

极高真空技术

一九八一年八月

出版说明

一九八〇年九月，中国真空学会派出真空技术代表团，参加了在法国戛纳举行的“第八届国际真空会议”、“第四届国际固体表面会议”和“第三届欧洲表面科学会议”。这是我国第一次参加这类学术会议，并发表了学术报告。通过会议和考察，对国外极高真空技术、真空测量、清洁真空技术，以及薄膜技术等有了较深的了解，收获较大。

代表团回国后，对真空技术等方面进行了认真的总结，并分别写出专题报告，为了促进我国对于真空技术方面的研究，特编辑出版供各部门有关同志参考。

目 录

一、极高真空技术与极高真空物理的发展.....	1
二、真空测量研究的动向.....	10
三、材料出气.....	27
四、清洁真空技术.....	34
五、薄膜技术简介.....	48

极高真空技术与极高真空物理的发展

达 道 安

极高真空技术是现代真空科学的前沿，它拓展了一个崭新的学科领域。在极高真空中，分子密度非常稀薄，空间异常清洁，清洁表面吸附一个单分子层气体需要数年以上的時間。在此环境中，物理学家和工程技术人员得到了空前的优良条件，取得了以前无法取得的实验结果。在空间科学、表面物理和加速器工程上已经成功地应用了这一技术，并取得了很大进展。因此有人估计八十年代将是极高真空技术走向实用化的时代〔1〕。

由于极高真空技术领域新，难度大，工业生产技术尚不能完全适应它的发展。因而各国投入这方面研究工作的人力物力都很有限，第八届国际真空会议上这方面的论文还不到五篇。其中我国就占了二篇〔8, 9〕。会议以后，我们参观了一些研究所和大学，因法国在极高真空方面几乎没有开展研究工作，因此很难概述这个领域的动态。回国后，我们又调研了近年来美、日、英等国极高真空方面的文献，再结合这次会议的论文以及会上会下参观交谈中的资料整理成文，供有关方面参考。

一、液氮冷凝泵

液氮冷凝泵的主要问题是液氮蒸发量大，运转费用高。对一个贮量250升的液氮泵，日消耗液氮量25升左右。欧洲核子中心（CERN）对液氮冷凝泵进行了改型〔2〕，用一个由蒸发的氮气冷却的防辐射屏来保护氮容器的侧面和上部表面，它可以使液氮消耗量减小2~12倍（视泵的几何尺寸而异）。改进型的液氮冷凝泵将两次注入液氮的时间间隔延长了一个量级，工作时间约为200天。改进液氮冷凝泵设计时有以下几方面的考虑：

- （1）低温表面镀银以减小辐射热损，降低氮的解吸压强；
- （2）采用液氮冷冻的障板减小室温辐射传输；
- （3）为了防止液氮面变化而引起氮容器侧表面的气体解吸，用了一个双层壁防护。两层壁之间的空间在冷却过程中充以氮气使外层壁能较快地

冷却下来，待容器完全冷却下来时，把壁间抽成真空以使外壁的温度受液氮面变化的影响很小。

加障板以后，抽气表面对氢和氮的比抽速分别为 $9 \text{ 升/秒} \cdot \text{厘米}^2$ 和 $3 \text{ 升/秒} \cdot \text{厘米}^2$ 。两种尺寸的液氮冷凝泵的总抽速（对氢）为 4500 升/秒 和 27000 升/秒 ，其贮液氮量分别为 10 升 和 75 升 。工作在 4.2°K 的寿命分别为 40 天 和 80 天 。当减压工作在 2.3°K 下时，其寿命大约降低 20% 左右。

未改型前的泵叫第一代泵，如图 1-1 所示。

第一代泵氮的耗量主要由于液氮保护面所发出的辐射引起，而液氮表面又全部包围了液氦容器。原来设计这样大的液氮表面想增加泵的抽速，实际上由于通导的限制，在直径与高度相等的一个液氮容器中，抽气表面的面积仅为保护壁面积的 20% 。该设计增大了热损失而抽速并不能加大。另一方面蒸发的液氮仅有一小部分相变焓差的冷量被利用，而大部分冷氮气却沿氦容器的胫管被放掉了。

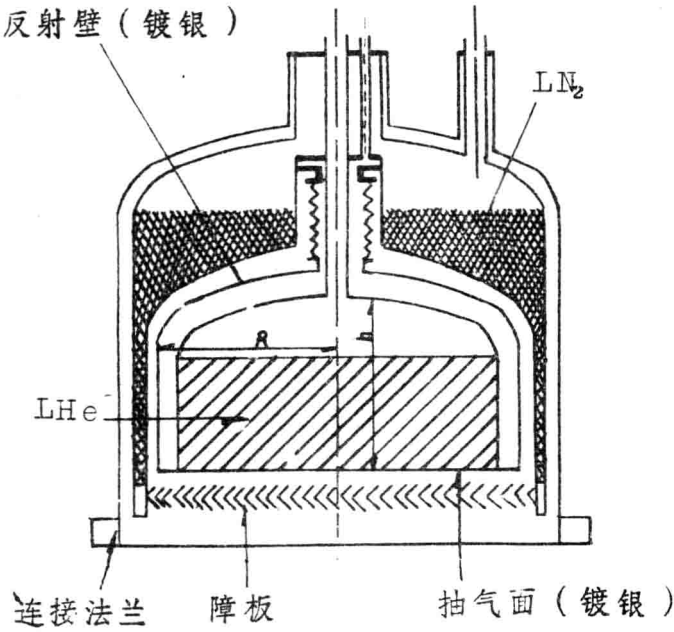


图 1-1 第一代 CERN 冷凝泵

改型后的泵叫第二代泵，采取的改进措施是利用蒸发的氮气的冷量，减小液氮保护面而代之以更低温度的保护屏。它是一个圆柱体的屏，和胫管连接在一起用冷氮气冷却它，它位于液氮屏和液氮容器之间如图 1-2 所示。根据计算及实测，该屏在泵工作时，温度约为 28°K 。液氮贮存容器间所含的空间充以氦气后封死。它在 27.2°K 以上是气态，导热性好，使外壁迅速冷却。但当容器中有液氮出现，温度低于 27.2°K 时，氦气液化，

在 4.2°K 下氦的蒸汽压低于 10^{-1} 帕，从而形成高真空状态，这个作用叫热开关。为了保证良好的热开关，充氦时必须注意充氦的压强和氦气中的含氮量，否则将破坏氦的热开关作用。

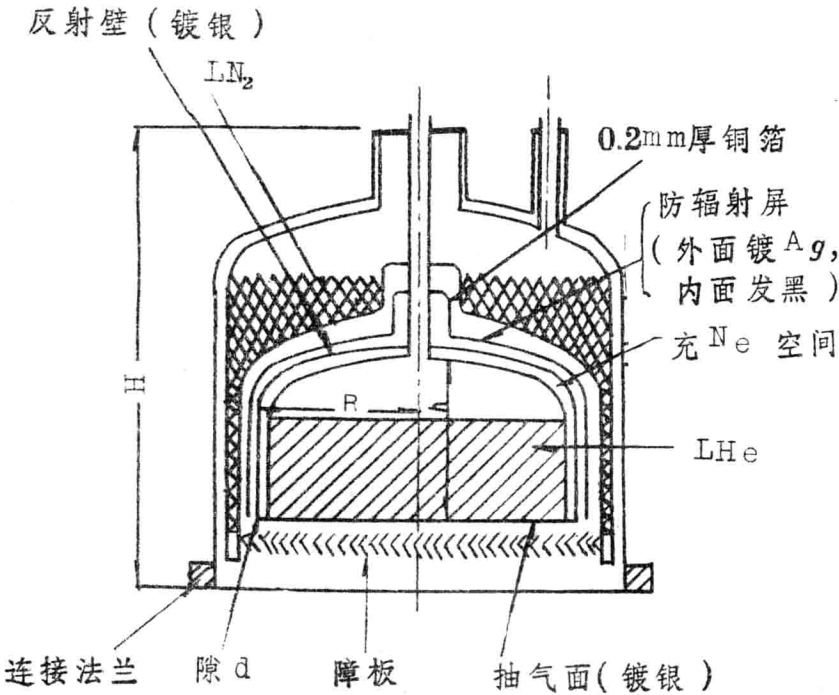


图 1-2 改型后的液氮冷凝泵

经过改进的液氮冷凝泵在技术上达到了良好的程度，为推广应用开拓了前景。改进型泵的特性如表 1-1 所示：

表 1-1 两种尺寸液氮冷凝泵的特性

参 数	泵 2R20	泵 2R13
外径 (mm)	50	32
总高 (cm)	~100	~86
R (cm)	20	13
h (cm)	29	28

有效容积 (升)	3 2	1 2
液氮耗量 (毫升/天)	156±20	63±8
寿命 (天)	205±27	190±25

该冷凝泵经过烘烤可以达到 10^{-12} 帕的压强。由于氢在 4.2°K 下的饱和蒸汽压为 5.7×10^{-5} 帕，因而，不能有效地排除氮、氖、氢。如果在冷凝面上予先凝结一层霜，就能有效地排除这些气体。特别是 CO_2 冷凝霜能作为很好的氢吸附剂，或者在冷凝面上粘结一些吸气剂，如活性炭、分子筛等同样能得到很好地排除氮、氖、氢的效果。

二、极高真空测量

极高真空测量主要用冷阴极磁控规、调制 B-A 规及分离规。

1. 冷阴极磁控规具有非线性效应以及在极高真空下的熄火特性，测量结果可信度差。

2. 调制规的调制因子需要在高压强下，剩余电流和离子流 i_1 比较可以忽略时测定。调制 B-A 规是 Redhead 在 B-A 规的离子收集极旁插入一个细丝，该细丝叫调制极。它可以交替接上栅极和收集极电位以改变流入收集极的真正离子流。当调制极电位 V_M 和栅极电位 V_G 相等时，收集极电流不改变。当调制极电位 V_M 和收集极电位 V_C 相等时，离子流中有 30~40% 流入调制极。于是有

$$V_M = V_G \quad \text{收集极电流 } I_1 = I_i + I_r$$

$$V_M = V_C \quad \text{收集极电流 } I_2 = \alpha I_i + I_r$$

式中 α 叫调制因子，它与 I_i 、 I_r 及压强无关。真正的离子流 $I_i = \frac{I_1 - I_2}{1 - \alpha}$ 。

当调制极改变电位时，剩余电流 I_r 不发生变化，才能求出真正离子流。实际上由于调制极电位的变化， I_r 多少有些改变，这就限制了测量的极限，目前用此方法可以测量到 4×10^{-10} 帕。该种规管存在的主要问题是 [3]：由于收集极周围的陡峭的势场很难受调制电位的影响，因此光电流没有被调制。Redhead 认为从栅极上解吸的气体产生的离子流也没有被调制。调制极的出气也是一个问题，这些因素限制了调制 B-A 规的测量下限。

3. 分离规的基本原理是把收集极放在栅网外边，使 X-射线不易到

达。收集极的离子是由栅区分离出来而达到收集极的。此时剩余电流能降到被测压强所允许的程度。常见的设计是将收集极放置在栅网尾端出口处，通过尾口来分离。好处是通过尾端的收口限制了直接看到收集极的视角，从而减小了X-射线光电流。

4. Helmer把一个静电场加在一个出口缝隙上，使离子弯曲 90° 从而达到分离，我们叫做弯注规，其基本结构示于图1-3。此时X-射线仅能通过反射达到收集极。他又多附加了一个抑制极以抑制二次离子产生的电流。二次离子电流是由于离子轰击反射系统的电极而产生的，它也影响压强测量。近年来的实践证明，弯注规具有测量极高真空度的前景。商业上出售的弯注规极限测量压强为 10^{-10} 帕，限制因素主要是钨灯丝的蒸气压，灯丝的紫外辐射，玻壳渗氦，热解吸的气体及电解吸的气体等原因。近年来，CERN（欧洲核子研究中心）对此规管作了改进〔4〕，提高了灵敏度，使测量下限延伸到 10^{-12} 帕，他们主要改进了以下几点：

(1) 把钨丝改为敷钍阴极，

并将发射电流由原来的10mA降为4mA。由于该材料电子发射率高，这就大大降低了灯丝温度。

(2) 增加规管的灵敏度。

主要是加大栅网尺寸，采用圆柱体封闭型，其直径为35mm，长45mm，用 $\phi 0.13\text{mm}$ 的铂-铱丝，间距2mm绕制。实验确定了栅网电离效率最佳的电参数为： $i_e = 3\text{mA}$ ， $V_G = +150\text{V}$ ， $V_D = -600\text{V}$ ， $V_S = -100\text{V}$ ；（ V_S 为抑制极电位）。此时规管灵敏度为 0.32帕^{-1} ，即 4.2托^{-1} 。为了减少

离子从栅网区到达收集极时沿途的损失，必须由实验确定栅网下端和

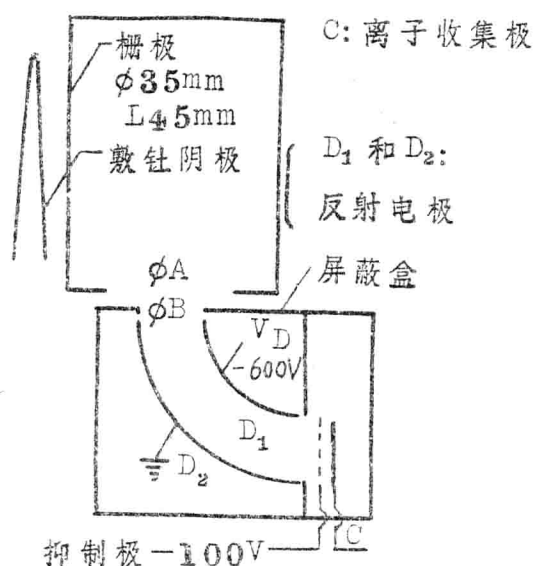


图1-3 弯注规结构图

屏蔽盒入口直径的比。结果认为栅网孔径A是20mm，屏蔽盒入口直径B是6mm为最适当。

(3) 降低剩余电流。在极低压强下，从收集极测量到一个负电流 I_1 ，Helmer 认为它是由于 D_2 反射的X—射线打到抑制极而分离出的电子，通过选择 $B = 6\text{ mm}$ ，降低了反射的X—射线，增加了抑制极的渗透性。使 I_1 从 $-4 \times 10^{-15}\text{ A}$ 降到 $-2 \times 10^{-16}\text{ A}$ ，后者在 $i_e = 3\text{ mA}$ 时相当于 2×10^{-13} 帕的压强。

(4) 降低热出气。规管中的屏蔽盒及电极很难用电子轰击彻底去气，因而装架前须进行仔细去气。如果在 10^{-5} 帕的真空炉中 950°C 下去气，规管的出气影响可以小到 10^{-12} 帕，已用不同发射电流测量同一压强的方法证实。

总之，改进后的弯注规适于测量 10^{-12} 帕范围的压强，其精度小于 2×10^{-12} 帕。在 $i_e = 3\text{ mA}$ 时， 10^{-12} 帕的压强相应于 10^{-15} A 的离子流。

三、极高真空中使用的材料

极高真空中使用的材料放气率要求非常的小，因此选材和适当的表面处理就变得非常重要。在材料方面，这次会议上报告了 AlMg3 合金 [5]，它不需要经过予处理，和不锈钢及铜在 825°K 、 10^{-6} 帕下真空处理 72 小时的出气率一样，均为 10^{-13} 帕·米·秒⁻¹。实测的结果如表 1-2 所示。

表 1-2 不锈钢、无氧铜、 AlMg3 的出气率 (10^{-13} 帕·米·秒⁻¹)

出气成分 材料	H_2	H_2O	N_2/CO	O_2	CO_2	予处理
不锈钢	1.6	0.015	0.015	<0.014	<0.014	喷砂, 825°K , 10^{-6} 帕, 72 小时
无氧铜	0.6	<0.014	0.016	<0.014	<0.014	
AlMg3	9	0.025	0.083	<0.014	<0.014	未处理

注: $1\text{ 帕} \cdot \text{米} \cdot \text{秒}^{-1} = 10^{-3}\text{ 托} \cdot \text{升} \cdot \text{秒}^{-1} \cdot \text{厘米}^{-2}$

这三种材料的放气成分主要是 H_2 ，尽管 AlMg3 比前两种材料放氢量大 6~15 倍，但使用 AlMg3 材料作极高真空系统的材料至少有以下好处：节省费用，减轻重量，不需要任何机械和热处理。因此用铝合金代替

不锈钢作真空容器是一种发展趋势。在另一篇文献(6)中报导了 A1-6061-T 6, 这种材料已经工作在 10^{-11} 托下, 其处理方法是:

铝: 去脂, 化学抛光, Ar 和 O₂ 流放电清除及 200°C 下烘烤 25 小时。

不锈钢: 去脂, 化学清洗, 950°C 下真空退火, Ar 及 O₂ 流放电清除, 300°C 下烘烤 25 小时。测量的出气率值如表 1-3 所示:

表 1-3 铝和不锈钢的放气率 (托·升·秒⁻¹, 厘米⁻²)

材料 \ 放气成分	H ₂	CO, CO ₂
A1-6061-T 6	$\sim 1 \times 10^{-13}$	$\sim 2 \times 10^{-15}$
不 锈 钢	$(0.5 \sim 1) \times 10^{-13}$	$(3 \sim 4) \times 10^{-15}$

表 1-3 说明铝和不锈钢的出气率相近。但铝的处理比不锈钢简单。

四、极高真空物理的发展

真空技术是科学和工业的基本技术。努力提供真空条件并扩大真空技术的范围是研究真空技术的目的。在提供条件扩大范围的同时研究在这些条件下所产生的效应也是真空学科发展的目标。在极高真空条件下, 出现了分子流效应, 压强分布不均匀, 从器壁放出的气体的速度分布不断发生变化。低温泵抽气系统具有几种不同的温度, 因此系统中的气体分子一般不能达到平衡态。由于气体分子分布的不均匀性和非等温状态, 入射来的分子具有特定的方向性, 这就引入了具有方向性的分子束的真空技术问题。测量压强要用方向性真空计。在这种情况下原来的热力学定律、数据, 以及流导的计算都要进行修正, 需要重新研究。

在这次会议上 W. Wuest 的论文〔7〕谈到了这方面的问题, 但作者只研究了高真空范围。我们在会议上宣读的“超高真空中稀薄气体分子运动规律的研究”一文〔8〕, 较详细地研究了这方面的问题。文章采用数理统计的方法分析了分子的运动状态, 从理论上推导出了气体分子在空间的数目。

$$N = \frac{n}{\beta} + \frac{n'}{\beta}$$

N —空间气体分子数, β —分子粘着几率, n, n' —分别是试验物和容器壁的放气率(分子/秒), τ —分子在空间的平均寿命, 我们又算出

$$\tau = K \frac{D}{\bar{v} \beta}$$

式中 K —待定的物理因子, D —真空容器线度, $\bar{v}$ —气体分子的平均速度。我们从实验上测出了 τ , 从而求出 $\bar{v}$, 确定了气体分子的热适应系数及平均温度, 测量结果如表 1-3 所示:

表 1-3 热适应系数 α 的测量值

气体	分子的 $\frac{1}{10}$ 寿命 300°K (秒)	分子的 $\frac{1}{10}$ 寿命 77°K (秒)	α	气体分子的平均温度 (°K)
H ₂	41	55	0.600	166.8
He	45	68	0.760	131.3
N ₂	94	151	0.828	116.2

从上述数据和公式出发, 可以导出该状态下气体分子的速度分布。这是值得注意的一个新课题。

参 考 文 献

1. 小宫宗治 超高真空技术的进步 (内部报告)
2. C. Benvenuti 等 Vacuum 29 11/12 (1979) 427
3. G. F. Weston Vacuum 29 8/9 (1979) 277
4. C. Benvenuti等 Proc of 8th Inter Vac Cong (1980) 199
5. C. Grosse 等 Proc of 8th Inter Vac Cong (1980) 399
6. H. J. Halama J. Vac Sci Technol 16(2) 1979 P717
7. W. Wuest; Proc of 8th Inter Vac Cong (1980) 1
8. Da Dao-an(达道安)等 Proc of 8th Inter Vac Cong (1980) 7
9. Li Wang-Kui(李旺奎)等 Proc of 8th Tnter Vac Cong (1980) 195

真空测量研究的动向

李旺奎

在第八届国际真空会议上发表了有关真空测量方面的文章共十九篇，其中真空规研究九篇、真空校准研究四篇、质谱分析研究六篇。

从新发表的文章内容和与会者之间的交流中看出，近年来真空测量与校准研究在量限的拓宽，新现象的发现，新原理的提出等方面进展是缓慢的，没有革命性的突破。而在精确、稳定、可靠的真空测量研究方面，在深化、推广和普及国际间统一真空量值的研究在加速进行。

真空测量与校准研究的这一特征，与当前整个真空技术发展的现状是一致的。这一特征的出现，究其原因至少有如下几点：

1. 社会需要，一般地说已得到了基本的满足。这主要指的是空间科学已从创造空间壮举，走向空间实用技术的开拓阶段，而发展中的其它重大科学领域（如热核聚变、高能物理、表面科学等），对真空技术的需要和推动，还没有促进其达到新的质的飞跃阶段。

2. 当前，在真空技术本身的发展中存在一些技术难点和理论难点有待突破，例如极高真空获得和测量、超稀薄非均匀分子运动论等。

3. 新学科分支的崛起，也冲击着真空技术的研究队伍，一部分人转向去研究薄膜、表面、能源等问题。

作为应用技术学科的真空技术，以其发展史来看，向广度发展和向深度进军总是相间隔地进行，它需要工业上广泛地应用或重大科学领域的推动，目前正处于两大飞跃阶段之间，即空间科学推动与受控核聚变推动之间，是积蓄力量、解决难点、探索新方向、准备新飞跃的阶段。

一、极高真空测量与校准研究

1. 管型电子倍增器电离规〔1〕

采用管型电子倍增器（CEM）、敷氧化钍——钨（ ThO_2/W ）阴极和小发射电流（ $I_e=10^{-10}\text{A}$ ），是管型电子倍增器电离规方案考虑的三个基本点。

（1）采用CEM，可以测量更小的离子流（ 10^{-19}A ），可以采用更小

的发射电流、更复杂的X射线屏蔽结构和离子光学系统，这样可使热阴极电离规的三项限制因素得到改善。

(2) 采用 ThO_2/W 阴极，可以降低阴极温度，从而使阴极的蒸发率和出气率降低。

(3) 采用小发射电流，可以进一步降低阴极温度。

经过理论分析认为，在高真空和超高真空下，采用小发射电流是不可行的，因为在高真空和超高真空下，规管栅极上的吸附——解吸处于平衡状态，只有在大发射电流下工作，才能维持栅极表面比较清洁，以降低电子碰撞解吸 (EID) 效应的影响。但是在极高真空下 (例如 $P \leq 10^{-12}$ 托) 再吸附可以忽略，只要运用合理的除气规范，清除掉栅极上的吸附层，栅极就不会再被污染，就能维持原子态清洁表面，所以产生 EID 效应的根源就消失了，故在极高真空下可以采用更小的发射电流。

图 2-1~图 2-3 为三种结构的管型倍增器电离规，其中以双弯注规 (图 2-3) 性能最好，其灵敏度 $K = 2 \times 10^{20}$ 脉冲/秒/安·托，下限压强 $P_a \leq 1 \times 10^{-14}$ 托。预计可测 10^{-14} 托的极高真空，但规管结构比较复杂。

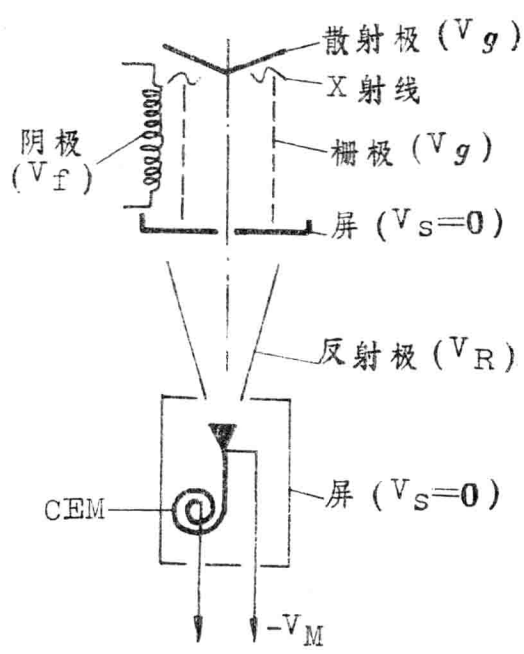


图2-1 XHVG-1 规

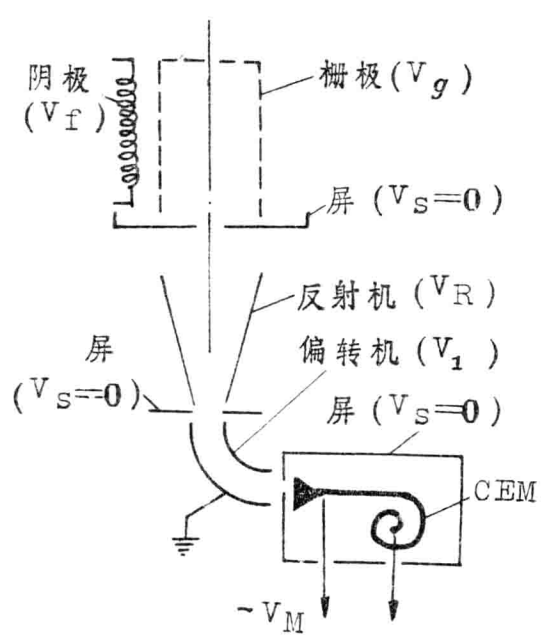


图 2-2 XHVD-2 规

铅玻璃型 CEM 能否经住高温 (400°C) 烘烤, 是管型电子倍增器电离规成败的关键, 该文认为铅玻璃型 CEM 不但能经得住高温 400°C 烘烤, 还起到清除 CEM 表面吸附层的作用, 虽然 400°C 下长时烘烤使 CEM 的增益衰减一倍左右, 但是烘烤促使 CEM 更快地工作在稳定增益阶段。管型倍增器电离规在 $\leq 400^{\circ}\text{C}$ 下, 经几十次长时烘烤, 性能保持良好。三种电离规的各极电参量可参见下表:

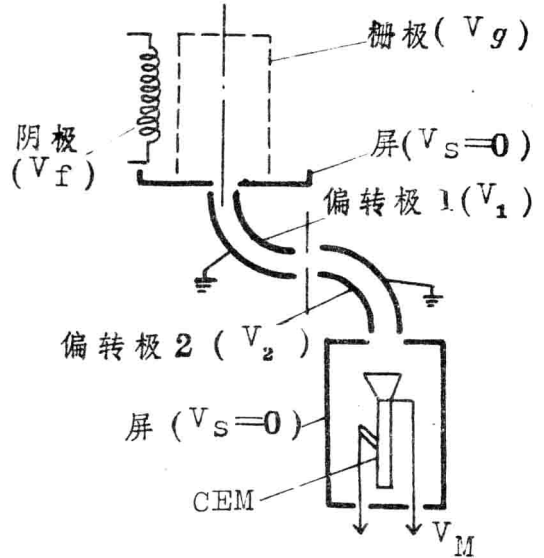


图 2-3 XHVG-3 规

三种电离规的各极电参量

类 型	$V_f(\text{v})$	$V_g(\text{v})$	$V_R(\text{v})$	$V_M(\text{kV})$	$V_1(\text{v})$	$V_2(\text{v})$
XHVG-1	90	200	0	-3	/	/
XHVG-2	90	200	0	-3	-220	/
XHVG-3	90	200	/	-3	-376	-300

2. 改进型 Helmer 规 [2]

欧洲核子研究中心 (CERN) 选用 Helmer 型电离规去测量交叉贮存环 (ISR) 中低于 10^{-10} 帕的压强, 但对几个 Varian 公司生产的 Helmer 型规试验证明, 其低压限制约为 2.5×10^{-10} 帕, 这主要是由规中发射电流为 10mA 的高温钨阴极的升华所引起的。

为了用 Helmer 型电离规测量低于 10^{-10} 帕的压强, 该文 [2] 介绍了一种改进型 Helmer 规 (图 2-4)。

(1) 选用氧化钪——钨阴极代替钨阴极。如发射电流为 4mA , 则阴极升华所引起的低压限制降为 10^{-11} 帕。

(2) 增大规管灵敏度 S ，采用的措施是增大栅极直径和长度 ($d=35\text{ mm}$, $l=45\text{ mm}$)；合理选择栅极下端孔直径 (ϕA) 和屏蔽盒入口孔直径 (ϕB) 之比，要求 $A/B > 2$ 。经实验确定，最后选 $\phi A=20\text{ mm}$, $\phi B=6\text{ mm}$ ；提高抑制栅的渗透率；实验确定最佳电参量 ($I^- = 3\text{ mA}$, $V_{gf}=150\text{ V}$, $U_D=-600\text{ V}$, $V_S=-100\text{ V}$)，从而使灵敏度 $S=42/\text{托}$ ($0.32/\text{帕}$)。

(3) 降低剩余电流 I_R 。合理选择 ϕA 和 ϕB 以降低 I_R 。例如最后选择 $\phi A=20\text{ mm}$ 、 $\phi B=6\text{ mm}$ ，虽然相对 $\phi A=20\text{ mm}$ 、 $\phi B=10\text{ mm}$ ，其灵敏度 S 降低了 1.5 倍，但是可使 I_R 降低 3 倍。另外提高抑制栅的渗透率，不但降低了它捕集离子的几率，同时也降低了它捕集 X 射线的几率，这就降低了负 X 射线光电流效应 (I_1)，在 $\phi B=6\text{ mm}$ ， $I^- = 3\text{ mA}$ 时， $I_1 \approx -2 \times 10^{-16}\text{ A}$ ，相应压强 $P_{-x} = 2 \times 10^{-18}\text{ 帕}$ 。

(4) 降低规管零件的热出气。规中的屏蔽盒及其中的电极在使用时很难用电子轰击除气，因此在装配前，这些电极零件都在 $P=10^{-5}\text{ 帕}$ 、 950°C 的真空炉内仔细地经过除气处理。这样处理后的零件装配好的规管，已在真空度为 10^{-12} 帕 的系统中使用过，其热出气效应的影响很小。

改进型 Helmer 规的下限压强 $P_R \leq 2 \times 10^{-12}\text{ 帕}$ ($1.5 \times 10^{-14}\text{ 托}$)，预计可测 10^{-12} 帕 (10^{-14} 托) 的压强。

3. 分子束法校准系统 [3]

美国 P. Fowler 和 F. J. Brock 最早提出用分子束法进行真空规校准，并说其所建系统校准压强下限可达 10^{-15} mbar [4]。但是至今没有公布过校准结果。

德国 G. Grosse 描述了一台新的分子束法校准系统，而且给出了实

C：离子收集极

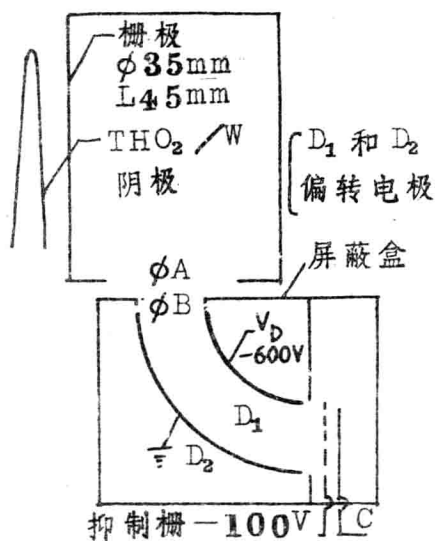


图 2-4 改进型 Helmer 规

际的校准结果。图 2-5 是校准原理图，气体是从克努曾小室穿过孔 A_1 漫射进极低压强室（分子束管、壁面冷却到 4.3°K ），其中一小部分气体飞行距离 l 后再通过孔 A_2 进入校准空，导致校准空中压强上升，直至达到平衡为止。

在平衡条件下，从校准室外每秒打到 A_2 上的气体分子数为：

$$\overline{Q} = \frac{1}{4\pi} n_0 \overline{V}_0 \frac{A_1 A_2}{l^2}$$

式中 n_0 是克努曾小室中气体分子密度， $\overline{V}_0$ 是气体分子平均速度， A_1 和 A_2 是两孔面积， l 是两孔间的距离。以校准室内每秒打到 A_2 上的气体分子数为：

$$\overline{Q} = \frac{1}{4} n \overline{V} A_2$$

式中 n 是校准室中的气体分子密度， $\overline{V}$ 是气体分子平均速度。平衡时， $\overline{Q} = \overline{Q}$ ，如克努曾室中温度与校准室中温度相等（ $T_0 = T$ ），则：

$$P = \frac{1}{\pi} P_0 \frac{A_1}{l^2} = 0.318 P_0 \frac{A_1}{l^2}$$

式中 P 为校准室中压强， P_0 为克努曾室中压强，单位为 mbar 。 A_1 单位为 cm^2 ， l 单位为 cm 。

图 2-6 是校准系统结构图，系统是用不锈钢制成，全金属密封。抽气机组由分子泵，离子泵和液氮冷却的钛升华泵组成。分子束管壁面用液氮冷却到 4.3°K 。

校准压强下限 $P_{\min}$ 主要由校准空内壁的出气率 Q 大小来定，要求 $Q \leq P_{\min} \cdot LA_2$ （ LA_2 是孔 A_2 的流导）。薄壁校准室予先在真空炉内，温度为 825°K 下烘烤除气 72 小时，这样处理以后，其出气率 $Q = 1.8 \times 10^{-15} \text{ m} \cdot \text{mbar}/\text{S}$ 。运转时，整个系统在 $300^{\circ} - 400^{\circ}\text{C}$ 下烘烤 36 小时，校准室中

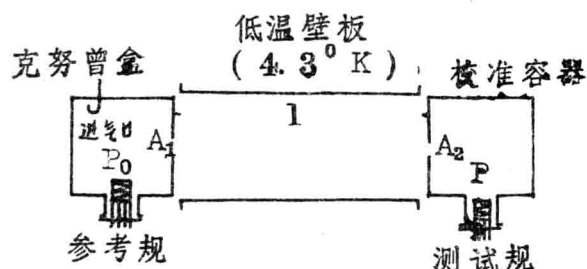


图 2-5 分子束法校准原理图

可获得极限压强 $P \leq 10^{-13}$ mbar。在校准开始前,被校规要进行除气和工作长达 15 小时,以保证使校准室壁面和被校规电极表面之间的吸附—解吸达到平衡。克努曾室中压强 P_0 在 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ mbar 内变化,以改变校准压强 P 进行校准。

$$\bar{R} = P_0 / P = 7.2566 \times 10^3,$$

$LA_2 = 22.4 \text{ l/s (H}_2\text{)}$, 电离规对 H_2 的抽速相对流导 LA_2 可以忽略。

曾用此分子束法系统(在 $10^{-7} \sim 10^{-12}$ mbar 区间)和动态膨胀系统(在 $10^{-7} \sim 10^{-9}$ mbar 区间)对一个 Helmer 规 (Varian 公司) 和一个 Extractor 规 (Leybold-Heraeus 公司) 进行了对比校准,两法校准结果在 $10^{-7} \sim 10^{-9}$ mbar 区域内一致性良好 ($\Delta < 1\%$)。

由于表面过程引起的校准不确定度,估计在 10^{-12} mbar 为 50%, 在 10^{-10} mbar 为 10%。

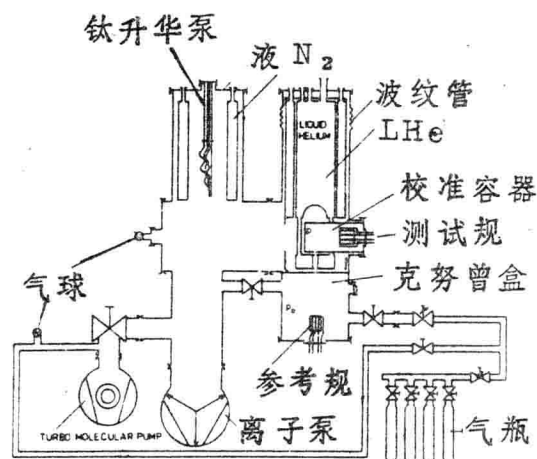
实验结果证明:分子束法适用于在低于 10^{-9} mbar 下对真空规进行校准。已有的静态膨胀法的最低校准压强约为 10^{-8} mbar, 而动态膨胀法用于低于 10^{-9} mbar 校准也是困难的,所以分子束法在极低压校准方面是一个有价值的补充方法。

上面介绍的三项工作,代表真空测量与校准在广度方面的发展。

二、精确、稳定、可靠的真空测量研究

精确、稳定、可靠的真空规研究,不但因许多尖端应用部门的需要而得到推力,而且作为真空测量标准之间相互比对的媒介和作为真空量值传递的重要环节受到日益广泛的重视。

1. 磁悬浮自旋转子真空规 [5.6.7]



涡轮分子泵

图 2-6 分子束法校准系统