

**CNIC-01621**  
**SWIP-0143**

**HL-2A 真空抽气、检漏系统方案**  
**PUMPING AND LEAK DETECTION**  
**SYSTEM OF THE HL-2A**  
*(In Chinese)*

**中国核情报中心**  
**China Nuclear Information Centre**

CNIC-01621  
SWIP-0143

## HL-2A 真空抽气、检漏系统方案

曹曾 徐云仙 付卫东  
(核工业西南物理研究院, 成都, 610041)

### 摘 要

HL-2A 真空抽气系统由 8 套前级集总式分子泵三级抽气机组组成, 对环有效抽速为  $12 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。用软罩加吸枪、检漏盒罩、双质谱法分别进行零部件和总体检漏, 真空室总漏率  $\leq 1 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。HL-2A 装置极限真空  $\leq 1 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ 。

关键词: 抽气系统, 检漏, 漏率

# **Pumping and Leak Detection System of the HL-2A**

*(In Chinese)*

CAO Zeng XU Yunxian FU Weidong  
(Southwestern Institute of Physics, Chengdu, 610041)

## **ABSTRACT**

The pumping system is a combination of 8 turbomolecular pumps with three stages pumping for HL-2A vacuum vessel, a total effective pumping speed at the vessel of  $12 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  for nitrogen. The leak detection of element and vessel is performed with inspiration, case of leak detection and two mass spectrometry. The total leak rate of vessel is below  $1 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . The base pressure is  $1 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ .

**Keywords:** Pumping system, Leak detection, Leak rate

# 引言

HL-2A 装置是一个具有磁孔栏和轴对称（极向）偏滤器的托马克装置，其主机系统由原 ASDEX 主机恢复而成。2A 真空室大半径 1.64 m，小半径 0.4 m，体积 26 m<sup>3</sup>，金属真空表面积 76 m<sup>2</sup>。截面呈 D 形（高 206 cm，宽 106 cm），内铺设电解石墨瓦（内表 0.3 m<sup>2</sup>/g），环室顶部和底部是上下偏滤器室（2×7.2 m<sup>3</sup>），其靶板铺设复合碳纤维板。偏滤器室到主等离子体室（11.6 m<sup>3</sup>）的喉部宽度为 5 cm，长度 10 cm，分子流通导  $L=600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。大小窗口 218 个，其中  $\phi 600 \text{ mm}$  的大型窗口 10 个，全部窗口为刀口密封。安装所涉及的真空密封还有真空室半环合车面（4 个大 D 型密封面， $\phi 7.9$ ， $\phi 9.1 \text{ mm}$  氟橡胶两层密封，单个密封圈展开长度分别为 6485 mm，6272 mm），128 个真空室内冷热水管接头（水管直径  $\phi 6$ ， $\phi 8 \text{ mm}$ ），6 个多极场线圈波纹管保护套<sup>[1]</sup>，24 个多极场线圈合车面接头外壳焊接点等。此外，真空室内还装有一定数量石墨第一壁材料以及部分不适合超高真空技术要求的部件。综合上述情况，HL-2A 真空抽气、检漏系统方案设计的合理性及先进性，确定所要达到的合理的真空技术指标（机组数量、有效抽速、总体漏放气率、单件部件漏气率等），充分利用随装置拆运回来的零部件，对节省研制费用，HL-2A 装置总体规划及工程进展具有十分重要的意义。

## 1 技术指标

### 1.1 几个托卡马克真空系统技术指标

表 1 给出国内外几个托卡马克真空系统技术指标及抽气机组配置情况。

表 1 真空系统技术指标

	HL-1M	HT-7 <sup>1)</sup>	JT-60	ASDEX	HT-7U <sup>2)</sup>
总漏气率 (Pa · m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )	$3 \times 10^{-8}$	$7 \times 10^{-7}$	$5 \times 10^{-8}$	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-8}$
极限真空度 (Pa)	$5.6 \times 10^{-6}$	$5.3 \times 10^{-6}$	$1.3 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-6}$	$1.3 \times 10^{-5}$
总放气率 (Pa · m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )	$8 \times 10^{-6}$	$7 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-4}$	$4 \times 10^{-5}$
主抽气泵 (分子泵)	3×1500	1×450 1×1500	4×3500	8×3500	4×3500
有效抽速 (m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )	1.5	1.06	13.6	15	8.2
前级泵	3×30 升 机械泵	1×70 1×30 机械泵	2×450 罗茨泵 2×70 机械泵	2×300 罗茨泵 4×20 机械泵	4×550 罗茨泵 4×70 机械泵
抽速配比	50 : 1	21.5 : 1 15 : 1	100 : 5.2 : 1	400 : 7.5 : 1	50 : 6.3 : 1

1) HT-7 内真空系统； 2) HT-7U 内真空系统

## 1.2 2A 真空系统技术指标

根据我们的调研分析，HL-2A 真空室预装及正式运行时的真空技术指标和机组配置如表 2。

表 2 2A 真空室预装、正式运行时真空技术指标及抽气机组配置

	2A 真空室预装	2A 正式运行
总漏气率 ( $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$
极限真空度 (Pa)	$(1 \sim 2) \times 10^{-4}$	$\leq 1 \times 10^{-5}$
总放气率 ( $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	$(4 \sim 6) \times 10^{-4}$ <sup>1)</sup>	$4.5 \times 10^{-5}$
主抽气泵 (分子泵)	4×3500	8×3500
有效抽速 ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	6	12
前级泵	2×600 罗茨泵 2×70 机械泵	2×600 罗茨泵 2×70 机械泵
抽速配比	100 : 8.6 : 1	200 : 8.6 : 1

1) 2A 真空室预装初抽时总漏放气率： $6 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

零部件漏气率指标：

- (1) 半环合车面氟橡胶密封处  $\leq 3 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
- (2) 多极场电极保套外壳焊缝  $\leq 3 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
- (3) 可拆卸窗口  $\leq 3 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
- (4) 水管及接头  $\leq 3 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

## 2 2A 真空室预装抽气、检漏方案

### 2.1 抽气系统

如图 1, 2 所示，HL-2A 真空室预装抽气系统为 4 套前级集总式分子泵三级抽气机组。由于预装平台结构尺寸的限制，选择 2A 真空室 4 个  $\phi 350 \text{ mm}$  水平窗口为预装抽气口，与原 ASDEX 装置和 2A 正式运行时的抽口位置不同（见图 3）<sup>[2]</sup>。目前国外大中型托卡马克均选用了具有高压缩比、高转速的涡轮分子泵为主抽气泵，如：TFTR，ASDEX，JET，

TEXTOR 和 JT-60<sup>[3, 4]</sup> 等, 并且大多数中等装置采用两级串联抽气, 大装置采用前级集总式三级抽气。2A 真空室预装抽气主泵选用 4 台 F-400 型  $3.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  分子泵, 设计为前级集总式三级抽气机组, 罗茨增压泵、机械泵分别为 ZJB-600 型、2X-70A 型, 抽气组合与 ASDEX 装置相似<sup>[2]</sup>, 抽速配比为 100 : 8.6 : 1。ASDEX 抽气系统中分子泵、罗茨泵、机械泵抽速配比不合理, 在其放电清洗时只能打开 4 套分子泵 (工作压强  $10^{-1} \text{ Pa}$ ), 有效抽速仅为  $5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。我们在 2A 预装及正式安装运行时调整了抽气系统的配置, 能避免 ASDEX 的这种情况。预装抽气系统的设计指标为<sup>[5, 6]</sup>: ① 抽气系统本底压强  $p_0 \leq 6.0 \times 10^{-7} \text{ Pa}$ ; ② 主泵有效抽速  $5 \sim 6 \text{ m}^3/\text{s}$ ; ③ 抽气系统漏放率  $\leq 1 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ; ④ 达到残余气体质谱峰  $\leq M/e44$  的无油要求。有关设计参数详见表 3。

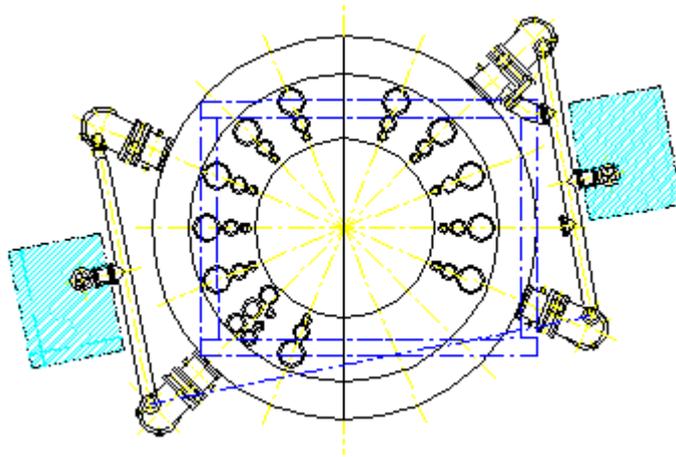


图 1 2A 真空室预装抽气系统俯视图

表 3 真空抽气机组设计参数

名称	通径 $\phi/\text{mm}$	名义抽速 $(\text{L} \cdot \text{s}^{-1})$	抽口尺寸 $\phi/\text{mm}$	通导 ( $\text{N}_2$ ) $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	有效抽速 $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$
分子泵	400	$3500 \times 4$	$350 \times 4$	$2.5 \times 4$	$1.46 \times 4$
罗茨泵	200	$600 \times 2$	$100 \times 2$	$0.23 \times 2$	$0.166 \times 2$
机械泵	80	$70 \times 2$	$150 \times 2$	$0.08 \times 2$	$0.038 \times 2$

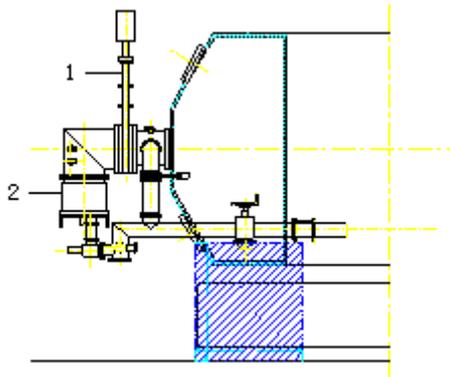


图 2 2A 真空室预装抽气机组

1——ZBS φ400 mm 气动闸阀； 2——F-400 涡轮分子泵

上述机组配置相应的真空测量探头，如 B-A 规、中量程规、前级真空规，在 2A 真空室预装抽气性能测试时，可研究上述三级抽气运行特点，为 2A 装置正式运行时抽气系统的设计、运行提供依据。

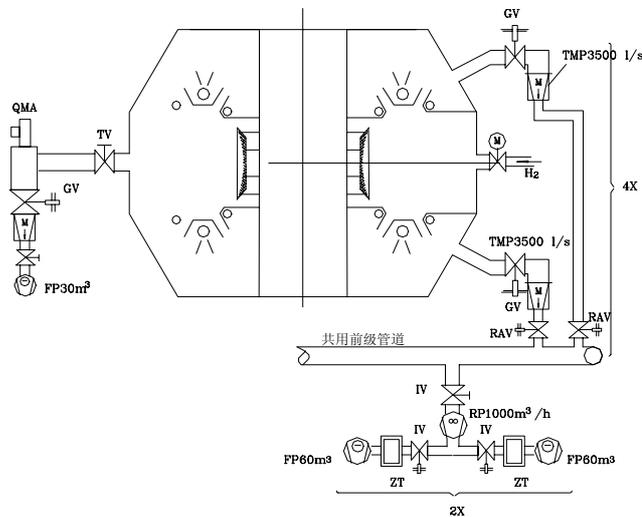


图 3 ASDEX 真空抽气系统

GV——闸阀；TMP——分子泵；RP——罗茨泵；QMS——四极质谱计  
IV——隔离阀；RAV——角阀；TV——节流阀；ZT——分子筛阱

ASDEX 装置真空抽气系统运行情况显示<sup>[7]</sup>, 在总有效抽速  $15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  时, ASDEX 真空室不经任何处理, 抽气几天后真空度约为  $4 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ , 总的气体漏放率  $4 \times 10^{-4} \times 15 = 6 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , 残余气体以  $\text{H}_2\text{O}$  占主导地位, 经 6 天  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  中温烘烤并冷却低温吸气板到  $-100 \text{ }^\circ\text{C}$  后, ASDEX 的极限真空达  $3 \times 10^{-6} \text{ Pa}$ , 气体漏放率  $3 \times 10^{-6} \times 15 = 4.5 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

根据上述情况分析, 2A 真空室预装时四套机组总有效抽速  $1460 \times 4 = 5.8 \text{ m}^3/\text{s}$  (参见表 3), 初抽时能达到的真空度约为  $(1 \sim 2) \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 。为降低 2A 真空室放气率, 有效抽除  $\text{H}_2\text{O}$ , 特采取如下措施: (1) 根据 HL-1M 装置真空运行经验<sup>[5]</sup>, 在每套机组前级设计快速 (更换时间小于 1 分钟) 装卸吸气剂的  $\text{P}_2\text{O}_5$  阱, 降低  $\text{H}_2\text{O}$  分压, (2) 在抽气过程中用  $\text{H}_2$ 、干燥  $\text{N}_2$  反复冲刷真空室, (3) 根据 2A 真空室残余气体情况, 启用 HL-1M 装置 DB-250 低温冷凝泵一套, 其有效抽速为  $800 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$  ( $\text{N}_2$ ) 和  $900 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$  ( $\text{H}_2\text{O}$ ), 加强抽除  $\text{H}_2\text{O}$  效率, (4) 原 ASDEX 3 套直流辉光电极已随真空室拆运回来, 仅需少量经费配置 2 套直流辉光电源和简单的连续送气设备即可在预装时进行  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2 + \text{He}$  直流辉光放电清洗工作, 有效降低真空室放气率。在不影响 2A 主机安装工程进度的前提下, 一并解决直流辉光放电清洗的有关技术、工艺问题。

在采取上述有效的除气、抽气措施后, 预计 2A 真空室总的气体漏放率将由初抽时的  $6 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  降至  $(4 \sim 6) \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , 预装所能达到的真空度为  $(1 \sim 2) \times 10^{-4} \text{ Pa}$ 。

## 2.2 零部件、总体检漏

以文献[8]中 ASDEX 曾达到的真空漏气指标为依据, 2A 装置总漏气率应  $\leq 1 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。预装所涉及的真空密封 230 多处, 每处允许漏气率为  $3 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。为确保漏气率能满足实验要求, 并考虑到真空室半环合车面及冷热水管接头是用氟橡胶密封, 窗口法兰是可拆卸全金属密封, 多极场电极保护套及其合车面接头外壳为焊接密封, 真空室本身尚有大量焊缝及部份不能拆卸的水管密封头, 因此所有可拆卸及新焊接金属密封处漏气率应再降低两个数量级, 为  $3 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

### 2.2.1 零部件检漏方法

2 A 真空室预装涉及的密封口 230 多处, 如等全部安装完毕再检漏会出现真空抽不上去而无法检漏的困难, 部份窗口及特殊位置 (如多极场电极接头及保护套等) 即使检出漏气也因无工作面而难以进行处理。因此检漏 (粗检) 应与装置安装同步进行。在安装过程中, 窗口、水接头的密封检漏可采用软罩 + 吸枪法<sup>[9]</sup>、检漏盒罩等<sup>[10]</sup>在大气压下进行, 检漏灵敏度为  $5 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。在粗检的基础上对多极场密封处采用负压检漏 (参见图 4, 5), 检漏灵敏度为  $10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

在零部件检漏系统上配置标准漏孔 ( $10^{-5} \sim 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), 以便及时对系统灵敏度进行校准。

### 2.2.2 真空室总体检漏

采用四极场质谱计 (SZ-001 原 HL-1M 设备) 与大容器逆流氦质谱检漏仪相结合的方法 (即双质谱法) 进行真空室总体检漏。粗检的部份用逆流检漏法, 可检压强  $100 \text{ Pa}$ 。2A 真空室体积  $26 \text{ m}^3$ , 两套分子泵机组 (见图 1~3) 有效抽速约  $2.92 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $\text{He}$  响应时间  $=V/S_c = 9 \text{ s}$ 。在大漏排除后, 用双质谱法进行细检。

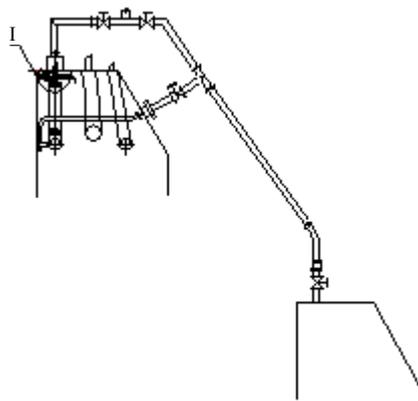


图4 ASDEX 多极场线圈真空套检漏示意图

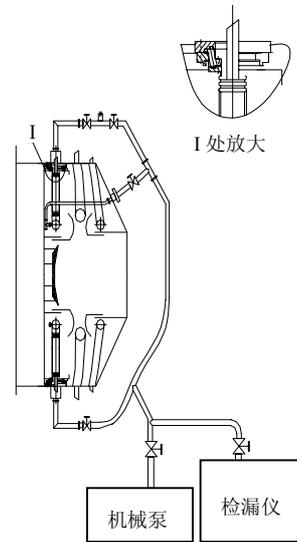


图5 2A 多极场线圈真空套检漏示意图

图6是质谱差分系统示意图,考虑到真空室预装不存在磁场,分析系统应靠近真空室并可选用  $1500 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$  分子泵差分机组<sup>[2, 5]</sup>,用  $\Phi 50$  的三通分别与真空室的主等离子体室和下偏滤器室相连接,通过图中阀门的关闭分别测量两个室的气体组分。采用动态质谱法<sup>[9]</sup>进行  $\text{O}_2$  漏率标定,将事先校准好的自制压扁型漏孔安装在真空室上,用四极质谱计测出  $\text{O}_2$  峰高度,其为装置漏气和漏孔漏气之和;关断漏孔阀门,再次测量  $\text{O}_2$  峰高度,二者差为装置漏  $\text{O}_2$  峰高,根据漏孔校准灵敏度即可计算出  $\text{O}_2$  漏气率。

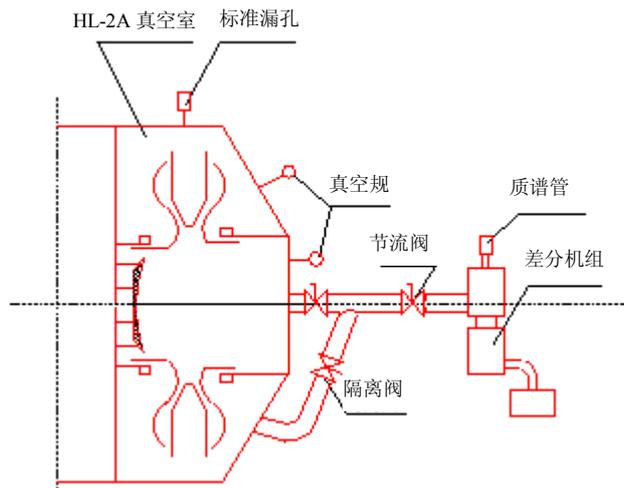


图6 真空室质谱差分系统

### 2.2.3 总漏放气率测量

漏放气率的测量采用静态定容法<sup>[6]</sup>。当真空室检漏工作完成后，抽气机组抽空至本底真空度  $p_0$ ，用阀门隔断真空系统，则

$$Q=V \times \frac{\Delta p}{\Delta T} \quad (1)$$

式中  $Q$ —总漏放气率， $\Delta p$ —真空室压强变化， $\Delta T$ —时间间隔， $V$ —真空室体积。

多次测量 2A 真空室关闭状态下的静态压强上升率，则可计算出总漏气率<sup>[6, 9]</sup>。

### 2.2.4 有效抽速的测定

2A 真空室抽气至本底真空（约为  $(1\sim 2) \times 10^{-4}$  Pa），用经过流量标定的送气阀<sup>[11]</sup>以一定流量向真空室内连续送气，当系统达到动态平衡后测量真空室不同位置压强（参见图 2），由下式可计算出单套或四套抽气机组的有效抽速。

$$Q = p_i \times S_e \quad (2)$$

式中  $Q$ —气体流量， $p_i$ —任意截面的压强， $S_e$ —有效抽速。

2A 真空室预装时总漏放率  $(4\sim 6) \times 10^{-4}$  Pa·m<sup>3</sup>·/s，阀门送气量  $(4\sim 6) \times 10^{-2}$  Pa·m<sup>3</sup>/s，因此总漏放气率可忽略。

### 结 论

(1) 2A 真空室预装抽气系统有效抽速大于  $5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ，在一定的抽气时间及采取必要的除气、抽气措施后本底真空度  $(1\sim 2) \times 10^{-4}$  Pa。真空室允许的总漏气率  $\leq 1 \times 10^{-5}$  Pa·m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>，真空室半环合车面及部分冷热水接头每处漏气率  $\leq 3 \times 10^{-8}$  Pa·m<sup>3</sup>·s，窗口及部分焊缝每处漏气率  $\leq 3 \times 10^{-10}$  Pa·m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>。

(2) 借助于直流辉光放电清洗，干燥气体冲刷，P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 吸气，必要时启用原 HL-1M 装置低温泵一套等有效除气、抽气手段，把 2A 真空室总体气体漏放率由初抽时的  $6 \times 10^{-3}$  Pa·m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> 降低至  $5 \times 10^{-4}$  Pa·m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>。

### 2.3 2A 真空室本体清洗技术要求

原 ASDEX 装置 1990 年停止运行，在德国停放 6 年（部份窗口已敞开）。其真空室 1996 年中运到 2A 工地现场，经我们进入真空室观察，其内部十分脏，石墨粉尘、沙子、污垢等，考虑到 2A 真空室目前的特殊情况，特提出以下真空清洗技术要求：

(1) 用 240# 砂布或细砂轮手工打磨真空室内所能操作的部分（重点位置：偏滤器室钛球吸气泵窗口内壁、主等离子体内壁，操作过程中注意通风），用吸尘器清除粉末，用干净棉纱擦拭，再用半干半湿棉纱擦拭。

(2) 用较湿的棉纱（去离子水浸湿）反复擦洗真空室内壁件。

(3) 用一定比例的合成洗涤剂液擦洗（合成洗涤剂溶解后去掉沉淀物）。

(4) 用去离子水棉纱擦洗。

(5) 通热风反复吹干。

(6) 用丙酮擦洗，最后用无水酒精擦洗。

(7) 通热风反复吹干。

在上述清洗过程中注意保护工作面，以防再次污染。

(8) 第一壁石墨块表面最好进行打磨处理, 然后再进行超声波清洗、烘烤除气等。

## 2.4 预装抽气、检漏系统主要设备

表 4 给出 2A 真空室预装急需的仪器设备清单。

表 4 2A 真空室预装抽气、检漏系统主要设备

序号	名称	型号	数量	预选厂家	备注
1	涡轮分子泵	F400	4	南光机器厂 北京科仪研制中心	3500 L · S <sup>-1</sup> 南光厂 2001 年二季度供货, 中科院 北京科学仪器研制中心正在研制, 2001 年二月可供货。
2	闸板阀	ZBS	4	南光机器厂 上海阀门二厂	与装置接口法兰按我方要求 (注: 原 ASDEX 主抽气管法兰) 加工
3	检漏仪	ZLS26TD ZQJ230D	1	成都仪器厂 北京科仪研制中心	大容器逆流检漏仪
4	四极质谱计	SZ-001 ZQA-402	1	南京达京有限公司 北京科仪研制中心	倍增器发放大, 100 m 远控
5	真空计		10	成都仪器厂 核西物院瑞普公司	前级真空计 5 台, 高、超高真空计 5 台 其中 FB-1 付标准规 1 台
6	罗茨泵 机械泵	ZJB-600 2X-70	2	南光机器厂 上海真空泵厂	前级集总二级抽气站
7	H <sub>2</sub> 发生器	GCH2500	1	北京中惠普分析 技术研究所	500 ML/Min、纯度 99.999% 直流辉光放电清洗

## 3 HL-2A 真空抽气系统

表 HL-2A 装置正式运行的真空抽气系统应具有以下主要功能: (1) 抽空检漏; (2) 烘烤除气; (3) 放电清洗; (4) 面对等离子体部件的锻炼; (5) 等离子体运行实验。图 7 是主抽气系统示意图 (1/4), 第一级由八台 F-400 涡轮分子泵, 每台泵的抽速 3.5 m<sup>3</sup> · s<sup>-1</sup>, 第二级由二台 ZJB-600 罗茨真空泵, 第三级由 2 台 2X-70 旋片式机械泵串联组成。八台涡轮分子泵与八台 φ400 mm 的气动闸阀通过抽气管道分别连接到真空室 φ350 mm 的 4 个上斜口和 4 个下斜口。分子泵前级出口通过 φ100 mm 波纹管、φ100 mm 前级管道与 φ150 mm 电磁阀连接到 φ150 mm 前级水平管道上。前级水平管道由波纹管、三通管组成, 抽速比为 200 : 8.6 : 1。在 HL-2A 运行时增加必要的烘烤手段, 先进的器壁处理技术以及偏滤器抽气系统, 其总气体漏放率可降至 4.5 × 10<sup>-5</sup> Pa · m<sup>3</sup> · s<sup>-1</sup> (注: ASDEX 装置的最好漏放气率指标), 2A 装置的极限真空将 ≤ 1 × 10<sup>-5</sup> Pa, 能满足工程及物理实验的需要。

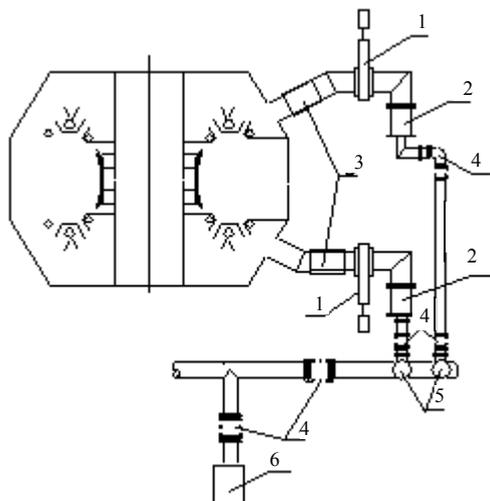


图7 HL-2A 真空抽气系统

1——闸阀；2——分子泵；3——角度调解管；4——波纹管；5——前级管道；6——前级机组。

## 4 直流辉光放电清洗系统

如图8所示，原ASDEX的辉光电极由4只阳极为 $\phi 25\text{ mm} \times 450\text{ mm}$ 的不锈钢杆和“日光灯”罩形状的不锈钢背板构成（现2A真空室仅有3套电极），4只电极均匀分布于环室外侧的孔栏阴极区内，典型工作参数为 $5 \times 10^{-1}\text{ Pa}$ ；阳极电压为300~600 V，电流最大为4 A。

2A直流辉光放电清洗系统利用图8所示3套电极配制2套电源组成，电源输出最大电压为1000~2000 V，最大电流5 A，并加上预电离电源进行预电离，加预电离的原因是在直流辉光中，若气压大于2 Pa，辉光区域就会向偏滤器室扩展，引起偏滤器的极向场线圈屏蔽套打火或拉弧。从装置安全及可靠运行考虑，直流辉光电源击穿电压不能过高。

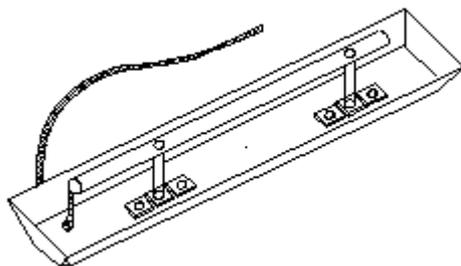


图8 ASDEX 放电清洗电极示意图

## 5 偏滤器抽气系统

2A偏滤器抽气系统由钛球吸气泵构成，包括钛球升华器（见图9）和钛球升华电源。

其电源输出为  $0\sim 20\text{ kW}$  ( $0\sim 15\text{ V}$ ,  $0\sim 80\text{ A}$ )  $\times 18$ 。

钛升华吸气程序为：钛球预热 $\rightarrow$ 钛升华 ( $10\sim 30$ ) mm $\rightarrow$ 托卡马克放电。

由于钛球寿命较短，随 ASDEX 拆回的钛升华器要检查、维修，还缺少升华电源，这些器件、设备均无标准产品，我们将根据有关条件研制。

最大抽速成： $1\times 10^6\text{ L/s}$  升华功率： $20\text{ kW}$  钛蒸发量： $0.5\text{ g/次}$

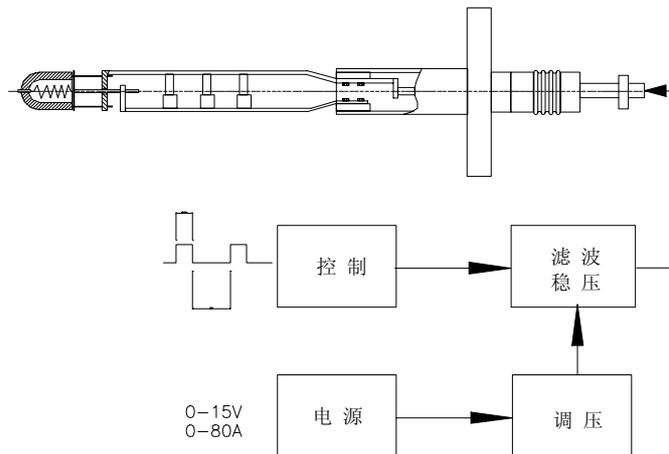


图 9 HL-2A 偏滤器抽气系统原理图

感谢刘德权、洪文玉、崔成和、许正华等同志对本工作提供的帮助。

### 参 考 文 献

- 1 Schneider U and the ASDEX Team. Ten Year of Operating Experience with ASDEX. Fusion Technology, 1992, 1: 742
- 2 Poschenrieder W, Staudenmaier G and Staib P. Conditioning of ASDEX by Glow Discharge, J. nucl. Mater., 1980, 93: 322
- 3 Ogiwara N, Arai T, Shimizu M. JT-60 Torus Vacuum Pumping System, Fusion Technology, 1984, 1: 383
- 4 Deites G.Goetz. Large Turbomolecular Pumps for Fusion Research and High-energy Physics Vacuum, 1982, 32: 703
- 5 严东海、孙守祁、许正华等.中国环流器 HL-1M 装置的真空抽气系统, 四川真空, 1995. 1
- 6 达道安、李旺奎.真空设计手册, 国防工业出版社, 1991
- 7 Niedermeyer H, Albert D B, Behringer K, et al. Conditioning and Optimization of Discharges in ASDEX,J.Nucl.Mater, 1980, 93: 286
- 8 Langley R A, Paul Lamarche.Vacuum Pumping Requirement Considerations for Future Fusion Devices, J. Nucl. Mater., 1993, 93: 326
- 9 严东海、孙守祁、许正华等. 大型激光室检漏技术, 四川真空, 1994. 3
- 10 关奎之. 真空检漏, 四川真空, 1998. 2
- 11 徐云仙、肖正贵、李瑞钧等. 快速响应真空送气阀性能实验, 四川真空, 1997. 1