SF_6在2700帕以后的抽速曲线中中间未测时间部分不会大于5升／秒的抽速。我们在试验中所用的无油泵是单台串联结构。

三、小　结

对真空工作者来说，SF_6气体充放回收试验的意义超过了原实用试验的目的。因为我们的实验回答了两个问题：1.无油泵在粗真空的抽气，对于重质气体的极限真空度不会降低，而且会提高。这是因为重气体分子密度高、返流减少的原因。如果将无油泵组成真空机组，在我们的实验的中间抽气阶段同样优于本机组抽空气的性能。这与分子泵中分子碰撞机理一样，重质气体分子有较大的碰撞动能；2.从本系统来看，抽氮气达到2000帕是15分41秒；抽SF_6气体为80分钟达到2000帕。这与气体的分子量几乎成同一比例关系。

参加本试验工作的有周福成、万胜、王力生、庄余昌、郭建军、杜雪春、陆剑飞等同志。

受控热核聚变装置中的真空测量技术*
——抗干扰快速规性能研究

李旺奎　刘强　丁立华　章其中

（兰州物理研究所）

主题词：核聚变、真空度测量、真空计、等离子体

内容提要：受控热核聚变和等离子体物理研究装置中的真空测量是一种特殊环境下的真空测量。简要介绍了真空测量在等离子体容器中的应用和意义。对这种特殊环境进行了描述，并对如何解决这些复杂环境中正确可靠地测量压力（密度）提出了意见。

等离子体物理研究装置中存在着很强的磁场和各种带电粒子、快速中性粒子、中子，高能光子等的强烈干扰，要正确、可靠地测量容器中的压力（密度），必须研究抗干扰测量技术。此外、装置中气体状态处于非平衡气流条件下，被测的气体分子既是空间位置的函数，也是空间方位的函数。容器中气流瞬变，要求测量必须快速。

介绍了已研制成功的快速抗干扰真空规。这种规采用了几何屏蔽和脉冲调制抗干扰技术并利用了环境中的磁场强度，进一步提高了抗干扰能力。这种规还在入口采用威尼斯平行叶片百叶窗的结构和纵横交叉的电场屏蔽，保证了入口的气体流导，既解决了快速测量问题，又解决了抗干扰的要求。

在受控热核聚变和等离子体物理研究中，中性气体压力（密度）的测量，具有重要的意义。

中性气体压力的大小和变化，直接影响等离子体的密度、稳定性、涨落、能量运输和离子寿命。

中性粒子与等离子体中离子、电子、电磁辐射之间的直接相互作用能引起能级激励、分解、电离和电荷交换，阻碍着等离子体的累积，必须去研究控制中性气体密度的问题。

* 1986年11月收到

等离子体中射出的快速中性粒子、带电粒子、中子和高能光子强烈地轰击器壁，引起解吸、溅射和反散射。从壁面上发射出的大量中性粒子是杂质的主要来源，它可导致等离子体能量损失和冷却，测量发射出的中性粒子流，是研究第一壁材料性能的主要手段。

测量等离子体与器壁之间的中性气体密度，研究等离子体与中性气体之间的交流过程，在分析等离子体物质平衡的基础上，可以确定离子寿命。

了解等离子体附近的中性气体密度，对于估计受约束等离子体内的各种扩散过程的速率是十分必要的。

中性粒子注入是提高等离子体温度的重要二次加热手段，并要求快速注入，以减少液氦冷凝泵的冷损。因此，必须监测注入器源头、中和室和漂移管处中性气体压力的分布和变化。

脉冲充气和补充充气过程中，对中性气体时间和空间分布的测量，对于研究快速阀门的性能，找出影响充气压力、流速、波形的因素是十分必要的。

然而，不论是等离子体外的包壳中，还是中性粒子注入器和脉冲充气系统中的中性气体压力（密度）的测量都是特种条件下的真空测量。在气流状态、变化速率、环境条件、压力范围等方面各具特色，要求视其具体情况采用不同结构的测量工具，来解决一系列特殊的测量技术问题。

一、特　征

受控热核聚变和等离子体物理研究装置中的真空测量，将遇到如下一些特殊环境：

（一）非平衡气流状态

（1）定向气流——非动力学平衡

由于装置的中心是受约束的等离子体柱，容器壁面具有部份抽气性能（钛膜或低温表面），在两者之间是中性气体包壳，所以中性气体压力不但是空间位置的函数，还是空间方位的函数。这种非平衡情况下气体压力P与气体密度n之间没有明确的关系。

（2）不等温——非热力学平衡

由于中心等离子是炽热的，而外壁是室温或低温，致使装置中有一很大的温度梯度（非均匀的温度分布）。因此，热力学平衡也遭到破坏。

（3）瞬变气流——非气相-吸附相平衡

等离子体收缩的瞬间将形成强烈的抽气效应，等离子体中发出的快速中性粒子、带电粒子、高能光子轰击器壁使其发射出的中性离子流以及脉冲充气、补充充气和中性粒子注入都能形成随时间改变的瞬变气流，所以气相-吸附相的平衡也遭到破坏。

由于非平衡气流状态下，通常稳态中压力与密度n间的关系式$P = nkT$不成立，气体能量流的温度密度也不均匀，此时迁移现象相当复杂。瞬变气流和规管相互作用的问题以及瞬态校准中静态与动态性能的差异等等都给测量带来很大困难。

（二）干　扰

复杂而变化的电磁辐射和带电粒子辐射，强烈地干扰测量线路的正常工作。带电粒子、快速中性粒子和中子、高能光子（紫外辐射和x射线）渗入到测量管中，引起的二次电子发射有时比有用信号高2～3个数量级，干扰着规管的正常工作。

（三）磁场环境

强磁场和变化磁场的存在，改变规的性能特性，为了适于在磁场下工作，要求规具有特殊的结构。

二、测 量 技 术

由上可知，受控热核聚变和等离子体物理研究装置中的真空测量是十分复杂的。下面我们将从三个方面来讨论特殊环境下的测量问题。

在受控热核聚变和等离子体物理研究中，抗干扰快速真空测量几乎都采用不同结构的电离规。因此，我们仅讨论采用电离规的测量技术。

（一）非平衡流测量

受控热核聚变和等离子体物理研究装置中各种因素引起非平衡状态，所以，在该装置中的真空测量，要视不同的测量对象和目的，采用不同的规管结构，布置不同的测量位置和方位，研究解决不同的测量技术问题。

图 1 列出了各种类型的电离规，以便简述其各自的作用：

规 1 为裸电离规，可测空间平均分子密度，具有方向性。规 2 在裸电离规前加一块遮板，可屏蔽从中心等离子体来的粒子流。规 3 是裸BA规，可测空间平均分子密度，不具有方向性。规 4 较规 3 多一遮板。规 5 具有同轴圆环叶片形百叶窗屏蔽结构，可抗辐射干扰。规 6 、7 、8 为转换器规，可测定向气流密度。规 9 、10 是具有平行叶片形百叶窗结构的抗干扰规，可测定向气流密度。

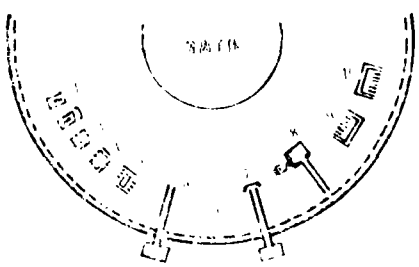

图1　各种类型的电离规

（二）磁场中的真空测量

磁场的存在可以改变规管的性能特性。可以通过使规电场平行磁场来降低磁场的影响，也可以使规中电场垂直磁场，这样就能利用磁场的作用，提高规管的灵敏度。

（三）抗干扰原理

在受控热核聚变和等离子体物理研究装置中，除了解决非平衡气态和强磁场环境下的测量问题外，抗干扰性能如何是测量中十分重要的环节，前面曾谈过干扰引起的噪声往往比有用讯号高 2 ～ 3 个数量级，如何把淹没在噪声中的有用讯号分辨出来？这是我们所要讨论的问题所在。从规管角度来讲，抗各种粒子干扰的方法有三种：

1.提高规管灵敏度，以提高信噪比

通常是采用磁控电离规来达到此目的，但是，磁控电离规性能非线性和不稳定，测量可靠性差。另一方面，高灵敏度的电离规，按其本质来说就是一个完善的带电粒子阱，因此，从外部进入规中的带电粒子有效地被陷捕在规的电极系统中，从而引起附加的气体电离。同时，在高灵敏度规中，为避免空间电荷效应产生的不稳定性，只能使用小发射电流。其结果，有用讯号的增长比一般三极管型电离规仅大 1 ～ 2 个数量级，限制了规管抗干扰能力。

2.几何屏蔽

用屏蔽罩把规管包围起来，入口处还可以形成电场加以阻止各种干扰粒子的进入，这是一

种有效的抗干扰方法。但是，屏蔽效率高的密实结构，增大了规管的气体动力学时间常数，降低了规管的反应速度，并使规内出气效应引起更大的测量误差。所谓威尼斯百叶窗结构——平行叶片形结构，既具有良好的屏蔽效果，又具有较大的气体流导，较好的解决了上述矛盾。图2示出了三种形式的结构。

对三种结构的抗干扰性能，进行了实验测定，结果如下：

(1)A形结构（环片型）

当直射干扰离子流（与叶片平行）的能量为800电子伏，环形叶片接地，磁场B＝1000高斯，环形叶片阻挡住94%的离子进入。如在相邻两叶片间加电压，抗干扰能力还会大大增强。

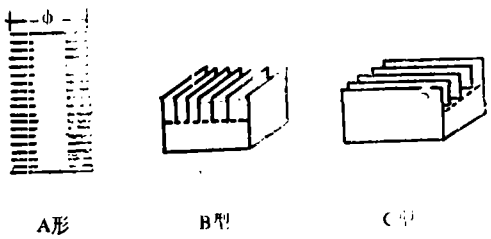

图2　三种形式的百叶窗结构

(2)B形结构

当直射干扰离子流能量为300电子伏，磁场B＝0，各极接地，阻挡干扰离子流进入各极所起的作用为：外壳占77%，内盒占3%，平行叶片占15%，仅有5%的离子能达到收集极。如在相邻叶片间加正200伏电压，到达收集的干扰离子又下降3个数量级，为总直射离子流的0.005%。

当直射干扰电子流能量为400电子伏，磁场B＝0，各极接地，阻挡干扰电子流进入各极所起的作用为：外壳网口占78%，内壳网口占2%，平行叶片占19.8%，仅有0.2%的干扰电子能到达收集极。如在相邻叶片间加正300伏电压，到达收集极的干扰电子流又下降4个数量级，为总直射电子流的0.00002%。

如磁场B不等于0，抗干扰能力还会增强一个量级。

(3)C形结构

当直射干扰电子能量为300电子伏，磁场B等于0，各极接地，阻挡干扰电子流进入各极所起的作用为：外壳网口占61%，内壳网口占10.6%，平行叶片占28.2%，仅有0.2%的干扰电子能到达收集极。如在相邻叶片间加正300伏电压，到达收集的干扰电子流又下降了数量级，为总直射电子流的0.002%。

3.交流调制法

对规中有用信号进行交流调制，是十分有效的抗干扰方法。在电离规中，只需在阴极与电子加速栅之间，增加一调制栅，并在调制栅上加一高频电压（正弦波或矩形脉冲），就可实现对阴极发射的电子流进行调制。假定电子在电离空间的渡越时间与调制电压周期相比可以忽略，那么此调制电子流电离中性气体产生的离子流（有用讯号）也具有同样的频率并且相位一致。调制频率应选译在噪声信号最小的频段，如采用窄频带放大器进行测量，就可以滤去干扰信号，具有很高的抗干扰能力。

在采用调制法的电离规中，本底电流除已知的x光电流和电解吸离子流外，还存在下述两种新的本底电流。

(1)容性电流

调制栅与离子收集极之间存在一极间电容C_1，当调制栅上加有交流电压时，则通过C_1耦

合，在离子收集极回路中产生一容性电流I_1，如设规为同轴圆柱形电极结构，调制电压$V=V_0\mathrm{Sin}\omega t$，则

$$I_1=\frac{a_1L}{2ln r_k/r_g}V_0\omega\mathrm{Sin}(\omega t+\frac{\pi}{2}) \qquad (1)$$

其中：L为电极高度；rg为调制栅半径；r_k为收集极半径；a_1为小于1的常数，由加速栅的屏蔽作用来计算；I_1超前调制电压$\pi/2$。

(2)感应电流

在电离空间（加速栅～收集极之间）被调制的电子所形成的负空间电荷的变化，在收集极回路感应出一感应电流I_2，此负空间电荷变化的性质取决于调制深度，并与调制电压相位基本相同，因此I_2滞后调制电压$\pi/2$。

可以采用调制各极电参量的方法，使I_1与I_2相消。亦可采用极间屏蔽的方法，减少I_1和I_2的作用。

三、影响规管快速反应的因素

1.离子渡越时间

假定离子在同一位置产生的初始动能为零，从加速场中所获动能为：

$$E=\frac{1}{2}m_iV_i^2=eV \qquad (2)$$

其中m_i、V_i 为离子质量和速度；e为离子电荷量；V为加速电压。

如从产生离子处到收集极之间的距离为L，则渡越时间t为：

$$t=L/V_i=L\ (m_i/2eV)^{\frac{1}{2}} \qquad (3)$$

对于通常结构的电离规，t小于1微秒。由此可知，从原理上看，电离规是一种良好的快速规，反应速度能够快到微秒量级。

2.发射电流稳定时间

电离规正常工作时，要求发射电流稳定。但是，在测量瞬变气流时，由于气流瞬时到达，使热阴极冷却，以及电离产生的离子在阴极附近瞬时构成正电荷缓冲层，把阴极相对栅极的负电位一时屏蔽起来，从而导致电子流急剧下降。通常采用的稳流原理是用反馈信号去控制阴极加热电流，以改变阴极温度来达到稳流的这种温控法反应时间为毫秒量级，满足不了快速测量的要求。应该采用使阴极处在更高温度，工作在空间电荷限制的状态下，反馈信号去控制贮存在阴极附近的空间电荷（电子云）来达到稳流的目的，这种方法反应时间取决于线路的反馈速度和电子的渡越时间，适于快速测量。

3.调制电压频率与反应时间

采用调制的抗干扰电离规，调制频率下限的选择，还应满足反应时间τ的要求：

$$f>1/\tau \qquad (4)$$

频率f的上限取决于线路的RC，过高会引起寄生效应，一般选为10千赫，这样使规的反应时间不会快于100微秒。

4.气体动力学时间常数

对于孔型入口管规，当入口面积A_0与规表面积A相比很小时，规内分子经受的碰撞次数可以使分子速度场恢复各向同性。因此，规中压力变化过渡过程可写为：

$$V\frac{dp}{dt}=(p-p^*)C_0 \tag{6}$$

$$p=p^*+(p_0-p^*)exp(-C_0t/V) \tag{7}$$

$$\tau=V/C_0 \tag{8}$$

$$h(t)=\frac{(p-p^*)}{(p_0-p^*)}exp(-t/\tau_0) \tag{9}$$

其中p^*为$t\longrightarrow\infty$的规中平衡压，C_0为规孔流导，V为规的体积，τ_0为规的气体动力学时间常数，h(t)为过渡特性函数。

当$A_0\approx A$时，由于规中分子速度场各向异性的增长，过渡特性偏离指数函数，不能用上式进行分析，而要用蒙特卡罗方法进行研究。图3所示的实线是对具有威尼斯百叶窗入口结构的管规的过渡特性，虚线仍按$exp(-t/\tau_0)$计算。比较两曲线可知，偏离不算大，在最不利的情况下，时间常数约偏低τ_0的25%。对于图3所示的结构，τ_0约等于100微秒。

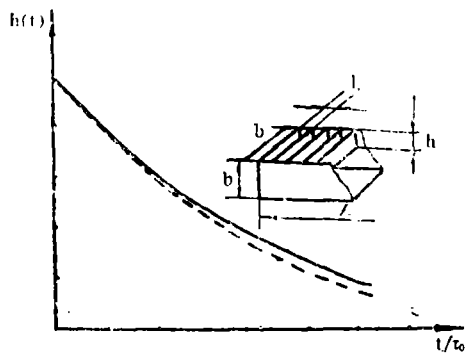

图3

5.气相——吸附相平衡时间

对于瞬变气流，规中的气相——吸附相平衡遭到破坏，因此，规中压力的过渡特性还取决于吸附分子在规壁上的平均滞留时间τ_1和吸附时间常数τ_2，$\tau_2=V/S'$。S'相当于规表面的抽速。

6.测量线路的反应时间

测量微弱离子流的线路反应时间主要取决于放大器输入端的杂散电容和反馈电阻周围的分布电容。如离子流信号十分微弱，快速测量要求采用高增益的二次电子倍增器，记录方式要求采用示波器拍照。

四、三种快速抗干扰规

研究受控热核聚变和等离子体物理研究装置的真空测量技术与研制新型的快速抗干扰规性能是不可分开的，下面介绍我们研究的三种快速抗干扰规的性能。

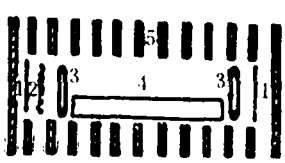

图4

1.反射极；2.阴极；3.阳极；
4.收集极；5.环形屏

1.环形屏蔽磁控型抗干扰快速规

(a)结构

这种规采用了环形屏蔽结构，其叶片为0.2毫米厚的钼片制成外径420毫米，内径10毫米的圆环，片间距为2毫米，组成40毫米长的屏蔽环体，规管电极系统在环的内径中(图4)。

(b)规的特点

本规适于低磁场(几千高斯)装置中使用，它有效地利用装置本身的磁场，增大电子行

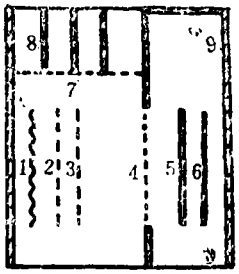

图5　1.阴极；2.调制极；3.阳极；4.屏栅；
5.抑制极；6.收集极；7.屏蔽片；8.外壳

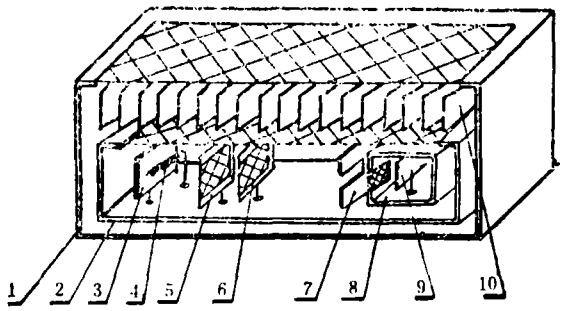

图6

程，提高规管灵敏度，使K＝30帕$^{-1}$。该规百叶窗形屏蔽无方向性，适用于测量中性气体密度，没有测量方向性气流的能力。其反应时间较快。

2.平行板方向性屏蔽抗干扰快速规

(a)　规的结构

规的电极系统屏蔽在一个直径为40毫米的不锈钢筒中，筒的上端有1/3部分被隔开并封死，其余开口部分装上了平行叶片形的百叶窗。收集极藏在被封死的1/3小盒之内（图5）。

(b) 规的特点

本规的电极电场E平行于磁场B，适用于强磁场装置中使用。为使该规有较强的抗干扰能力，采用了调制电子流和屏蔽结构，并使屏蔽筒单向开口，适于测量方向性气流。这种规对本身出气很敏感，反应时间也较慢。

3．电场型方向性屏蔽抗干扰快速规

(a) 规的结构

规的结构示意图6中。

其中1为外壳，用厚0.1毫米不导磁的不锈钢片制成。一面为网状结构，被测气体由此而注入。此极起屏蔽带电粒子和磁场作用，接地。

2为内壳，用厚0.1毫米钼片制成，一面亦为网状，电位与加速栅6相同。内壳与加速栅一起构成了电离空间，内外壳网状间构成纵向电场，对带电粒子起屏蔽作用。

3为电子反射极，用0.1毫米厚的不锈钢片制成，其电位低于阴极，以保证电离的电子可以多次使用。

4为阴极，用敷氧化钇——铱丝制成，直径0.1毫米，长为10毫米。

5为调制栅G_1，用直径为0.2毫米钼丝制成，渗透率为95%，其上加一频率为10千赫，辐值为240伏的矩形脉冲电压，对电子流进行调制。

6为加速栅G_2，用直径为0.2毫米钼丝制成，渗透率为95%。上加一直流电压，以保证在电离空间中电子能量对应最大的电离几率。其所收集的电子流，用来监测电离的电子流。此栅还起屏蔽调制栅和离子收集极的作用，以降低两者之间的极间电容C_1，从而减小调制信号对有用信号的干扰。

7为准直孔，用0.2毫米厚的不锈钢片制成，接地，使不平行于电力线的离子很难到达收集极，以降低磁场的作用。

8为收集极屏蔽盒，不锈钢片制成，接地。对离子收集极起屏蔽作用，其小孔开口处有

网状结构，进一步降低C_1和C_2的作用。

9为离子收集极，要求对其规内外的引线都要严格地屏蔽，以防调制信号和其它信号的干扰。

10为平行叶片，用0.2毫米厚的不锈钢片制成。相邻两叶片加以不同极性电位，形成横向电场，以阻止干扰的带电粒子和光子的进入。这种结构具有较大的流导，其气体动力学时间常数约100微秒。

(b) 规的特点

本规采用了调制法和平行叶片加纵横交叉电场的屏蔽，具有很强的抗干扰能力，适于在等离子体附近工作。由于采用平行配置的电极系统，使电场与磁场平行，减小了磁场对规性能特性的影响，适于在强磁场下工作。规一面开口，可测定向流密度。其缺点是结构复杂，自身出气敏感。

(c) 性能特性研究

(1) 各极电参数

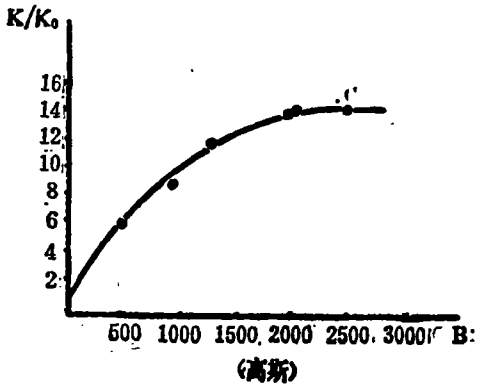

图7

外壳、准直孔、收集极屏蔽盒、收集极等都接地。

阴极为+25伏，反射极为－435伏。调制栅加一矩形波脉冲电压，辐值为+204伏，频率为10千赫。加速栅为+175伏与内壳等电位。

(2) 灵敏度

在无磁场时，工作在上述电参数中，灵敏度为0.278帕$^{-1}$。

在磁场不等于0时，灵敏度随磁场的增大而增大，逐渐地达到饱和，饱和后再不随磁场变化（图7）。

(3) 量程

灵敏度K在10^{-1}帕至10^{-5}帕范围内成线性。如果要扩展此规的下限。可在收集极前增加一抑制极。

(4) 反应时间

规的气体动力学反应时间常数据由(7)式算出，约等于100微秒。

(5) 脉冲调制特性

规管内外部严格屏蔽是清除调制信号对收集极信号干扰的关键，在电极设计、装架、芯柱结构等方面必须给予仔细的考虑。

（上接第6页）

〔3〕Miller H. C., IEEE EI-15 (1980) 419
〔4〕Latham R. V., High Voltage Vacuum Insulation: the Physical Basis, (1981)
〔5〕Chatterton P. A., Proc. 3rd Inter. Conf. on Electrostatic Accelerator Technol., (1981)77
〔6〕胡汉泉等，真空科学与技术，2 (1983) 153
〔7〕Chatterton P. A., NIM200, (1984)73
〔8〕Lafferty J. M., Vacuum Arcs, (1980)20
〔9〕Mckinben J. L., Phys. Rev., 82(1951)315
〔10〕Joy T., Proc 3rd Inter. Conf. on Electrostatic Accelerator Technol., (1981)87