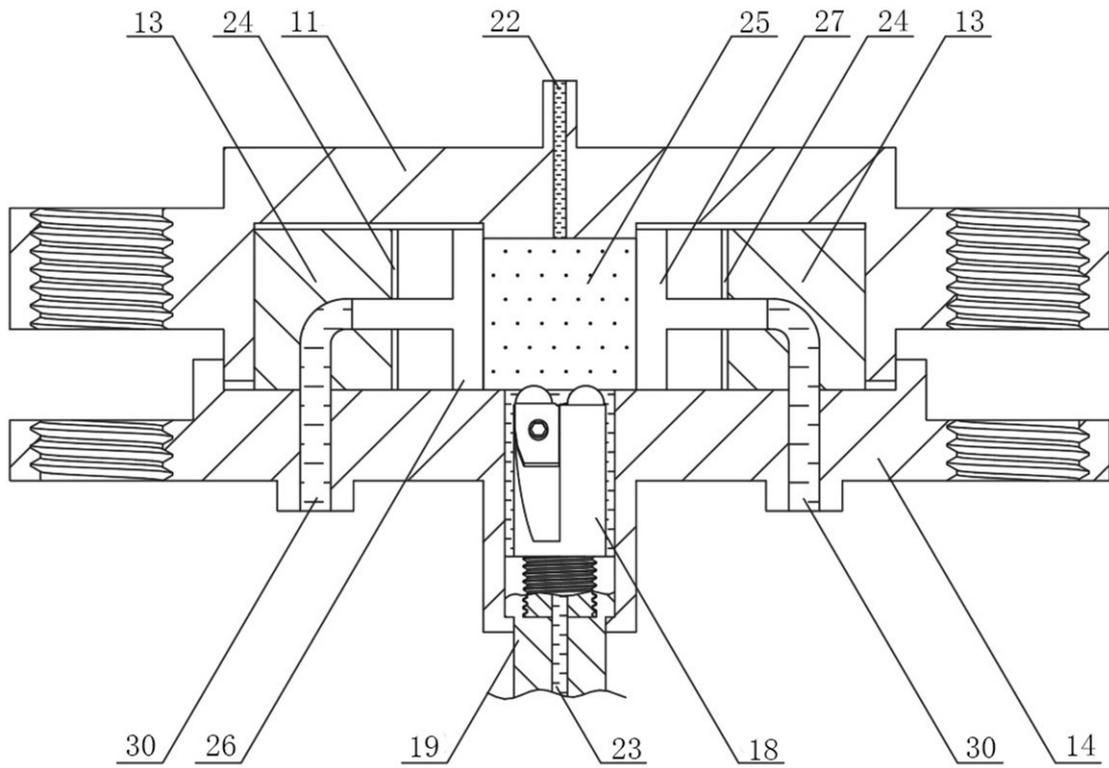


图7

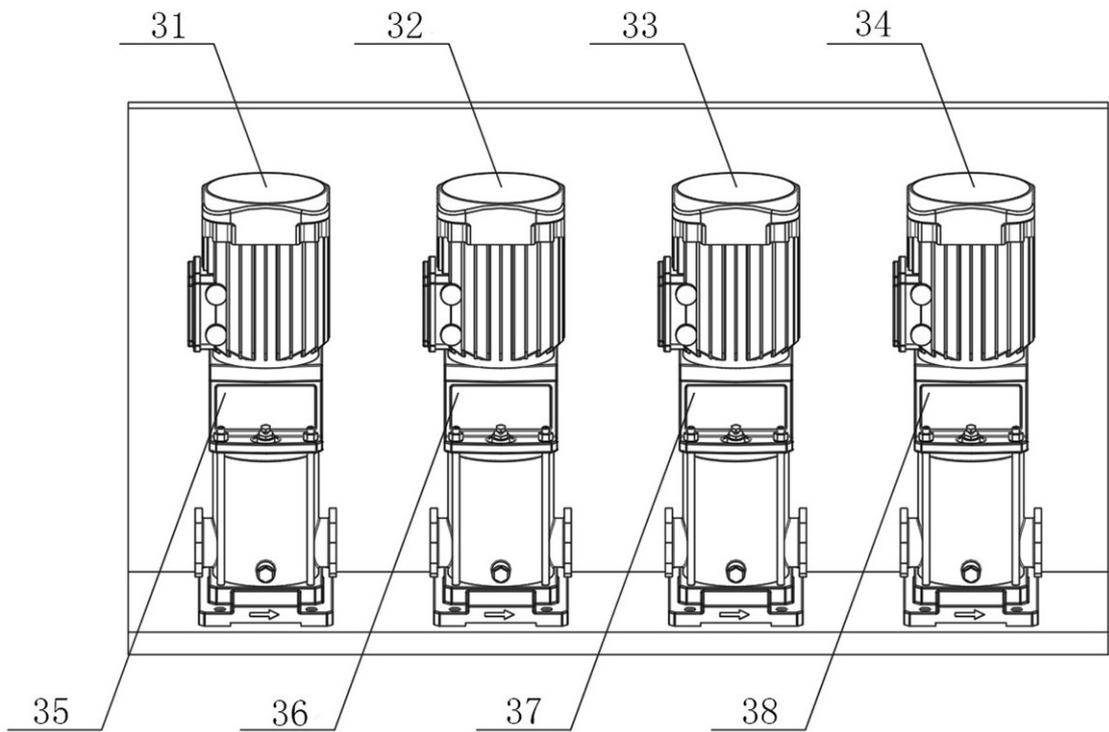


图8