



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 111220484 A

(43)申请公布日 2020.06.02

(21)申请号 202010155263.5

G01N 19/02(2006.01)

(22)申请日 2020.03.09

(71)申请人 重庆地质矿产研究院

地址 401120 重庆市渝北区空港兰馨大道
111号

申请人 重庆大学

(72)发明人 陆朝晖 贾云中 汤积仁 程玉刚

周军平 周雷 贺培

(74)专利代理机构 重庆华科专利事务所 50123

代理人 唐锡娇

(51)Int.Cl.

G01N 3/24(2006.01)

G01N 3/12(2006.01)

G01N 3/06(2006.01)

G01N 15/08(2006.01)

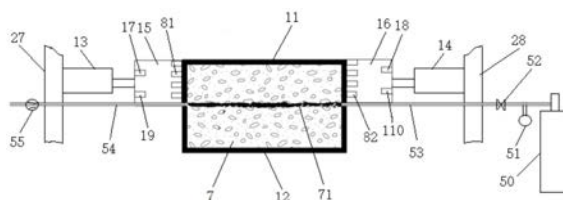
权利要求书3页 说明书7页 附图3页

(54)发明名称

一种往复式岩石裂缝摩擦-渗流特性测试装置及测试方法

(57)摘要

本发明公开了一种往复式岩石裂缝摩擦-渗流特性测试装置及测试方法,测试装置包括X轴剪切系统、Y轴应力加载系统、Z轴应力加载系统、伺服油源系统、孔隙压力加载系统和主机;X轴剪切系统包括X轴EDC控制器、上剪切盒、下剪切盒、X轴左液压缸、X轴右液压缸、X轴左压头、X轴右压头、X轴左压力传感器、X轴右压力传感器和X轴位移传感器;孔隙压力加载系统包括气瓶、压力表、减压阀、流体入口管路、流体出口管路和流量计。采用本发明能高效、准确测量滑移过程中的摩擦系数、裂缝面的稳定性参数和渗透率,实现岩石裂缝摩擦特性与裂缝渗透率演化规律的同时测量,能同时表征岩石裂缝的力学性质和渗流(水力学)特性。



1. 一种往复式岩石裂缝摩擦-渗流特性测试装置,包括X轴剪切系统、Y轴应力加载系统、Z轴应力加载系统、伺服油源系统,其特征在于:还包括孔隙压力加载系统和主机(6);

所述X轴剪切系统包括X轴EDC控制器(10)、上剪切盒(11)、下剪切盒(12)、X轴左液压缸(13)、X轴右液压缸(14)、X轴左压头(15)、X轴右压头(16)、X轴左压力传感器(17)、X轴右压力传感器(18)和X轴位移传感器,所述伺服油源系统给X轴左液压缸(13)、X轴右液压缸(14)供油,下剪切盒(12)、X轴左液压缸(13)、X轴右液压缸(14)分别固定安装,上剪切盒(11)与下剪切盒(12)正对平行形成能容纳岩石试件(7)的空腔,上剪切盒(11)的左侧壁下边缘与下剪切盒(12)的左侧壁上边缘通过对开缺口的方式形成有左连接孔,上剪切盒(11)的右侧壁下边缘与下剪切盒(12)的右侧壁上边缘通过对开缺口的方式形成有右连接孔,X轴左液压缸(13)的活塞杆端部固定连接X轴左压头(15),X轴左压头(15)作用于上剪切盒(11)左侧,通过X轴左压头(15)对上剪切盒(11)施加左剪切力,X轴左压力传感器(17)安装在能测量左剪切力的部位且通过信号线与X轴EDC控制器(10)电连接,X轴右液压缸(14)的活塞杆端部固定连接X轴右压头(16),X轴右压头(16)作用于上剪切盒(11)右侧,通过X轴右压头(16)对上剪切盒(11)施加右剪切力,X轴右压力传感器(18)安装在能测量右剪切力的部位且通过信号线与X轴EDC控制器(10)电连接,X轴位移传感器安装在能测量剪切形成的裂缝面滑移位移的部位且通过信号线与X轴EDC控制器(10)电连接,X轴EDC控制器(10)通过信号线与主机(6)、伺服油源系统中用于X轴左液压缸与X轴右液压缸供油切换的换向阀(40)和用于调节X轴左液压缸与X轴右液压缸供油油液流量的X轴电液伺服阀(41)电连接;

所述Y轴应力加载系统能对上剪切盒、下剪切盒以及岩石试件加载Y轴应力,所述Z轴应力加载系统能对上剪切盒、下剪切盒以及岩石试件加载Z轴应力;

所述孔隙压力加载系统包括气瓶(50)、压力表(51)、减压阀(52)、流体入口管路(53)、流体出口管路(54)和流量计(55),压力表(51)、减压阀(52)安装在流体入口管路(53)上,流体入口管路(53)的一端插在右连接孔内能与岩石试件(7)接触,流体入口管路(53)的另一端与气瓶(50)连接,流量计(55)安装在流体出口管路(54)上且通过信号线与主机(6)电连接,流体出口管路(54)的一端插在左连接孔内能与岩石试件(7)接触,流体出口管路(54)的另一端直接接通大气。

2. 根据权利要求1所述的往复式岩石裂缝摩擦-渗流特性测试装置,其特征在于:该测试装置还包括声发射检测系统,声发射检测系统包括声发射信号分析仪(80)、声发射探头(81)和声接收探头(82),声发射探头(81)安装在上剪切盒(11)的左侧壁上或者下剪切盒(12)的左侧壁上且通过信号线与声发射信号分析仪(80)电连接,声接收探头(82)安装在上剪切盒(11)的右侧壁上或者下剪切盒(12)的右侧壁上且通过信号线与声发射信号分析仪(80)电连接,声发射信号分析仪(80)通过信号线与主机(6)电连接。

3. 根据权利要求1所述的往复式岩石裂缝摩擦-渗流特性测试装置,其特征在于:所述X轴位移传感器由X轴左位移传感器(19)和X轴右位移传感器(110)构成,X轴左位移传感器(19)安装在X轴左压头(15)上且通过信号线与X轴EDC控制器(10)电连接,X轴右位移传感器(110)安装在X轴右压头(16)上且通过信号线与X轴EDC控制器(10)电连接。

4. 根据权利要求1所述的往复式岩石裂缝摩擦-渗流特性测试装置,其特征在于:所述上剪切盒(11)的内表面涂有能填满与岩石试件(7)之间的缝隙的密封胶层,所述下剪切盒(12)的内表面也涂有能填满与岩石试件(7)之间的缝隙的密封胶层;所述上剪切盒(11)与

下剪切盒(12)之间通过密封条密封。

5. 根据权利要求1至4任一项所述的往复式岩石裂缝摩擦-渗流特性测试装置,其特征在于:所述Y轴应力加载系统包括Y轴EDC控制器(20)、Y轴液压缸(21)、Y轴压头(22)、与Y轴压头(22)对应的Y轴压板(23)、Y轴压力传感器(24)和Y轴加载框架, Y轴加载框架为由前钢板(25)、后钢板(26)、左钢板(27)和右钢板(28)垂直连接形成的口字形框架,所述伺服油源系统给Y轴液压缸(21)供油, Y轴液压缸(21)固定安装在前钢板(25)上, Y轴液压缸(21)的活塞杆端部固定连接Y轴压头(22), Y轴压板(23)固定安装在后钢板(26)上, Y轴压头(22)作用于上、下剪切盒的前侧, Y轴压板(23)作用于上、下剪切盒的后侧,通过Y轴压头(22)和Y轴压板(23)的配合能对上、下剪切盒以及岩石试件加载Y轴应力; Y轴压力传感器(24)安装在能测量Y轴应力的部位且通过信号线与Y轴EDC控制器(20)电连接, Y轴EDC控制器(20)通过信号线与主机(6)、伺服油源系统中用于调节Y轴液压缸供油油液流量的Y轴电液伺服阀(42)电连接。

6. 根据权利要求5所述的往复式岩石裂缝摩擦-渗流特性测试装置,其特征在于:所述Y轴应力加载系统还包括Y轴位移传感器(29), Y轴位移传感器(29)安装在能测量Y轴压头位移的部位且通过信号线与Y轴EDC控制器(20)电连接。

7. 根据权利要求6所述的往复式岩石裂缝摩擦-渗流特性测试装置,其特征在于:所述X轴左液压缸(13)固定安装在左钢板(27)上,所述X轴右液压缸(14)固定安装在右钢板(28)上。

8. 根据权利要求7所述的往复式岩石裂缝摩擦-渗流特性测试装置,其特征在于:所述Z轴应力加载系统包括Z轴EDC控制器(30)、Z轴液压缸(31)、Z轴压头(32)、与Z轴压头(32)对应的Z轴压板(33)、Z轴压力传感器(34)、Z轴位移传感器(35)、门型框架(36)和压力室(37),所述Z轴压板(33)固定安装在压力室(37)的底部,所述下剪切盒(12)固定安装在Z轴压板(33)上,所述伺服油源系统给Z轴液压缸(31)供油, Z轴液压缸(31)通过安装在压力室顶部的门型框架(36)悬挂在压力室(37)内, Z轴液压缸(31)具有两根活塞杆, Z轴液压缸(31)的上活塞杆(38)的端部安装Z轴位移传感器(35), Z轴液压缸(31)的下活塞杆(39)的端部与Z轴压力传感器(34)的一端固定连接, Z轴压力传感器(34)的另一端与Z轴压头(32)固定连接, Z轴压头(32)作用于上剪切盒上侧,通过Z轴压头(32)和Z轴压板(33)的配合能对上、下剪切盒以及岩石试件加载Z轴应力; Z轴压力传感器(34)、Z轴位移传感器(35)分别通过信号线与Z轴EDC控制器(30)电连接, Z轴EDC控制器(30)通过信号线与主机(6)、伺服油源系统中用于调节Z轴液压缸供油油液流量的Z轴电液伺服阀(43)电连接。

9. 一种往复式岩石裂缝摩擦-渗流特性测试方法,采用如权利要求1至8任一项所述的测试装置,其特征在于,包括:

第一步、准备岩石试件(7),并在岩石试件外表面均匀涂抹一层聚氨酯密封胶;

第二步、将涂抹了一层聚氨酯密封胶的岩石试件(7)放入下剪切盒(12)内,在下剪切盒(12)与岩石试件(7)之间的缝隙内注入能填满该缝隙的聚氨酯密封胶,然后盖上上剪切盒(11),在上剪切盒(11)与岩石试件(7)之间的缝隙内注入能填满该缝隙的聚氨酯密封胶;

第三步、将下剪切盒(12)固定安装在Z轴压板(33)上,使Y轴压板(23)与上、下剪切盒的后侧接触,使Y轴压头(22)与上、下剪切盒的前侧接触,使Z轴压头(32)与上剪切盒(11)上侧接触,使X轴左压头(15)与上剪切盒(11)左侧接触,使X轴右压头(16)与上剪切盒(11)右侧

接触；

第四步、将孔隙压力加载系统中的流体入口管路(53)的一端插在右连接孔内与岩石试件(7)接触,将流体出口管路(54)的一端插在左连接孔内与岩石试件(7)接触；

第五步、对测试装置中的各个系统中的管路进行抽真空处理；

第六步、安装声发射探头(81)和声接收探头(82)；

第七步、对上、下剪切盒以及其内的岩石试件加载Z轴应力和Y轴应力；

第八步、通过在流体入口管路(53)中通入渗流流体介质的方式加载孔隙压力；

第九步、以第一预设X轴加载速率对上剪切盒以及其内的岩石试件施加左剪切力或者右剪切力,待加载的左剪切力或者右剪切力经过增大到减小再到保持稳定时,表示剪切完成形成了裂缝面(71),以第一预设X轴加载速率继续加载,裂缝面开始滑移,在裂缝面滑移过程中可以根据实验需求改变X轴加载速率和X轴加载方向,通过改变X轴加载方向的方式进行往复加载；

第十步、利用公式： $\mu = \tau / \sigma$,计算得到裂缝面摩擦系数 μ ；利用公式： $(a-b) = (\mu^{i+1} - \mu^i) / \ln(V^{i+1}/V^i)$,计算得到裂缝面的稳定性参数(a-b)；利用公式： $k = (-12\eta LQ / W \Delta P)^{2/3} / 12$,计算裂缝面滑移过程中的渗透率k；其中, τ 表示X轴剪切力, τ 等于左剪切力或者右剪切力, σ 表示Z轴应力； μ^i 表示裂缝面形成后X轴加载速率为 V^i 时的裂缝面摩擦系数, μ^{i+1} 表示裂缝面形成后X轴加载速率为 V^{i+1} 时的裂缝面摩擦系数, ΔP 表示压力表读数与大气压的压力差, η 表示渗流流体介质的动力粘度,L表示滑移过程中裂缝接触面的长度,W表示裂缝面的宽度,Q表示流量计的读数。

一种往复式岩石裂缝摩擦-渗流特性测试装置及测试方法

技术领域

[0001] 本发明涉及岩体力学与工程实验领域,具体涉及一种往复式岩石裂缝摩擦-渗流特性测试装置及测试方法。

背景技术

[0002] 油气与地热能源开发、污水回注等与注水有关的人类活动可能诱发地震活动及灾害风险。大量的高压流体注入地层,改变了储层的地应力场,减小了原始作用在断层和裂缝面上的有效应力,可能产生断层和裂缝的滑移,导致地震现象。断层和裂缝面的滑移稳定性将会直接决定滑移的形式是稳定的蠕变滑移或非稳定性地震滑移,滑移过程也会导致周围岩体的渗透性的变化。同样,二氧化碳地质封存也存在类似的工程问题,多物理场变化下盖层渗透率的演化会直接影响二氧化碳地质封存的效果。为了能够高效安全的进行能源开发水力压裂、污水回注和二氧化碳地质封存等作业,非常有必要对储层和盖层岩石裂缝的摩擦-渗流特性进行科学评估。然而,由于储层和盖层深度大,条件复杂多变,直接在地应力条件下进行摩擦-渗流相关参数的测量难度较大。因此,有必要在实验室内进行模拟实验,以推广到实际操作中。为此,已经有研究者对岩石裂缝滑移过程中的摩擦-渗流特性做出了研究。如CN208921564U公开的测定岩石剪切强度及剪切裂缝摩擦滑动特性的测试装置,其利用了三轴岩石力学试验机压头在上剪切盘施加轴向载荷,促使上剪切盘和下剪切盘沿上剪切斜面与下剪切斜面相对滑动,同时记录轴向位移、轴向载荷随时间的变化,同时得到岩石的剪切强度和摩擦滑动特性;CN103257089A公开的压力脉冲测量装置测量基质和裂缝渗透率的方法,其利用了压力脉冲测量装置,提出了对具有裂缝的岩心进行一次测试就能分别测出裂缝、基质的渗透率的方法。但这些研究仍存在着以下缺点:

[0003] (1) 现有的岩石斜剪仪无法模拟深部岩石所处的三轴地应力状态,无法准确测量岩石裂缝面在地应力条件下的摩擦特性。

[0004] (2) 现有室内实验岩石裂缝摩擦系数的测量多采用斜剪方式,斜剪裂缝滑移过程中由于端头加载导致的应力集中现象难以保证裂缝沿裂缝面方向进行滑移,使得上下裂缝面不能完全接触,导致测量结果不够准确。

[0005] (3) 现有测试装置不能同时测量岩石裂缝摩擦特性与裂缝渗透率演化规律,不能同时表征岩石裂缝的力学性质和渗流(水力学)特性。

发明内容

[0006] 本发明的目的是提供一种往复式岩石裂缝摩擦-渗流特性测试装置及测试方法,以在实验室内进行岩石裂缝面滑移过程中的摩擦-渗流实验,同时高效、准确测量滑移过程中的摩擦系数、裂缝面的稳定性参数和渗透率。

[0007] 本发明所述的往复式岩石裂缝摩擦-渗流特性测试装置,包括X轴剪切系统、Y轴应力加载系统、Z轴应力加载系统、伺服油源系统,还包括孔隙压力加载系统和主机。

[0008] 所述X轴剪切系统包括X轴EDC控制器、上剪切盒、下剪切盒、X轴左液压缸、X轴右液

压缸、X轴左压头、X轴右压头、X轴左压力传感器、X轴右压力传感器和X轴位移传感器,所述伺服油源系统给X轴左液压缸、X轴右液压缸供油,下剪切盒、X轴左液压缸、X轴右液压缸分别固定安装,上剪切盒与下剪切盒正对平行形成能容纳岩石试件的空腔,上剪切盒的左侧壁下边缘与下剪切盒的左侧壁上边缘通过对开缺口的的方式形成有左连接孔,上剪切盒的右侧壁下边缘与下剪切盒的右侧壁上边缘通过对开缺口的的方式形成有右连接孔,X轴左液压缸的活塞杆端部固定连接X轴左压头,X轴左压头作用于上剪切盒左侧,通过X轴左压头对上剪切盒施加左剪切力,X轴左压力传感器安装在能测量左剪切力的部位且通过信号线与X轴EDC控制器电连接,X轴右液压缸的活塞杆端部固定连接X轴右压头,X轴右压头作用于上剪切盒右侧,通过X轴右压头对上剪切盒施加右剪切力,X轴右压力传感器安装在能测量右剪切力的部位且通过信号线与X轴EDC控制器电连接,X轴位移传感器安装在能测量剪切形成的裂缝面滑移位移的部位且通过信号线与X轴EDC控制器电连接,X轴EDC控制器通过信号线与主机、伺服油源系统中用于X轴左液压缸与X轴右液压缸供油切换的换向阀和用于调节X轴左液压缸与X轴右液压缸供油油液流量的X轴电液伺服阀电连接。

[0009] 所述Y轴应力加载系统能对上剪切盒、下剪切盒以及岩石试件加载Y轴应力(即加载Y轴方向的应力),所述Z轴应力加载系统能对上剪切盒、下剪切盒以及岩石试件加载Z轴应力(即加载Z轴方向的应力)。

[0010] 所述孔隙压力加载系统包括气瓶、压力表、减压阀、流体入口管路、流体出口管路和流量计,压力表、减压阀安装在流体入口管路上,流体入口管路的一端插在右连接孔内能与岩石试件接触,流体入口管路的另一端与气瓶连接,流量计安装在流体出口管路上且通过信号线与主机电连接,流体出口管路的一端插在左连接孔内能与岩石试件接触,流体出口管路的另一端直接接通大气。

[0011] 优选的,上述测试装置还包括声发射检测系统,声发射检测系统包括声发射信号分析仪、声发射探头和声接收探头,声发射探头安装在上剪切盒的左侧壁上或者下剪切盒的左侧壁上且通过信号线与声发射信号分析仪电连接,声接收探头安装在上剪切盒的右侧壁上或者下剪切盒的右侧壁上且通过信号线与声发射信号分析仪电连接,声发射信号分析仪通过信号线与主机电连接。利用声发射检测系统可以动态采集裂缝面滑移过程中,X轴方向和Z轴方向岩石试件破裂信息和损伤情况,并呈现于主机界面。

[0012] 优选的,所述X轴位移传感器由X轴左位移传感器和X轴右位移传感器构成,X轴左位移传感器安装在X轴左压头上且通过信号线与X轴EDC控制器电连接,X轴右位移传感器安装在X轴右压头上且通过信号线与X轴EDC控制器电连接。利用X轴左位移传感器测量X轴左压头位移,利用X轴右位移传感器测量X轴右压头位移,对这两个位移进行差动分析能消除测量误差,使测量剪切形成的裂缝面滑移位移更准确。

[0013] 优选的,所述上剪切盒的内表面涂有能填满与岩石试件之间的缝隙的密封胶层,所述下剪切盒的内表面也涂有能填满与岩石试件之间的缝隙的密封胶层,密封胶层能避免渗流流体介质从上、下剪切盒与岩石试件之间的缝隙流到流体出口管路内,从而保证了渗透率测试的准确性;所述上剪切盒与下剪切盒之间通过密封条密封,密封条能避免渗流流体介质泄漏。

[0014] 优选的,所述Y轴应力加载系统包括Y轴EDC控制器、Y轴液压缸、Y轴压头、与Y轴压头对应的Y轴压板、Y轴压力传感器和Y轴加载框架,Y轴加载框架为由前钢板、后钢板、左钢

板和右钢板垂直连接形成的口字形框架,所述伺服油源系统给Y轴液压缸供油,Y轴液压缸固定安装在前钢板上,Y轴液压缸的活塞杆端部固定连接Y轴压头,Y轴压板固定安装在后钢板上,Y轴压头作用于上、下剪切盒的前侧,Y轴压板作用于上、下剪切盒的后侧,通过Y轴压头和Y轴压板的配合能对上、下剪切盒以及岩石试件加载Y轴应力;Y轴压力传感器安装在能测量Y轴应力的部位且通过信号线与Y轴EDC控制器电连接,Y轴EDC控制器通过信号线与主机、伺服油源系统中用于调节Y轴液压缸供油油液流量的Y轴电液伺服阀电连接。

[0015] 优选的,所述Y轴应力加载系统还包括Y轴位移传感器,Y轴位移传感器安装在能测量Y轴压头位移的部位且通过信号线与Y轴EDC控制器电连接。

[0016] 优选的,所述X轴左液压缸固定安装在左钢板上,所述X轴右液压缸固定安装在右钢板上。

[0017] 优选的,所述Z轴应力加载系统包括Z轴EDC控制器、Z轴液压缸、Z轴压头、与Z轴压头对应的Z轴压板、Z轴压力传感器、Z轴位移传感器、门型框架和压力室,所述Z轴压板固定安装在压力室的底部,所述下剪切盒固定安装在Z轴压板上,所述伺服油源系统给Z轴液压缸供油,Z轴液压缸通过安装在压力室顶部的门型框架悬挂在压力室内,Z轴液压缸具有两根活塞杆,Z轴液压缸的上活塞杆的端部安装Z轴位移传感器,Z轴液压缸的下活塞杆的端部与Z轴压力传感器的一端固定连接,Z轴压力传感器的另一端与Z轴压头固定连接,Z轴压头作用于上剪切盒上侧,通过Z轴压头和Z轴压板的配合能对上、下剪切盒以及岩石试件加载Z轴应力;Z轴压力传感器、Z轴位移传感器分别通过信号线与Z轴EDC控制器电连接,Z轴EDC控制器通过信号线与主机、伺服油源系统中用于调节Z轴液压缸供油油液流量的Z轴电液伺服阀电连接。

[0018] 本发明所述的往复式岩石裂缝摩擦-渗流特性测试方法,采用上述测试装置,包括:

[0019] 第一步、准备岩石试件,并在岩石试件外表面均匀涂抹一层聚氨酯密封胶;

[0020] 第二步、将涂抹了一层聚氨酯密封胶的岩石试件放入下剪切盒内,在下剪切盒与岩石试件之间的缝隙内注入能填满该缝隙的聚氨酯密封胶,然后盖上上剪切盒,在上剪切盒与岩石试件之间的缝隙内注入能填满该缝隙的聚氨酯密封胶;

[0021] 第三步、将下剪切盒固定安装在Z轴压板上,使Y轴压板与上、下剪切盒的后侧接触,使Y轴压头与上、下剪切盒的前侧接触,使Z轴压头与上剪切盒上侧接触,使X轴左压头与上剪切盒左侧接触,使X轴右压头与上剪切盒右侧接触;

[0022] 第四步、将孔隙压力加载系统中的流体入口管路的一端插在右连接孔内与岩石试件接触,将流体出口管路的一端插在左连接孔内与岩石试件接触;

[0023] 第五步、对测试装置中的各个系统中的管路进行抽真空处理;

[0024] 第六步、安装声发射探头和声接收探头;

[0025] 第七步、对上、下剪切盒以及其内的岩石试件加载Z轴应力和Y轴应力;

[0026] 第八步、通过在流体入口管路中通入渗流流体介质的方式加载孔隙压力;

[0027] 第九步、以第一预设X轴加载速率对上剪切盒以及其内的岩石试件施加左剪切力或者右剪切力,待加载的左剪切力或者右剪切力经过增大到减小再到保持稳定时,表示剪切完成形成了裂缝面,以第一预设X轴加载速率继续加载,裂缝面开始滑移,在裂缝面滑移过程中可以根据实验需求改变X轴加载速率和X轴加载方向,通过改变X轴加载方向的方式

进行往复加载；

[0028] 第十步、利用公式： $\mu = \tau / \sigma$ ，计算得到裂缝面摩擦系数 μ ；利用公式： $(a-b) = (\mu^{i+1} - \mu^i) / \ln(V^{i+1}/V^i)$ ，计算得到裂缝面的稳定性参数 $(a-b)$ ；利用公式： $k = (-12\eta LQ/W \Delta P)^{2/3} / 12$ ，计算裂缝面滑移过程中的渗透率 k ；其中， τ 表示X轴剪切力， τ 等于左剪切力或者右剪切力， σ 表示Z轴应力； μ^i 表示裂缝面形成后X轴加载速率（也是裂缝面滑移速率）为 V^i 时的裂缝面摩擦系数， μ^{i+1} 表示裂缝面形成后X轴加载速率（也是裂缝面滑移速率）为 V^{i+1} 时的裂缝面摩擦系数， ΔP 表示压力表读数与大气压的压力差， η 表示渗流流体介质的动力粘度， L 表示滑移过程中裂缝接触面的长度， W 表示裂缝面的宽度， Q 表示流量计的读数。

[0029] 采用本发明能在实验室内进行岩石裂缝面滑移过程中的摩擦-渗流实验，能高效、准确测量滑移过程中的摩擦系数、裂缝面的稳定性参数和渗透率，实现了岩石裂缝摩擦特性与裂缝渗透率演化规律的同时测量，能同时表征岩石裂缝的力学性质和渗流（水力学）特性，为注水等作业的选区选层提供了依据，能有效避免由于注水等作业导致的储层或盖层岩石裂缝的非稳定性地震滑移。同时测试装置结构简单，精度高，运行稳定，可广泛应用于实验室内岩石裂缝的力学-水力学耦合性质测试。

附图说明

[0030] 图1为本发明的电路原理框图。

[0031] 图2为本发明中X轴剪切系统以及孔隙压力加载系统的结构示意图。

[0032] 图3为本发明中Y轴应力加载系统的结构示意图。

[0033] 图4为本发明中Z轴应力加载系统的结构示意图。

具体实施方式

[0034] 下面结合附图对本发明作详细说明。

[0035] 如图1至图4所示的往复式岩石裂缝摩擦-渗流特性测试装置，包括X轴剪切系统、Y轴应力加载系统、Z轴应力加载系统、伺服油源系统，孔隙压力加载系统、声发射检测系统和主机6。

[0036] 伺服油源系统（为现有技术）是X轴剪切力、Y轴应力加载、Z轴应力加载的动力来源，由通过油路连接的油箱、油泵-电机组、精密滤油器、溢流阀、压力表、空气滤清器、换能器、换向阀40（为电磁换向阀）、X轴电液伺服阀41、Y轴电液伺服阀42、Z轴电液伺服阀43等组成，为了达到精密伺服，X轴电液伺服阀41、Y轴电液伺服阀42、Z轴电液伺服阀43都是采用美国MOOG公司生产的MOOG-D633精密伺服阀。

[0037] X轴剪切系统包括X轴EDC控制器10、上剪切盒11、下剪切盒12、X轴左液压缸13、X轴右液压缸14、X轴左压头15、X轴右压头16、X轴左压力传感器17、X轴右压力传感器18、X轴左位移传感器19和X轴右位移传感器110。伺服油源系统中的电机驱动油泵旋转时，高压油依次经过精密滤油器、溢流阀、X轴电液伺服阀41、换向阀40进入X轴左液压缸13或者X轴右液压缸14内，给X轴左液压缸13或者X轴右液压缸14供油。上剪切盒11与下剪切盒12正对平行形成能容纳岩石试件7的空腔，上剪切盒11的内表面涂有能填满与岩石试件7之间的缝隙的聚氨酯密封胶层，下剪切盒12的内表面也涂有能填满与岩石试件7之间的缝隙的聚氨酯密封胶层，上剪切盒11与下剪切盒12之间通过密封条（为三元乙丙橡胶密封条）密封。上剪切

盒11的左侧壁下边缘与下剪切盒12的左侧壁上边缘通过对开缺口的方式形成有左连接孔,上剪切盒11的右侧壁下边缘与下剪切盒12的右侧壁上边缘通过对开缺口的方式形成有右连接孔,X轴左液压缸13的活塞杆端部固定连接X轴左压头15,X轴左压头15作用于上剪切盒11左侧,通过X轴左压头15对上剪切盒11施加左剪切力,X轴左压力传感器17、X轴左位移传感器19都安装在X轴左压头15上且分别通过信号线与X轴EDC控制器10电连接,X轴右液压缸14的活塞杆端部固定连接X轴右压头16,X轴右压头16作用于上剪切盒11右侧,通过X轴右压头16对上剪切盒11施加右剪切力,X轴右压力传感器18、X轴右位移传感器110都安装在X轴右压头16上且分别通过信号线与X轴EDC控制器10电连接,X轴EDC控制器10通过信号线与主机6、换向阀40和X轴电液伺服阀41电连接。主机6将施加X轴左剪切力大小命令发送给X轴EDC控制器10,X轴左压力传感器17将检测的X轴左剪切力信号反馈给X轴EDC控制器10,X轴EDC控制器10根据X轴左剪切力大小命令和反馈的X轴左剪切力信号控制换向阀40切换至左油路,控制X轴电液伺服阀41的阀门开度,以调节X轴左液压缸13的供油油液流量,使X轴左液压缸13的活塞杆移动,实现X轴左剪切力大小的闭环控制。主机6将施加X轴右剪切力大小命令发送给X轴EDC控制器10,X轴右压力传感器18将检测的X轴右剪切力信号反馈给X轴EDC控制器10,X轴EDC控制器10根据X轴右剪切力大小命令和反馈的X轴右剪切力信号控制换向阀40切换至右油路,控制X轴电液伺服阀41的阀门开度,以调节X轴右液压缸14的供油油液流量,使X轴右液压缸14的活塞杆移动,实现X轴右剪切力大小的闭环控制。通过换向阀40的换向作用,可以实现往复剪切。X轴左位移传感器19将检测的X轴左压头位移发送给X轴EDC控制器10,X轴右位移传感器110将检测的X轴右压头位移发送给X轴EDC控制器10,X轴EDC控制器10将X轴左压头位移、X轴右压头位移发送给主机6进行处理,在形成裂缝面之后,根据这两个位移能计算得到裂缝面滑移位移。

[0038] Y轴应力加载系统包括Y轴EDC控制器20、Y轴液压缸21、Y轴压头22、与Y轴压头22对应的Y轴压板23、Y轴压力传感器24、Y轴位移传感器29和Y轴加载框架,Y轴加载框架为由前钢板25、后钢板26、左钢板27和右钢板28垂直连接形成的口字形框架。X轴左液压缸13固定安装在左钢板27上,X轴右液压缸14固定安装在右钢板28上。伺服油源系统中的电机驱动油泵旋转时,高压油依次经过精密滤油器、溢流阀、Y轴电液伺服阀42进入Y轴液压缸21内,给Y轴液压缸21供油。Y轴液压缸21固定安装在前钢板25上,Y轴液压缸21的活塞杆端部通过Y轴压力传感器24固定连接Y轴压头22,Y轴压板23固定安装在后钢板26上,Y轴压头22作用于上、下剪切盒的前侧,Y轴压板23作用于上、下剪切盒的后侧,通过Y轴压头22和Y轴压板23的配合能对上、下剪切盒以及岩石试件加载Y轴应力,Y轴位移传感器29安装在Y轴压头22上;Y轴压力传感器24、Y轴位移传感器29分别通过信号线与Y轴EDC控制器20电连接,Y轴EDC控制器20通过信号线与主机6、Y轴电液伺服阀42电连接。主机6将施加Y轴应力大小命令发送给Y轴EDC控制器20,Y轴压力传感器24将检测的Y轴应力信号反馈给Y轴EDC控制器20,Y轴EDC控制器20根据Y轴应力大小命令和反馈的Y轴应力信号控制Y轴电液伺服阀42的阀门开度,以调节Y轴液压缸21的供油油液流量,使Y轴液压缸21的活塞杆移动,实现Y轴应力大小的闭环控制。主机6将施加Y轴应力以使Y轴压头移动位移大小命令发送给Y轴EDC控制器20,Y轴位移传感器29将检测的Y轴压头位移信号反馈给Y轴EDC控制器20,Y轴EDC控制器20根据使Y轴压头移动位移大小命令和反馈的Y轴压头位移信号控制Y轴电液伺服阀42的阀门开度,以调节Y轴液压缸21的供油油液流量,使Y轴液压缸21的活塞杆移动,实现Y轴位移大小的闭环控

制。

[0039] Z轴应力加载系统包括Z轴EDC控制器30、Z轴液压缸31、Z轴压头32、与Z轴压头32对应的Z轴压板33、Z轴压力传感器34、Z轴位移传感器35、门型框架36和压力室37，Z轴压板33固定安装在压力室37的底部，下剪切盒12固定安装在Z轴压板33上。伺服油源系统中的电机驱动油泵旋转时，高压油依次经过精密滤油器、溢流阀、Z轴电液伺服阀43进入Z轴液压缸31内，给Z轴液压缸31供油。Z轴液压缸31通过安装在压力室37顶部的门型框架36悬挂在压力室37内，Z轴液压缸31具有两根活塞杆，Z轴液压缸31的上活塞杆38的端部安装Z轴位移传感器35，Z轴液压缸31的下活塞杆39的端部与Z轴压力传感器34的一端固定连接，Z轴压力传感器34的另一端与Z轴压头32固定连接，Z轴压头32作用于上剪切盒11上侧，通过Z轴压头32和Z轴压板33的配合能对上、下剪切盒以及岩石试件加载Z轴应力；Z轴压力传感器34、Z轴位移传感器35分别通过信号线与Z轴EDC控制器30电连接，Z轴EDC控制器30通过信号线与主机6、Z轴电液伺服阀43电连接。主机6将施加Z轴应力大小命令发送给Z轴EDC控制器30，Z轴压力传感器34将检测的Z轴应力信号反馈给Z轴EDC控制器30，Z轴EDC控制器30根据Z轴应力大小命令和反馈的Z轴应力信号控制Z轴电液伺服阀43的阀门开度，以调节Z轴液压缸31的供油油液流量，使Z轴液压缸31的上、下活塞杆移动，实现Z轴应力大小的闭环控制。主机6将施加Z轴应力以使Z轴压头移动位移大小命令发送给Z轴EDC控制器30，Z轴位移传感器35将检测的Z轴压头位移信号反馈给Z轴EDC控制器30，Z轴EDC控制器30根据使Z轴压头移动位移大小命令和反馈的Z轴压头位移信号控制Z轴电液伺服阀43的阀门开度，以调节Z轴液压缸31的供油油液流量，使Z轴液压缸31的上、下活塞杆移动，实现Z轴位移大小的闭环控制。

[0040] 孔隙压力加载系统包括气瓶50、压力表51、减压阀52、流体入口管路53、流体出口管路54和流量计55，压力表51、减压阀52安装在流体入口管路53上，流体入口管路53的一端插在右连接孔内能与岩石试件7接触，流体入口管路53的另一端与气瓶50连接，流量计55安装在流体出口管路54上且通过信号线与主机6电连接，流体出口管路54的一端插在左连接孔内能与岩石试件7接触，流体出口管路54的另一端直接接通大气。流量计55将流过裂缝面的渗流流体介质的流量大小发送给主机6。气瓶50为二氧化碳气瓶（气瓶50还可以是氮气瓶、氦气瓶等）。

[0041] 声发射检测系统包括声发射信号分析仪80、声发射探头81和声接收探头82，声发射探头81安装在上剪切盒11的左侧壁上（能避开X轴左压头15）且通过信号线与声发射信号分析仪80电连接，声接收探头82安装在上剪切盒11的右侧壁上（能避开X轴右压头16）且通过信号线与声发射信号分析仪80电连接，声发射信号分析仪80通过信号线与主机6电连接。利用声发射检测系统可以动态采集裂缝面滑移过程中，X轴方向和Z轴方向岩石试件破裂信息和损伤情况，并呈现于主机界面。

[0042] 采用上述测试装置进行往复岩石裂缝摩擦-渗流特性测试方法，包括：

[0043] 第一步、准备岩石试件7，并在岩石试件7外表面均匀涂抹一层1mm左右的聚氨酯密封胶；本方法中使用的岩石尺寸为长度方向（即X轴方向）150.00mm、宽度方向（即Y轴方向）100.00mm、高度方向（即Z轴方向）为100.00mm。

[0044] 第二步、将涂抹了一层聚氨酯密封胶的岩石试件7放入下剪切盒12内，在下剪切盒12与岩石试件7之间的缝隙内注入能填满该缝隙的聚氨酯密封胶，然后盖上上剪切盒11，在上剪切盒11与岩石试件7之间的缝隙内注入能填满该缝隙的聚氨酯密封胶。

[0045] 第三步、将下剪切盒12固定安装在Z轴压板33上,并使Y轴压板23与上、下剪切盒的后侧接触,使Y轴压头22与上、下剪切盒的前侧接触,使Z轴压头32与上剪切盒11上侧接触,使X轴左压头15与上剪切盒11左侧接触,使X轴右压头16与上剪切盒11右侧接触。

[0046] 第四步、将孔隙压力加载系统中的流体入口管路53的一端插在右连接孔内与岩石试件7接触,将流体出口管路54的一端插在左连接孔内与岩石试件7接触。

[0047] 第五步、使用真空泵对测试装置中的各个系统中的管路进行抽真空处理。

[0048] 第六步、根据实验需求安装声发射探头81和声接收探头82。

[0049] 第七步、对上、下剪切盒以及其内的岩石试件加载Z轴应力和Y轴应力。Z轴应力为10.0MPa,Z轴应力加载速率为0.1MPa/s;Y轴应力为1.0MPa,Y轴应力加载速率为0.1MPa/s;加载完成后,稳定0.5小时使得岩石试件7应力加载稳定,待应力加载稳定后进行下一步。

[0050] 第八步、通过在流体入口管路53中通入渗流流体介质二氧化碳的方式加载孔隙压力。使用恒定压力控制的方式进行孔隙压力加载,压力设置为0.5MPa,孔隙压力加载速率为0.01MPa/s。当流量稳定时,可以进行下一步。

[0051] 第九步、进行摩擦-渗流特性实验,按照预先设置好的剪切力加载方式进行加载。以 $1\mu\text{m/s}$ 的X轴加载速率对上剪切盒11以及其内的岩石试件7施加左剪切力或者右剪切力,待加载的左剪切力或者右剪切力经过增大到减小再到保持稳定时,表示剪切完成形成了裂缝面71,再以 $1\mu\text{m/s}$ 的X轴加载速率继续加载,裂缝面开始滑移,当滑移位移达到0.5mm之后,调节X轴加载速率为 $10\mu\text{m/s}$,并等待滑移位移再经过0.5mm之后,再以 $1\mu\text{m/s}$ 的X轴加载速率加载,并等待滑移位移再经过0.5mm之后,再以 $10\mu\text{m/s}$ 的X轴加载速率加载;重复此加载速率调整过程直到滑动总位移达到15.0mm。在裂缝面滑移过程中可以根据实验需求改变X轴加载方向(即选择加载左剪切力还是加载右剪切力),通过改变X轴加载方向的方式进行往复加载。

[0052] 第十步、实验结果分析。利用公式: $\mu = \tau / \sigma$,计算得到裂缝面摩擦系数 μ ;其中, τ 表示X轴剪切力, τ 等于左剪切力或者右剪切力, σ 表示Z轴应力。变滑移速率实验可以根据速度-状态定律利用公式: $(a-b) = (\mu^{i+1} - \mu^i) / \ln(V^{i+1}/V^i)$,计算得到裂缝面的稳定性参数 $(a-b)$;其中, μ^i 表示裂缝面形成后X轴加载速率(也是裂缝面滑移速率)为 V^i 时的裂缝面摩擦系数, μ^{i+1} 表示裂缝面形成后X轴加载速率(也是裂缝面滑移速率)为 V^{i+1} 时的裂缝面摩擦系数; $(a-b) < 0$ 是裂缝面可能产生非稳定性地震滑移的必要条件, $(a-b)$ 的值越大,裂缝面的稳定性也就越好。裂缝面滑移过程中的渗透率可以根据立方定律利用公式: $k = (-12\eta LQ / W \Delta P)^{2/3} / 12$,计算得到裂缝面滑移过程中的渗透率 k ;其中, ΔP 表示压力表读数与大气压的压力差($\Delta P = 0.4\text{MPa}$), η 表示渗流流体介质(本实施例中为二氧化碳)的动力粘度, L 表示滑移过程中裂缝接触面的长度(即裂缝面滑移过程中被剪切分成的上、下两块岩石试件的接触面在X轴方向的尺寸,可根据裂缝面滑移位移确定), W 表示裂缝面的宽度(即裂缝面在Y轴方向的尺寸), Q 表示流量计的读数。

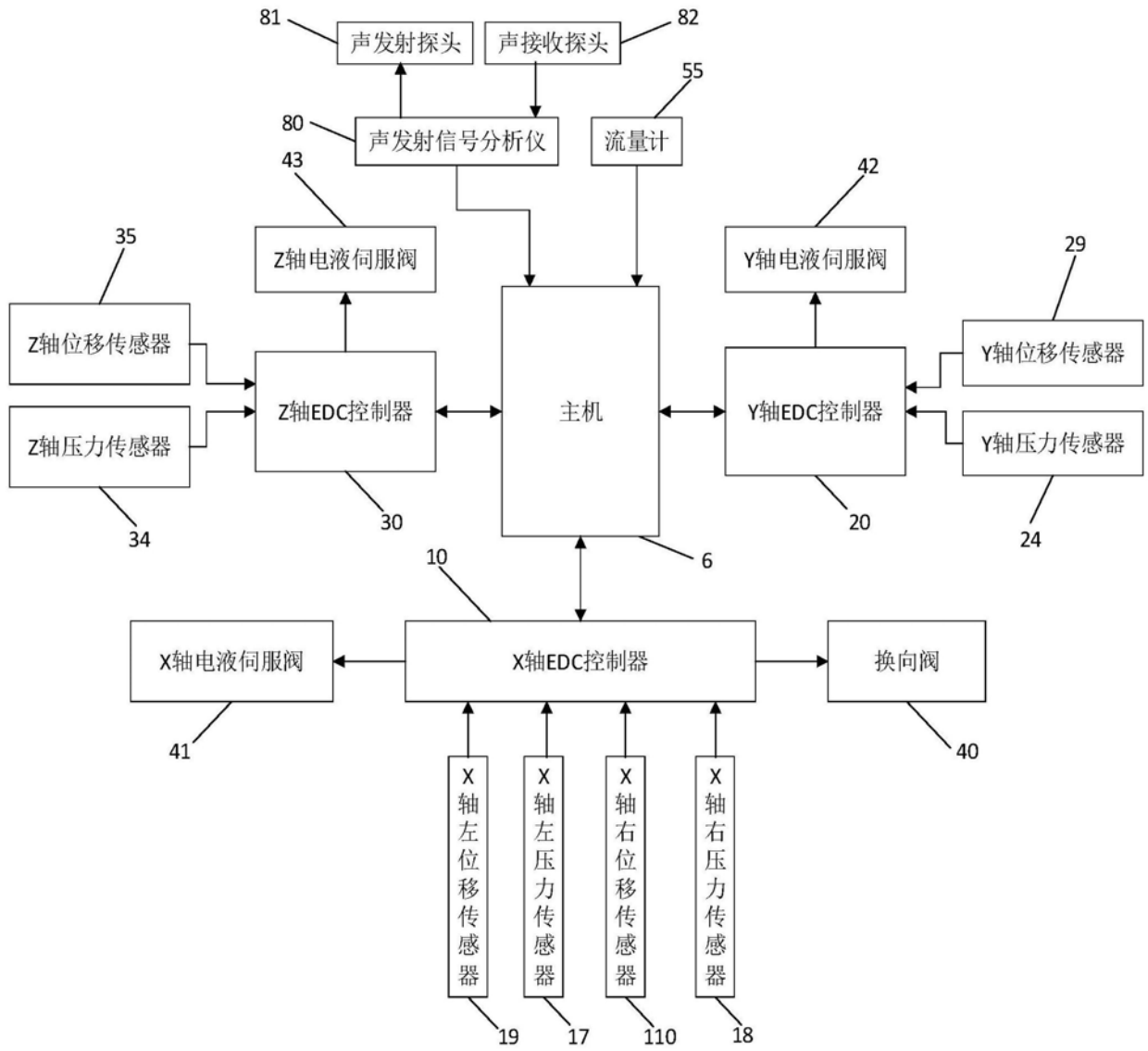


图1

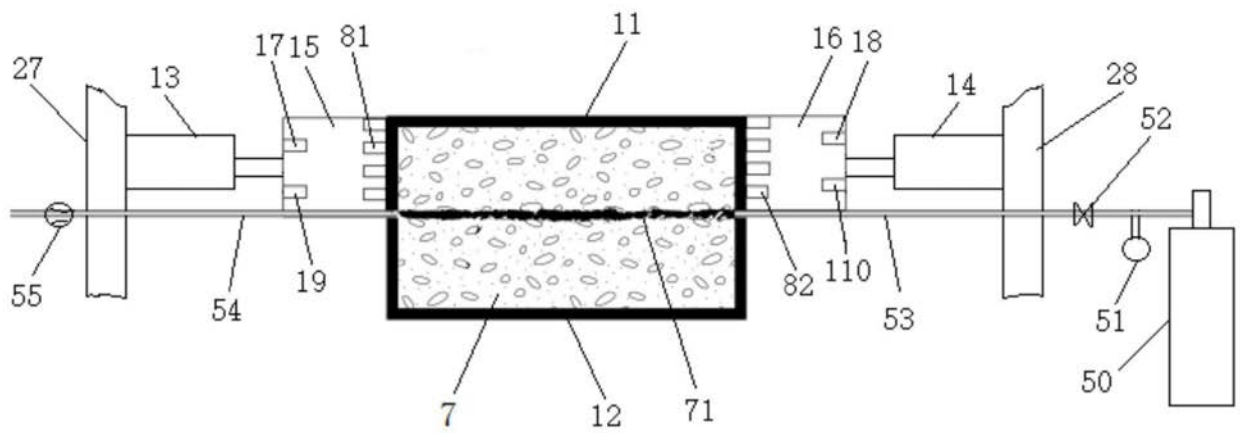


图2

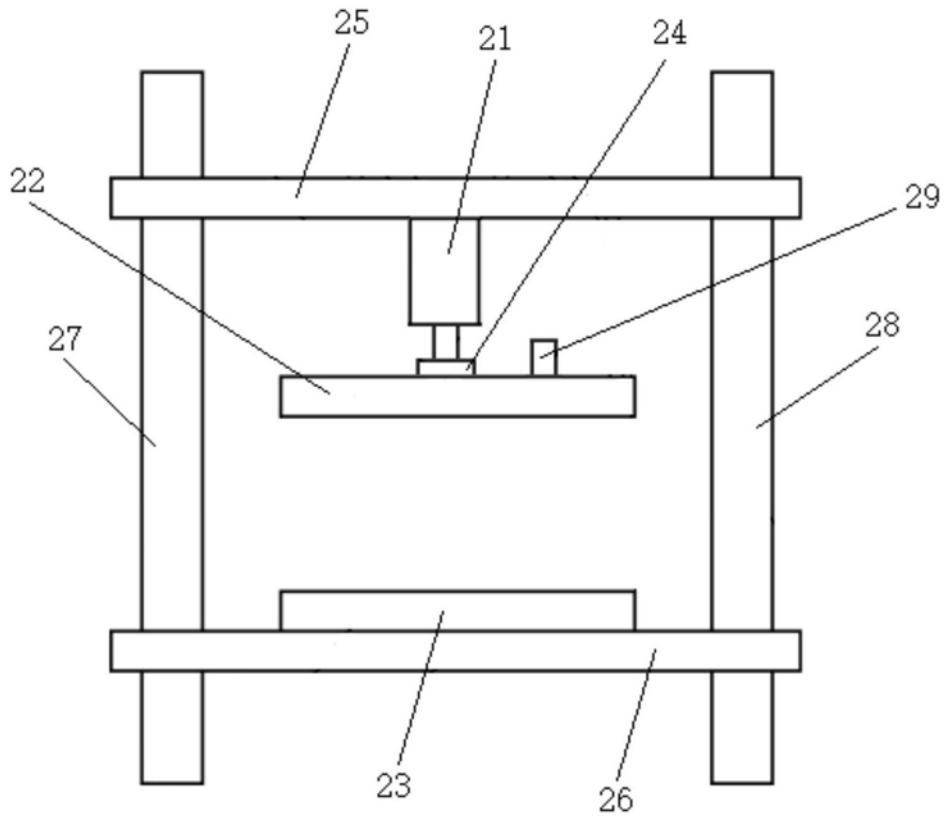


图3

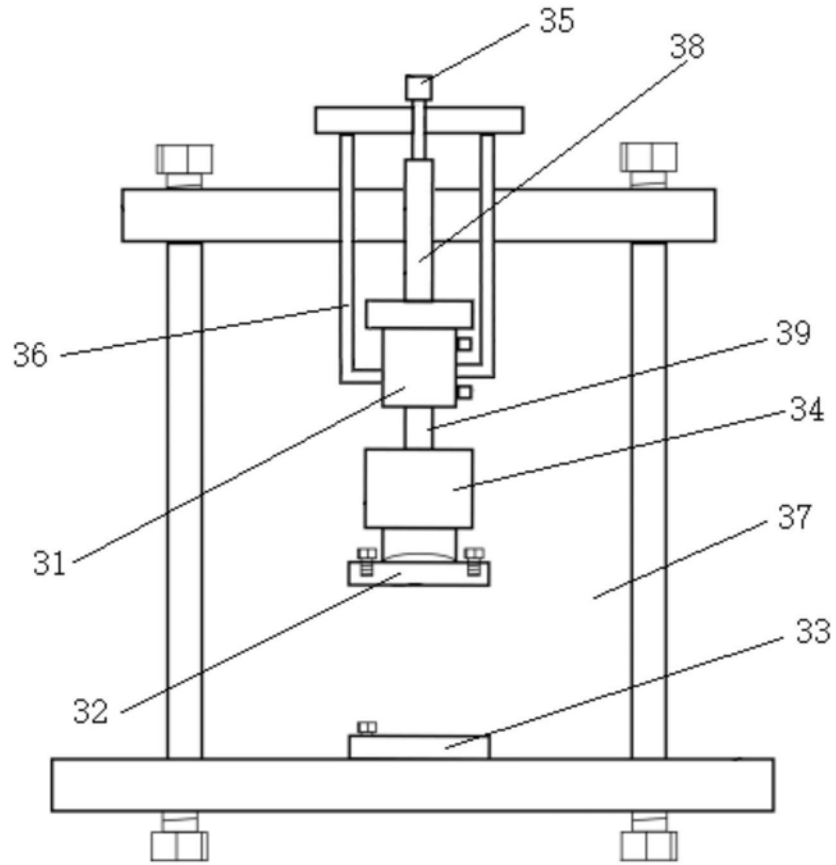


图4