

[19] 中华人民共和国国家知识产权局



## [12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200710078493.0

[43] 公开日 2007 年 10 月 24 日

[51] Int. Cl.  
G01N 30/02 (2006.01)  
G01N 1/28 (2006.01)

[11] 公开号 CN 101059485A

[22] 申请日 2007.5.23

[21] 申请号 200710078493.0

[71] 申请人 重庆大学

地址 400044 重庆市沙坪坝区沙正街 174 号  
重庆大学科研处

[72] 发明人 唐 炬 张晓星 孙才新 杜 林  
李 剑 万凌云

[74] 专利代理机构 重庆大学专利中心  
代理人 郭吉安

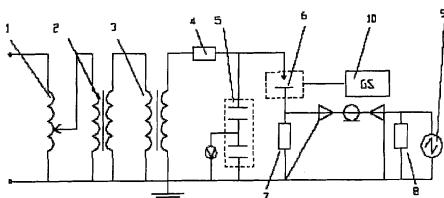
权利要求书 2 页 说明书 9 页 附图 2 页

### [54] 发明名称

六氟化硫放电分解气体组分分析系统及其使  
用方法

### [57] 摘要

一种六氟化硫放电分解气体组分分析系统，由调压器控制台 1、隔离变压器 2、无晕实验变压器 3、无局放保护电阻 4、电容分压器 5、六氟化硫放电分解装置 6、无感检测阻抗 7、匹配阻抗 8、示波器 9、和气相色谱仪 10 构成；系统的使用方法包括如下步骤：1) 用真空泵 18 对六氟化硫放电分解装置 6 抽真空；2) 通过进气针阀 17 对六氟化硫放电分解装置 6 冲入 SF<sub>6</sub> 气体；3) 测量最大外施实验电压和起始 PD 电压；4) 产生不同电极下的 PD；5) 采气；6) 气体组分分析；7) 采集 PD 脉冲信号波形，并进行故障诊断和模式识别。该发明可广泛用于科研、教学、研究院所和设备制造厂家，用于对 GIS 设备 PD 在线状态检测的理论分析和应用研究。



1、一种六氟化硫放电分解气体组分分析系统，由调压器控制台（1）、隔离变压器（2）、无晕实验变压器（3）、无局放保护电阻（4）、电容分压器（5）、六氟化硫放电分解装置（6）、无感检测阻抗（7）、匹配阻抗（8）、高速数字存储示波器（9）和气相色谱仪（10）构成；其特征是：六氟化硫放电分解装置（6）由检测阻抗接口（11）、接地金属杆（12）、三角支撑架（13）、低压端导电杆（14）、缸体（15）、SF<sub>6</sub>气瓶（16）、进气针阀（17）、真空泵（18）、真空泵球阀（19）、真空表针阀（20）、压力表针阀（21）、真空表（22）、压力表（23）、法兰（24）、O型密封圈（25）、螺杆螺帽（26）、椭圆封头（27）、高压套管固定槽（28）、聚四氟乙烯套筒（29）、高压端导电棒（30）、椭圆形均压帽（31）、采样阀（32）、蝶阀（33）、气敏传感器接管（34）、气敏传感器接口法兰（35）、高压电极插口（36）、高压电极（37）、低压电极（38）、低压电极插口（39）、石英观察窗口（40）组成；缸体（15）、椭圆封头（27）之间通过法兰（24）、螺杆螺帽（26）配合O型密封圈（25）压紧密封，形成椭圆形缸体结构，椭圆形缸体结构中心所在水平面上开有观察放电现象用的对称的石英观察窗口（40）；外施实验电压通过高压端导电棒（30）和椭圆形均压帽（31）加到高压电极插口（36）和高压电极（37），形成一个高电位的导体；低压电极（38）通过螺纹与低压电极插口（39）连接，然后接地或通过无感检测阻抗（7）接地；高压电极（37）与低压电极（38）处于六氟化硫放电分解装置（6）正中；SF<sub>6</sub>气体通过进气针阀（17）进入由缸体（15）和椭圆封头（27）形成的腔体，气压范围为0.2~0.5MPa；采样阀（32）通过气管与气相色谱仪（10）进气口连接；检测阻抗接口（11）与无感检测阻抗（7）连接，再通过信号电缆与匹配阻抗（8）和高速数字存储示波器（9）连接。

2、根据权利要求1所述的六氟化硫放电分解气体组分分析系统的使用方法，其

特征是该方法包括如下步骤：

- 1) 抽真空：关闭压力表针阀(21)，打开真空表针阀(20)，打开真空泵球阀(19)，用真空泵(18)对六氟化硫放电分解装置(6)抽真空，静置12小时再观察真空表(22)示数，检验其密封性能；
- 2) 充气：在通过密封性能检验后，打开SF<sub>6</sub>气瓶(16)和进气针阀(17)对六氟化硫放电分解装置(6)充入SF<sub>6</sub>气体，待真空表(22)示数为0时，关闭真空表针阀(20)，打开压力表针阀(21)，继续充气使气压达到实验所需气压，静置12小时再观察压力表示数，检验其耐压性能；
- 3) 测量起始PD电压：调节调压器控制台(1)，缓慢升高实验电压，仔细观察高速数字存储示波器(9)上的波形，当出现放电脉冲时，记录下此时电压，记为U<sub>st</sub>，该电压为实验的起始放电电压；
- 4) 产生局部放电：施加起始PD电压U<sub>st</sub>的1.2~1.5倍电压，使六氟化硫放电分解装置(6)在不同电极下产生PD；
- 5) 采气：待放电达到足够时间(24~120小时)后，微微打开采样阀(32)，让气体缓缓进入采样袋，待采样袋微微鼓起后即关闭采样阀(32)停止采气；
- 6) 组分分析：用气相色谱仪(10)进行分解气体组分分析，对分解气体组分含量与稳定性、不同电极的放电剧烈程度、能量分布以及脉冲频率与气体组分的关联比对等进行分析判断；
- 7) 放电脉冲信号采集：用高速数字存储示波器(9)采集PD引起检测阻抗(7)两端产生的电压脉冲信号波形，结合气相色谱仪(10)的分析结果，对PD信号反映的放电类型和特征进行故障诊断和模式识别。

## 六氟化硫放电分解气体组分分析系统及其使用方法

### 技术领域

本发明涉及六氟化硫(SF<sub>6</sub>)气体放电分解、局部放电实验和气体组分检测，特别涉及一种六氟化硫放电分解组分分析系统及其使用方法。

### 背景技术

GIS采用SF<sub>6</sub>作为气体绝缘介质，具有绝缘强度高、运行稳定、占地面积少和维护工作量小等优点，在大中城市城网建设和改造中得到广泛应用。但是从近年的运行情况看，国内外的GIS在使用中都出现了许多问题，其中以绝缘故障为主。绝缘故障最初一般表现为时断时续的局部放电(PD)，而PD又会引起SF<sub>6</sub>气体分解。对SF<sub>6</sub>分解气体的检测已经有相应的国家标准和国际标准，但还缺乏对绝缘缺陷类型定量比对的分析与判断。根据GB/T8905-1996，对六氟化硫电气设备中气体的检测项目主要有：空气、CF<sub>4</sub>、水、酸度、可水解氟化物和矿物油。根据IEC 60480-2004，对六氟化硫电气设备中气体的检测分为两种情况。一种情况是为了确认六氟化硫是否需要进行回收处理进行的现场检测，检测项目主要有：SOF<sub>2</sub> + SO<sub>2</sub> (<12ppmv)，HF (<25ppmv)，空气，CF<sub>4</sub>，水和矿物油；另一种情况是为了定量的检测气体中各种杂质的含量，检测项目主要有：空气、CF<sub>4</sub>、HF、矿物油、SF<sub>4</sub>、SOF<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>。以上检测最常用的方法是气相色谱法。

对GIS内部SF<sub>6</sub>放电分解气体的检测能够提供GIS内部酸性气体杂质含量数据，保证GIS内部绝缘和金属不受到过量腐蚀。放电分解气体的检测还能够及时准确反映出GIS内部放电的总体情况，从而为及时发现故障，判断故障提供依据。但是，对GIS内部SF<sub>6</sub>放电分解气体的检测与分析的研究尚处于起步阶段。一方面，实际运行的GIS中吸附剂和干燥剂的使用、分解气体在气室的扩散效应以及

气体采样位置的随意性都对准确确定分解气体组分浓度产生不利影响；另一方面，SF<sub>6</sub>放电分解气体成分复杂，其中有不少气体组分很不稳定，使得对SF<sub>6</sub>放电分解气体的定性和定量变得非常困难。因此，为了完善IEC和GB标准对绝缘缺陷类型定量比对的分析与判断，有效的办法和手段是在实验室建立产生PD使SF<sub>6</sub>气体产生分解的模拟实验装置，以便进行有关基础理论和应用基础的研究。

## 发明内容

本发明的目的是提供的一种六氟化硫放电分解气体组分分析系统及其使用方法，利用该系统及其使用方法可在实验室内模拟GIS设备内部局部放电，并获得反映局部放电情况的气体组分及放电波形实验数据，实现对SF<sub>6</sub>放电分解气体组分分析研究，并为GIS绝缘缺陷的模式识别奠定实验研究基础。

本发明所涉及的六氟化硫放电分解气体组分分析系统，由调压器控制台1、隔离变压器2、无晕实验变压器3、无局放保护电阻4、电容分压器5、六氟化硫放电分解装置6、无感检测阻抗7、匹配阻抗8、高速数字存储示波器9和气相色谱仪10构成；六氟化硫放电分解装置6由检测阻抗接口11、接地金属杆12、三角支撑架13、低压端导电杆14、缸体15、SF<sub>6</sub>气瓶16、进气针阀17、真空泵18、真空泵球阀19、真空表针阀20、压力表针阀21、真空表22、压力表23、法兰24、O型密封圈25、螺杆螺帽26、椭圆封头27、高压套管固定槽28、聚四氟乙烯套筒29、高压端导电棒30、椭圆形均压帽31、采样阀32、蝶阀33、气敏传感器接管34、气敏传感器接口法兰35、高压电极插口36、高压电极37、低压电极38、低压电极插口39、石英观察窗口40组成；缸体15、椭圆封头27之间通过法兰24、螺杆螺帽26配合O型密封圈25压紧密封，形成椭圆形缸体结构，椭圆形缸体结构中心所在水平面上开有观察放电现象用的对称的石英观察窗口40；外施实验电压通过高压端导电棒30和椭圆形均压帽31加到高压电极插口36和高压电极37，

形成一个高电位的导体；低压电极38通过螺纹与低压电极插口39连接，然后接地或通过无感检测阻抗7接地；高压电极37与低压电极38处于六氟化硫放电分解装置6正中；SF<sub>6</sub>气体通过进气针阀17进入由缸体15和椭圆封头27形成的腔体，气压范围为0.2~0.5MPa；检测阻抗接口11与无感检测阻抗7连接，再通过信号电缆与匹配阻抗8和高速数字存储示波器9连接。

所述的六氟化硫放电分解气体组分分析系统的使用方法包括如下步骤：

- 1) 抽真空：关闭压力表针阀21，打开真空表针阀20，打开真空泵球阀19，用真空泵18对六氟化硫放电分解装置6抽真空，静置12小时再观察真空表22示数，检验其密封性能；
- 2) 充气：在通过密封性能检验后，打开SF<sub>6</sub>气瓶16和进气针阀17对六氟化硫放电分解装置6充入SF<sub>6</sub>气体，待真空表22示数为0时，关闭真空表针阀20，打开压力表针阀21，继续充气使气压达到实验所需气压，静置12小时再观察压力表示数，检验其耐压性能；
- 3) 测量起始PD电压：调节调压器控制台1，缓慢升高实验电压，仔细观察高速数字存储示波器9上的波形，当出现放电脉冲时，记录下此时电压，记为U<sub>st</sub>，该电压为实验的起始放电电压；
- 4) 产生局部放电：施加起始PD电压U<sub>st</sub>的1.2~1.5倍电压，使六氟化硫放电分解装置6在不同电极下产生PD；
- 5) 采气：待放电达到足够时间（24~120小时）后，微微打开采样阀32，让气体缓缓进入采样袋，待采样袋微微鼓起后即关闭采样阀32停止采气；
- 6) 组分分析：用气相色谱仪10进行分解气体组分分析，对分解气体组分含量与稳定性、不同电极的放电剧烈程度、能量分布以及脉冲频率与气体组分的关联比对等进行分析判断；

7) 放电脉冲信号采集: 用高速数字存储示波器9采集PD引起检测阻抗7两端产生的电压脉冲信号波形, 结合气相色谱仪10的分析结果, 对PD反映的放电类型和特征进行故障诊断和模式识别。

本发明采用上述技术方案, 设计的六氟化硫放电分解气体组分分析系统密封性能良好, 可以在200小时内保持SF<sub>6</sub>气体压力, 在密封性能和耐压性能方面均表现出良好的适用性; 研制的六氟化硫放电分解装置6可以有效产生局部放电并引起SF<sub>6</sub>分解; 高速紫外成像仪可以透过石英观察窗口40摄取清晰的局部放电图形; 通过测量无感检测阻抗7上电压可以有效地检测出局部放电脉冲波形和相位; 选择的气体采集工具和设计的采集方法可以保证采集气样的有效性; 通过气相色谱仪10可以检测出ppmv级的SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>、SOF<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>等各种SF<sub>6</sub>放电分解气体产物及Air、CF<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>O等气体杂质。该发明可广泛用于科研、教学、研究院所和设备制造厂家, 用于对GIS设备PD在线状态检测的理论分析和应用研究。

#### 附图说明

图1为六氟化硫放电分解气体组分分析系统分解气体组分及PD信号检测系统组成原理图;

图2为六氟化硫放电分解装置6结构示意图。

图3为六氟化硫放电分解装置6横截面图。在图3中, (40) 为石英观察窗口。

图4为六氟化硫放电分解气体组分分析系统针板电极模型。

图5为六氟化硫放电分解气体组分分析系统针针电极模型。

图6为六氟化硫放电分解气体组分分析系统接线高压屏蔽示意图。

上列图中: 1、调压器控制台 2、隔离变压器 3、无晕实验变压器 4、无局放保护电阻 5、电容分压器 6、六氟化硫放电分解装置 7、无感检测阻抗 8、匹配阻抗 9、高速数字存储示波器 10、气相色谱仪 11、检测阻抗接口 12、

接地金属杆 13、三角支撑架 14、低压端导电杆 15、缸体 16、SF<sub>6</sub>气瓶 17、进气针阀 18、真空泵 19、真空泵球阀 20、真空表针阀 21、压力表针阀 22、真空表 23、压力表 24、法兰 25、O型密封圈 26、螺杆螺帽 27、椭圆封头 28、高压套管固定槽 29、聚四氟乙烯套筒 30、高压端导电棒 31、椭圆形均压帽 32、采样阀 33、蝶阀 34、气敏传感器接管 35、气敏传感器接口法兰 36、高压电极插口 37、高压电极 38、低压电极 39、低压电极插口 40、石英观察窗口

### 具体实施方式

六氟化硫放电分解气体组分分析系统及其使用方法，其PD的检测方法为：调节调压器控制台1，缓慢升高实验电压，首先测量最大外施实验电压和起始PD电压，然后施加起始PD电压U<sub>st</sub>的1.2~1.5倍电压，GIS模拟实验装置会产生PD，PD引起无感检测阻抗7两端产生电压脉冲，电压脉冲通过信号电缆连接到高速数字存儲示波器9，并送至计算机储存，进行PD信号的故障诊断和模式识别；PD激发的分解气体的检测方法为：在做完放电试验10分钟后，微微打开采样阀32，使分解气体通过进入采样袋，待采样袋微微鼓起后，关闭采样阀32，然后用取样针取几毫升样气注入气相色谱仪10进行气体组分分析。具体的实验方法及实验步骤如下：

#### 一、实验方法及实验步骤

本发明设计的六氟化硫放电分解气体组分分析系统可模拟GIS内发生的典型局部放电。以下结合附图对本装置的使用方法做进一步描述。

1、测量最大外施实验电压。在不放置电极模型情况下，接好实验线路，通过进气针阀17向GIS模拟实验装置内注入实验气体SF<sub>6</sub>，使气压达到2-5个大气压，调节调压器控制台1，缓慢升高实验电压，仔细观察高速数字存儲示波器9上有无信号，当出现微小放电脉冲信号时，记录下此时加在模拟实验装置上的外施

电压（即为 $U_{\max}$ ），该电压值为以后实验过程中最高的外施电压，即模拟实验电压不能超过该电压值，否则由实验装置本身产生的局部放电信号会与电极放电引起的PD信号所混淆，导致实验结果不准确，甚至无法识别是否是电极放电引起的PD信号。

2、测量起始PD电压。置入需要检测的电极模型，通过进气针阀17往GIS实验装置内注入所需压力的实验气体，调节调压器控制台1，缓慢升高实验电压，仔细观察高速数字存储示波器9上的波形，当出现放电脉冲时，记录下此时电压，记为 $U_{st}$ ，该电压为实验的起始放电电压。

3、实验数据获取。实验时，施加起始PD电压 $U_{st}$ 的1.2~1.5倍，就能观察到PD信号，通过高速数字存储示波器9记录此时波形。根据实验数据的重复性和稳定性，考虑到放电具有一定的统计规律，可将实验数据按组编号记录。在每放电24小时后进行一次气体样本采集，然后立即进行气体样本组分分析，得出各气体组分的绝对浓度。

## 二、六氟化硫放电分解气体组分分析系统的设计

### 1、高压端导电棒30直径d的计算

缸体15直径为20cm，所加电压的最大有效值为30kV，电场为极不均匀电场。以下单位为cm, kV。

空气中，对稍不均匀场，估算时可以用：起晕电场为30kV/cm。

由空气中的同轴圆柱电极模型电极表面最大场强经验公式：

$$E_{\max} = \frac{U}{r \times \ln(R/r)}$$

其中，R、r分别为外，内圆柱半径。

直径r取1.5cm时，在空气中不会起晕，在SF<sub>6</sub>中也不会（在曲率半径大于4mm时，导体在SF<sub>6</sub>中的起晕电压一般是空气中的2倍以上）。考虑到与电极的配合与

机械强度，故取导电杆直径d取1.5cm。

## 2、聚四氟乙烯套筒29长度的计算

空气中的沿面放电一般取3kV/cm，聚四氟乙烯套筒29表面线长度应大于 $45/3=15\text{cm}$ ，考虑到加工精度以及裕度，缸体15内取18cm，缸体15外取长度为20cm，可以保证在在空气和SF<sub>6</sub>中不会发生沿面放电。

## 3、六氟化硫放电分解装置6厚度计算方法

本发明设计的GIS模拟装置存在充高气压SF<sub>6</sub>气体和充压前抽真空清洗装置两种状态，所以在设计时既要考虑装置耐受内压又要考虑到装置耐受外压。因此必须进行厚度的校验。采用如下的压力容器厚度计算方法：

### (a) 承受内压筒式压力容器壁厚的计算公式

$$S_i = \frac{P \cdot D}{2[\sigma]} + C$$

上式中， $S_i$ ：容器的壁厚(mm)； $P$ ：设计压力(MPa)； $D$ ：中间面直径(mm)； $C$ ：为附加厚度； $[\sigma]$ ：使用材料许用应力式中许用应力 $[\sigma]$ 的取值有以下规定：在常温下，取 $\frac{\sigma_b}{n_b}$ 和 $\frac{\sigma_s}{n_s}$ 中的较小值，且规定 $n_b=4.0$ ， $n_s=2.5(\text{MPa})$ 。

### (b) 承受外压筒式压力容器壁厚的计算公式

$$S_0 = D_3 \sqrt{\frac{P_{cr}}{2.2 \cdot E}}$$

上式中， $S_0$ ：容器的壁厚(mm)； $D$ ：容器的中间面直径(mm)； $P_{cr}$ ：临界压力(N/m<sup>2</sup>)； $E$ ：使用材料的弹性模量(N/m<sup>2</sup>)，对于不锈钢E一般在172-200GPa之间。由材料规格、及性能参数，计算得到采用不锈钢无缝管。实际上，由于局部放电会使模拟装置中短时压力升高，以及SF<sub>6</sub>气体分解物具有一定的腐蚀性，可在计算数值基础上适当加大外壳强度裕度， $S$ 取10mm。同理，经过计算加上强度裕度后，有机玻璃的厚度 $S$ 取8mm。

#### 4、六氟化硫放电分解气体组分分析系统的电极设计

综合考虑到材料的导电性能与经济性，针电极、板电极全部采用黄铜。对板电极，板直径取60mm,厚度为10mm，电极连接杆直径为3mm,长度30mm。由于板与导电杆（直径为15mm）之间对电极连接杆形成屏蔽作用，可以保证电极连接杆不会发生电晕。

对针电极，电极连接杆直径为3mm，长度30mm，针尖部分长度为5mm。

#### 5、六氟化硫放电分解气体组分分析系统气体采集工具选择及方法设计

由于试验气压为2-5个大气压，且分解气体中含有微量剧毒气体，为了确保气体采集时的安全性，特别选用可以调节气体流量的采样阀32，这样可以保证气体缓缓进入采样袋，待采样袋微微鼓起后即关闭采样阀32停止采气。为了保证被采气体的有效性，采气管道应具有足够大的直径并尽量短以使得分解气体能快速扩散到采样阀32处。在进行气体采集后要及时用取样针把采气袋内的气体样本注入气相色谱仪10进行气体组分分析。

#### 6、六氟化硫放电分解气体组分分析系统起晕预防方法

进行GIS的PD检测实验中，高压引线及电极屏蔽都应该是无晕的，高压实验中对高电位及地电位上的尖端部位都要采用适当的屏蔽和均压措施，避免在这些部位上产生放电。

为了减小表面场强，就必须增大表面曲率半径，增大极间或对地的距离，注意电极的表面平整和光滑。高压电极可采用球形或双环形的屏蔽罩，引线须采用大直径的金属管。引线与装置的连接处用直径为60mm的金属球均压。

本发明提供的六氟化硫放电分解气体组分分析系统及其使用方法，可在实验室内部模拟 GIS 内部局部放电，并由气相色谱仪 10 检测出 ppmv 级的 SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>、SOF<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>等各种 SF<sub>6</sub> 放电分解气体产物及 Air、CF<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>O 等气体杂质，还配合

---

使用高速数字存储示波器 9 采集信号波形，结合气相色谱仪 10 的分析结果，对 PD 反映的放电类型和特征进行故障诊断和模式识别，从而找出电极类型、放电能量与 SF<sub>6</sub>分解物类型、含量及产气速率之间的对应关系，对 SF<sub>6</sub>局部放电分解机理进行深入研究。该发明可广泛用于科研、教学、研究院所和设备制造厂家，用于对 GIS 设备 PD 在线状态检测的理论分析和应用研究。

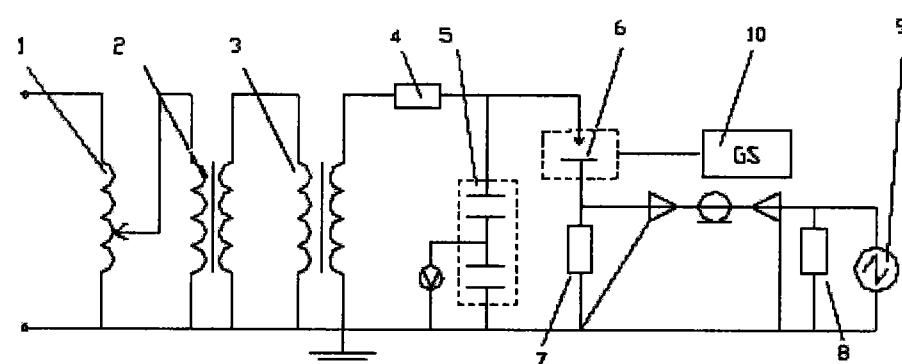


图 1

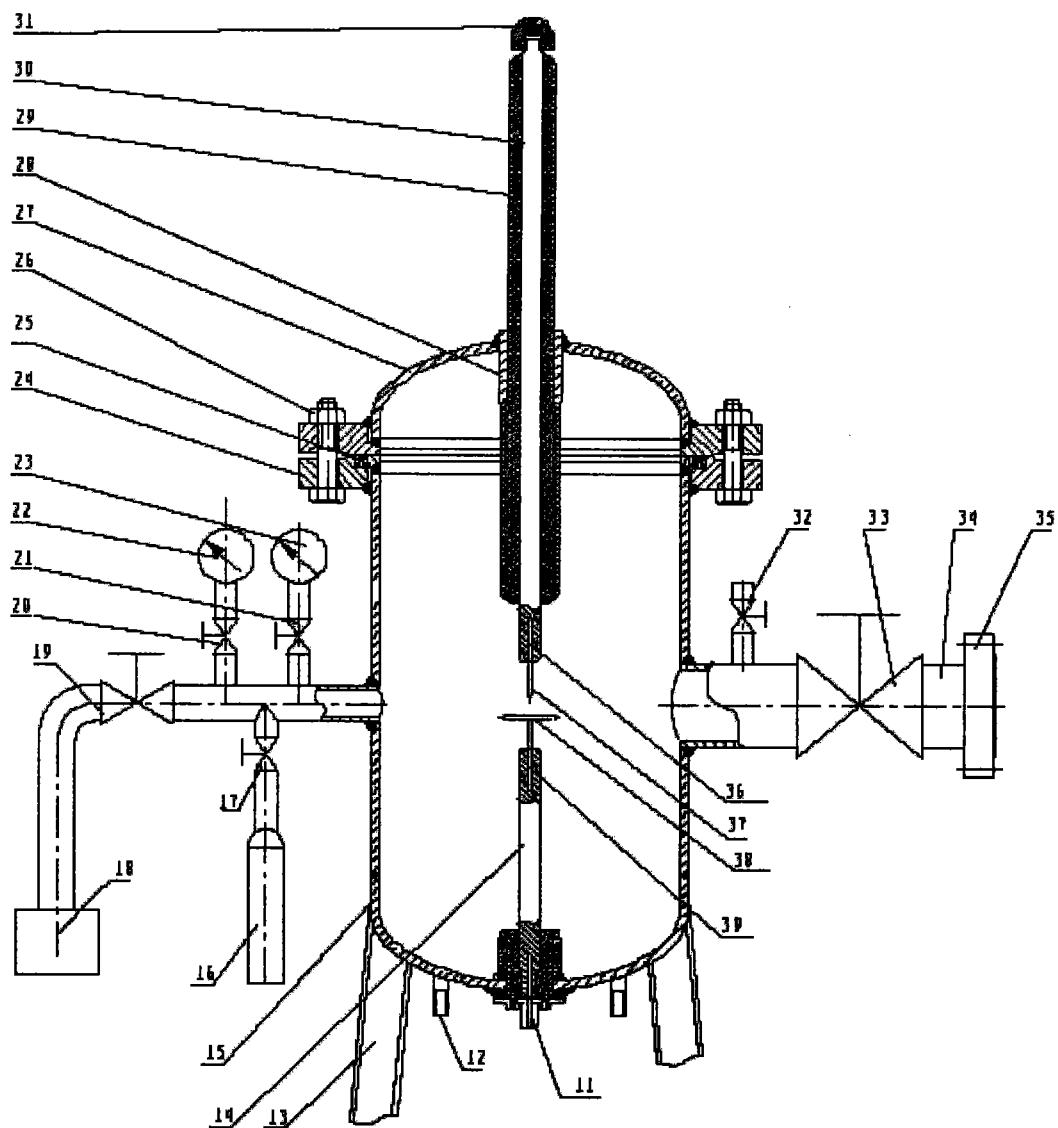


图 2

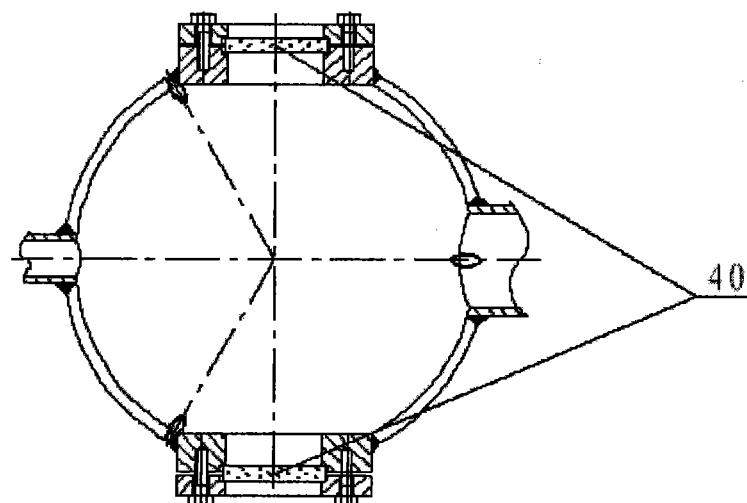


图 3

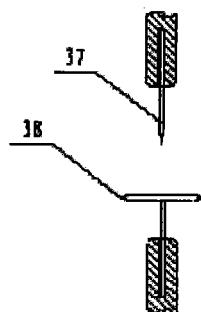


图 4

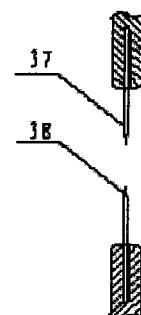


图 5

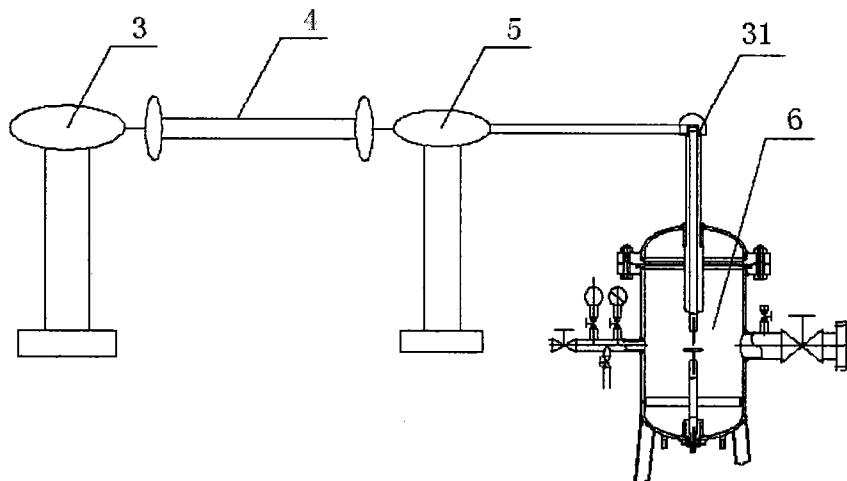


图 6