

溅射离子泵抽气系统的 B-A 计检漏

刘命辉

(兰州物理研究所, 兰州 730000)

(收稿日期 1996-04-29)

LEAK DETECTION OF SPUTTER ION PUMPED SYSTEM WITH B-A GAUGE

Liu Minghui

(Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000)

Abstract: The formulas of leak sensibility based on the leak rates of the atmospheric partial pressures are given. The conditions to obtain the high leak sensibility are analyzed and the synthetic factors to select the detectable gas is proposed. It is shown from the calculation that argon is a very sensitive gas for detecting the leak of the sputter ion pumped system and it is sensitive enough to assure the leak rate of the detected leak much less than that of the gas release of the system. The detection result under 10^{-8} Pa is also given, which is in good agreement with the theory.

Keywords: B-A gauge, Leak detection, Sputter ion pump.

摘 要: 给出了以大气中各气体组分的漏率为基础的检漏灵敏度公式, 分析了获得高灵敏度的条件, 提出了选择示漏气体的综合依据。计算表明, 用氩作示漏气体检测溅射离子泵系统的灵敏度很高, 足以保证系统的漏气率远小于系统自身的放气率。给出了 10^{-8} Pa 压力下的检漏结果, 其理论值与实测结果很好地一致。

关键词: B-A 计、检漏、溅射离子泵。

为了获得无油超高真空环境, 对运转中的真空系统必须采用无油检漏技术来发现漏孔从而消除漏气。利用系统本身的电离真空规可以进行无油检漏, 并且给出了以大气总漏率分析为基础的检漏灵敏度公式^[1,2]。近代无油超高真空系统多采用溅射离子泵和钛升华泵抽气, 它们具有很强的选择抽气特性, 泵的抽速特别是真空规的灵敏度是按不同气体成分给出的。因此, 有必要建立起更加严密的以大气中各气体组分的漏率为基础的检漏灵敏度公式。

1 检漏灵敏度

1.1 检漏灵敏度公式

溅射离子泵系统大都具有体积较大的真空室, 抽气泵及测量压力的真空规分接在工作室周围, 现在分析此种典型真空系统的 B-A 计检漏问题。分析中不考虑漏孔在规管上的情况, 同时忽略真空规本身的抽气作用。

标准大气中 N_2 、 O_2 、Ar 的体积百分比含量占 99.966%, 只需考虑这三种气体对检漏灵敏度的影响。设空气总压力为 P , 空气中 N_2 、 O_2 、Ar 的体积百分比含量分别为 r_N 、 r_O 和 r_A , 空气和氮的粘度分别为 η 和 η_N , 空气的平均分子量为 M_a , 氮的分子量为 M_N 。则对于几何因子为 C_1 的粘滞漏孔, 大气总漏率 $q = C_1 P^2 / \eta$, 其中 N_2 的漏率 $q_N = C_1 r_N P^2 / \eta_N$ 。

设 $r_{1N} = \eta / \eta$, 则 $q_N = r_N q / r_{1N}$ 。对于几何因子为 C_2 的分子漏孔, $q = C_2 P / M_a^{1/2}$, $q_N = C_2 r_N P / M_N^{1/2}$ 。若此时改设 $r_{1N} = (M_N / M_a^{1/2})$, 同样可以得到 $q_N = r_N q / r_{1N}$ 。因此, r_{1N} 视为漏孔对氮的流阻。漏入系统的气体在到达真空室以前有可能遭受吸附损失, 若设通过几率为 r_{2N} , 则到达工作室的氮为 $r_N r_{2N} q / r_{1N}$ 。若泵对工作室 N_2 的有效抽速为 S_N , B-A 规对 N_2 的灵敏度为 K_N , 规管的发射电流为 I_e , 则规管内形成的漏氮离子流 $I_N = K_N I_e r_N r_{2N} q / r_{1N} S_N$ 。同样可以得到漏气流中 O_2 和 Ar 形成的离子流 I_o 和 I_A , 也可得到检漏时示漏气体形成的离子流 I_t 。当以脚标 O, A, t 分别代替脚标 N 表示氧、氩和示漏气体的对应量时, 可求得漏孔漏大气时形成的总离子流为

$$I_a = I_N + I_o + I_A = I_e q \left(\frac{r_N r_{2N} K_N}{r_{1N} S_N} + \frac{r_o r_{2o} K_o}{r_{1o} S_o} + \frac{r_A r_{2A} K_A}{r_{1A} S_A} \right) = I_e q \frac{K_N}{S_N} \left(\frac{r_N r_{2N}}{r_{1N}} + \frac{r_o r_{2o} K_{ON}}{r_{1o} S_{ON}} + \frac{r_A r_{2A} K_{AN}}{r_{1A} S_{AN}} \right) = K_{NA} I_e q / S_N \quad (1)$$

式中, $K_{ON} = K_o / K_N$, $K_{AN} = K_A / K_N$ 分别代表 B-A 规对 O_2 和 Ar 的相对灵敏度系数, $S_{ON} = S_o / S_N$, $S_{AN} = S_A / S_N$ 分别代表泵对真空室内氧和氩的氮相对抽速。公式中的

$$A = \frac{r_N r_{2N}}{r_{1N}} + \frac{r_o r_{2o} K_{ON}}{r_{1o} S_{ON}} + \frac{r_A r_{2A} K_{AN}}{r_{1A} S_{AN}}$$

是一个与示漏气体性质无关的无量纲数, 它主要由真空系统所采用的泵的选择抽气特性以及漏孔的性质和位置决定, 可视为系统综合因子。

当进行气体探索检漏时, 若漏孔外混合气体中示漏气体的体积百分比浓度为 x , 则其中 N_2, O_2, Ar 的浓度应分别为 $r_N (1-x)$, $r_o (1-x)$ 和 $r_A (1-x)$, 同样可求得探漏稳定后混合气体形成的总离子流 I_b , 进而求得喷示漏气体前后规管内离子流的变化量

$$\Delta I^+ = I_b - I_a = \left[\frac{x r_{2t} K_t I_e q}{r_{1t} S_t} + (1-x) I_a \right] - I_a = \frac{x r_{2t} K_t I_e q}{r_{1t} \cdot S_t} - \frac{K_N}{S_N} A x I_e q = \frac{K_{tN}}{S_N} I_e q x \left(\frac{r_{2t} K_{tN}}{r_{1t} S_{tN}} - A \right) \quad (2)$$

式中, $K_{tN} = K_t / K_N$ 为规管对示漏气体的相对灵敏度系数, $S_{tN} = S_t / S_N$ 为泵对工作室示漏气体的氮相对抽速。

检漏灵敏度通常以最小可检漏孔的空气漏率 q_{min} 衡量, 其值由检漏时 B-A 计读数的相对变化量, 即离子流的相对变化 $\Delta I^+ / I_o^+$, 等于真空系统的本底压力 P_0 的波动量 R 来确定。将式 (2) 中的 q 换成 q_{min} , 并利用关系式 $I_o^+ = K_N I_e P_0$, 即可由定义式 $\Delta I^+ / I_o^+ = R$ 求得气体探索检漏时的最小可检漏率

$$q_{min} = \frac{R S_N P_0}{\left(\frac{r_{2t} K_{tN}}{r_{1t} S_{tN}} - A \right) x} \quad (3)$$

式 (3) 中的系统本底压力 P_0 本质上就是系统的总等效氮压力, 故乘积 $S_N P_0$ 可视为系统真空泵的总等效氮气体负荷。

式 (1) 中的 I_a 与系统漏大气造成的附加压力 ΔP_0 间应满足 $I_a = K_N I_e \Delta P_0$, 因此

$$\Delta P_0 = \frac{A q}{S_N} \quad (4)$$

式 (2) 中的 ΔI^+ 与气体探索检漏时 B-A 计指示的压力的变化量 ΔP 之间应满足 $\Delta I^+ = K_N I_e \Delta P$, 因而

$$\Delta P = \Delta P_0 \left(\frac{r_{2t} K_{tN}}{r_{1t} A S_{tN}} - 1 \right) x \tag{5}$$

1.2 提高检漏灵敏度的方法

由式(3)和(5)可知,提高B-A计检漏灵敏度的方法是:1)提高漏孔外示漏气体的浓度;2)减少真空系统自身本底压力的波动量;3)降低检漏时系统的本底压力,例如采用先消除大漏再检小漏孔的方法;4)根据泵对工作室气体的选择抽气特性、B-A规的相对灵敏度系数、气体穿过漏孔的难易程度和通导几率的大小,综合考虑选取最佳示漏气体。式(3)和(5)中的乘积项 $F = K_{tN} r_{2T} / S_{tN} r_{1t}$ 中的各因子均与示漏气体的性质有关,可视为气体综合因子,它是选择示漏气体的综合依据,显然 F 与 A 的差越大则检漏灵敏度越高。表1中给出了常用示漏气体的性能数据。

表1 常用示漏气体性能数据^[1,3,4]

气体	分子量	空气中体 积含量比	粘滞系数 η /(10^{-5} Pa · s) (20 ℃)	漏孔的流阻		泵的相对抽速				B-A 规 相 对灵敏度
				粘滞 漏孔	分子 漏孔	溅射离子泵		液氮壁 升华泵	扩散泵	
						钛钽二极	三极式			
空气	28.96	1	1.81	1	1	—	—	—	—	—
氮	28.01	0.78084	1.75	0.967	0.983	1	1	1	1	1
氧	32.00	0.20948	2.03	1.12	1.05	0.74	0.57	1	0.95	0.879
氩	39.95	0.00934	2.22	1.23	1.17	0.21~0.29	0.21	≈0	1.2	1.34
氦	4.003	5×10^{-6}	1.96	1.08	0.372	0.26~0.37	0.30	≈0	1.6	0.221
氢	2.016	5×10^{-7}	0.88	0.486	0.264	1.7~2.1	2.7	1	1.8	0.491

2 用B-A计检溅射离子泵系统

曾对一台极限压力 $2.3 \times 10^{-9} \text{ Pa}$ 的用于进行冷焊试验的全金属无油超高真空系统(图1)进行过多年的B-A计检漏。该系统用氮抽速 $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ 的钛-钽二极式溅射离子泵和氮抽速 $1.3 \text{ m}^3/\text{s}$ 的液氮冷壁钛升华泵联合抽气获得超高真空。升华泵和B-A规直接工作室,离子泵和工作室之间有氮流导约 $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$ 的通道。

用氩检溅射离子泵系统时能满足 $F \gg A$ 的条件,用氩检冷焊系统的灵敏度必然很高。当系统上存在有漏率较大的粘滞漏孔时,总压力 P_0 较高,只能在离子泵工作的条件下检漏。由于钛-钽二极式离子泵的氩抽速较大和泵对工作室的氮抽速明显地受流导限制,泵对工作室氩的氮相对抽速较大,故在此真空系统中氩检漏的灵敏度较低。但计算表明,即使离子泵对氩的氮相对抽速取0.29,检漏时B-A计指示的压力的变化量仍可达到 $\Delta P = 1.92_x \Delta P_0$ 。在系统真空度主要受漏气限制即 $\Delta P_0 > 0.5 P_0$ 时, $\Delta P / P_0 > 0.96_x$,即只要漏孔

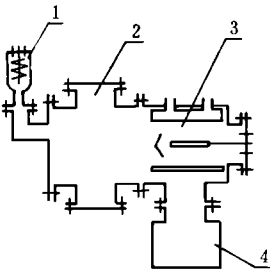


图1 冷焊无油超高真空系统
1-B-A规;2-冷焊工作室;3-钛
升华泵;4-钛-钽二极式离子泵

外混合气体中的氩浓度 x 达到 10% 就很容易发现漏孔。若取 $R=0.02$ 和 $x=1$, 则按公式 (3) 有 $q_{min}/S_N P_0=0.01$, 即用纯氩可检出其漏率仅相当于系统真空泵总等效氮负荷 1% 的微小漏孔。上述计算结果与用氩对冷焊系统进行实际 B-A 计检漏时所表现的高灵敏度是一致的。试验中曾用氩罩迅速检出了氮罩未能检出的玻璃芯柱漏孔, 用往密封垫四周注入纯氩的方法迅速检出了用注水堵漏的方法未能检出的法兰密封漏气, 并且通过采用相应措施消除了漏气, 使系统的真空度迅速达到了 3×10^{-8} Pa 以上。理论和实际都充分证明, 用氩作示漏气体的 B-A 计检漏法, 足以保证离子泵系统的漏气率远小于系统自身的放气率。

当系统压力进入 10^{-7} Pa 以后, 升华泵蒸钛后可维持较长时间的稳定抽速, 可以在离子泵和升华泵联合抽气的条件下进行 B-A 计检漏。此时泵对工作室内氩的氮相对抽速更小, 检漏灵敏度更高。曾在一次试验中, 在离子泵和升华泵正常工作以后系统压力仍停滞在 9.3×10^{-8} Pa, 认为是新安装的升华器法兰(图 1)的垫圈密封漏气。用真空封泥将法兰连接处的环缝围住后对密封部位进行对流充氩检漏时, 充氩 5 min 后 B-A 计的压力示数变到了 5.3×10^{-6} Pa 的基本稳定值, 说明此法兰密封明显漏气。进一步压紧法兰密封垫后消除了漏气, 系统压力迅速降到了 3.2×10^{-8} Pa。

在上述检漏试验中, 漏气流进入真空系统后部分直接被升华泵抽走, 其余部分穿过升华泵进入冷焊工作室, 然后再被离子泵和升华泵抽走(图 1)。根据上述实测数据, 漏气流在工作室内形成的等效氮压力 $\Delta P_0=6.1 \times 10^{-8}$ Pa。设在 10^{-8} Pa 压力下升华泵对 N_2 和 O_2 的抽速不变, 对 Ar 的抽速为零; 溅射离子泵对氮的抽速降为 70%, 对氧和氩的氮相对抽速分别为 0.74 和 0.25。则两泵对工作室内氧和氩的总有效氮相对抽速分别为 0.99 和 0.0096。漏气流穿过钛升华泵进入工作室的几率对氩近似为 1, 对氧和氮约为 0.5。若取 $R=0.02$, 则根据以上数据按分子漏孔计算, 可求得系统综合因子 $A=1.6$, 氩的气体综合因子 $F=119.3$, 最小可检漏率 $q_{min}=2.1 \times 10^{-8}$ Pa·L/s, 用纯氩检漏时 B-A 计指示的压力的变化量 $\Delta P=4.5 \times 10^{-6}$ Pa。不难发现, ΔP 的计算值与实测结果 5.2×10^{-6} Pa 相当接近。

3 小结

建立了以大气中各气体组分漏率为基础的电离真空计检漏灵敏度公式。理论和实际都证明, 对溅射离子泵系统采用氩作示漏气体的 B-A 计检漏法既简单易行又具有很高的灵敏度, 足以保证真空系统的漏气率远小于系统自身的放气率。

参 考 文 献

- 1 达道安主编. 真空设计手册. 北京: 国防工业出版社, 1991
- 2 胡汉泉、王迁. 真空物理与技术及其在电子器件中的应用. 北京: 国防工业出版社, 1982
- 3 王欲知. 真空技术. 成都: 四川人民出版社, 1980
- 4 Katsuya Nakayama, Hisao Hojo. Relative ion gauge sensitivities to various hydrocarbon gases. 6th Intern. Vac. Congr., 1974; 113

作者简介: 刘命辉, 57 岁, 高级工程师。曾从事电子学、质谱、真空冷焊和磁力传动等方面的研究工作, 现从事空间机械润滑研究。研究试验成果颇多。负责研制的无油超高真空摩擦试验机 and 75 kW 磁力泵均达到了国际水平, 并获部科技进步二等奖。