



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 114458564 B

(45) 授权公告日 2022.07.12

(21) 申请号 202210380575.5

(22) 申请日 2022.04.12

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 114458564 A

(43) 申请公布日 2022.05.10

(73) 专利权人 国科大杭州高等研究院
地址 315731 浙江省杭州市西湖区象山支
弄1号

(72) 发明人 龙建飞 徐禄祥 吴铭钊 柏树
郭宁 周艳波 赵杰 杨威
孙明明 罗威

(74) 专利代理机构 浙江杭州金通专利事务所有
限公司 33100
专利代理师 邓世凤

(51) Int.Cl.

F03H 1/00 (2006.01)

(56) 对比文件

杨福全等.电推力器气路高电压绝缘技术研究.《真空科学与技术学报》.2014,第34卷(第12期),1290-1293.

审查员 马飞

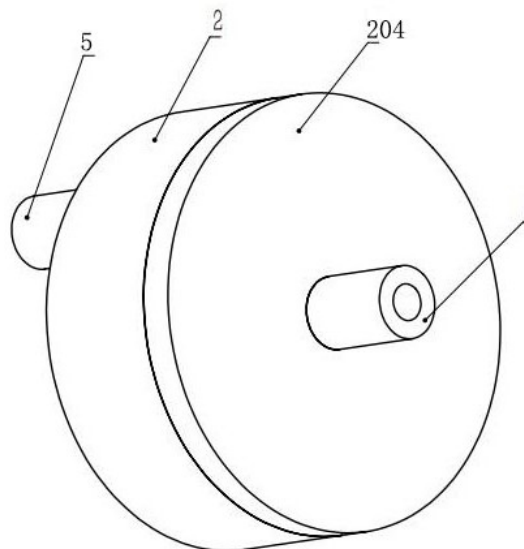
权利要求书4页 说明书11页 附图4页

(54) 发明名称

一种霍尔推力器环式分压气路绝缘结构

(57) 摘要

本发明的一种霍尔推力器环式分压气路绝缘结构,包括进气管、绝缘器本体和出气管,所述绝缘器本体内包括缓冲腔、环状气路和金属隔网,所述绝缘器本体在连通进气管的内腔设置的圆柱形的缓冲腔,缓冲腔连通外侧的环状气路,环状气路呈圆环状,环状气路上间隔设置若干金属隔网,气体通过进气管进入缓冲腔扰匀降速后,通入环状气路,经过间隔设置的若干金属隔网分压后通过出气管通出,在气体流通过程中,若干金属隔网复用为金属电极。本发明提供了一种增加工质气体流通速度、提升耐压性能的霍尔推力器环式分压气路绝缘结构。



1. 一种霍尔推力器环式分压气路绝缘结构,其特征在于:包括进气管、绝缘器本体和出气管,所述绝缘器本体内包括缓冲腔、环状气路和金属隔网,所述绝缘器本体在连通进气管的内腔设置的圆柱形的缓冲腔,缓冲腔连通外侧的环状气路,环状气路呈圆环状,环状气路上间隔设置若干金属隔网,气体通过进气管进入缓冲腔扰匀降速后,通入环状气路,经过间隔设置的若干金属隔网分压后通过出气管通出,在气体流通过程中,若干金属隔网复用为金属电极。

2. 如权利要求1所述的霍尔推力器环式分压气路绝缘结构,其特征在于:所述绝缘器本体包括绝缘陶瓷环和陶瓷盖板,绝缘陶瓷环包括中心内置的圆柱形缓冲腔和外置的环状气路,缓冲腔和环状气路为同心布局,且相同高度;缓冲腔通过导流孔与环状气路前端相连;环状气路为被陶瓷隔板分开的非闭合环形通道,在环状气路上等间距设置多级金属隔网,在环状气路末端的底部设置有出气孔,通过出气孔与出气管相连;所述陶瓷盖板为圆形盖板,中心设置有圆孔,通过该圆孔与进气管路连接,陶瓷盖板与绝缘陶瓷环具有相同的外径。

3. 如权利要求2所述的霍尔推力器环式分压气路绝缘结构,其特征在于:绝缘陶瓷环在环状气路与缓冲腔的壁间设置导流孔,导流孔连通的环状气路的一侧设置挡板,挡板在另一侧设置出气孔,出气孔连接出气管,气体通过导流孔通入环状气路后从出气孔通出,形成单向流通通道。

4. 如权利要求2所述的霍尔推力器环式分压气路绝缘结构,其特征在于:所述绝缘陶瓷环在环状气路上设置有卡槽插装金属隔网;所述金属隔网选用不锈钢材质。

5. 如权利要求2所述的霍尔推力器环式分压气路绝缘结构,其特征在于:所述绝缘陶瓷环呈圆环状,绝缘陶瓷环与陶瓷盖板密封后构成绝缘器本体的圆盘形状。

6. 如权利要求2所述的霍尔推力器环式分压气路绝缘结构,其特征在于:绝缘陶瓷环与出气管采用钎焊密封;陶瓷盖板与进气管采用钎焊密封。

7. 如权利要求1所述的霍尔推力器环式分压气路绝缘结构,其特征在于:环状气路中气体雷诺数 Re_1 计算公式如下:

$$Re_1 = \frac{q_m D}{A \eta} \quad (8)$$

其中, q_m 为气体质量流量,单位为mg/s; D 为环状气路的当量直径,单位为m, A 为环状气路的横截面积,单位为 m^2 , η 为气体的黏滞系数,单位为 $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$;

环状气路当量直径 D 满足如下关系:

$$D = \frac{2(R_3 - R_2) h}{R_3 - R_2 + h} \quad (9)$$

其中, R_2 为环状气路内径,单位为m; R_3 为外径,单位为m; h 为高度,单位为m;

环状气路的横截面积 A 满足如下关系:

$$A = (R_3 - R_2) h \quad (10)$$

将公式(9)和公式(10)带入公式(8),进一步得到环状气路中气体雷诺数的计算公式如下:

$$\text{Re}_1 = \frac{2q_m}{\eta(R_3 - R_2 + h)} \quad (11)$$

环状气路中气体克努增系数计算公式如下：

$$K_{n1} = \frac{2\bar{\lambda}_1}{R_3 - R_2} \quad (12)$$

其中： K_{n1} 为环状气路气体克努增系数； $\bar{\lambda}_1$ 为环状气路中气体平均自由程，单位为m；

同种气体下气体的平均自由程 $\bar{\lambda}$ 满足如下公式：

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma n} \quad (13)$$

其中， σ 为气体碰撞截面，单位为 m^2 ； n 为气体密度，单位为个/ m^3 ；

环状气路中气体的密度满足如下公式：

$$n_1 = \frac{q_m}{\bar{v}(R_3 - R_2)hm} \quad (14)$$

其中， n_1 为气体密度，单位为个/ m^3 ； \bar{v} 为气体的平均热运动速度，单位为 m/s ； m 为气体分子质量，单位为 kg ；

环状气路中压强与气体密度的关系为：

$$P_1 = n_1 k T \quad (15)$$

式中， P_1 为气体压强，单位为 Pa ； k 为玻尔兹曼常数，单位为 J/K ； T 为气体温度，单位为 K ；

根据霍尔推力器放电通道内气体电离性能要求，放电通道入口气体压强为 $100 \sim 1000 \text{Pa}$ ，同时，环状气体中气体需要满足粘滞流状态，即：

$$\text{Re}_1 < 1200$$

$$K_{n1} < \frac{1}{100}$$

$$100 < P_1 < 1000 \quad (16)$$

结合公式(8)～(16)，确定环状气路内径 R_2 、外径 R_3 和高度 h 的值，环状气路的上述参数值的设定实现气路中的气体满足粘滞流特性，从而保证了分级耐压性能的实现。

8. 如权利要求7所述的霍尔推力器环式分压气路绝缘结构，其特征在于：气路绝缘结构最大耐压为 V_{max} 设计，设阳极高压为 V_d ，工作裕度为 ΔV ，则气路绝缘器最大耐压满足如下关系：

$$V_{\text{max}} = V_d + \Delta V \quad (1)$$

基于电势叠加原理，通过多级分压实现耐高压参数，即在单联通气路中，通过设定 N 级电极，每级电极可耐压 V_0 ，则总耐压参数 V_1 满足如下关系：

$$V_1 = N V_0 \quad (2)$$

针对氙气工质，在粘滞流状态下，当电极为铁材料时，两极最低耐压值约为 150V ，因此，环状气路中设置的金属隔网电极的级数 N 满足如下关系：

$$150N \geq V_{\max} \quad (3)$$

则最小级数 N_{\min} 为:

$$N_{\min} = \frac{V_{\max}}{150} \quad (4)$$

当 N_{\min} 有余数时,则 N_{\min} 加1;金属隔网设置数量 N 大于等于 N_{\min} ;

相邻金属隔网之间需要绝缘处理,设两金属隔网最小间距为 d ,则金属网格最大数量 N_{\max} 满足如下关系:

$$N_{\max} = \frac{L}{d} \quad (5)$$

其中, L 为气体传输路径长度,单位为 m ;考虑金属网格之间尖端放电以及陶瓷工艺等,最小间距为 $2mm$,环状气路中,气体传输路径满足如下关系:

$$L = 2\pi\bar{R} \quad (6)$$

其中, \bar{R} 为环状气路平均半径,单位为 m ;根据以上分析可知,金属隔网数量 N 位于 N_{\min} 和 N_{\max} 之间。

9.如权利要求1所述的霍尔推力器环式分压气路绝缘结构,其特征在于:缓冲腔内气体需要为粘滞流状态,由进气管流入的气体具有较强的速度和一定的非均匀性,通过缓冲腔减缓其流速,并增加气体的均匀性,缓冲腔内部气体雷诺数计算公式如下:

$$R_1 = \frac{2q_m}{\pi\eta Re_2} \quad (17)$$

其中, R_1 为缓冲腔半径,单位为 m ; q_m 为气体质量流量,单位为 mg/s ; η 为气体的黏滞系数,单位为 $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$; Re_2 为缓冲腔气体雷诺数;

缓冲腔半径 R_1 与其内部气体克努曾系数关系如下:

$$R_1 = \frac{\bar{\lambda}_2}{K_{n2}} \quad (18)$$

其中, $\bar{\lambda}_2$ 为缓冲腔内气体平均自由程,单位为 m ; K_{n2} 为缓冲腔气体克努增系数;

对于缓冲腔内气体密度与进气管质量流量的关系如下:

$$n_2 = \frac{q_m}{\bar{v}\pi R_1^2 m} \quad (19)$$

其中, n_2 为缓冲腔气体密度,单位为个/ m^3 ;

根据粘滞流要求,缓冲腔内气体的雷诺数和克努增系数需要同时满足如下要求:

$$Re_2 < 1200$$

$$K_{n2} < \frac{1}{100} \quad (20)$$

结合 (17) ~ (20) 公式, 进而得到缓冲腔半径 R_1 满足范围:

$$\frac{q_m}{600\pi\eta} < R_1 < \frac{\sqrt{2}\sigma q_m}{\bar{v}\pi m 100} \quad (21)$$

从而得到缓冲腔半径值。

一种霍尔推力器环式分压气路绝缘结构

技术领域

[0001] 本发明涉及霍尔推力器技术领域,特别涉及一种霍尔推力器环式分压气路绝缘结构。

背景技术

[0002] 霍尔推力器又称霍尔效应推力器,在推力器中推进剂被电场加速,霍尔推力器将电子约束在磁场中,并利用电子电离推进剂,加速离子产生推力,并中和羽流中的离子。

[0003] 霍尔推力器是一种先进的电推进装置,被广泛应用在卫星位置保持和姿态控制领域,并以其结构简单、高比冲、高效率等优点成为未来空间飞行器的首选推进装置之一。与大气环境下工作的常规电器设备绝缘设计不同,霍尔推力器作为一种工作在高真空环境、等离子体环境下的特殊电气设备,由于真空中带电粒子平均自由程很大,电气绝缘的研究与设计也更加特殊化。

[0004] 霍尔电推进系统工作时,一般采用气路电绝缘结构连接贮供单元与推力器之间,既保证供气的畅通又能够实现高电压绝缘。一般供气管路中氙气压力为 $10^2\sim 10^3\text{Pa}$ 量级的稀薄气体,容易发生电离击穿导致绝缘失效;同时推力器工作环境为高真空、等离子体包围的复杂环境,陶瓷管路的外表面污染导致结构绝缘失效而发生电导通。

[0005] 现有气路绝缘结构主要采用轴向多级分压结构,通过增大其绝缘级数,提高气路电绝缘器的耐压能力,随之带来的影响是:轴向距离增长,使其抗力学性能变得很差;同时陶瓷外部采用保护罩设计减少等离子体轰击污染,安装结构复杂,长期工作下外部陶瓷绝缘性能下降,仍无法长期有效工作

[0006] 因此,针对霍尔推力器供气管路耐高压需求,气路绝缘器结构设计中,如何采用多级分压实现耐高压的同时,解决其结构的抗力学工程问题,以及在长期工作条件下外部陶瓷不受污染击穿,是本领域技术人员亟待解决的技术问题。

发明内容

[0007] 本发明的目的在于,针对现有技术中的问题,提供了一种霍尔推力器环式分压气路绝缘结构,在满足耐压要求的同时,提升气路绝缘器抗力学性能。

[0008] 为此,本发明的上述目的通过以下技术方案实现:

[0009] 一种霍尔推力器环式分压气路绝缘结构,其特征在于:包括进气管、绝缘器本体和出气管,所述绝缘器本体内包括缓冲腔、环状气路和金属隔网,所述绝缘器本体在连通进气管的内腔设置的圆柱形的缓冲腔,缓冲腔连通外侧的环状气路,环状气路呈圆环状,环状气路上间隔设置若干金属隔网,气体通过进气管进入缓冲腔扰匀降速后,通入环状气路,经过间隔设置的若干金属隔网分压后通过出气管通出,在气体流通过程中,若干金属隔网复用为金属电极。

[0010] 在采用上述技术方案的同时,本发明还采用或者组合采用如下技术方案:

[0011] 作为本发明的优选技术方案:所述绝缘器本体包括绝缘陶瓷环和陶瓷盖板,绝缘

陶瓷环包括中心内置的圆柱形缓冲腔和外置的环状气路,缓冲腔和环状气路为同心布局,且具有相同高度;缓冲腔通过导流孔与环状气路前端相连;环状气路为被陶瓷隔板分开的非闭合环形通道,在环状气路上等间距设置多级金属隔网,在环状气路末端的底部设置有出气孔,通过出气孔与出气管相连;所述陶瓷盖板为圆形盖板,中心设置有圆孔,通过该圆孔与进气管路连接,陶瓷盖板与绝缘陶瓷环具有相同的外径。

[0012] 作为本发明的优选技术方案:绝缘陶瓷环在环状气路与缓冲腔的壁间设置导流孔,导流孔连通的环状气路的一侧设置挡板,挡板在另一侧设置出气孔,出气孔连接出气管,气体通过导流孔通入环状气路后从出气孔通出,形成单向流通通道。

[0013] 作为本发明的优选技术方案:所述绝缘陶瓷环在环状气路上设置有卡槽插装金属隔网;所述金属隔网选用不锈钢材质。

[0014] 作为本发明的优选技术方案:所述绝缘陶瓷环呈圆环状,绝缘陶瓷环与陶瓷盖板密封后构成绝缘器本体的圆盘形状。

[0015] 作为本发明的优选技术方案:绝缘陶瓷环与出气管采用钎焊密封;

[0016] 陶瓷盖板与进气管采用钎焊密封。

[0017] 作为本发明的优选技术方案:环状气路中气体雷诺数 Re_1 计算公式如下:

$$[0018] \quad Re_1 = \frac{q_m D}{A \eta} \quad (8)$$

[0019] 其中, q_m 为气体质量流量,单位为mg/s; D 为环状气路的当量直径,单位为m, A 为环状气路的横截面积,单位为 m^2 , η 为气体的黏滞系数,单位为 $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$;

[0020] 环状气路当量直径 D 满足如下关系:

$$[0021] \quad D = \frac{2(R_3 - R_2) h}{R_3 - R_2 + h} \quad (9)$$

[0022] 其中, R_2 为环状气路内径,单位为m; R_3 为外径,单位为m; h 为高度,单位为m;

[0023] 环状气路的横截面积 A 满足如下关系:

$$[0024] \quad A = (R_3 - R_2) h \quad (10)$$

[0025] 将公式(9)和公式(10)带入公式(8),进一步得到环状气路中气体雷诺数的计算公式如下:

$$[0026] \quad Re_1 = \frac{2q_m}{\eta(R_3 - R_2 + h)} \quad (11)$$

[0027] 环状气路中气体克努增系数计算公式如下:

$$[0028] \quad K_{n1} = \frac{2\bar{\lambda}_1}{R_3 - R_2} \quad (12)$$

[0029] 其中: K_{n1} 为环状气路气体克努增系数; $\bar{\lambda}_1$ 为环状气路中气体平均自由程,单位为m;

[0030] 同种气体下气体的平均自由程 $\bar{\lambda}$ 满足如下公式:

$$[0031] \quad \bar{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2}n\sigma} \quad (13)$$

[0032] 其中, σ 为气体碰撞截面, 单位为 m^2 ; n 为气体密度, 单位为 $\text{个}/\text{m}^3$;

[0033] 环状气路中气体的密度满足如下公式:

$$[0034] \quad n_1 = \frac{q_m}{\bar{v}(R_3 - R_2)hm} \quad (14)$$

[0035] 其中, n_1 为气体密度, 单位为 $\text{个}/\text{m}^3$; \bar{v} 为气体的平均热运动速度, 单位为 m/s ; m 为气体分子质量, 单位为 kg ;

[0036] 环状气路中压强与气体密度的关系为:

$$[0037] \quad P_1 = n_1 k T \quad (15)$$

[0038] 式中, P_1 为气体压强, 单位为 Pa ; k 为玻尔兹曼常数, 单位为 J/K ; T 为气体温度, 单位为 K ;

[0039] 根据霍尔推力器放电通道内气体电离性能要求, 放电通道入口气体压强为 $100 \sim 1000 \text{Pa}$, 同时, 环状气体中气体需要满足粘滞流状态, 即:

$$[0040] \quad \text{Re}_1 < 1200$$

$$[0041] \quad K_{nl} < \frac{1}{100}$$

$$[0042] \quad 100 < P_1 < 1000 \quad (16)$$

[0043] 结合公式 (8) ~ (16), 确定环状气路内径 R_2 、外径 R_3 和高度 h 的值, 环状气路的上述参数值的设定实现气路中的气体满足粘滞流特性, 从而保证了分级耐压性能的实现。

[0044] 作为本发明的优选技术方案: 气路绝缘结构最大耐压为 V_{\max} 设计, 设阳极高压为 V_d , 工作裕度为 ΔV , 则气路绝缘器最大耐压满足如下关系:

$$[0045] \quad V_{\max} = V_d + \Delta V \quad (1)$$

[0046] 基于电势叠加原理, 通过多级分压实现耐高压参数, 即在单联通气路中, 通过设定 N 级电极, 每级电极可耐压 V_0 , 则总耐压参数 V_1 满足如下关系:

$$[0047] \quad V_1 = N V_0 \quad (2)$$

[0048] 针对氙气工质, 在粘滞流状态下, 当电极为铁材料时, 两极最低耐压值约为 150V , 因此, 环状气路中设置的金属隔网电极的级数 N 满足如下关系:

$$[0049] \quad 150 N \geq V_{\max} \quad (3)$$

[0050] 则最小级数 N_{\min} 为:

$$[0051] \quad N_{\min} = \frac{V_{\max}}{150} \quad (4)$$

[0052] 当 N_{\min} 有余数时, 则 N_{\min} 加 1; 金属隔网设置数量 N 大于等于 N_{\min} ;

[0053] 相邻金属隔网之间需要绝缘处理, 设两金属隔网最小间距为 d , 则金属网格最大数量 N_{\max} 满足如下关系:

$$[0054] \quad N_{\max} = \frac{L}{d} \quad (5)$$

[0055] 其中,L为气体传输路径长度,单位为m;考虑金属网格之间尖端放电以及陶瓷工艺等,最小间距为2mm,环状气路中,气体传输路径满足如下关系:

$$[0056] \quad L = 2\pi\bar{R} \quad (6)$$

[0057] 其中, \bar{R} 为环状气路平均半径,单位为m;根据以上分析可知,金属隔网数量N位于 N_{\min} 和 N_{\max} 之间。

[0058] 作为本发明的优选技术方案:缓冲腔内气体需要为粘滞流状态,由进气管流入的气体具有较强的速度和一定的非均匀性,通过缓冲腔201减缓其流速,并增加气体的均匀性,缓冲腔内部气体雷诺数计算公式如下:

$$[0059] \quad R_1 = \frac{2q_m}{\pi\eta Re_2} \quad (17)$$

[0060] 其中, R_1 为缓冲腔半径,单位为m; q_m 为气体质量流量,单位为mg/s; η 为气体的黏滞系数,单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; Re_2 为缓冲腔气体雷诺数;

[0061] 缓冲腔半径 R_1 与其内部气体克努曾系数关系如下:

$$[0062] \quad R_1 = \frac{\bar{\lambda}_2}{K_{n2}} \quad (18)$$

[0063] 其中, $\bar{\lambda}_2$ 为缓冲腔内气体平均自由程,单位为m; K_{n2} 为缓冲腔气体克努增系数;

[0064] 对于缓冲腔内气体密度与进气管质量流量的关系如下:

$$[0065] \quad n_2 = \frac{q_m}{\bar{v}\pi R_1^2 m} \quad (19)$$

[0066] 其中, n_2 为缓冲腔气体密度,单位为个/ m^3 ;

[0067] 根据粘滞流要求,缓冲腔内气体的雷诺数和克努增系数需要同时满足如下要求:

[0068] $Re_2 < 1200$

$$[0069] \quad K_{n2} < \frac{1}{100} \quad (20)$$

[0070] 结合(17)~(20)公式,进而得到缓冲腔半径 R_1 满足范围:

$$[0071] \quad \frac{q_m}{600\pi\eta} < R_1 < \frac{\sqrt{2}\sigma q_m}{\bar{v}\pi m 100} \quad (21)$$

[0072] 从而得到缓冲腔半径值。

[0073] 本发明的一种霍尔推力器供气管路的气路分压绝缘结构,采用环状气路,延长了气体传输路径,并在环状气路上沿着周向设置金属隔网,从而实现多级分压;分析环状气路

和缓冲腔气体状态与结构尺寸之间关系,得到气体满足粘滞流状态下环状气路的内半径、外半径、高度和缓冲腔半径、高度等关键尺寸的设计准则;通过控制气路绝缘器本体的长径比,提高其结构抗力学性能;根据推力器阳极电压参数,给出气体绝缘器耐压值,并计算出金属隔网数量以及布局方式;结合霍尔推力器导磁底座与气体分配器的空间尺寸,给出气路绝缘器外形尺寸匹配关系,从而将气路绝缘器内置于推力器内部。通过本发明设计的环式分压气体绝缘结构,在满足高耐压基本要求的同时,结构紧凑,抗力学性能增强,解决了现有气路绝缘器轴向分压带来的结构抗力学性能变差的问题;同时将气路绝缘器内置与推力器内部,避免外部环境中的等离子体污染,提高了该气路绝缘器长期工作可靠性。

附图说明

- [0074] 图1是本发明的霍尔推力器环式分压气路绝缘结构轴视图;
[0075] 图2是本发明的霍尔推力器环式分压气路绝缘结构的爆炸图;
[0076] 图3是本发明的霍尔推力器环式分压气路绝缘结构的剖视图;
[0077] 图4是本发明的霍尔推力器环式分压气路绝缘结构的局部示意图;
[0078] 附图中:进气管1;绝缘器本体2;缓冲腔201;环状气路202;底板205;绝缘陶瓷环203;陶瓷盖板204;导流孔205;挡板206;出气孔207;金属隔网208;出气管5。

具体实施方式

[0079] 参照附图和具体实施例对本发明作进一步详细地描述。

[0080] 实施例1

[0081] 图1-图4所示,本发明的一种霍尔推力器环式分压气路绝缘结构,包括进气管1、绝缘器本体2和出气管5,所述绝缘器本体2包括缓冲腔201、环状气路202和金属隔网208,所述绝缘器本体2在连通进气管1的内腔设置圆柱形缓冲腔201,圆柱形的缓冲腔201连通外侧环状气路202,环状气路呈圆环状,环状气路202上间隔设置若干金属隔网208,气体通过进气管1进入缓冲腔201扰匀降速后,通入环状气路202,经过间隔设置的若干金属隔网208分压,通过出气管5通出,在气体流通过程中,若干金属隔网208复用为金属电极。金属格网不仅通气,还充作分压电极。

[0082] 本发明的一种霍尔推力器环式分压气路绝缘结构,相比现有气路绝缘器轴向气路结构,将气路设计成圆环状结构,可显著延长气体传输路径,同时有效控制气路绝缘器长径比,提高气路绝缘器的抗力学性能;在环状气路内均匀设置一系列金属隔网作为分级电极,且每两个电极间都低于最低击穿电压,根据多级分压原理,各电极间的电压之和等于总耐压值。通过控制金属隔网数量,从而实现不同耐压需求。为了更好的实现耐压性能,在环状气路之前设计一个缓冲腔结构,减低气体的流速并实现气体匀化从而提高耐压可靠性,缓冲腔与环状气路为同心圆布局,呈圆盘状,结构紧凑。本发明的霍尔推力器环式分压气路绝缘结构在满足耐压需求的同时,提高了结构抗力学性能,解决了现有气路绝缘器轴向分压引发轴向结构增长而带来的抗力学性能变差问题。

[0083] 所述绝缘器本体2包括绝缘陶瓷环203和陶瓷盖板204,绝缘陶瓷环203包括中心内置的圆柱形缓冲腔201和外置的环状气路202,缓冲腔201和环状气路202为同心布局,且具有相同高度;缓冲腔201通过导流孔205与环状气路202前端相连;环状气路202为被陶瓷隔

板分开的非闭合环形通道,在环状气路上等间距设置多级金属隔网208,在环状气路末端的底部设置有出气孔207,通过出气孔207与出气管3相连;所述陶瓷盖板201为圆形盖板,中心设置有圆孔,通过该圆孔与进气管路1连接,陶瓷盖板204与绝缘陶瓷环203具有相同的外径。

[0084] 绝缘陶瓷环203在环状气路202与缓冲腔201的壁间设置导流孔205,导流孔205连通的环状气路202的一侧设置挡板206,挡板206在另一侧设置出气孔207,出气孔207连接出气管5,气体通过导流孔205通入环状气路202后从出气孔207通出,形成单向流通通道。挡板206选用陶瓷材质。

[0085] 本发明中,缓冲腔201设置在环状气路202中部,环状气路202为圆环状,环状气路202利用环状路径延长了分压所需气路的长度,工质气体进入缓冲腔201后,受益于圆柱形结构以及侧壁面导流孔布局,达到更好的扰匀和减速效果,使得进入环状气路202分压的工质气体进入的流速更为平稳、气质更均匀,提升了气路分压的稳定性。本发明中,所述陶瓷盖板204、绝缘陶瓷环203的材质为A95氧化铝陶瓷材料;陶瓷盖板204中心设置有圆孔,通过该圆孔与进气管1连接,其中陶瓷盖板204与进气管1采用钎焊密封;陶瓷盖板204与绝缘陶瓷环203具有相同的外径,通过高温陶瓷胶进行密封。

[0086] 本发明中,环状气路202的环状设计及其与环内缓冲腔201同心设计,为进气管1及其进气口的圆孔在进气方向与侧壁的导流孔205垂直设置提供了实现条件,进气管1及其进气口的圆孔在进气方向与侧壁的导流孔205垂直设置为扰流提供了弯折气路路径,延长混扰路径,降低进气管1的工质气体流速,同时提升混扰效果。尤其是,缓冲腔201设置在环状气路202内壁,在整体结构包络不变的情况下,分隔出缓冲腔和环状气路两个功能区。

[0087] 本发明中的一种霍尔推力器用的环式分压气路绝缘结构,工质气体从进气管1进入绝缘器本体2,首先在缓冲腔201中实现减速匀化,接着通过导流孔205进入环状气路202前端,沿着周向依次经过等间隔设置的多级金属隔网208分压,在环状气路末端碰到挡板被阻断,最后从出气管3流出,形成单向流通;改变了现有技术中利用轴向方向上的长度分压的模式,在环状气路上进行分压,利用陶瓷绝缘环呈圆形环状或螺形的圆盘式形状贴合霍尔推力器底部圆形腔室设计,整体结构包络小,无需额外设置复杂的安装支架即可内置于导磁底座内,适用于微小结构霍尔推力器内部安装,彻底避免外部环境中的等离子体污染,解决了因长期工作外部陶瓷表面污染而导致击穿的风险。

[0088] 所述霍尔推力器环式分压气路绝缘结构中金属隔网208的数量与本发明的环式分压气路绝缘结构耐压参数和相邻电极的最低耐压值相关,具体的关系如下:

[0089] 本发明的气路绝缘结构最大耐压为 V_{\max} 设计,设阳极高压为 V_d ,工作裕度为 ΔV ,则气路绝缘器最大耐压满足如下关系:

$$[0090] \quad V_{\max} = V_d + \Delta V \quad (1)$$

[0091] 基于电势叠加原理,通过多级分压实现耐高压参数。即在单联通气路中,通过设定N级电极,每级电极可耐压 V_0 ,则总耐压参数 V_1 满足如下关系:

$$[0092] \quad V_1 = NV_0 \quad (2)$$

[0093] 针对氙气工质,在粘滞流状态下,当电极为铁材料时,两极最低耐压值约为150V,因此,环状气路中设置的金属隔网电极的级数N满足如下关系:

$$[0094] \quad 150N \geq V_{\max} \quad (3)$$

[0095] 则最小级数 N_{\min} 为:

$$[0096] \quad N_{\min} = \frac{V_{\max}}{150} \quad (4)$$

[0097] 当 N_{\min} 有余数时,则 N_{\min} 加1;金属隔网设置数量 N 大于等于 N_{\min} ;

[0098] 相邻金属隔网之间需要绝缘处理,设两金属隔网最小间距为 d ,则金属网格最大数量 N_{\max} 满足如下关系:

$$[0099] \quad N_{\max} = \frac{L}{d} \quad (5)$$

[0100] 其中, L 为气体传输路径长度,单位为 m ;考虑金属网格之间尖端放电以及陶瓷工艺等,一般最小间距为 $2mm$ 。环状气路中,气体传输路径满足如下关系:

$$[0101] \quad L = 2\pi\bar{R} \quad (6)$$

[0102] 其中, \bar{R} 为环状气路平均半径,单位为 m ;根据以上分析可知,金属隔网数量 N 位于 N_{\min} 和 N_{\max} 之间。

[0103] 在确定金属隔网数量之后,将这些金属隔网在环状气路中沿径向方向上等夹角设置,每两个金属隔网之间的夹角 θ 满足如下公式:

$$[0104] \quad \theta = \frac{2\pi}{N} \quad (7)$$

[0105] 本发明中,为了保证环状气路中气体为粘滞流,从而保证金属隔网电极的耐压性能,需要对环状气路结构尺寸进行合理设计。环状气路中气体雷诺数 Re_1 计算公式如下:

$$[0106] \quad Re_1 = \frac{q_m D}{A \eta} \quad (8)$$

[0107] 其中, q_m 为气体质量流量,单位为 mg/s ; D 为环状气路的当量直径,单位为 m , A 为环状气路的横截面积,单位为 m^2 , η 为气体的黏滞系数,单位为 $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$;

[0108] 环状气路当量直径 D 满足如下关系:

$$[0109] \quad D = \frac{2(R_3 - R_2) h}{R_3 - R_2 + h} \quad (9)$$

[0110] 其中, R_2 为环状气路内径,单位为 m ; R_3 为外径,单位为 m ; h 为高度,单位为 m ;

[0111] 环状气路的横截面积 A 满足如下关系:

$$[0112] \quad A = (R_3 - R_2) h \quad (10)$$

[0113] 将公式(9)和公式(10)带入公式(8),进一步得到环状气路中气体雷诺数的计算公式如下:

$$[0114] \quad Re_1 = \frac{2q_m}{\eta(R_3 - R_2 + h)} \quad (11)$$

[0115] 环状气路中气体克努增系数计算公式如下:

$$[0116] \quad K_{n1} = \frac{2\bar{\lambda}_1}{R_3 - R_2} \quad (12)$$

[0117] 其中： K_{n1} 为环状气路气体克努增系数； $\bar{\lambda}_1$ 为环状气路中气体平均自由程，单位为m；

[0118] 同种气体下气体的平均自由程 $\bar{\lambda}$ 满足如下公式：

$$[0119] \quad \bar{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2}n\sigma} \quad (13)$$

[0120] 其中， σ 为气体碰撞截面，单位为 m^2 ； n 为气体密度，单位为个/ m^3 ；

[0121] 环状气路中气体的密度满足如下公式：

$$[0122] \quad n_1 = \frac{q_m}{\bar{v}(R_3 - R_2)hm} \quad (14)$$

[0123] 其中， n_1 为气体密度，单位为个/ m^3 ； \bar{v} 为气体的平均热运动速度，单位为m/s； m 为气体分子质量，单位为kg；

[0124] 环状气路中压强与气体密度的关系为：

$$[0125] \quad P_1 = n_1 k T \quad (15)$$

[0126] 式中， P_1 为气体压强，单位为Pa； k 为玻尔兹曼常数，单位为J/K； T 为气体温度，单位为K；

[0127] 根据霍尔推力器放电通道内气体电离性能要求，放电通道入口气体压强为100~1000Pa，同时，环状气体中气体需要满足粘滞流状态，即：

$$[0128] \quad Re_1 < 1200$$

$$[0129] \quad K_{n1} < \frac{1}{100}$$

$$[0130] \quad 100 < P_1 < 1000 \quad (16)$$

[0131] 结合公式(8)~(16)，确定环状气路内径 R_2 、外径 R_3 和高度 h 的值。通过对这些尺寸的控制，使得环状气路中的气体满足粘滞流特性，从而保证了分级耐压性能的实现。

[0132] 同理，需要对缓冲腔尺寸进行合理设计，缓冲腔内气体需要为粘滞流状态。由进气管1流入的气体具有较强的速度和一定的非均匀性，通过缓冲腔201减缓其流速，并增加气体的均匀性，有助于提高气路绝缘器的耐压性能。

[0133] 缓冲腔内部气体雷诺数计算公式如下：

$$[0134] \quad Re_1 = \frac{2q_m}{\pi\eta Re_2} \quad (17)$$

[0135] 其中， R_1 为缓冲腔半径，单位为m； q_m 为气体质量流量，单位为mg/s； η 为气体的黏滞系数，单位为 $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ ； Re_2 为缓冲腔气体雷诺数；

[0136] 缓冲腔半径 R_1 与其内部气体克努增系数关系如下：

$$[0137] \quad R_1 = \frac{\bar{\lambda}_2}{K_{n2}} \quad (18)$$

[0138] 其中, $\bar{\lambda}_2$ 为缓冲腔内气体平均自由程, 单位为m; K_{n2} 为缓冲腔气体克努增系数;

[0139] 对于缓冲腔内气体密度与进气管质量流量的关系如下:

$$[0140] \quad n_2 = \frac{q_m}{\bar{v} \pi R_1^2 m} \quad (19)$$

[0141] 其中, n_2 为缓冲腔气体密度, 单位为个/m³;

[0142] 根据粘滞流要求, 缓冲腔内气体的雷诺数和克努增系数需要同时满足如下要求:

[0143] $Re_2 < 1200$

$$[0144] \quad K_{n2} < \frac{1}{100} \quad (20)$$

[0145] 结合(17)~(20)公式, 进而得到缓冲腔半径 R_1 满足范围:

$$[0146] \quad \frac{q_m}{600\pi\eta} < R_1 < \frac{\sqrt{2}\alpha q_m}{\bar{v} \pi m 100} \quad (21)$$

[0147] 从而得到缓冲腔半径值。

[0148] 为了避免气路绝缘器长期工作中外壁面陶瓷污染导致结构绝缘失效而发生电导通, 可将气路绝缘器布置在霍尔推力器内部, 即将气路绝缘器安置在气体分配器和底座之间, 由于推力器内部没有等离子体环境, 绝缘体外面无需设计屏蔽罩, 减小了气路绝缘器的整体结构尺寸。

[0149] 本发明的霍尔推力器供气管路的气路分压绝缘方法的环状气路分压绝缘结构, 应用安装在霍尔推力器导磁底座内。

[0150] 所述气路分压绝缘结构的绝缘器本体外径满足如下关系:

$$[0151] \quad R_3 + 0.5 < R_4 < \frac{R_m}{2} - 0.5 \quad (22)$$

[0152] 其中, R_3 为环状气路外径, 单位为m; R_4 为绝缘器本体外径, 单位为m; R_{in} 为导磁底座内径, 单位为m;

[0153] 所述气路分压绝缘结构高度满足如下关系:

$$[0154] \quad \begin{aligned} H &= H_1 - L_1 - L_2 \\ H &= h + 1 \end{aligned} \quad (23)$$

[0155] 其中, H 为气路绝缘器本体结构高度, 单位为m; H_1 为阳极与导磁底座之间高度, 单位为m; L_1 为进气管长度, 单位为m; L_2 为出气管长度, 单位为m。

[0156] 陶瓷盖板2与绝缘陶瓷环203具有相同的外径, 通过高温陶瓷胶进行密封。

[0157] 所述绝缘陶瓷环203在环状气路内设置有卡槽插装金属隔网208;所述金属隔网208选用不锈钢材质。

[0158] 本发明的霍尔推力器环式分压气路绝缘结构,利用陶瓷绝缘环的环数增加来延长气路,增加金属隔网而提高分级电极数量,显著提高耐电压能力,扩展能力强;同时通过控制结构的长径比而提高抗力学性能,具有重要的实用价值和应用前景。本发明的霍尔推力器环式分压气路绝缘结构,改变了现有技术中轴向方向的拉长提升耐电压能力,整体包络小,适于安装在霍尔推力器内部,就此无需另行配设分压气路绝缘结构的保护罩即可从根本上避免外部环境的等离子体污染

[0159] 以国内200W霍尔推力器为例,阳极电压 V_d 为800V,工作裕度 ΔV 为400V,则最大耐压为 V_{max} 为1200V;根据公式(4),计算出最小电极级数 N_{min} 为8,根据公式(7),两个金属隔网之间相隔 θ 为 45° 。

[0160] 本发明应用的推力器工作时,阳极流量 q_m 调节范围为8~10sccm,对于 20°C 的氙气流,黏滞系数为 $2.1 \times 10^{-5} \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,气体碰撞截面 σ 约为 $1.96 \times 10^{-19} \text{m}^2$,平均热运动速度280m/s,氙气分子质量 2.1810^{-25}kg 。

[0161] 结合公式(8)~(16),环状气路关键尺寸如下: R_2 为2.5mm, R_3 为5.0mm, h 为3mm。此时环状气路内气体雷诺数 Re 约为15.6,克努增系数为0.0029,满足粘滞流要求。

[0162] 结合公式(17)~(20),缓冲腔半径 R_1 为2.0mm,克努增系数为0.0037,实现粘滞流要求。

[0163] 国内200W霍尔推力器导磁底座内径 R_{in} 约为21mm,阳极与导磁底座之间高 H_1 为12mm,根据公式(22)~(23)。本发明的霍尔推力器供气管路的环式分压气路绝缘结构外部尺寸如下: R_4 为6mm, H 为5mm, L_1 为3.5mm, L_2 为3.5mm,安装在霍尔推力器导磁底座内,实现彻底解决陶瓷气路外表面污染导致结构绝缘失效问题。

[0164] 针对200W霍尔推力器供气管路的环式分压气路绝缘结构,并将该气路绝缘结构在真空环境下进行耐压实验测试,结果如表1所示的电气绝缘结构击穿电压测试。实验结果表明:真空度 1.0×10^{-3} 下,阳极流量在1.0~12.0sccm范围变化时,气路绝缘结构耐压值均超过1200V,满足气路分压绝缘目的,符合霍尔推力器环式分压气路绝缘设计目的。

[0165] 表1

[0166]

序号	阳极流量 (sccm)	耐压值 (V)	真空度 (Pa)	工作时间 (min)	是否击穿
1	1.0	1200	1.0×10^{-3}	10	否
2	2.0	1200	1.0×10^{-3}	10	否
3	3.0	1200	1.0×10^{-3}	10	否
4	4.0	1200	1.0×10^{-3}	10	否
5	5.0	1200	1.0×10^{-3}	10	否
6	6.0	1200	1.0×10^{-3}	10	否
7	7.0	1200	1.0×10^{-3}	10	否
8	8.0	1200	1.0×10^{-3}	10	否
9	9.0	1200	1.0×10^{-3}	10	否
10	10.0	1200	1.0×10^{-3}	10	否
11	11.0	1200	1.0×10^{-3}	10	否
12	12.0	1200	1.0×10^{-3}	10	否

[0167] 现有气路绝缘器为轴向分压结构,其基本原理是通过轴向方向上多级分压来提高耐压值,当耐压值较高时候,对应分级级数较大,导致轴向结构过长,抗力学性能变差;;同时轴向距离过长,受空间限制而无法安装在霍尔推力器内部,外部安装时需要设计保护罩,外形轮廓大,且长期工作下,陶瓷外壁污染仍存在击穿风险。

[0168] 本发明的气路绝缘器结构,将轴向分压结构改为环向分压结构,延长气体传输路径,通过设置不同数量金属网格,满足耐电压性能要求;同时控制长径比,提高气路绝缘器抗力学性能;设计缓冲腔匀化气路并降低气路流速,提高耐压可靠性;缓冲腔与环式气路同心圆布局,结构紧凑,轴向距离短且整体包络小,内置于推力器内部,不受等离子体轰击,有效解决外部陶瓷污染问题。例如,上述实例中,气路绝缘器本体外径为6mm,高为5mm,长径比为5:6,在耐压性能提升的同时,具有较好的抗力学性。

[0169] 上述具体实施方式用来解释说明本发明,仅为本发明的优选实施例,而不是对本发明进行限制,在本发明的精神和权利要求的保护范围内,对本发明做出的任何修改、等同替换、改进等,都落入本发明的保护范围。

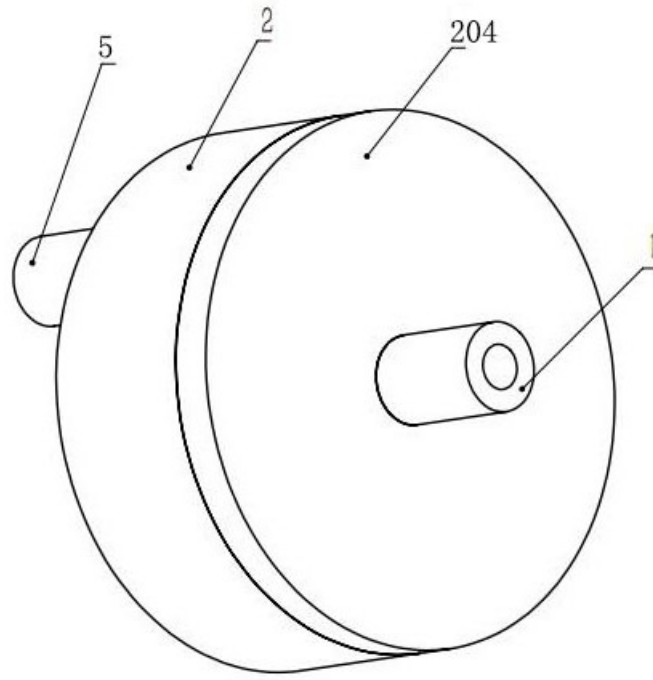


图1

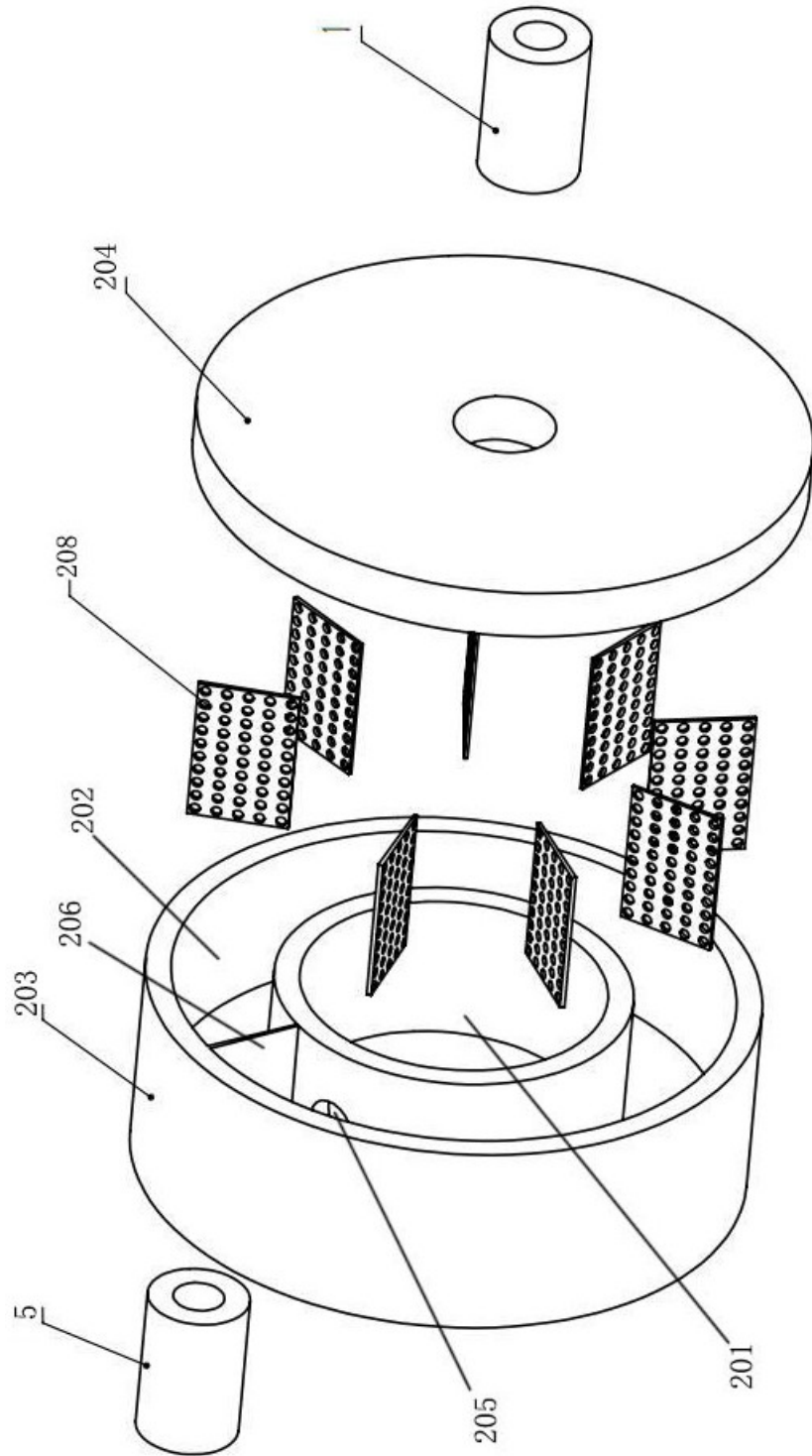


图2

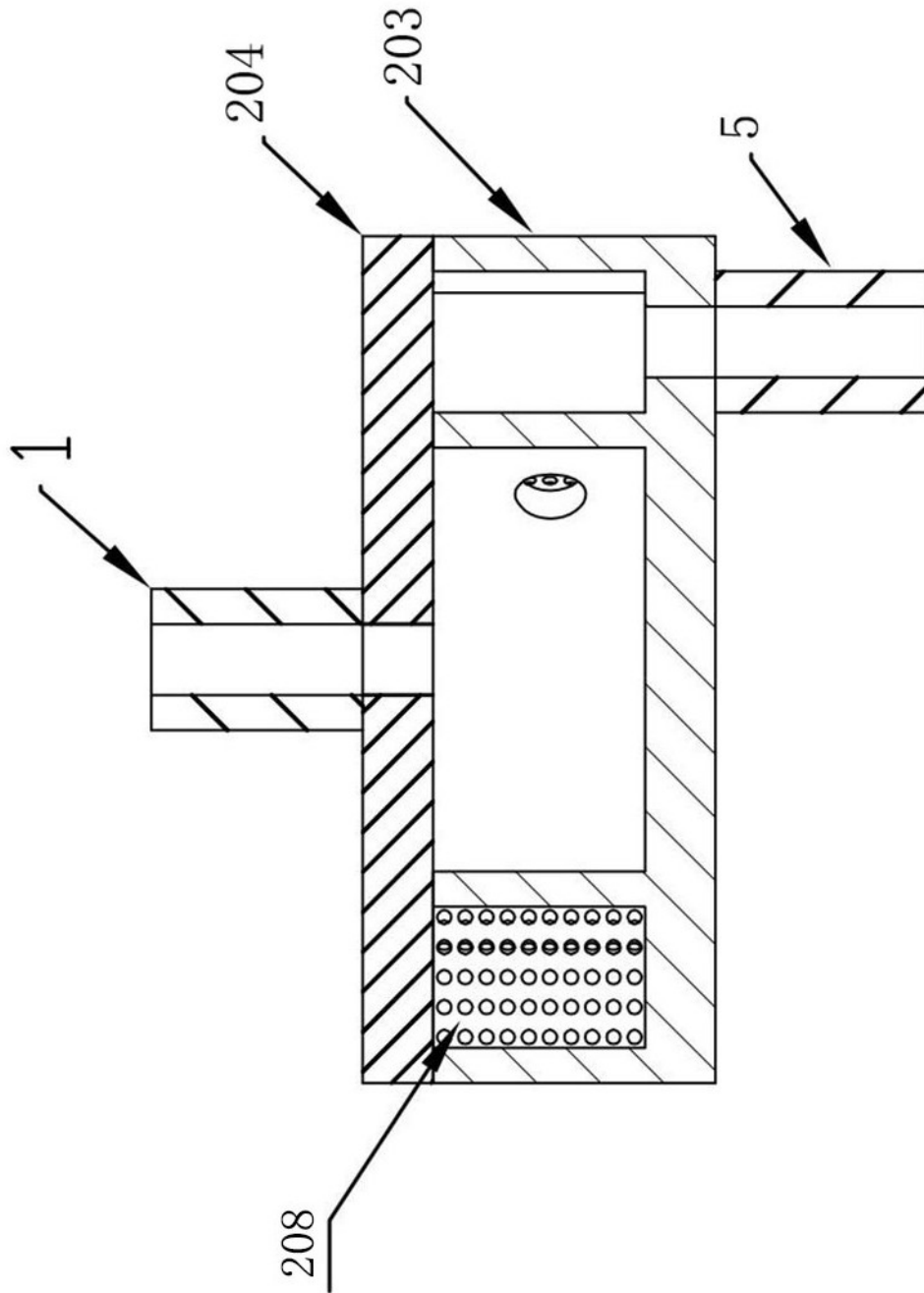


图3

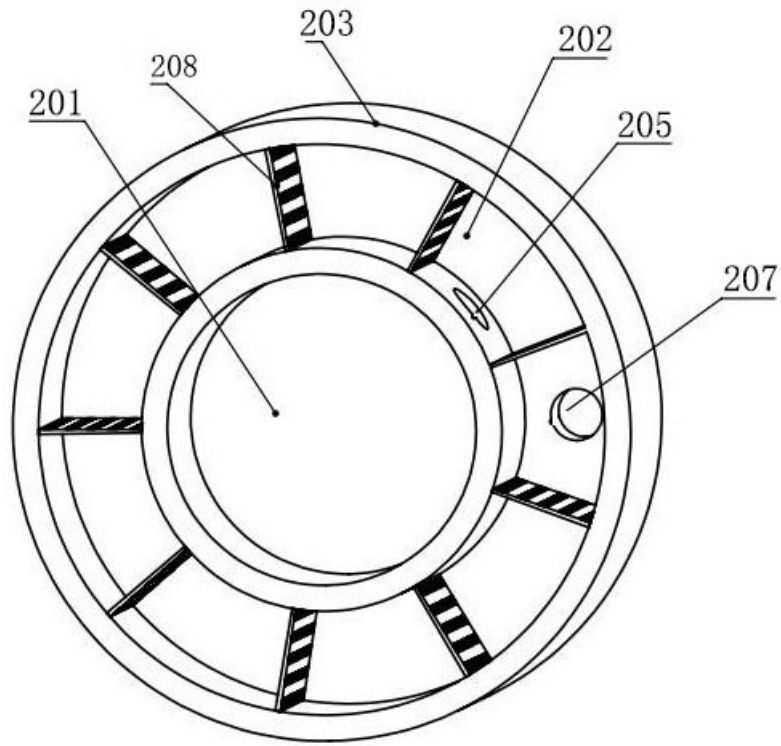


图4