

〔法国〕蒙哥丁等著

真空密封与检漏

中国科学院原子核科学委员会编辑委员会编辑

中国工业出版社出版

71.736
675

真空密封与检漏

〔法国〕蒙哥丁等著

李平瀕譯

赵国方校

36506/02

中国科学院原子核科学委员会编辑委员会編輯

中国工业出版社出版

1966.10.4

本书结合法国皮埃尔拉特扩散厂的实践,全面介绍了真空密封与检漏的问题,着重介绍了氦气检漏和氨气检漏法。

本书分四章:第一章阐述了氦气检漏的基本原理,第二章介绍了密封的标准和要求,以及法国检漏技术的目前发展状况,第三章介绍了三种检漏方法及其所用设备,并对氦气检漏法和氨气检漏法作了比较,第四章介绍了设计密封设备的问题,还介绍了设备制造时和安装前后的检漏。

本书可供原子能、化工、冶金等方面的广大工程技术人员及有关院校师生参考之用。

真空密封与检漏

李平瀕 译 赵国方 校

*

中国科学院原子核科学委员会编委会编辑

中国工业出版社出版(北京修睦园路西10号)

北京市书刊出版业营业许可证出字第110号

中国工业出版社第一印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ ·印张 $2^{15/16}$ ·插页3·字数75,000

1966年5月北京第一版·1966年5月北京第一次印刷

印数0001—3,040·定价(科五)0.55元

*

统一书号:15165·4278(核委-65)

目 录

緒 論	1
第一章 氨气检漏的基本原理	3
第一节 检漏系统的函数特性	3
1-1 检漏器的函数特性	3
1-1-1 分析室	3
1-1-2 放大系统和读数系统	4
1-1-3 内部抽气系统	5
1-2 辅助抽气系统的函数特性	6
1-3 检漏器和辅助系统连接导管的函数特性	7
1-4 检漏系统函数特征的简单介绍	7
第二节 各阶段氨气检漏的数学描述	9
2-1 待检部件的预抽空	10
2-2 待检部件的放气	12
2-3 正式检漏, 持续状态和灵敏度	15
2-4 过渡状态, 信号的建立和消失	20
2-4-1 不用次级泵的检漏系统	20
2-4-2 采用次级泵的检漏系统	23
第三节 小结	27
第二章 密封标准与检漏工作量	28
第一节 密封标准	28
第二节 检漏工作量	31
2-1 基本部件的检漏	31
2-2 回路安装完毕后的检漏	31
第三节 目前法国检漏技术的发展情况	32
第四节 部件的表面处理	33
第三章 检漏方法和检漏设备	35

N

第一节 氦气检漏	35
1-1 方法	35
1-2 探索气体氦和氦*及其应用	35
1-3 经济问题	37
1-4 检漏器	38
1-4-1 氦气检漏器	38
1-4-2 大部件检漏用的辅助真空系统	45
1-4-3 小部件检漏用的辅助真空系统	48
1-4-4 特大部件检漏用的真空系统	49
1-4-5 检漏器和辅助抽气系统的联合使用	50
1-4-6 向聚乙烯袋和双环垫圈喷氦*的装置	52
第二节 氨检漏器	53
2-1 原理和方法	53
2-2 关于探索气体氨及其应用的数据	54
2-3 显影带	55
2-4 充气和抽气的设备	56
2-5 检漏速度	58
2-6 氨检漏法和氦检漏法的比较	58
第三节 静态升压法检漏	59
3-1 静态升压法的原理	59
3-2 设备	61
3-2-1 真空泵	62
3-2-2 放电管	63
3-2-3 检漏插头	63
3-2-4 高压电源	63
第四章 密封与检漏	64
第一节 设备的设计	67
1-1 密封设备的设计	67
1-1-1 材料的选择	67
1-1-2 焊型的选择	68
1-1-3 连接零件的介绍	69
1-2 设备的设计	72
1-2-1 氦气检漏的可能性	73

00020

1-2-2 氨气检漏的可能性	75
1-2-3 要可以用静态升压法检查双环垫圈的密封	76
第二节 设备制造单位的检漏	76
2-1 设计阶段	77
2-2 在制造过程中	77
2-3 在制造完工时	78
第三节 包装和运输	79
第四节 皮埃尔拉特厂在回路安装前的氨气检漏	79
4-1 密封检查车间	80
4-2 需要的人员和专业人员的培养	83
第五节 安装过程中的检漏(双环垫圈)	84
第六节 安装结束时的检查	85
6-1 检漏的组织工作	86
6-1-1 关于待检回路的研究	86
6-1-2 准备工作	87
6-2 检漏程序	87
6-2-1 初步操作	87
6-2-2 一般抽真空	87
6-2-3 待检回路的标准漏隙	88
6-2-4 装配处的检漏	90
6-2-5 铀回路的密封总检查	91
结 论	93
参考文献	94

緒 論

建鈾同位素分离厂的时候，会遇到許許多多的密封問題。这种工厂，需要密封的容积有几万立方米，而它的允許漏量，跟超真空系統同数量級。

为了确知密封性，就需要生产出一些特別灵敏、特別有效的检漏器。实际上，从1943年起，用氦作探索气体的检漏法，获得了飞跃的发展；1960年以来，不太灵敏的氨检漏法，在法国也得到了改进，目前，用它来检查大型設備时，灵敏度和氨检漏法差不多了。

皮埃尔拉特厂^①的建造，要求把許多很灵敏的检漏方法大規模地用到工业上来，但是，法国目前的情况是，这些方法用得并不普遍，多半还停留在实驗室的水平上。针对这样一种情况，我們必須进行許多工作。

一方面，我們需要建造一些新型的检漏装置，以便在未装UF₆时，检查部件和回路的密封性。

另一方面，要組織一个严密的检漏系統，因为要把十几万个基本部件，装配成几百个真空系統，这些系統，要有极高的灵敏度，这样才能迅速进行检漏工作，例如，在5分钟之內，在100立方米的管道和容器的复杂系統中，检查出 5×10^{-8} 毛·升/秒的小漏隙。

讀者可以參閱文献[1~3]，把本厂的技术同美国橡树岭扩散厂和英国卡本赫斯特厂的技术作一比較。

在本文中，我們不涉及整个鈾回路的真空度。这时需要真

① 皮埃尔拉特扩散厂，位于法国南部馬尔庫尔以北100里的地方，1961年动工，計划1967年建成，投資9~10亿美元，每年浓缩鈾的生产量为1.46吨，浓缩度3%，耗电量10万瓩，人員5千——編者注。

空，是为了預先除去水分，为此，不需要使用极低的压力。讀完本文后，人們会感到很惊奇，原来鈾回路的最高真空度，就是我們检漏方法要达到的真空度。

此外，在UF₆沾污的、真空度相当适度的回路中，抽气和密封检查工作，还存在着一些严重問題，在此我們就不打算研究了。

第一章 氦气检漏的基本原理

本章的目的，是确定检漏系统的一些特征值，这些值是了解和估计各阶段检漏工作所必须知道的。

第一节将确定下列设备的特征值：检漏器、辅助泵、检漏器和辅助泵的连接导管。

第二节将指出，如何用这些特征值分析各个阶段的检漏工作，选择最有利的检漏条件。我们将列出方程式，并对下列几个例子进行计算：

预抽空，除气，氦气信号建立的过渡时间（也就是装置的反应时间），平衡状态和信号的获得，装置的灵敏度，氦气信号消失的过渡时间（装置的反应时间）。

第一节 检漏系统的函数特性

1-1 检漏器的函数特性

大致说来，可以认为检漏器包括：分析室、放大系统、读数系统和内部抽气系统。

1-1-1 分析室

原则上说，可以用三个量表示它的特征。分析室类型不同，这三个量也不同，特别是低压分析室的工作条件最特殊。

分辨本领

如果分析室的调节和使用得当，它就只对氦气灵敏。分析室中的气体分子都是电离了的，而且它们受到电磁场加速和偏转后，只有电离了的氦分子才能打到靶上。实际工作中，氦气最多时，改变加速电压，能大大消除标准漏隙产生的信号。

线性和灵敏度

分析室中的氮分子越多，打在靶上的氮离子也越多，也就是說，分析室中氮氣分壓 p_c 越大，打在靶上的氮离子越多。

收集電流和氮氣分壓之比，能表征分析室的靈敏度，

$$s = \frac{i}{p_c}, \quad (1)$$

i 的單位是安培， p_c 的單位是托，靈敏度的單位是安培/托。

我們看到，在氮氣分壓給定時，也就是漏隙一定時，上面兩點表明，信號同分析室的總壓力無關。

極限壓強

要避免燈絲斷裂、沾污等危險，要確保分辨本領、線性和靈敏度等特點，分析室就要有極限壓強，低於這個壓強時，檢漏工作才能順利進行。必須指出，分析室始終受到液氮冷阱的保護，因此，總壓力可以理解為非凝氣體的總壓力。在這個非凝氣體的總壓力中，主要是氮和氧的貢獻，氮氣分壓很小。還要注意一點，氧被特效的液氮冷阱部分地凝結了。

1-1-2 放大系統和讀數系統

要使測量儀器的指針發生偏轉，必須放大收集電流。放大器是線性的，我們可以用系數 k 表示它的放大特性，

$$D = ki, \quad (2)$$

D 是測量儀器上的讀數，顯然，由 (1) 式可得到

$$D = ksp_c, \quad (3)$$

或寫成

$$K = ks, \\ D = Kp_c. \quad (4)$$

從理論上說，可以直接在測量儀器上刻上氮氣分壓或收集電流強度。事實上，比例系數因儀器和時間而異，因此，在實際工作中，我們寧願採用任意的線性刻度盤。在檢漏以前，把一個已知的氮漏隙，放在適當的地方，再對檢漏系統進行刻度。

我們也可以用最大靈敏度，或最小漏量表征檢漏器的特征。生產單位常常用這個辦法，但這是值得討論的。實際上，靈敏度

同检漏器的连接导管、辅助系统、阀门和电压的调节有关。因此，检漏系统要在精确的条件下使用，才能用灵敏度表示它的特征。生产单位给出的值，是针对最佳条件说的，由于工作情况不同，这个条件不是经常都能实现的。

1-1-3 内部抽气系统

这个系统一般包括一个前级泵、一个扩散泵和一两个冷阱。

需要知道的特征值是：分析室里的空气抽速 S_a ，氦气抽速 s_a ；检漏器进气口的空气抽速 S_e ，氦气抽速 s_e 。

可冷凝蒸汽，主要是水蒸汽、油蒸汽和二氧化碳，我们假定冷阱对它们的效率很高，以致它们的分压同不可冷凝气体的分压比较起来，可以忽略不计。

若不知道检漏器进气口的氦气和空气的抽速，只知道它们在分析室和进气口之间的通导 C_i 和 c_i 也行（包括检漏器进气阀的通导）。抽速和通导有如下的简单关系：

$$\frac{1}{S_e} = \frac{1}{S_a} + \frac{1}{C_i}, \quad \frac{1}{s_e} = \frac{1}{s_a} + \frac{1}{c_i}. \quad (5)$$

空气的抽速和通导，用普通方法测量。但是，必须指出，在分子流的情况下，总压力相当低，氦气的分压极低，只有 10^{-12} — 10^{-8} 毛，氦气的抽速

和通导，必须用贵尔巴得 (C. Guilbard) 等人^[5]的特殊方法测量。

这种方法的简单原理是：故意把抽速降得很低，再用检漏器比较下列两处由标准漏隙产生的氦气分压：泵的进气口（它可以确定氦气抽速）和膜孔的进气口（氦气抽速可从进气口

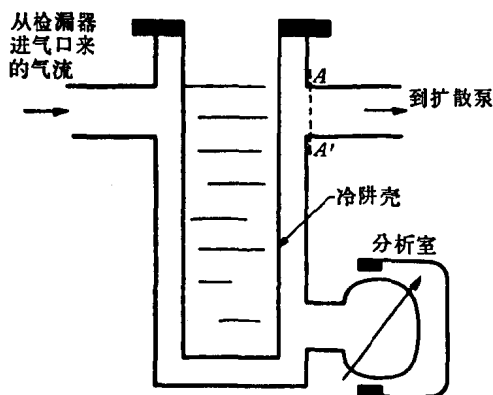


图 1

的大小求出)。泵的氦气抽速可以从薄膜处的抽速和检漏器的信号比推导出来。为了使薄膜的氦气抽速实际上只同薄膜的尺寸有关, 我們把薄膜安在大扩散泵上。

如果分析室安在图 1 所示的位置上, 就要弄清楚分析室里的抽速是什么意思。我們确实不能认为, 那里的抽速为零, 而应当认为, 那里的抽速是有分析室那么大压力的回路的抽速。在图 1 中, 它是 44 截面的抽速。

这个抽速, 不是单个扩散泵的抽速, 而且是装上了隔离閥的扩散泵的抽速。这个隔离閥, 可以全部打开, 也可以部分打开。

1-2 輔助抽气系統的函数特性

根据需要, 这个系統可以只包括前級泵(二級), 也可以串联好多泵, 构成一个比較复杂的系統, 例如包括一个一級或二級的前級泵、一两个草鞋泵^①、一个带或不带草鞋泵的扩散泵、冷阱等等。

为了便于說明問題, 我們把輔助系統分成两段, 分別考虑它們的抽速:

并联检漏器的支路; 輔助系統同待检部件的连接导管。

当检漏器恰恰连接在待检部件的封接处时, 上述这两处就连接在一起了。此外, 还要分別对待空气抽速和氦气抽速, 这样一来, 在一般情况下, 要考虑四个抽速(問題仅仅涉及輔助泵的抽速, 当检漏器同輔助泵连接时, 附加的抽速可以不考虑):

检漏器支路上的空气抽速 S_1 , 氦气抽速 s_1 ;

待检部件连接处的空气抽速 S_2 , 氦气抽速 s_2 。

我們称检漏器支路前面一个或几个輔助泵为前級泵, 后面的为次級泵。

如果輔助泵就是前級泵的話, 我們还要知道前級泵的极限压强 P_1 。

① 草鞋泵, 又叫罗茨泵, 或轉子泵——編者注。

1-3 检漏器和辅助系统连接导管的函数特性

用导管连接支路和检漏器进气端。支路的选择通常有几种可能性，而且要测定 1-2 节的抽速。

支路一经选定后，就把容器预先抽空，再研究前级泵阀门打开或关闭时的检漏情况，这就是说，根据情况，容器的气流通过检漏器的泵和前级泵，或全部通过检漏器泵。

最后，为了彻底了解连接的特性，还必须知道：

连接导管的空气传导 C_i ，

氮气传导 c_i 。

知道了这两个传导，就可以用下面的公式直接计算检漏器在支路处的抽速 S_d 和 s_d ，

$$\frac{1}{S_d} = \frac{1}{S_e} + \frac{1}{C_i} = \frac{1}{S_e} + \frac{1}{C_i} + \frac{1}{C_i},$$

$$\frac{1}{s_d} = \frac{1}{s_e} + \frac{1}{c_i} = \frac{1}{s_e} + \frac{1}{c_i} + \frac{1}{c_i}. \quad (6)$$

本文不打算讨论各种辅助系统的所有支路。每种解决办法的利弊，可以根据不同用法，从我们后面的计算结果看出来。

1-4 检漏系统函数特征的简单介绍

我们在图 2 中，画出了整个检漏系统的简图，并标出了截

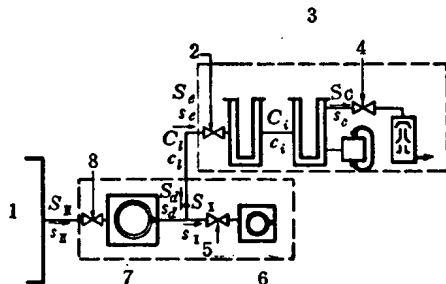


图 2 检漏系统

1—待检部件；2—检漏器的进气阀；3—检漏器；4—扩散
泵阀门；5—前级泵；6—前级泵；7—次级泵；8—次级阀

面、管道和本文介紹的一些抽气系統。

- S_n 是待檢部件支路的空氣抽速；
- s_n 是待檢部件支路的氬氣抽速；
- S_1 是前級泵的空氣抽速；
- s_1 是前級泵的氬氣抽速；
- S_d 是檢漏器支路的空氣抽速；
- s_d 是檢漏器支路的氬氣抽速；
- S_e 是檢漏器進氣閥的空氣抽速；
- s_e 是檢漏器進氣閥的氬氣抽速；
- S_c 是分析室的空氣抽速；
- s_c 是分析室的氬氣抽速；
- C_l 是輔助泵同檢漏器連接導管的空氣通導；
- c_l 是輔助泵同檢漏器連接導管的氬氣通導；
- C_i 是檢漏器內部的空氣通導；
- c_i 是檢漏器內部的氬氣通導；
- s 是分析室的靈敏度；
- π 是分析室的極限壓強；
- K 是儀表偏轉度同分析室氬氣分壓的比例係數；
- P_1 是前級泵的（用麥氏真空規測量）極限壓強。

下面，我們給出了大輔助泵和 ZMA 檢漏器的上述各值。小輔助泵的值，可以从上述值推导出来。

前面已經談过，这些值彼此間有关系。但是，抽速和通导的关系很简单。在这里，我們还給出一个氬气和空气通导比的简单关系，在分子流的情况下， $\frac{c}{C}=2.7$ 。分別測抽速时，这个关系式就不成立。

最后，还要指出一点，这里給出的数值，都是在閘門完全打开的情况下测量的，如果把進氣閥和擴散泵閥打开一些的話，抽速 S_d 、 s_d 、 S_e 、 s_e 、 S_c 和 s_c 就会减少，甚至为 0。同样，關閉不能細調的前級閥，也可以使 S_1 和 s_1 为 0。

我們研究一下大型檢漏裝置的特征值。这个裝置由 SD100 輔助泵和 ZMA SD1000 檢漏器組成。

- S_{11} : 在 10^{-3} —1 毛下吸气时, 为 $270 \text{ 米}^3/\text{小时}$ (75 升/秒); 在 10^{-1} 毛下吸气时, S_{11} 达到最大值 $310 \text{ 米}^3/\text{小时}$ (86 升/秒); 在 10^{-4} 毛下吸气时, S_{11} 为 $125 \text{ 米}^3/\text{小时}$ (35 升/秒);
- s_{11} : 为 $200 \text{ 米}^3/\text{小时}$ (55 升/秒), 实际上同总压力无关, 而且在这个泵的使用范围内, 也同氦气分压无关;
- S_{12} : 吸气压强高过 10^{-1} 毛时, 为 $72 \text{ 米}^3/\text{小时}$ (20 升/秒);
- s_{12} : 为 $36 \text{ 米}^3/\text{小时}$ (10 升/秒), 在使用的范围内, 实际上是常数;
- S_{d1} : 为 $13 \text{ 米}^3/\text{小时}$ (4 升/秒);
- s_{d1} : 为 $36 \text{ 米}^3/\text{小时}$ (10 升/秒);
- S_{e1} : 为 $18 \text{ 米}^3/\text{小时}$ (5 升/秒);
- s_{e1} : 为 $43 \text{ 米}^3/\text{小时}$ (12 升/秒);
- S_{c1} : 为 $50 \text{ 米}^3/\text{小时}$ (14 升/秒);
- s_{c1} : 为 $110 \text{ 米}^3/\text{小时}$ (30 升/秒);
- C_{11} : 为 $72 \text{ 米}^3/\text{小时}$ (20 升/秒);
- c_{11} : 为 $200 \text{ 米}^3/\text{小时}$ (55 升/秒);
- C_{12} : 为 $25 \text{ 米}^3/\text{小时}$ (7 升/秒);
- c_{12} : 为 $68 \text{ 米}^3/\text{小时}$ (19 升/秒);
- P_{11} : 为 2×10^{-4} 至 3×10^{-4} 毛;
- π_1 : 为 10^{-4} 毛。

这里要指出的是, 在打开检漏器进气阀时, 为了使分析室的压力不超过极限压强, 就必须知道 P_1 的数值。为了在 $P_1 = 3 \times 10^{-4}$ 毛时, 仍使 $P_e < 10^{-4}$ 毛, 检漏器和分析室之间的压强梯度要足够大。

象我們馬上就要看到的, 每次检漏之前, 把 s 和 K 直接定标在装置上, 是有好处的。为了便于记忆, 我們确定分析室的灵敏度为 10^{-4} 安培/毛級。这里的讀数器, 有七个灵敏度量程 (1、3、10、30、100、300、1000)。

第二节 各阶段氦气檢漏的数学描述

大致說来, 我們可以把一次全面的检漏工作分成这样几步: 待检部件的預先抽空; 待检部件的放气; 氦气信号的出现; 氦气

信号的持續状态；氦气信号的消失。

现在，我們依次来研究各个检漏阶段，从中求出前节定义的特征值，看出它們的重要性。为了便于說明問題，我們还同时研究信号出現和消失的过渡状态。我們將看到，可以毫不困难地計算处于平衡状态的信号，而不必去考虑前面的过渡状态。

2-1 待检部件的預抽空

所謂預抽空，是把待检部件从大气压抽到压力似乎不再上升时的抽空，这种抽空受器壁放气的限制。实际上，預抽空時間和放气時間是容易分开的，因为它們的压力下降規律极不同，特别是达到放气阶段后，压力的降低就很慢了，这一点，下面将要談到。

在預抽空过程中，对一定的抽速來說，压强按一般規律下降：

$$P = P_i e^{-\frac{S}{V}t}, \quad (7)$$

式中， P_i 是 $t=0$ 时的压强，一般为大气压； S 是部件連接处的抽速，我們假定它不变， V 是部件的容积。

P_i 和 P 的单位相同，例如用毛表示， t 以秒表示， V 以升表示， S 以升/秒表示；或者 t 以小时表示， V 以立方米表示， S 以米³/小时表示。

用自然对数 $\log_e$ 和常用对数 $\log$ ，可以把上述公式写成：

$$t = \frac{V}{S} \log_e \frac{P_i}{P} = 2.30 \frac{V}{S} \log \frac{P_i}{P}. \quad (8)$$

在我們的检漏系統中，要考虑的抽速一般是 S_u ，不过要說明几点：

(1) 高压时，一个或几个草鞋泵不工作，所以直到启动为止，要考虑的抽速是 S_r 。

(2) 为了不显著地降低抽速，要假定輔助泵和部件的連接件要有足够大的通导。如果通导很小，則必須用下式計算部件处的抽速。

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{S_n} + \frac{1}{C_i} \quad (9)$$

(3) 在一級近似下，在我們所研究的压强範圍內，我們認為抽速不變。我們舉幾個例子來說明：

例1 用一個大泵，對6.8立方米的容器進行預抽空，假定沒有放氣和泵極限壓强的限制，在大氣壓和15毛之間，草鞋泵不工作，只有前級泵工作。試計算一下達到 10^{-3} 毛所需的時間。

解：從760毛到15毛的抽氣時間是：

$$t = 2.30 \times \frac{V}{S_i} \log \frac{P_i}{P} = 2.30 \times \frac{6800}{20} \log \frac{760}{15},$$

$$t = 1330 \text{ 秒} = 22 \text{ 分}.$$

從15毛到 10^{-3} 毛的抽氣時間是：

$$t = 2.30 \times \frac{V}{S_n} \log \frac{P_i}{P} = 2.30 \times \frac{6800}{75} \log \frac{15}{10^{-3}},$$

$$t = 880 \text{ 秒} = 15 \text{ 分}.$$

所以，預抽空的總時間=37分。

例2 用小泵抽空50升的容器。同樣，假定不受放氣和極限壓强的限制，並假定前級泵的平均抽速一定，考慮到在低壓時，抽速要降低，所以取平均抽速為15升/秒，即54米³/小時，試計算達到 10^{-3} 毛的時間。

解：從760毛到 10^{-3} 毛的抽氣時間是：

$$t = 2.30 \times \frac{V}{S_i} \log \frac{P_i}{P} = 2.30 \times \frac{50}{15} \log \frac{760}{10^{-3}},$$

$$t = 45 \text{ 秒}.$$

例3 試計算用小泵把6.8立方米容器抽到 10^{-3} 毛的時間。

解：從760毛到 10^{-3} 毛的抽氣時間是：

$$t = 2.30 \times \frac{V}{S_i} \log \frac{P_i}{P} = 2.30 \times \frac{6800}{15} \log \frac{760}{10^{-3}},$$

$$t = 6000 \text{ 秒} = 100 \text{ 分}.$$

● 原文為 C_L ，系 C_i 之誤——編者注。