(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 110082218 B
(45)授权公告日 2020.06.19

(21)申请号 201910386345.8

(22)申请日 2019.05.09

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 110082218 A

(43)申请公布日 2019.08.02

(73)专利权人 中国水利水电科学研究院
地址 100038 北京市海淀区复兴路甲一号

(72)发明人 刘立鹏 汪小刚 傅睿智 王玉杰 赵宇飞 段庆伟 王斌 孙兴松 曹瑞琅 皮进 张强 孙平 姜龙 林兴超 冷合勤 李昌博 陈晨

(74)专利代理机构 北京栈桥知识产权代理事务所(普通合伙) 11670
代理人 潘卫锋

(51)Int.Cl.
G01N 3/12(2006.01)
G01N 3/06(2006.01)
G01N 15/08(2006.01)
G01M 13/00(2019.01)

(56)对比文件
CN 106679904 A,2017.05.17,
CN 108169027 A,2018.06.15,
CN 107121342 A,2017.09.01,
CN 205781676 U,2016.12.07,
CN 101525875 A,2009.09.09,
WO 2018152615 A1,2018.08.30,
CN 106353120 A,2017.01.25,

审查员 林德伟

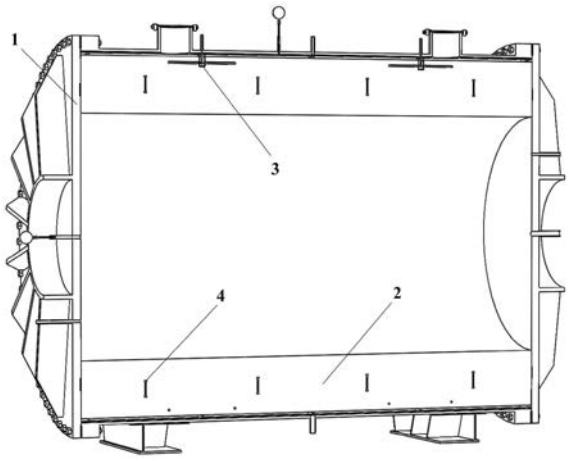
权利要求书3页 说明书8页 附图11页

(54)发明名称

一种隧洞衬砌结构模型试验装置及试验方法

(57)摘要

本发明公开了一种隧洞衬砌结构模型试验装置及试验方法，试验装置包括压力舱、应力加载机构、衬砌层和监测系统。压力舱包括前舱门、舱体和后舱门；衬砌层可由素混凝土、钢筋混凝土或环锚预应力混凝土等浇筑成形，另外在衬砌层与舱体内壁之间可设置围岩模拟层；应力加载机构包括加载腔、压力管、汇压阀和压力水泵；监测系统包括监测仪器和数据采集仪器；试验方法包括衬砌层的制作与安装、应力加载机构与监测系统的安装、不同内外荷载加载步骤以及数据的采集与处理分析。



CN 110082218 B

1.一种隧洞衬砌结构模型试验装置,包括压力舱(1)、衬砌层(2)、应力加载机构(3)和监测系统(4),所述压力舱(1)整体呈圆筒形,包括前舱门(11)、舱体(12)和后舱门(13);所述衬砌层(2)安装或浇筑于所述舱体(12)内部,衬砌层(2)筒体两端面与舱体(12)两端面齐平;所述应力加载机构(3)包括加载腔(31)、压力管(32)、汇压阀(33)和压力水泵,所述加载腔(31)外壁与舱体(12)内壁贴合,加载腔(31)内壁与衬砌层(2)外壁贴合,所述压力管(32)与汇压阀(33)埋设于衬砌层(2)内部,所述汇压阀(33)通过舱体(12)对应接头与外部压力水泵连接;所述监测系统(4)包括监测仪器和数据采集仪器,所述监测仪器埋设于衬砌层(2)内部,仪器线缆从舱体(12)引出后与外部数据采集仪器连接,所述前舱门(11)设有内水压力表(111)、内腔排水阀门(112)、内密封圈(113)、外密封圈(114)、螺栓(115)、螺栓孔(116)和加强肋(117);所述舱体(12)设有应力加载阀门外接头(121)、应力加载阀门内接头(122)、外腔注水加压阀门(123)、混凝土灌注孔(124)、外腔排气阀门(125)、外腔排水阀门(126)、外水压力表(127)、监测仪器线缆出口(128)、底座(129)和螺栓孔(116);所述后舱门(13)设有内腔注水加压阀门(131)、内腔排气阀门(132)、内密封圈(113)、外密封圈(114)、螺栓(115)、螺栓孔(116)和加强肋(117),在所述舱体(12)内壁铺设有长丝土工布(14)。

2.根据权利要求1所述的一种隧洞衬砌结构模型试验装置,其特征在于,所述监测仪器线缆出口(128)采用双层法兰结构,包括出口接头(1281)、密封垫(1282)、中部法兰板(1283)、密封胶层(1284)与顶部法兰板(1285),所述的中部法兰板(1283)与顶部法兰板(1285)在相同位置处开设有线缆导出孔(1286),所述监测仪器的单根线缆分别穿过中部法兰板(1283)与顶部法兰板(1285)上的线缆导出孔(1286),所述密封垫(1282)安装于出口接头(1281)与中部法兰板(1283)之间,所述中部法兰板(1283)与顶部法兰板(1285)之间均匀涂抹密封胶后采用螺栓压紧形成密封胶层(1284)。

3.根据权利要求1所述的一种隧洞衬砌结构模型试验装置,其特征在于,所述衬砌层(2)由素混凝土、钢筋混凝土或环锚预应力混凝土浇筑成形,所述衬砌层(2)外壁与加载腔(31)内壁贴合,所述衬砌层(2)筒体两端面与舱体(12)两端面齐平;所述衬砌层(2)内壁与前舱门(11)、后舱门(13)通过内密封圈(113)进行密封形成内水加压腔(21);所述衬砌层(2)外壁与舱体(12)内壁、前舱门(11)、后舱门(13)通过螺栓(115)和外密封圈(114)进行密封形成外水加压腔(22)。

4.根据权利要求1所述的一种隧洞衬砌结构模型试验装置,其特征在于,所述加载腔(31)由橡胶硫化而成的方形扁平囊体,在所述加载腔(31)的方形面设有前接头(311)与后接头(312)。

5.根据权利要求1所述的一种隧洞衬砌结构模型试验装置,其特征在于,所述汇压阀(33)包括内接口(331)、阀体(332)、汇压管(333)和外接头(334),所述汇压管(333)将内接口(331)与外接头(334)连接为一体,所述汇压阀(33)的内接口(331)与应力加载阀门内接头(122)连接,埋设于衬砌层(2)内部,所述加载腔(31)沿环向分片,轴向分段安装在舱体(12)内壁,用所述压力管(32)将环向相邻加载腔(31)的前接头(311)与后接头(312)串联后接入汇压阀(33)的外接头(334),所述的压力水泵可分别与应力加载阀门外接头(121)、外腔注水加压阀门(123)、内腔注水加压阀门(131)连接。

6.根据权利要求1所述的一种隧洞衬砌结构模型试验装置,其特征在于,在所述衬砌层(2)与舱体(12)内壁之间设置围岩模拟层,所述围岩模拟层整体呈圆筒形,由混凝土浇筑成

型，围岩模拟层外壁与舱体(12)内壁贴合，所述的围岩模拟层筒体两端面与舱体(12)两端面齐平，所述的汇压阀(33)埋设于围岩模拟层内，所述的加载腔(31)安装在围岩模拟层内壁。

7.根据权利要求1所述的一种隧洞衬砌结构模型试验装置，其特征在于，所述的监测仪器包括埋设于衬砌层(2)或围岩模拟层内部的监测应力/应变、变形、渗流数据的仪器；所述的数据采集仪器包括集线箱、信号转换器、解调仪、读数仪和采集仪。

8.根据权利要求1所述的一种隧洞衬砌结构模型试验装置，其特征在于，所述的压力水泵连接内腔注水加压阀门(131)，所述加压阀门(131)对内水加压腔(21)施加水压力荷载，模拟水工隧洞不同等级内水压力作用；所述的压力水泵连接外腔注水加压阀门(123)对外水加压腔(22)施加水压力荷载，模拟水工或交通隧洞不同等级外水压力作用；所述的压力水泵连接应力加载阀门外接头(121)，对加载腔(31)注水加压，模拟水工或交通隧洞的山岩压力作用。

9.一种如权利要求1-8任一所述的隧洞衬砌结构模型试验装置的试验方法，其特征在于，包括以下试验步骤：

步骤1：安装应力加载机构，包括：

在舱体(12)内壁铺设长丝土工布(14)，将汇压阀(33)的内接口(331)与应力加载阀门内接头(122)连接，在舱体(12)内壁沿环向分片、轴向分段铺设安装加载腔(31)，环向相邻加载腔(31)的前接头(311)与后接头(312)通过压力管(32)串联，最后将环向两端压力管(32)接入汇压阀(33)的外接头(334)，完成应力加载机构(3)的安装；

步骤2：浇筑安装衬砌层，包括：

安装固定后舱门(13)，埋设监测仪器，将仪器线缆由舱体(12)的监测仪器线缆出口(128)导出，将监测仪器线缆出口(128)的密封垫(1282)和中部法兰板(1283)装入出口接头(1281)固定，根据试验方案制作安装衬砌层内部结构组件，安装衬砌层浇筑模板，将设定标号的混凝土由舱体(12)上部的混凝土灌注孔(124)注入模板内，每次注入一定量后振捣均匀，浇筑完成后进行混凝土养护，达到龄期要求后拆除模板，完成衬砌层(2)的浇筑安装；

步骤3：山岩压力加载，包括：

在监测仪器线缆出口(128)的中部法兰板(1283)与顶部法兰板(1285)之间均匀涂抹密封胶后用螺栓固定压紧，安装固定前舱门(11)，锁紧前舱门(11)与后舱门(13)上螺栓(115)，使内密封圈(113)与外密封圈(114)全部压密，用真空泵连接应力加载阀门外接头(121)，抽出加载腔(31)内空气，再将压力水泵与应力加载阀门外接头(121)连接，根据试验方案，对加载腔(31)加压至设定值，同时打开数据采集仪记录各监测仪器读数；

步骤4：内水压力加载，包括：

打开内腔排气阀门(132)，将压力水泵连接内腔注水加压阀门(131)，对内水加压腔(21)注水加压，待内水加压腔(21)空气排净后关闭内腔排气阀门(132)，根据试验方案，逐级对内水加压腔(21)注水加压至设定值，观察记录内水压力表(111)与外水压力表(127)示数变化，同时打开数据采集仪记录各监测仪器读数，若加载过程中观察到外水压力表(127)示数由0开始增大，则说明衬砌发生开裂，加载结束后打开内腔排水阀门(112)，排出内水加压腔(21)水；

步骤5：外水压力加载，包括：

打开外腔排气阀门(125)，将压力水泵连接外腔注水加压阀门(123)，对外水加压腔(22)注水加压，待外水加压腔(22)空气排净后关闭外腔排气阀门(125)，根据试验方案，逐级对外水加压腔(22)注水加压至设定值，观察记录内水压力表(111)与外水压力表(127)示数变化，同时打开数据采集仪记录各监测仪器读数，加载结束后打开外腔排水阀门(126)，排出外水加压腔(22)水，步骤3、步骤4与步骤5可根据试验方案做不同排序；

步骤6：试验数据处理分析，包括：

将压力加载过程中数据采集仪记录到的各监测仪器的应力/应变、变形、渗流等数据导入电脑进行后期处理，同时可打开前舱门观察衬砌内部裂缝特征，对隧洞不同运营期衬砌结构的混凝土应变及钢筋应力和围岩稳定性、衬砌与围岩的联合承载特性及各自荷载分担比例、衬砌开裂后裂缝的分布和扩展规律、内水外渗及外水返渗的水头消减规律等进行分析研究。

一种隧洞衬砌结构模型试验装置及试验方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种隧洞衬砌结构模型试验装置及试验方法，适用于地下工程复杂边界条件下衬砌结构强度、变形特性及安全研究，也可用于不同类型衬砌与不同等级围岩的联合承载特性、衬砌开裂特性以及内外水渗流特性等的室内模拟研究。

背景技术

[0002] 近年来随着大量引水工程与道路工程的兴建，各种类型隧洞的应用越来越广泛，隧洞由于其结构与承担荷载的特殊性，以及设计理论与计算方法的不完善性，存有许多尚需进一步深入研究解决的关键问题，譬如隧洞在复杂受力条件下，隧洞衬砌与围岩的承载力，衬砌开裂及裂缝分布与扩展规律，衬砌与围岩联合作用机理及各自荷载分担比例，有压输水隧洞运行期衬砌内水外渗与放空检修期衬砌外水返渗的水头消减规律等一系列非常复杂的综合性问题。

[0003] 目前国内对于这一系列问题的研究手段主要采用数值方法做仿真计算分析，而在室内模型试验方面的工作基础较为薄弱，取得的成果有限，同时现有的室内模型试验存在几点不足：①对于隧洞所进行的室内模型试验研究多集中在施工方法选择、衬砌支护结构设计承载能力验证、隧洞渗流场分布方面，对衬砌与围岩联合承载特性、衬砌开裂后裂缝的分布与扩展规律方面研究较少；②现有室内模型缩尺比例范围为1:25～1:10，相对于隧洞实际尺寸，现有模型比尺均较小，难以较为精确地还原衬砌结构各组成；③模型材料多采用砂、石灰、水泥、粉煤灰等不同配比组成的相似材料，与实际混凝土材料的力学特性及渗透特性相差较大；④现有模型中缺失对于洞室开挖引起的山岩压力的模拟，使得衬砌与围岩的模拟受力条件与实际工况下的受力条件不完全吻合；⑤现有模型试验中水压力的加载多采用千斤顶或压力气囊等无水加压手段，并未采用真实的水压力加载，导致衬砌开裂特性与实际情况不符，无法模拟真实的渗流体积力、内水外渗及外水返渗对衬砌结构与围岩的影响，而采用真实水压力加载的多为现场高压充水原型试验，这类试验存在的主要的问题是现场试验洞段的堵漏困难，很容易发生渗透破坏和内水渗漏，以及高压充水试验中补水困难，难以提高或维持较高的内水压力。

发明内容

[0004] 本发明的目的在于提供一种隧洞衬砌结构模型试验装置及试验方法，能够对高内水压力单独作用、高外水压力单独作用、高内外水压力共同作用和山岩压力作用等不同内外荷载对衬砌结构的混凝土应变及钢筋应力和围岩稳定性的影响、不同类型衬砌与不同等级围岩的联合承载特性及各自荷载分担比例、衬砌开裂后裂缝的分布和扩展规律、内水外渗及外水返渗的水头消减规律等进行研究，以解决上述背景技术中提出的问题。

[0005] 为实现上述目的，本发明提供如下技术方案：

[0006] 一种隧洞衬砌结构模型试验装置，包括压力舱、衬砌层、应力加载机构和监测系统，压力舱整体呈圆筒形，包括前舱门、舱体和后舱门，前舱门设有内水压力表、内腔排水阀

门、内密封圈、外密封圈、螺栓、螺栓孔和加强肋，舱体设有应力加载阀门外接头、应力加载阀门内接头、外腔注水加压阀门、混凝土灌注孔、外腔排气阀门、外腔排水阀门、外水压力表、监测仪器线缆出口、底座和螺栓孔，后舱门设有内腔注水加压阀门、内腔排气阀门、内密封圈、外密封圈、螺栓、螺栓孔和加强肋；衬砌层整体呈圆筒形，安装于压力舱内部，可由素混凝土、钢筋混凝土或环锚预应力混凝土等浇筑成形，模拟不同的衬砌结构类型，衬砌层外壁与加载腔内壁贴合，衬砌层筒体两端面与舱体两端面齐平；应力加载机构包括加载腔、压力管、汇压阀和压力水泵；监测系统包括监测仪器和数据采集仪器。

[0007] 进一步地，监测仪器线缆出口采用双层法兰结构，包括出口接头、密封垫、中部法兰板、密封胶层与顶部法兰板，中部法兰板与顶部法兰板在相同位置处开设有线缆导出孔，监测仪器的单根线缆分别穿过中部法兰板与顶部法兰板上的线缆导出孔，密封垫安装于出口接头与中部法兰板之间，中部法兰板与顶部法兰板之间均匀涂抹密封胶后采用螺栓压紧形成密封胶层。

[0008] 进一步地，衬砌层内壁与前舱门、后舱门通过内密封圈进行密封形成内水加压腔；衬砌层外壁与舱体内壁、前舱门、后舱门通过螺栓和外密封圈进行密封形成外水加压腔。

[0009] 进一步地，舱体内壁铺设有长丝土工布，防止衬砌层浇筑过程中混凝土堵塞舱体内壁各阀门孔口与接头。

[0010] 进一步地，加载腔是由橡胶硫化而成的方形扁平囊体，在加载腔的方形面设有前接头与后接头。

[0011] 进一步地，汇压阀包括内接口、阀体、汇压管和外接头，汇压管将内接口与外接头连接为一体。

[0012] 进一步地，汇压阀的内接口与应力加载阀门内接头连接，埋设于衬砌层内部，加载腔沿环向分片，轴向分段安装在舱体内壁，用压力管将环向相邻加载腔的前接头与后接头串联后接入汇压阀的外接头，压力水泵可分别与应力加载阀门外接头、外腔注水加压阀门、内腔注水加压阀门连接。

[0013] 进一步地，在衬砌层与舱体内壁之间可设置围岩模拟层，围岩模拟层整体呈圆筒形，由设定标号的混凝土浇筑成型，可通过浇筑不同标号的混凝土模拟不同强度的围岩等级。若设置围岩模拟层，则围岩模拟层外壁与舱体内壁贴合，围岩模拟层筒体两端面与舱体两端面齐平，汇压阀埋设于围岩模拟层内，加载腔安装在围岩模拟层内壁。

[0014] 进一步地，监测仪器包括埋设于衬砌层或围岩模拟层内部的监测应力/应变、变形、渗流等数据的各类仪器；数据采集仪器包括各类集线箱、信号转换器、解调仪、读数仪和采集仪等。

[0015] 进一步地，压力水泵连接内腔注水加压阀门可对内水加压腔施加水压力荷载，模拟水工隧洞不同等级内水压力作用；所述的压力水泵连接外腔注水加压阀门可对外水加压腔施加水压力荷载，模拟水工或交通隧洞不同等级外水压力作用；所述的压力水泵连接应力加载阀门外接头可对加载腔注水加压，模拟水工或交通隧洞的山岩压力作用；通过不同内外荷载工况组合对高内水压力单独作用、高外水压力单独作用、高内外水压力共同作用和山岩压力作用下衬砌结构的混凝土应变及钢筋应力和围岩稳定性的影响、不同类型衬砌与不同等级围岩的联合承载特性及各自荷载分担比例、衬砌开裂后裂缝的分布和扩展规律、内水外渗及外水返渗的水头消减规律等进行分析研究。

[0016] 本发明还提供了一种隧洞衬砌结构模型试验装置及试验方法，其特征在于，包括以下试验步骤：

[0017] 步骤1：安装应力加载机构，包括：

[0018] 在舱体内壁铺设长丝土工布，将汇压阀的内接口与应力加载阀门内接头连接，在舱体内壁沿环向分片、轴向分段铺设安装加载腔，环向相邻加载腔的前接头与后接头通过压力管串联，最后将环向两端压力管接入汇压阀的外接头，完成应力加载机构的安装；

[0019] 步骤2：浇筑安装衬砌层，包括：

[0020] 安装固定后舱门，埋设监测仪器，将仪器线缆由舱体的监测仪器线缆出口导出，将监测仪器线缆出口的密封垫和中部法兰板装入出口接头固定，根据试验方案制作安装衬砌层内部结构组件，安装衬砌层浇筑模板，将设定标号的混凝土由舱体上部的混凝土灌注孔注入模板内，每次注入一定量后振捣均匀，浇筑完成后进行混凝土养护，达到龄期要求后拆除模板，完成衬砌层的浇筑安装；

[0021] 步骤3：山岩压力加载，包括：

[0022] 在监测仪器线缆出口的中部法兰盘与顶部法兰盘之间均匀涂抹密封胶后用螺栓固定压紧，安装固定前舱门，锁紧前舱门与后舱门上螺栓，使内密封圈与外密封圈全部压密，用真空泵连接应力加载阀门外接头，抽出加载腔内空气，再将压力水泵与应力加载阀门外接头连接，根据试验方案，对加载腔加压至设定值，同时打开数据采集仪记录各监测仪器读数；

[0023] 步骤4：内水压力加载，包括：

[0024] 打开内腔排气阀门，将压力水泵连接内腔注水加压阀门，对内水加压腔注水加压，待内水加压腔空气排净后关闭内腔排气阀门，根据试验方案，逐级对内水加压腔注水加压至设定值，观察记录内水压力表与外水压力表示数变化，同时打开数据采集仪记录各监测仪器读数，若加载过程中观察到外水压力表示数由0开始增大，则说明衬砌发生开裂，加载结束后打开内腔排水阀门，排出内水加压腔水；

[0025] 步骤5：外水压力加载，包括：

[0026] 打开外腔排气阀门，将压力水泵连接外腔注水加压阀门，对外水加压腔注水加压，待外水加压腔空气排净后关闭外腔排气阀门，根据试验方案，逐级对外水加压腔注水加压至设定值，观察记录内水压力表与外水压力表示数变化，同时打开数据采集仪记录各监测仪器读数，加载结束后打开外腔排水阀门，排出外水加压腔水，步骤3、步骤4与步骤5可根据试验方案做不同排序；

[0027] 步骤6：试验数据处理分析，包括：

[0028] 将压力加载过程中数据采集仪记录到的各监测仪器的应力/应变、变形、渗流等数据导入电脑进行后期处理，同时可打开前舱门观察衬砌内部裂缝特征，对隧洞不同运营期衬砌结构的混凝土应变及钢筋应力和围岩稳定性、衬砌与围岩的联合承载特性及各自荷载分担比例、衬砌开裂后裂缝的分布和扩展规律、内水外渗及外水返渗的水头消减规律等进行分析研究。

[0029] 与现阶段隧洞室内模型试验方法和方案相比，本发明的有益效果是：

[0030] (1)新的试验装置可模拟隧洞模型比尺范围为1:5～1:2，可最大程度还原衬砌各组成结构及相应功能，降低缩尺效应对试验结果的影响；

[0031] (2)衬砌模型材料采用与工程设计相同的混凝土结构材料，完全还原实际工程材料的力学与渗流特性；

[0032] (3)可通过应力加载机构对衬砌施加山岩压力，填补了隧洞模型试验中对衬砌所承担的山岩压力模拟的缺失；

[0033] (4)采用真实的水压力加载，通过前、后舱门上密封圈可将衬砌内、外水加压腔分别密封施加水压力荷载，同时压力水泵可保持稳定的水压力输出，压力舱的制作与质检符合《固定式压力容器安全技术监察规程》，试验操作安全，可重复性强；

[0034] (5)模型试验条件与隧洞不同运营期条件高度相似，保证了试验结果与实际工程中衬砌结构与围岩的受力与渗流特性的一致性，能够很好地研究分析和评价高内水压力单独作用、高外水压力单独作用、高内外水压力共同作用和山岩压力作用等不同内外荷载对衬砌结构的混凝土应变及钢筋应力和围岩稳定性的影响、不同类型衬砌与不同等级围岩的联合承载特性及各自荷载分担比例、衬砌开裂后裂缝的分布和扩展规律、内水外渗及外水返渗的水头消减规律等问题。

附图说明

[0035] 图1为本发明中试验装置整体剖面图。

[0036] 图2a为本发明中压力舱整体图。

[0037] 图2b为本发明中压力舱剖面图。

[0038] 图3a为本发明中前舱门的外侧结构示意图。

[0039] 图3b为本发明中前舱门的内侧结构示意图。

[0040] 图4a为本发明中舱体的右侧视结构示意图。

[0041] 图4b为本发明中舱体的左侧视结构示意图。

[0042] 图5为本发明中舱体的前视结构示意图。

[0043] 图6a为本发明中后舱门的外侧结构示意图。

[0044] 图6b为本发明中后舱门的内侧结构示意图。

[0045] 图7a为本发明中监测仪器线缆出口内部结构示意图。

[0046] 图7b为本发明中顶部法兰盘结构示意图。

[0047] 图8为本发明中应力加载机构整体图。

[0048] 图9为本发明中加载腔整体图。

[0049] 图10a为本发明中汇压阀的外观示意图。

[0050] 图10b为本发明中汇压阀的内部结构示意图。

[0051] 其中，1-压力舱；2-衬砌层；3-应力加载机构；4-监测系统；11-前舱门；12-舱体；13-后舱门；14-长丝土工布；21-内水加压腔；22-外水加压腔；31-加载腔；32-压力管；33-汇压阀；111-内水压力表；112-内腔排水阀门；113-内密封圈；114-外密封圈；115-螺栓；116-螺栓孔；117-加强肋；121-应力加载阀门外接头；122-应力加载阀门内接头；123-外腔注水加压阀门；124-混凝土灌注孔；125-外腔排气阀门；126-外腔排水阀门；127-外水压力表；128-监测仪器线缆出口；129-底座；131-内腔注水加压阀门；132-内腔排气阀门；311-前接头；312-后接头；331-内接口；332-阀体；333-汇压管；334-外接头；1281-出口接头；1282-密封垫；1283-中部法兰板；1284-密封胶层；1285-顶部法兰板；1286-线缆导出孔。

具体实施方式

[0052] 以下结合本发明实施例中的附图，对本发明实施例中的技术方案作进一步的详细说明。

[0053] 实施例1：如图1-6b所示，本发明的隧洞衬砌结构模型试验装置包括压力舱1、衬砌层2、应力加载机构3和监测系统4。压力舱1包括前舱门11、舱体12和后舱门13，前舱门11设有内水压力表111、内腔排水阀门112、内密封圈113、外密封圈114、螺栓115、螺栓孔116和加强肋117；舱体12设有应力加载阀门外接头121、应力加载阀门内接头122、外腔注水加压阀门123、混凝土灌注孔124、外腔排气阀门125、外腔排水阀门126、外水压力表127、监测仪器线缆出口128、底座129和螺栓孔115，舱体12内壁铺设有长丝土工布14，防止衬砌层2浇筑过程中混凝土堵塞舱体12内壁各阀门孔口与接头；后舱门13设有内腔注水加压阀门131、内腔排气阀门132、内密封圈113、外密封圈114、螺栓115、螺栓孔116和加强肋117；衬砌层2整体呈圆筒形，安装于压力舱1内部，可由素混凝土、钢筋混凝土或环锚预应力混凝土等浇筑成形，模拟不同的衬砌结构类型，衬砌层2外壁与加载腔31内壁贴合，衬砌层2筒体两端面与舱体12两端面齐平；衬砌层2内壁与前舱门11、后舱门13通过内密封圈113进行密封形成内水加压腔21；衬砌层2外壁与舱体12内壁、前舱门11、后舱门13通过螺栓115和外密封圈114进行密封形成外水加压腔22；压力水泵连接内腔注水加压阀门131可对内水加压腔21施加水压力荷载，模拟水工隧洞不同等级内水压力作用；所述的压力水泵连接外腔注水加压阀门123可对外水加压腔22施加水压力荷载，模拟水工或交通隧洞不同等级外水压力作用；所述的压力水泵连接应力加载阀门外接头121可对加载腔31注水加压，模拟水工或交通隧洞的山岩压力作用；通过不同内外荷载工况组合对高内水压力单独作用、高外水压力单独作用、高内外水压力共同作用和山岩压力作用下衬砌结构的混凝土应变及钢筋应力和围岩稳定性的影响、不同类型衬砌与不同等级围岩的联合承载特性及各自荷载分担比例、衬砌开裂后裂缝的分布和扩展规律、内水外渗及外水返渗的水头消减规律等进行分析研究。

[0054] 如图7a、7b所示，监测仪器线缆出口128采用双层法兰结构，包括出口接头1281、密封垫1282、中部法兰板1283、密封胶层1284与顶部法兰板1285，中部法兰板1283与顶部法兰板1285在相同位置处开设有线缆导出孔1286，密封垫1282安装于出口接头1281与中部法兰板1283之间，监测仪器的单根线缆分别穿过中部法兰板1283与顶部法兰板1285上的线缆导出孔1286，中部法兰板1283与顶部法兰板1285之间均匀涂抹密封胶后采用螺栓压紧形成密封胶层1284。

[0055] 如图8-10b所示，应力加载机构3包括加载腔31、压力管32、汇压阀33和压力水泵，加载腔31是由橡胶硫化而成的方形扁平囊体，在加载腔31的方形面设有前接头311与后接头312，汇压阀33包括内接口331、阀体332、汇压管333和外接头334，汇压管33将内接口331与外接头334连接为一体，汇压阀33的内接口331与应力加载阀门内接头122连接，埋设于衬砌层2内部，加载腔31沿环向分片，轴向分段安装在舱体12内壁，用压力管32将环向相邻加载腔31的前接头311与后接头312串联后接入汇压阀33的外接头334，压力水泵可分别与应力加载阀门外接头121、外腔注水加压阀门123、内腔注水加压阀门131连接。

[0056] 一种隧洞衬砌结构模型试验装置的试验方法，包括以下试验步骤：

[0057] 步骤1：安装应力加载机构，包括：

[0058] 在舱体12内壁铺设长丝土工布14，将汇压阀33的内接口331与应力加载阀门内接

头122连接，在舱体12内壁沿环向分片、轴向分段铺设安装加载腔31，环向相邻加载腔31的前接头311与后接头312通过压力管32串联，最后将环向两端压力管32接入汇压阀33的外接头334，完成应力加载机构3的安装；

[0059] 步骤2：浇筑安装衬砌层，包括：

[0060] 安装固定后舱门13，埋设监测仪器，将仪器线缆由舱体12的监测仪器线缆出口128导出，将监测仪器线缆出口128的密封垫1282和中部法兰板1283装入出口接头1281固定，根据试验方案制作安装衬砌层内部结构组件，安装衬砌层浇筑模板，将设定标号的混凝土由舱体12上部的混凝土灌注孔124注入模板内，每次注入一定量后振捣均匀，浇筑完成后进行混凝土养护，达到龄期要求后拆除模板，完成衬砌层2的浇筑安装；

[0061] 步骤3：山岩压力加载，包括：

[0062] 在监测仪器线缆出口128的中部法兰盘1283与顶部法兰盘1285之间均匀涂抹密封胶后用螺栓固定压紧，安装固定前舱门11，锁紧前舱门12与后舱门13上螺栓115，使内密封圈113与外密封圈114全部压密，用真空泵连接应力加载阀门外接头121，抽出加载腔31内空气，再将压力水泵与应力加载阀门外接头121连接，根据试验方案，对加载腔31加压至设定值，同时打开数据采集仪记录各监测仪器读数；

[0063] 步骤4：内水压力加载，包括：

[0064] 打开内腔排气阀门132，将压力水泵连接内腔注水加压阀门131，对内水加压腔21注水加压，待内水加压腔21空气排净后关闭内腔排气阀门132，根据试验方案，逐级对内水加压腔21注水加压至设定值，观察记录内水压力表111与外水压力表127示数变化，同时打开数据采集仪记录各监测仪器读数，若加载过程中观察到外水压力表127示数由0开始增大，则说明衬砌发生开裂，加载结束后打开内腔排水阀门112，排出内水加压腔21水；

[0065] 步骤5：外水压力加载，包括：

[0066] 打开外腔排气阀门125，将压力水泵连接外腔注水加压阀门123，对外水加压腔22注水加压，待外水加压腔22空气排净后关闭外腔排气阀门125，根据试验方案，逐级对外水加压腔22注水加压至设定值，观察记录内水压力表111与外水压力表127示数变化，同时打开数据采集仪记录各监测仪器读数，加载结束后打开外腔排水阀门126，排出外水加压腔22水，步骤3、步骤4与步骤5可根据试验方案做不同排序；

[0067] 步骤6：试验数据处理分析，包括：

[0068] 将压力加载过程中数据采集仪记录到的各监测仪器的应力/应变、变形、渗流等数据导入电脑进行后期处理，同时可打开前舱门观察衬砌内部裂缝特征，对隧洞不同运营期衬砌结构的混凝土应变及钢筋应力和围岩稳定性、衬砌与围岩的联合承载特性及各自荷载分担比例、衬砌开裂后裂缝的分布和扩展规律、内水外渗及外水返渗的水头消减规律等进行分析研究。

[0069] 实施例2：与实施例1不同之处在于，实施例2在衬砌层2与舱体12内壁之间还设置有围岩模拟层，围岩模拟层整体呈圆筒形，由设定标号的混凝土浇筑成型，可通过浇筑不同标号的混凝土模拟不同强度的围岩等级，围岩模拟层外壁与舱体12内壁贴合，围岩模拟层筒体两端面与舱体12两端面齐平。

[0070] 一种隧洞衬砌结构模型试验装置的试验方法，包括以下试验步骤：

[0071] 步骤1：浇筑安装围岩模拟层，包括：

[0072] 安装固定后舱板13，在舱体12内壁铺设长丝土工布14，将汇压阀33的内接口331与应力加载阀门内接头122连接，将外接头334与压力管32连接，埋设监测仪器，将监测仪器线缆由舱体12左侧的监测仪器线缆出口128导出，将左侧的监测仪器线缆出口128的密封垫1282和中部法兰板1283装入出口接头1281固定，在右侧的监测仪器线缆出口128安装模板，防止围岩模拟层混凝土浇筑过程中将其填充，安装围岩模拟层浇筑模板，将汇压阀33外接头334连接的压力管32从围岩模拟层浇筑模板穿出，根据试验方案，将设定标号的混凝土由舱体12上部的混凝土灌注孔124注入模板内，每次注入一定量后振捣均匀，浇筑完成后进行混凝土养护，达到龄期要求后拆除模板，完成围岩模拟层的浇筑安装；

[0073] 步骤2：安装应力加载机构，包括：

[0074] 在围岩模拟层内壁沿环向分片、轴向分段铺设安装加载腔31，环向相邻加载腔31的前接头311与后接头312通过压力管32串联，最后将环向两端压力管32与汇压阀33外接头334的压力管32连接，完成应力加载机构3的安装；

[0075] 步骤3：浇筑安装衬砌层，包括：

[0076] 根据试验方案制作安装衬砌层内部结构组件，埋设监测仪器，将监测仪器线缆由右侧的监测仪器线缆出口128导出，将右侧的监测仪器线缆出口128的密封垫1282和中部法兰板1283装入出口接头1281固定，并在右侧仪器线缆出口128内填充与围岩模拟层相同标号混凝土至与围岩模拟层内壁齐平。安装衬砌层浇筑模板，将设定标号的混凝土沿模板上的灌浆孔注入，每次注入一定量后振捣均匀，浇筑完成后进行混凝土养护，达到龄期要求后拆除模板，完成衬砌层2的浇筑安装；

[0077] 步骤4：山岩压力加载，包括：

[0078] 在两侧监测仪器线缆出口128的中部法兰盘1283与顶部法兰盘1285之间均匀涂抹密封胶后用螺栓固定压紧，安装固定前舱门11，锁紧前舱门12与后舱门13上螺栓115，使内密封圈113与外密封圈114全部压密，用真空泵连接应力加载阀门外接头121，抽出加载腔31内空气，再将压力水泵与应力加载阀门外接头121连接，根据试验方案，对加载腔31加压至设定值，同时打开数据采集仪记录各监测仪器读数；

[0079] 步骤5：内水压力加载，包括：

[0080] 打开内腔排气阀门132，将压力水泵连接内腔注水加压阀门131，对内水加压腔21注水加压，待内水加压腔21空气排净后关闭内腔排气阀门132，根据试验方案，逐级对内水加压腔21注水加压至设定值，观察记录内水压力表111与外水压力表127示数变化，同时打开数据采集仪记录各监测仪器读数，若加载过程中观察到外水压力表127示数由0开始增大，则说明衬砌发生开裂，加载结束后打开内腔排水阀门112，排出内水加压腔21水；

[0081] 步骤6：外水压力加载，包括：

[0082] 打开外腔排气阀门125，将压力水泵连接外腔注水加压阀门123，对外水加压腔22注水加压，待外水加压腔22空气排净后关闭外腔排气阀门125，根据试验方案，逐级对外水加压腔22注水加压至设定值，观察记录内水压力表111与外水压力表127示数变化，同时打开数据采集仪记录各监测仪器读数，加载结束后打开外腔排水阀门126，排出外水加压腔22水，步骤3、步骤4与步骤5可根据试验方案做不同排序；

[0083] 步骤7：试验数据处理分析，包括：

[0084] 将压力加载过程中数据采集仪记录到的各监测仪器的应力/应变、变形、渗流等数

据导入电脑进行后期处理，同时可打开前舱门观察衬砌内部裂缝特征，对隧洞不同运营期衬砌结构的混凝土应变及钢筋应力和围岩稳定性、衬砌与围岩的联合承载特性及各自荷载分担比例、衬砌开裂后裂缝的分布和扩展规律、内水外渗及外水返渗的水头消减规律等进行分析研究。

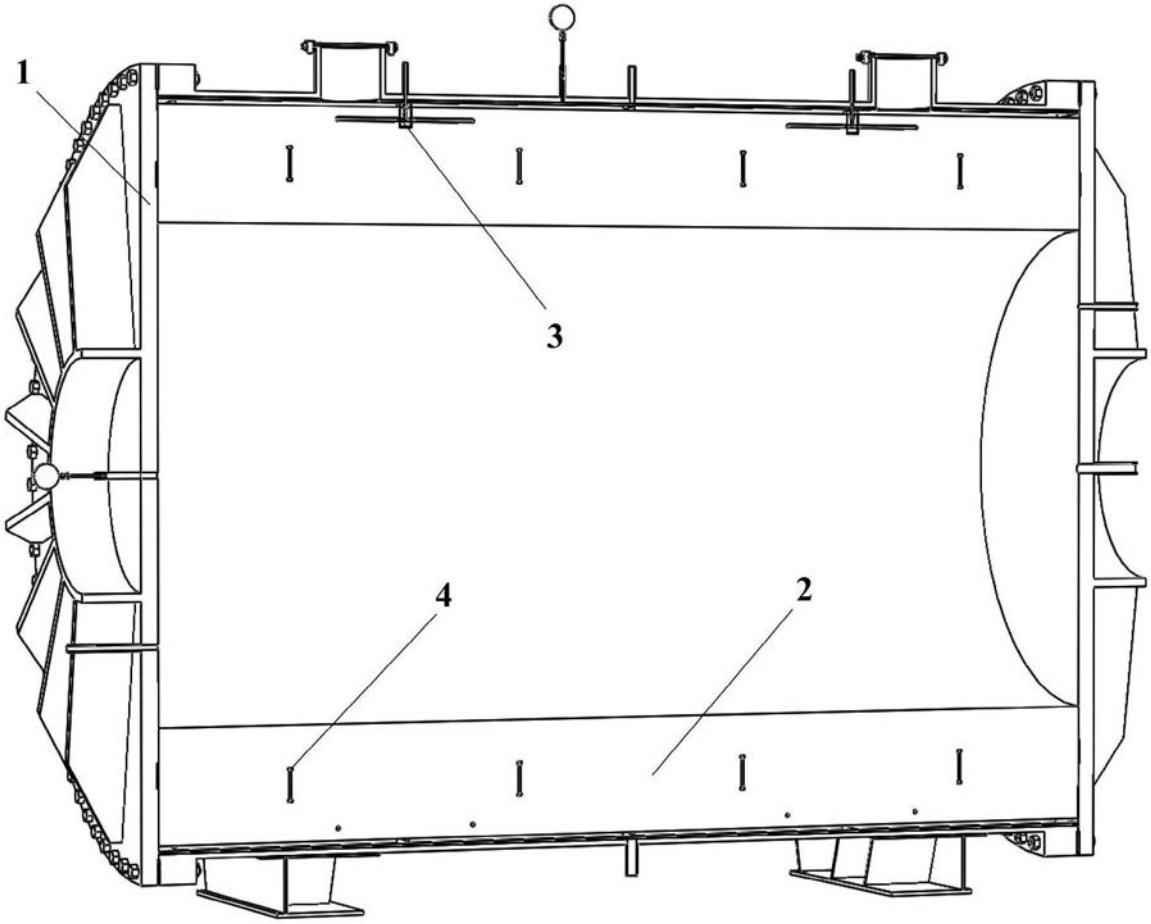


图1

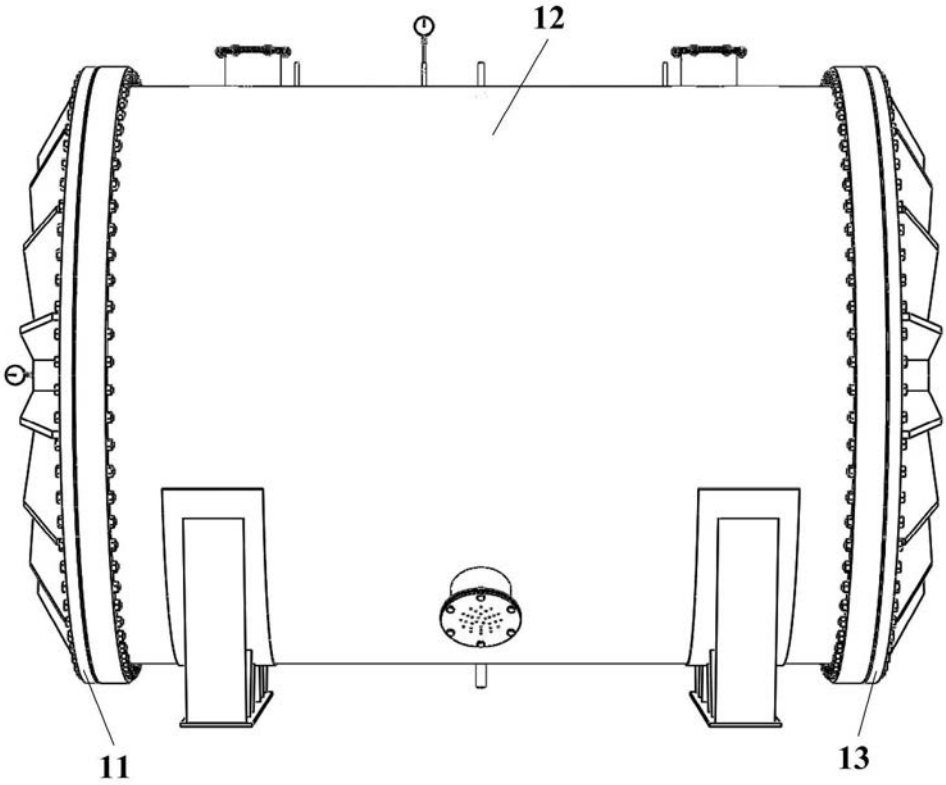


图2a

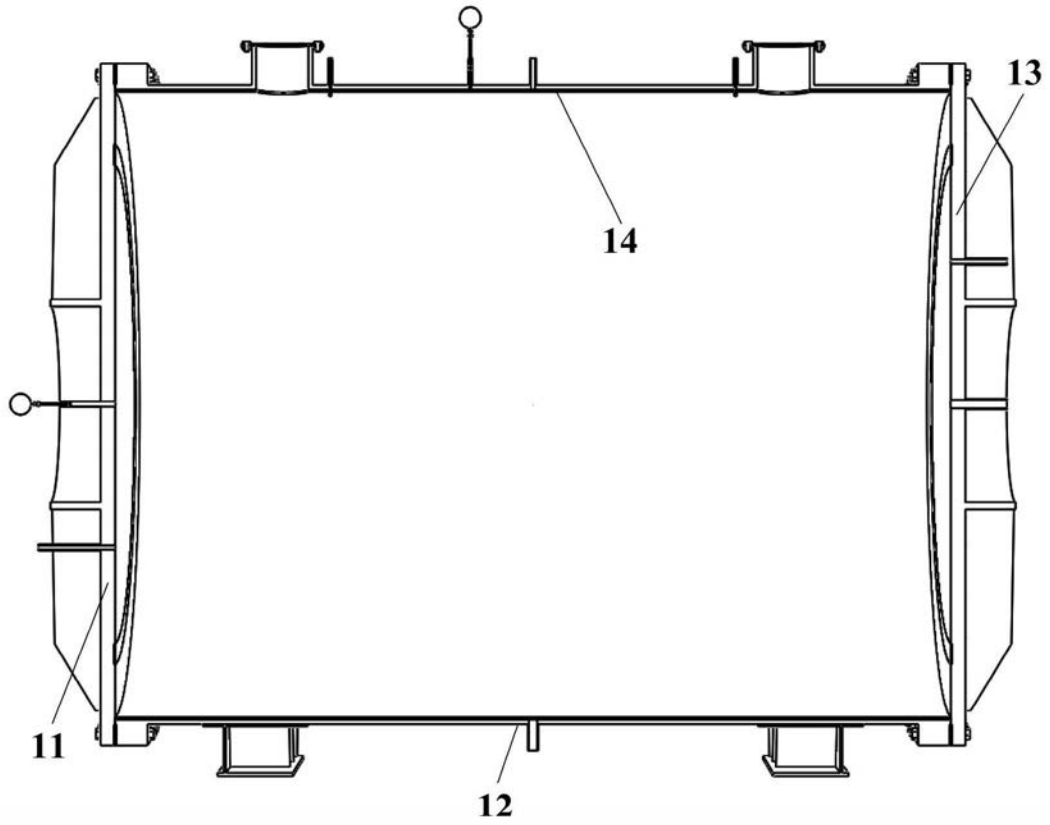


图2b

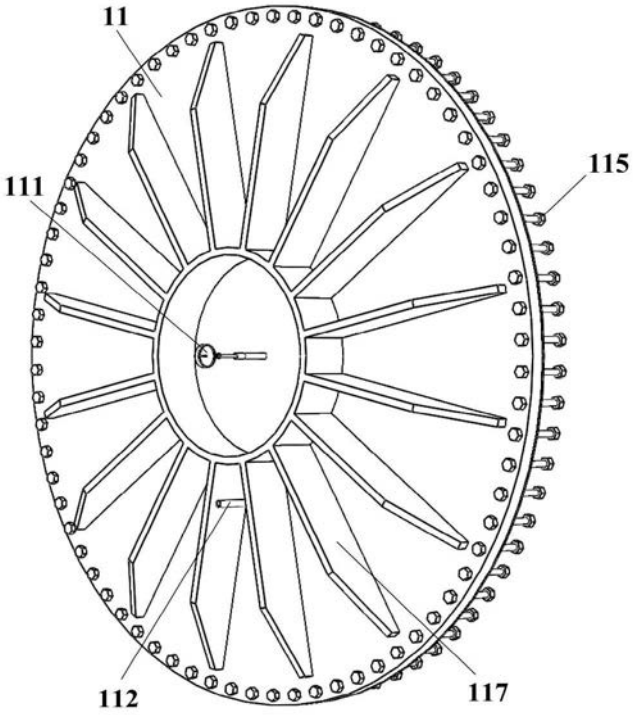


图3a

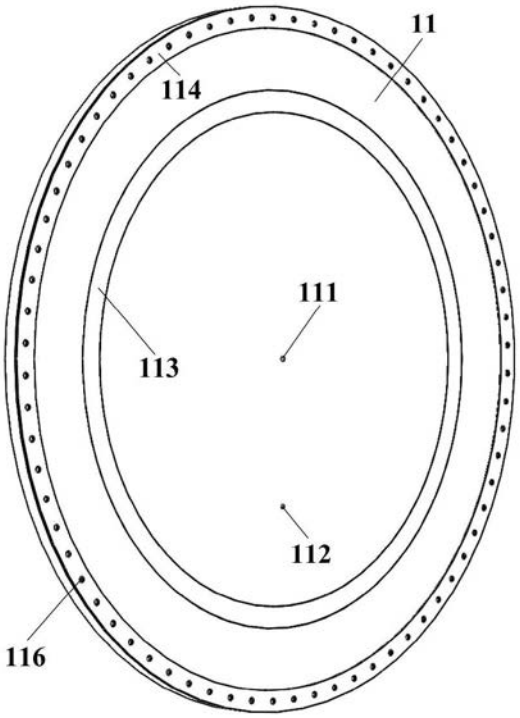


图3b

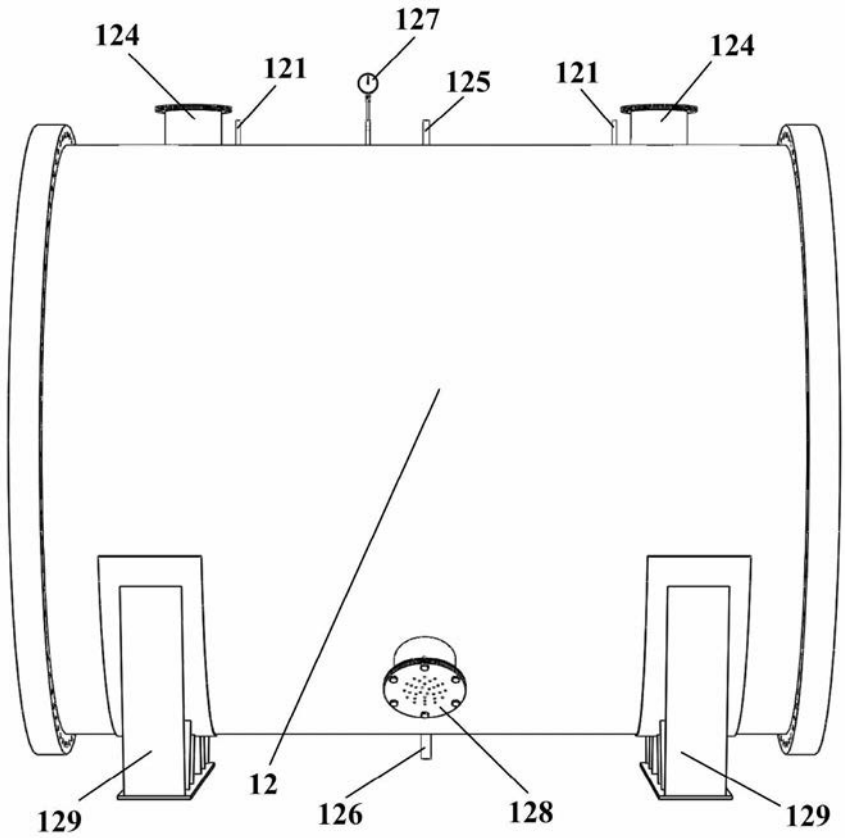


图4a

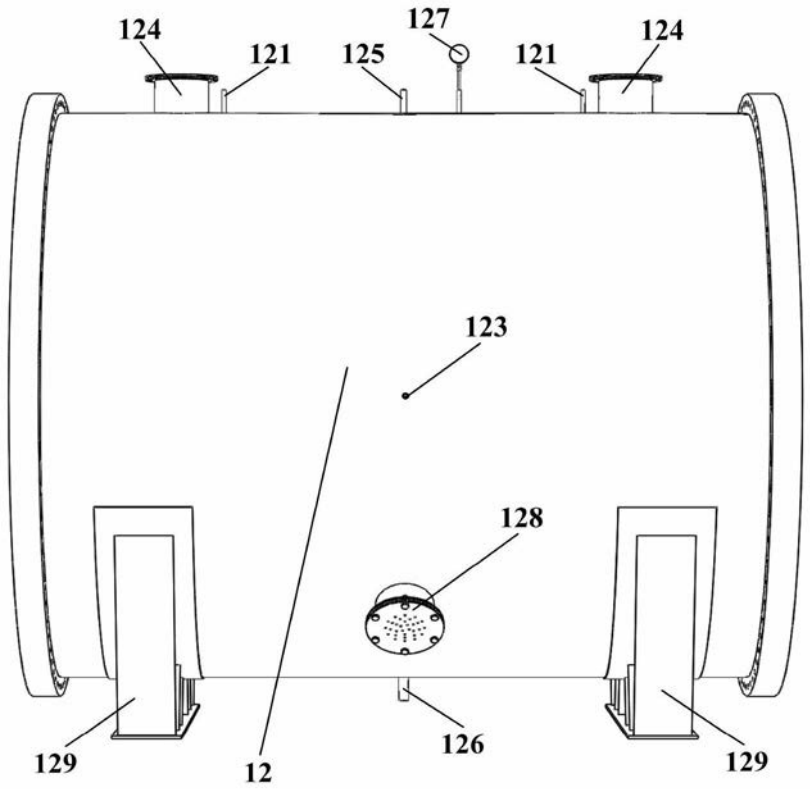


图4b

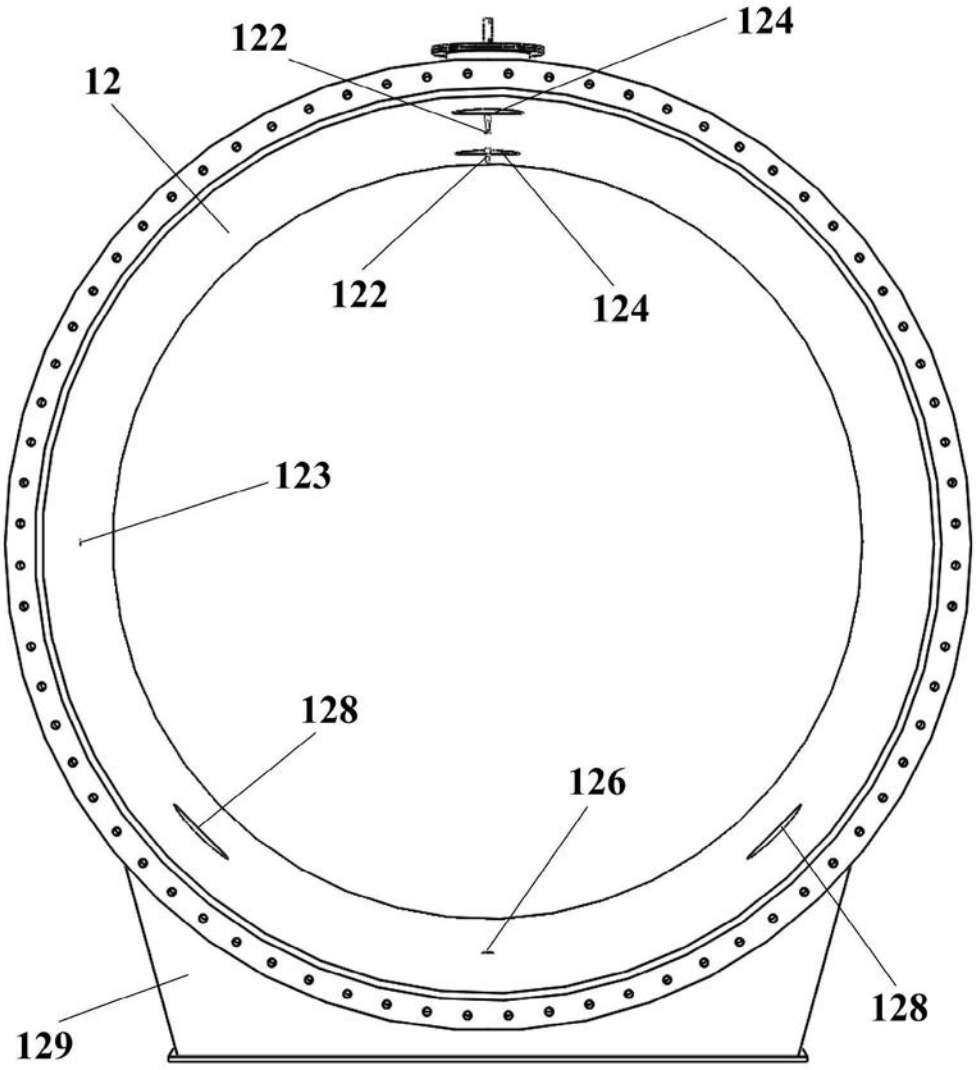


图5

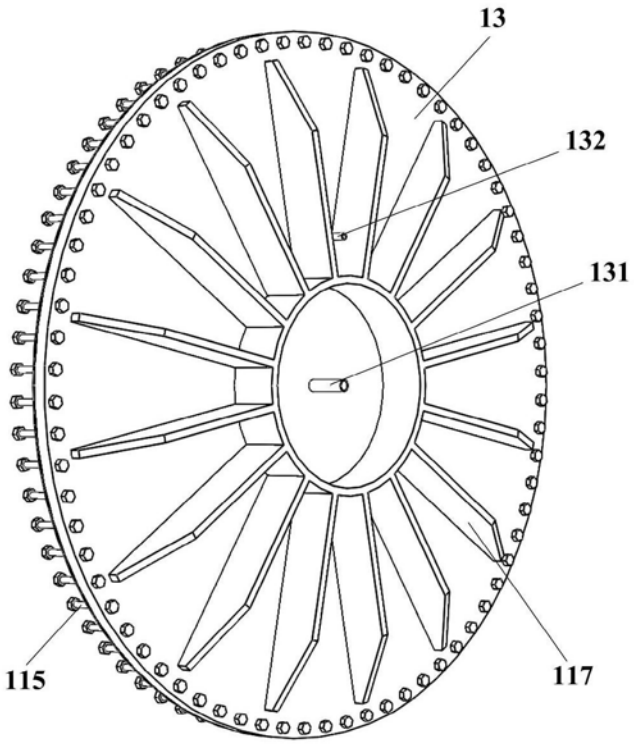


图6a

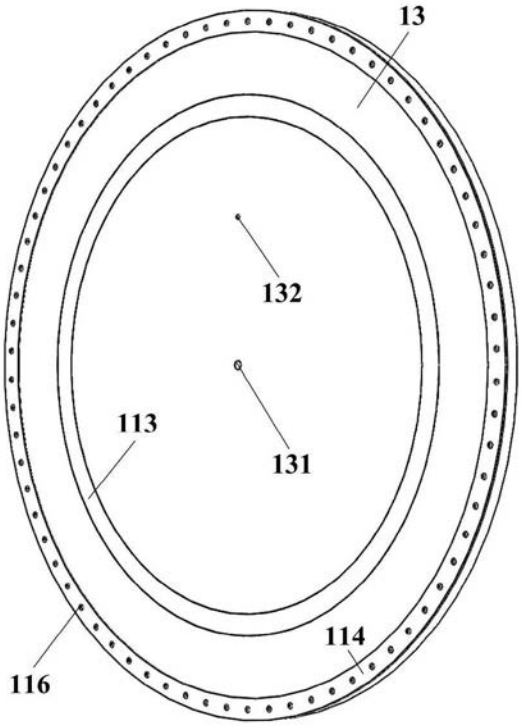


图6b

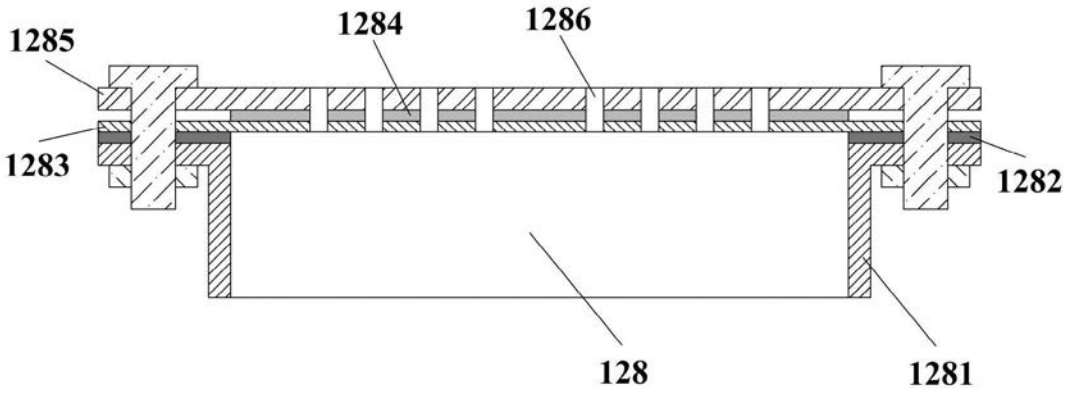


图7a

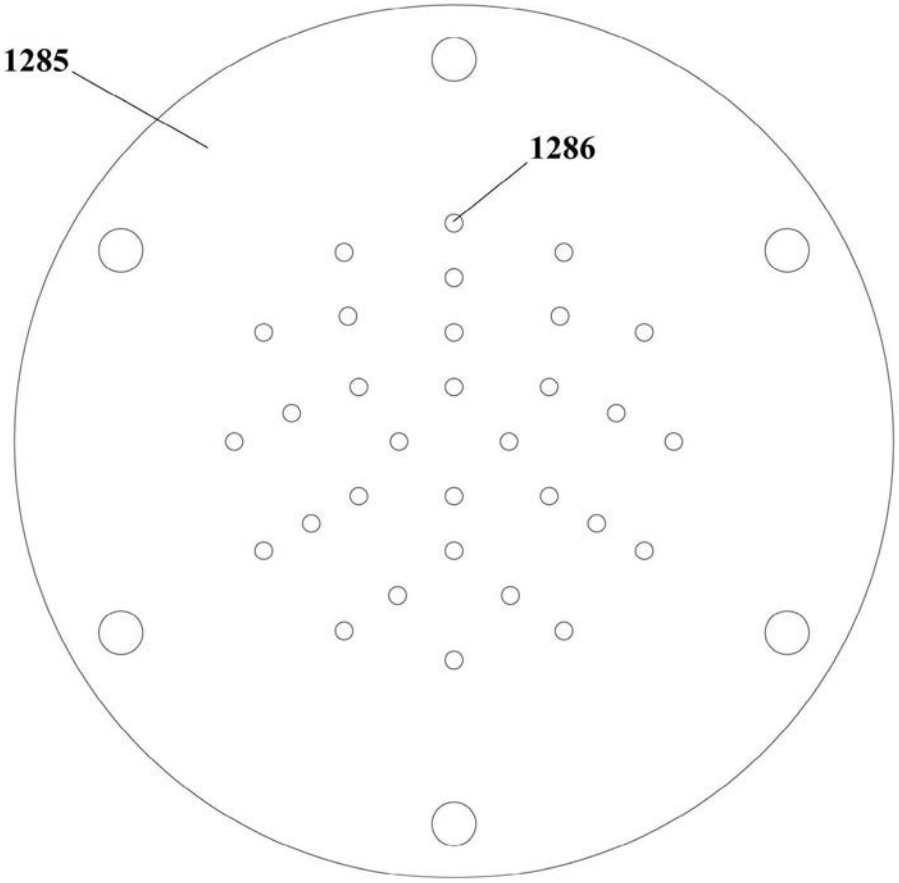


图7b

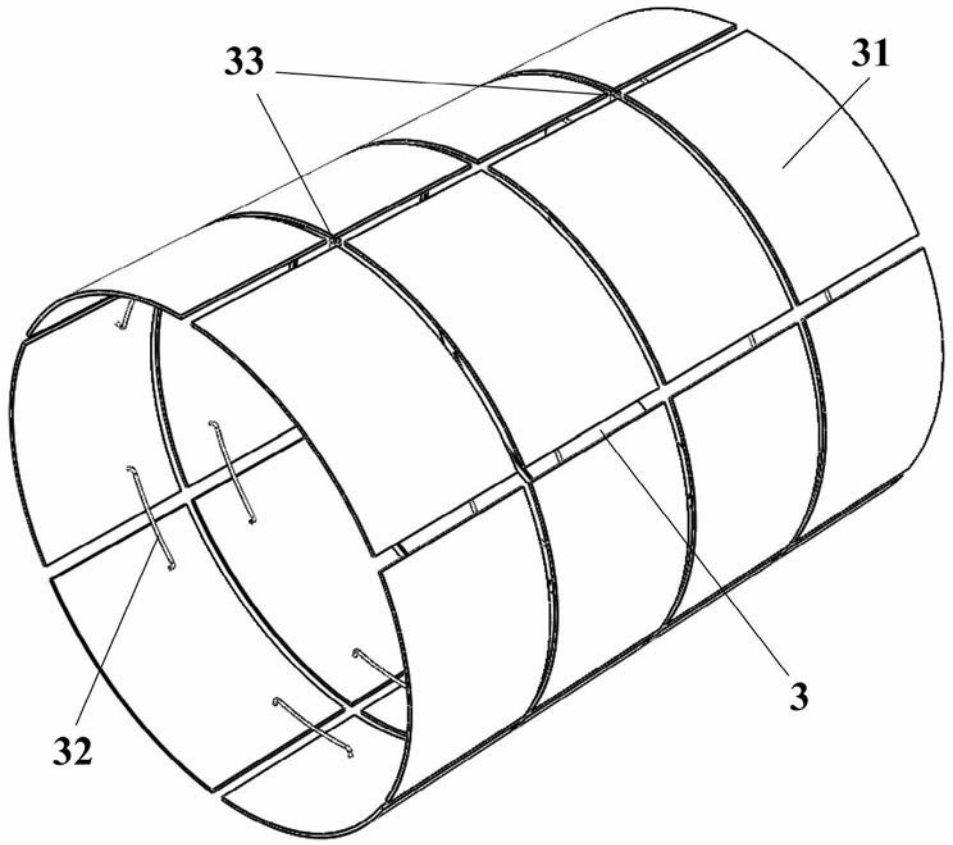


图8

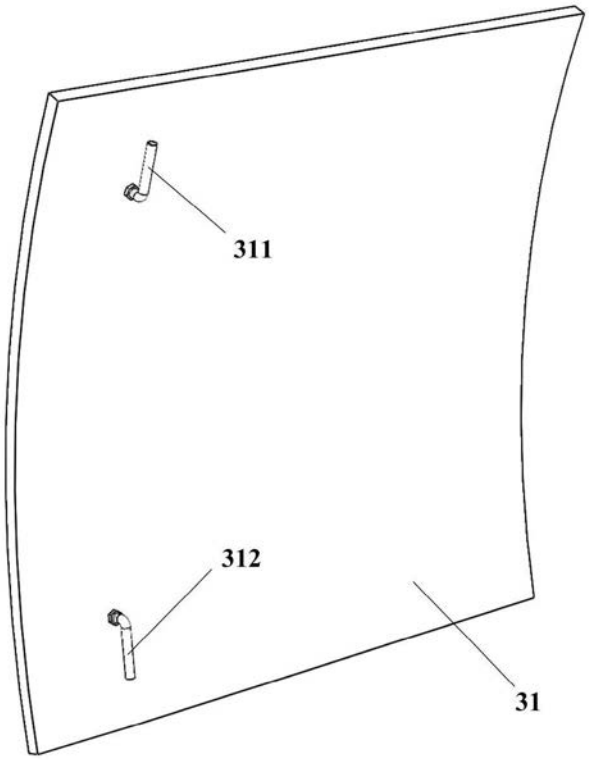


图9

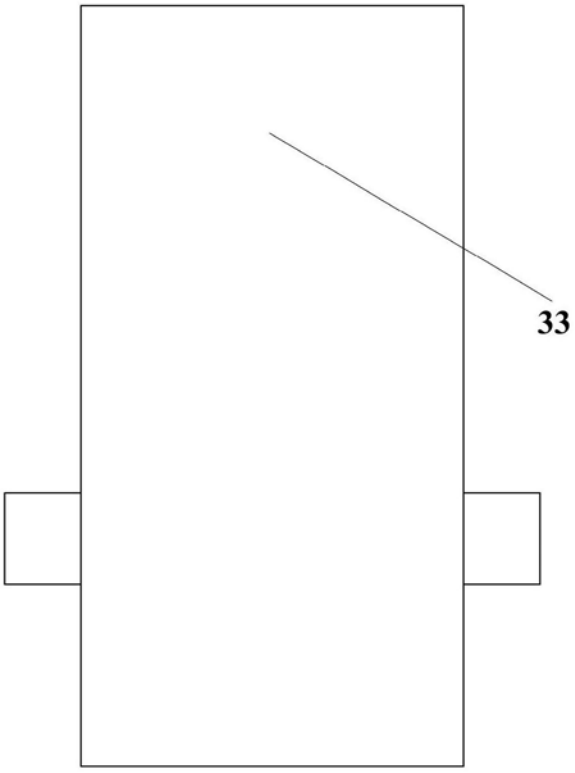


图10a

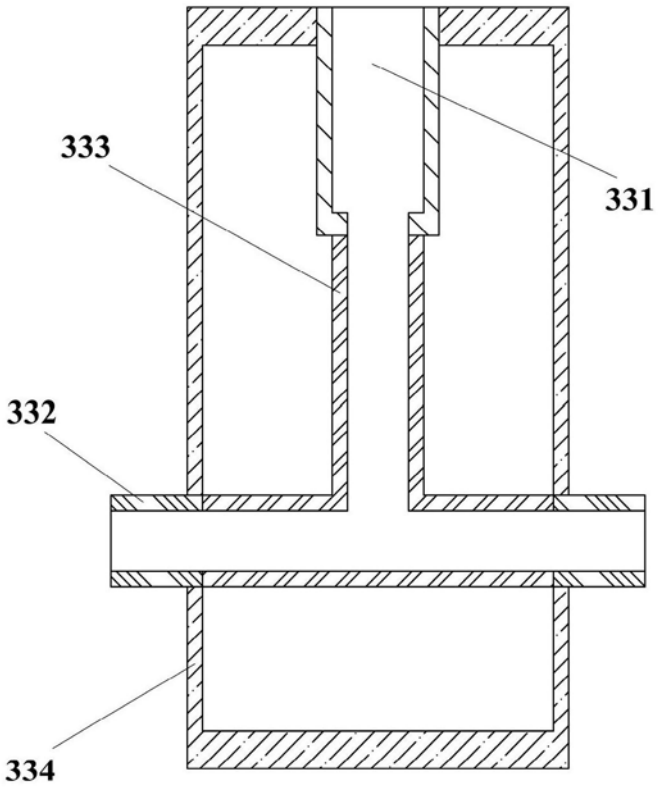


图10b