

辐射物理装置中的 超高真空技术

[苏] Г. Л. 萨克萨甘斯基

**FUSHE WULI
ZHUANGZHI
ZHONG DE
CHAOGAOZHENKONG
JISHU**

原子能出版社

53.8184

938

辐射物理装置中的 超高真空技术

穆永阁 译

胡宗渭 朱毓坤 校



原子能出版社

8510214

DUL/B 122

内 容 简 介

这是一本有关超高真空物理和超高真空技术方面的书。书中阐述热解吸和激发解吸以及快速粒子与金属表面相互作用的理论模型和试验结果, 还阐述冷凝泵、低温吸附泵、吸气剂泵和磁放电泵等的物理基础、计算原理和设计原则以及它们的主要特性, 分析了高真空测量仪表和测量方法, 还对大型加速器、等离子体装置和空间模拟装置的超高真空技术的特点进行了研究。

该书适合于实验物理、电物理、真空装置制造、电子和科学仪器制造等方面的专业人员使用。

Г. Л. Саксаганский
СВЕРХВЫСОКИЙ ВАКУУМ
В РАДИАЦИОННО-ФИЗИЧЕСКОМ
АППАРАТОСТРОЕНИИ
МОСКВА АТОМИЗДАТ 1976
辐射物理装置中的超高真空技术

穆永阁 译

胡宗渭 朱毓坤 校

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

北京印刷一厂印刷

(北京西便门)

新华书店北京发行所发行·新华书店经销

☆

开本 787×1092 $\frac{7}{32}$ ·印张 11 字数 235 千字

1984年5月第一版·1984年5月第一次印刷

印数 1—2,000 ·统一书号: 15175·545

定价: 1.35元

15010

译者的话

由于本人专业面所限，译文中难免存在缺点和错误，欢迎读者指正。

本书在翻译过程中，在技术上得到了胡炳森、兰增瑞、杨益民、薛大同等同志的帮助，在此表示感谢！

原作者序

有关中性粒子、带电粒子、电磁辐射与真空中的固体相互作用机理的概念，至今已有很程度的扩展和深化；冷凝和低温吸附抽气方法已在工业上获得了广泛的应用；有关潘宁放电的比较完整的物理和数学模型已经建立，因而设计、制造和应用磁放电泵，也更有根据了；真空工艺过程正向更完备的全自动化过渡——所有这些都是现阶段真空技术发展的重要特征，然而远非它的全貌。

这些成就的取得，无论过去还是现在，均是许多技术部门需求刺激的结果。辐射物理装置的迅速发展，对其中许多成果的取得也是一个很重要的条件。

对于现代加速器、热核试验装置、宇宙空间模拟装置、辐射真空装置和空间材料试验装置而言，真空技术的主要任务，是用简单可靠的方法提供必要的真空环境。然而，由于条件非常苛刻，此项任务往往变得非常复杂。

大的局部气体负荷和分布气体负荷、强的磁场和电场、作用在真空室器壁上的强大的电磁辐射和微粒辐射、受限制的抽气孔径、真空抽气管道几何形状复杂且支路多，所有这些因素对确定真空系统的结构工艺方案都起着决定性的作用。也正是这些因素决定了现代真空系统具有下列特点：几乎全采用无油非压缩抽气设备，广泛应用内装式放电泵、低温吸附泵和冷凝泵，在脉冲式和热不均衡状态下工作，氢是主要气体负荷。在大多数情况下，要求在真空中获得并稳定地保持相当于 $T = 293\text{ K}$ 下 $10^{-9} - 10^{-12}$ 托压强的剩余气体的分

子浓度；需要的抽速有时超过 10^7 升/秒*。

超高真空物理和工艺方面的许多成就，在杂志文章上、在国际和国内的有关真空技术的专业会议、专题讨论会和专业代表会议的报告中均有反映。有些非常重要的问题还较详细地发表在有关加速器和低温技术、热核装置和宇宙空间模拟工程、电子学物理基础、低压强下气体放电物理学等的专业刊物上。因资料来源过分分散，要收集和研究这些科技情报，并不容易。因此，在这样的情况下，以辐射物理装置为主要对象，系统地阐述超高真空领域内的某些科学概念、方法和技术措施，是十分迫切的。显然，这些内容对广大的其它方面的研制和使用高真空装置和设备的专业人员来说，也是有用的。

研究超高真空技术和工艺的所有方面，不是本书的目的；作者打算从真空技术领域内的专业人员的立场出发，阐明那些在专题论文文献中很少发表的，但对创建超高真空辐射物理装置又是非常重要的问题。

这里必须强调指出，由于研究工作尚在进行中，某些原理和结论，都不是绝对无争议的，有的甚至缺乏相应的物理和数学模型。在术语的应用方面，也存在着同样的情况，虽然在本书中尽量采用标准术语。

* 带电粒子加速器和试验性热核装置的真空系统的物理基础、计算和设计，详见[IV.8]。

常用符号表

- d, D ——圆筒形真空室和管路的直径, 厘米
 f ——真空室特征尺寸, 厘米
 m ——分子质量
 n ——体积浓度(每立方厘米的粒子数), 厘米⁻³
 p ——吸着压强, 毫米汞柱
 $p_{\text{н.п}}$ ——饱和蒸气压, 毫米汞柱
 $p_{0.\text{н}}$ ——真空泵极限压强, 毫米汞柱
 q ——表面出气速率, 气体流密度, 升·托/(秒·厘米²)
 r, R ——圆筒形真空室和管路的半径, 厘米
 t ——时间座标
 C ——被吸收气体的浓度, 升·托/厘米²; 厘米⁻³
 D ——扩散系数
 F ——表面, 面积
 E ——粒子的动能
 G ——真空系统的孔、管路或部件的流导, 升/秒
 K ——克劳逊系数
 L ——室或管道的长度, 厘米
 M ——原子量或分子量, 原子单位
 N, N_0 ——分别为粒子和吸附中心的表面密度, 厘米⁻²
 (原书误为-9)
 Q ——在给定截面上的气体流量, 升·托/秒
 R ——通用气体常数
 S ——在给定截面上的抽速, 升/秒
 S_0 ——比抽速(单位表面积上的抽速), 升/秒·厘米²

$S_{0.н}$ ——真空泵抽速, 升/秒

T ——绝对温度

V ——真空系统的室, 管道和其它部件的容积

β ——粘着系数, 冷凝系数

$\beta_{эф}$ ——有效捕获系数

γ ——光子、离子和电子激发出气系数

ε ——适应系数

ν ——分子在器壁单位面积上的碰撞频率

σ ——史蒂芬-玻尔兹曼常数

缩 写

ГВ——出气

СГВ——出气速度

СтГВ——激发出气

АДМ——吸附-扩散模型

4150128

目 录

原作者序	(1)
常用符号表	(1)

第 I 篇 真空中电磁辐射、快速 粒子流与金属表面的相互作用

引言	(1)
第一章 金属的热出气和在其表面受到电子和光子轰 击时的出气	
§ 1.1 气体与金属相互作用的吸附-扩散模型	(5)
§ 1.2 金属的热出气	(7)
§ 1.3 电子轰击下的出气	(16)
§ 1.4 同步加速器辐射作用下的出气	(23)
第二章 氢和氦的快速离子与金属表面的相互作用	
§ 2.1 注入系数 入射离子的反射	(30)
§ 2.2 注入原子的再发射	(40)
§ 2.3 靶溅射	(51)

第 II 篇 气体吸收 表面作用泵

引言	(57)
第三章 低温抽气 冷凝	
§ 3.1 低温抽气的物理基础	(66)
§ 3.2 低温泵的运行特点	(78)
§ 3.3 高真空冷凝泵	(81)
§ 3.4 预真空冷凝泵	(86)

第四章 低温吸附

- § 4.1 低温吸附机理 炭、沸石、硅胶的吸附特性.....(92)
- § 4.2 冷凝吸附抽气 静态等温线.....(97)
- § 4.3 冷凝气体层的结构及其吸附特性 低温捕获.....(103)

第五章 金属膜对气体的吸附 蒸发泵

- § 5.1 金属膜吸附气体动力学.....(110)
- § 5.2 钛和钡的吸附特性.....(116)
- § 5.3 蒸发器.....(126)
- § 5.4 钛蒸发泵的结构和运行特性.....(130)

第六章 磁放电泵

- § 6.1 低压强下的潘宁放电.....(145)
- § 6.2 磁放电泵计算原理.....(158)
- § 6.3 对单一气体和混合气体的抽气机理.....(162)
- § 6.4 工业用放电泵的结构和运行特性.....(166)
- § 6.5 内装式放电泵.....(171)

第III篇 真空测量和气体分析

- 引言.....(179)

第七章 辐射物理装置中气体压强和气体流量测量方法的特点

- § 7.1 器壁上的吸附和解吸过程对测量结果的影响及在非平衡系统中的测量.....(181)
- § 7.2 多室系统中的测量.....(199)

第八章 真空计和分压强测量仪表

- § 8.1 超高真空压力变换器 常用真空计.....(206)

§ 8.2 分压强测量仪质谱的识别·····	(215)
§ 8.3 抗干扰真空测量仪器·····	(231)

第IV篇 辐射物理装置的真空系统

引言·····	(243)
第九章 加速器和加速器储存环	
§ 9.1 对撞束式电子-正电子加速器的真空系统·····	(254)
§ 9.2 质子加速器储存环·····	(261)
第十章 等离子体装置和空间模拟装置	
§ 10.1 热核装置的杂质和第一壁问题·····	(267)
§ 10.2 热核反应堆托卡马克·····	(281)
§ 10.3 空间模拟装置·····	(296)
参考文献·····	(301)

第 I 篇

真空中电磁辐射、快速粒子 流与金属表面的相互作用

引 言

稀薄气体与真空室器壁（包括在表面受到强微粒辐射和电磁辐射时的）相互作用过程的物理学，是最重要的真空物理和真空技术课题之一。对这些过程机理的理解，是正确解决下述重要问题的先决条件：即确定热出气和激发出气参数；选择除气和抽气状态；计算加速器和储存环的真空室在同步加速器辐射、电子和离子轰击下的出气速率；分析由热核实验装置的器壁和气体放电装置电极产生的粒子流污染等离子体的动态过程；在设计制造超高真空装置时选择结构材料和加工工艺，等等。

为了正确地描述这些过程，必须同时分析在金属表面和金属里面发生的现象。尽管这一断言的正确是一目了然的，但是在从朗缪尔开始直至 70 年代初的所有研究工作中，吸附和扩散均被看成为单独的互不相关的现象，而且出气理论的建立亦只是考虑到了其中一个现象。例如，在分析金属的热出气时，通常假设表面气体浓度等于零，认为到达表面的原子立即离去。在该模型中，出气动力学用以零作边界条件的扩散方程的解来描述^[49,71]。所获得的解仅定性地与实验结

8510214

果相符，而且它一般都不包括出气速度与剩余气体压强的关系。

在文献[53, 79]中，气体自电子、离子、光子轰击下的金属表面放出的现象（激发出气）作为纯表面过程来分析，得到了出气速度与时间成指数关系的结论。如果根据吸附模型来分析激发出气的试验结果，得到的 γ 值将与已发表的激发出气系数值相差五个数量级。

无论扩散模型还是吸附模型，均不能解释许多试验结果，甚至不可能定性地预测与具体试验条件差异稍大的系统的性能。

建立一个在通常情况下对任意课题实际上都适用的单一理论的可能性是不大的，这是由于作用因素不可避免地是多变的，而且是非线性的。但是根据稀薄气体与金属相互作用的吸附-扩散模型，可以给出对所研究过程的、在唯象学领域内满意的定量描述^[10,23,72]。在专门阐述这个问题的第一章中，推导了动力学方程，并分析了有关在电子轰击和同步加速器辐射作用下的出气以及氢的热出气的实验资料。

我们研究的另一组问题涉及在轻气体（氢和氦）的快速离子与金属表面相互作用下的真空工艺。在有关受控热核聚变的文献中占很大比重的所谓第一壁问题^{*[8,31,36,65,86]}可归併到粒子与固体相互作用这个更为一般的物理命题中去^[7,17,38]。等离子体装置的器壁不断地受到宽能谱的快速中性粒子、带电粒子和光子的轰击。在这种条件下产生了一系列对等离子体能量平衡不利的现象：轰击粒子在被器壁中和和散射后返回放电区，金属溅射，金属中含有气体杂质（包

* 有关“第一壁问题”的详细真空工艺情况见§10.1。

括先前注入的粒子的逸出), 气泡的形成以及随后引起气体爆喷(起泡效应)的破裂, 等等(图 B.1)。所有这些效应最后均将导致冷的氢、氦原子和器壁产生的大量杂质粒子(即碳的原子和离子、碳的氧化物、碳氢化合物、氧和组成器壁的金属原子)进入等离子区, 使辐射损失急剧增加。

此外, 在准稳态热核反应条件下, 轰击粒子对器壁的溅射是如此地强烈, 以致确保使用期间内器壁的机械完好, 成了设计热核反应堆和确定氦的再生方案中的主要问题。

从另一方面看, 可以有效地利用快速离子和原子的注入效应来驱除装置工作区中的未反应粒子和杂质粒子。根据这个原理看来可研制具有很大抽气量的抽气装置。

有关这方面的理论和实验研究成果目前还有限, 仅为创立某个综合的相互作用模型大致勾划出一条可能的途径。尽管如此, 在下面列举的几个方面已积累了有关这个问题的实验资料, 如能量为几十万电子伏的氦和氢同位素离子对各种金属和合金的注入, 轰击粒子的反射和散射, 注入原子的热出气和激发出气动力学, 在离子的强烈轰击条件下金属的溅射及其宏观结构, 等等。在第二章中, 将对已发表的有关这些问题的文献进行简短的评论。

第一章 金属的热出气和在其表面受到电子和光子轰击时的出气

§ 1.1 气体与金属相互作用的吸附-扩散模型

我们来研究放置在被抽真空容器中的金属样品。气体的吸收或释放均是非静态过程的结果。在该过程中，金属里面的、样品表面的和容器中的气体分子之间建立起平衡。最终的气体流量随时间的变化可用下列诸式来描述：

a) 气体在金属中的扩散方程

$$\nabla^2 C = (1/D) \partial C / \partial t;$$

б) 在样品表面上的气体流量连续方程

$$dN/dt = q_a + q_n - q_r - q_e;$$

в) 容器的气体抽除方程

$$V dp/dt = (q_e + q_r - q_a)F - Sp.$$

(1.1)

式中， $q_a = 10^3 (p/\sqrt{MT_1}) \beta(N)$ ——吸附速度；

$q_n = -D \text{grad } C|_e$ ——扩散速度；

$q_r = k N^\mu \exp(-E_g/RT)$ ——热出气速度；

$q_e = 0.175 \gamma j N/N_0$ ——电子、光子等的激发出气速度；

$D \text{grad } C|_e$ ——样品表面的气体浓度梯度；

k 、 E_g 和 μ ——速度常数、热出气能量和阶次；

j ——轰击粒子流密度；

T_1 ——气体温度。

方程组 (1.1) 的第二个方程是扩散方程的边界条件。但是扩散过程的进程并不取决于吸附原子的密度 N ，而是取决于进到金属近表面区晶格中的气体原子的浓度 $C(0, t)$ 。这些量之间的关系用下列指数函数描写：

$$[N(t)/N_0]\exp(-\Delta E/RT) = C(0, t)/C_0, \quad (1.2)$$

式中 ΔE ——晶格中的气体原子与吸附原子的势能差，而 C_0 ——气体在金属中的溶解度或它在金属化合物中的浓度。

如果气体与金属的相互作用速度远大于扩散速度，即吸附相和在金属里面的气体之间建立平衡的时间可以忽略时，关系式 (1.2) 是正确的。这是吸附扩散模型的第一个假设。第二个假设可归结为，在吸附相与气相中的过程具有准稳态性质。这样就可令方程组 (1.1) 中的 dp/dt 和 dN/dt 等于零：

$$q_a + q_n - q_r - q_e = 0; \quad (q_e + q_r - q_a)F = Sp \quad (1.3)$$

通过研究吸附-解吸过程的物理图象，即可看出，上述假定显然是合理的。由连续方程得出：样品表面气体流量的代数和为表面浓度的变化 dN/dt 所平衡。在不变的外部条件下，由于扩散速度的减小，表面浓度随时间作缓慢的变化。此种情况下，如果还假设在每个瞬间在表面和近表面区建立起与扩散气体流量瞬时值相对应的准平衡态，那么这时的微商 dN/dt 很小，并可以忽略。当剩余气体的温度、压强或气流密度发生急剧变化时，表面状态跳跃地变化，因而微商就不能忽略。然而由于过渡过程的持续时间不长，对出气和吸气动力学没有太大的影响。根据以上对方程 (1.2) 和 (1.3) 进行的讨论可以得出结论：在外界条件变化时，浓度 $C(0, t)$ 从一个平衡值跃变到另一平衡值。

方程 (1.2) 和 (1.3) 给出扩散方程的第三种边界条