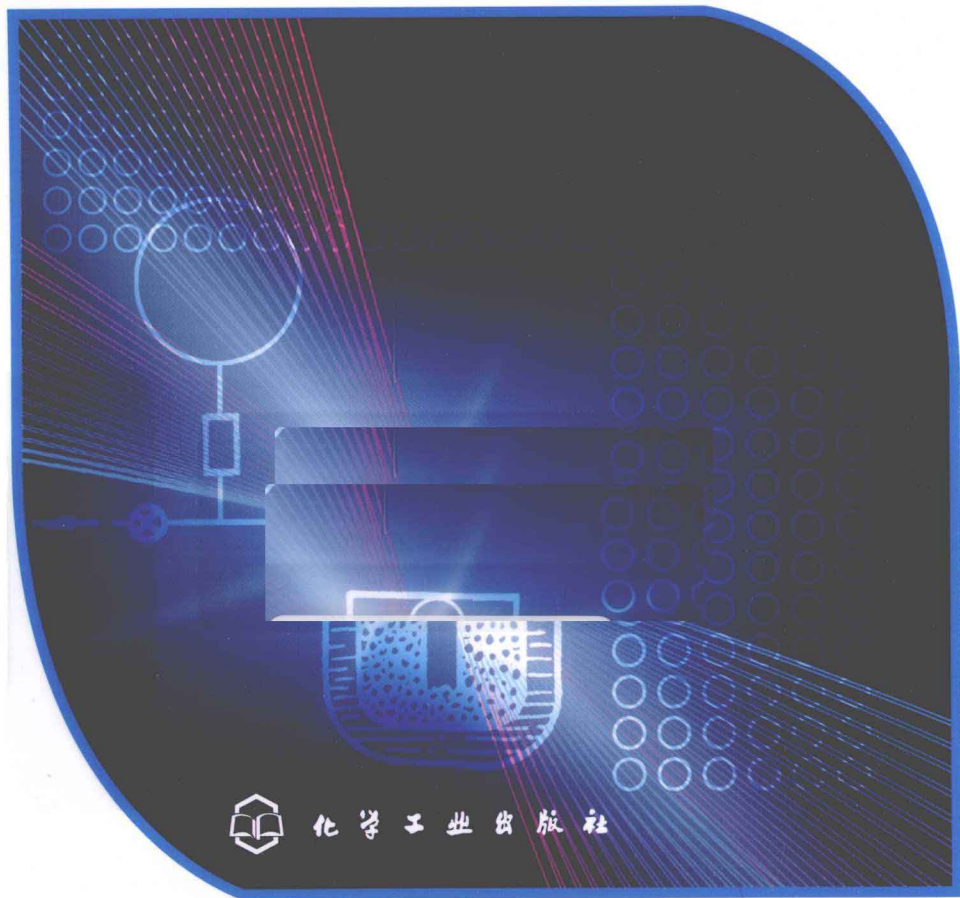


曹慎诚 编著

实用真空检漏技术

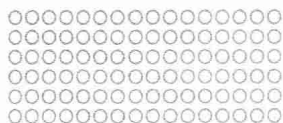
SHIYONG ZHENKONG
JIANLOU JISHU



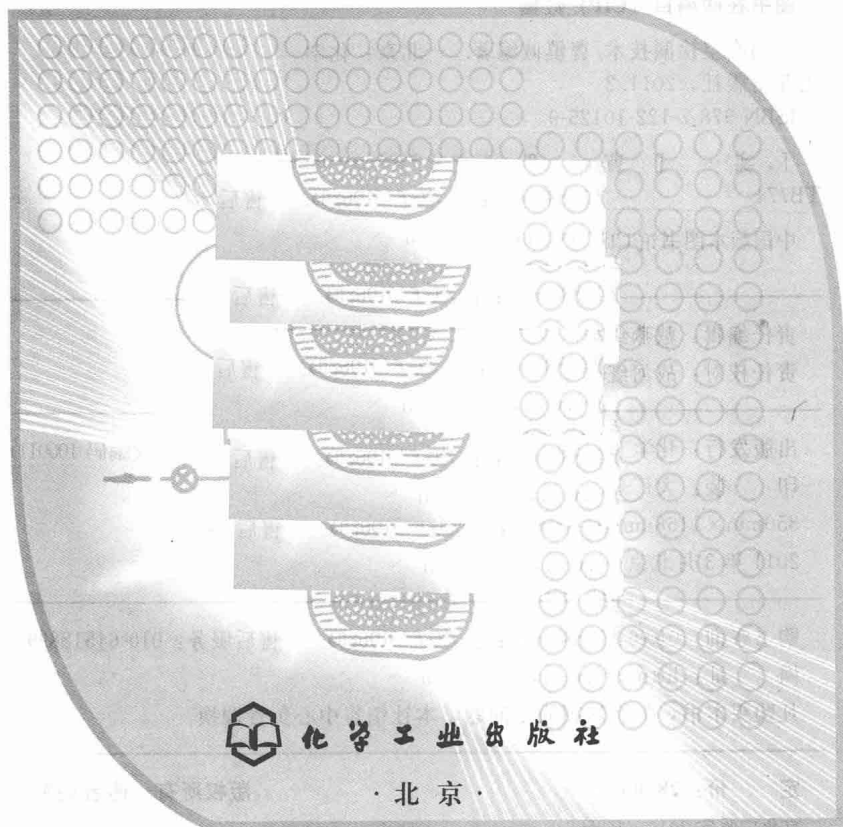
化学工业出版社

实用真空检漏技术

曹慎诚 编著



SHIYONG ZHENKONG
JIANLOU JISHU



化学工业出版社

· 北京 ·



序 言

真空检漏技术是真空技术的重要内容之一。众所周知，真空的应用涉及国民经济各个领域，如何在真空设备制造中，找出真空零部件及真空系统的漏孔，采用相应的技术措施，使每台真空设备达到对漏率的技术要求，便是摆在广大从事真空检漏技术人员面前的迫切任务。

翻阅当代国内外有关真空科技的著作、高校的真空教科书及真空设计手册等，都含有关于真空检漏技术的章节及论述。这些书籍为真空检漏人员曾提供了丰富知识，国内真空行业相关组织每年举办的各种不定期真空检漏技术培训班，为广大真空检漏人员提供了基本知识和技能培训。国内的真空检漏制造企业不断提供的各种型号的检漏仪，为真空检漏人员提供了检漏手段。这些展现了我国真空检漏技术发展的大好局面。但是，也应该看到，随着我国市场经济的发展，经济体制改革的不断深入发展，使原有的真空技术专业被高校所取消；国内原很有名的真空技术研究所，目前也没有专门研究真空检漏技术的班组建制。至今，还没有看到一本很实用的真空检漏技术的专著。而从事真空工作的广大用户、生产第一线的真空检漏技术人员，很希望能有一本实用性很强的真空检漏技术的书籍提供给他们。

这本《实用真空检漏技术》正是在这一背景下为上述人员编写的。该书文字简练、内容丰富，从实用技术入手，叙述了真空检漏的基本概念，详尽地论述了真空检漏常用的几种技术手段以及专用

的仪器设备。重点突出了打气试漏法、氦质谱检漏法、四极质谱计检漏法等。叙述了大容器检漏方面及大型液氢槽车检漏的方法、步骤及过程。其中包含了作者从事真空检漏的经验、教训。

作者曹慎诚先生是一位工作严谨、生活低调的普通高级工程师。但是，在国内真空检漏同行心目中，他是资深的真空检漏专家、教授。作者 1963 年从天津大学电真空专业毕业后，一直在兰州物理研究所从事真空检漏科研工作。他具有较深厚的电真空理论基础和丰富的实践经验，他从该所氦质谱检漏仪的研究和产品开发中，积累和丰富了真空检漏学科的理论基础。他善于总结经验，这集中反映在他从 1977~1995 年间所编著的三本检漏技术讲义中，在此不再赘述。

我们有幸在金建中所长、达道安所长领导下，在编写《真空设计手册》过程中，作为手册的技术编辑，与该手册作者之一曹慎诚先生经常在一起探讨真空工艺、真空检漏的有关技术问题，从中了解到他对真空科学技术具有不断钻研、不断进取的精神。如今，虽然他已到七十多岁的人生古稀之年，当看到他用他那颤抖的双手，一字一句反复修改文稿时，从他手上充分体现了一名知识分子为国尽力，为我国航天科技事业献身的高尚品德，我们不禁为他的这种精神所感动。我们真心地希望《实用真空检漏技术》能在化学工业出版社领导、责任编辑的大力帮助下，早日与广大读者见面。为振兴我国真空技术发展贡献一份力量。

兰州物理研究所：崔遂先（高级工程师）

谈治信（高级工程师）

2010 年 6 月 30 日



前

言

真空技术的快速发展和应用，对真空检漏技术提出了越来越高的要求。我国在检漏仪器研究和生产方面，在国际上处于先进行列；但在应用水平上显得有些不足，有待进一步提高。由于过去对检漏术语的定义（例如对检漏仪灵敏度、最小可检漏率）理解不同，因而造成了不少矛盾甚至错误。本书用国家标准统一了有关术语定义，这将是广大真空检漏人员所期盼的。相信对未来检漏技术的发展将起到推动作用。

本书共 7 章，内容丰富，提供的数据、图表精确、可靠。本书系统介绍了有关检漏的基本概念和基础理论，重点介绍了常用的检漏方法、氦质谱检漏法、四极质谱计检漏法等，并列举了一些应用实例。同时，为了更准确地反映实际情况，对工况下的检漏进行了研究和描述，其中包括真空条件下的检漏，也包括正压检漏。

笔者专门从事真空检漏技术研究和应用 47 年。根据多年的知识积累，综合现代新兴真空检漏技术成果编写出《实用真空检漏技术》，其目的就是给从事真空检漏技术第一线的技术人员提供技术帮助，该书可作为真空检漏人员培训教材使用，亦可供科研人员、大专院校师生参考。相信对真空装置设计、生产将起到促进作用。

本书在编写过程中，曾得到过崔遂先、谈治信等真空专家的指导和帮助，也得到了范垂祯、肖祥正、陈光奇、毕龙生等真空专家

的大力支持，在此一并表示感谢。

由于笔者水平有限，不足之处在所难免，敬请读者提出宝贵意见、批评指正。笔者谨表深深谢意。

编著者：曹慎诚

2010 年 11 月



目

录

第 1 章 检漏的一般概念

1.1 检漏技术的地位和应用	1
1.2 检漏技术的主要术语	1
1.3 压力与漏率关系	3
1.3.1 动态真空	3
1.3.2 静态真空	3
1.4 检漏的任务	3
1.4.1 真空抽不好的原因	3
1.4.2 不能保持压力的原因	4
1.4.3 检漏的任务	4
1.5 漏孔及其表示	4
1.5.1 焊缝及原材料的缺欠	4
1.5.2 常见漏孔的形式	5
1.5.3 漏孔出现位置及产生原因	5
1.5.4 漏孔大小的表示方法	6
1.5.5 影响漏孔漏率的因素	7
1.5.6 漏率的单位	7
1.5.7 漏孔对真空的影响	10
1.6 装置漏气的判定	10
1.6.1 真空装置漏气的判定	10
1.6.2 加压装置漏气的判定	12
1.6.3 检漏仪及其他方法	13
1.7 装置容许最大漏率估算	13

1.7.1	动态真空装置容许最大漏率	14
1.7.2	静态真空装置容许最大漏率	15
1.7.3	加压装置容许最大漏率	16
1.7.4	实际存在漏孔漏率分布	16
1.8	灵敏度与最小可检漏率	17
1.8.1	灵敏度	17
1.8.2	最小可检漏率	17
1.8.3	有效最小可检漏率	17
1.9	对检漏的一般要求	18
1.10	检漏方法的分类	19
1.10.1	加压检漏法	19
1.10.2	抽真空检漏法	20
1.10.3	其他方法	20
1.11	检漏方法、仪器和示漏物质选择原则	21
1.12	国产氦质谱检漏仪现状	21

第2章 检漏的真空基础

2.1	真空概念和测量单位	23
2.1.1	真空概念	23
2.1.2	真空度	23
2.1.3	真空区域划分	23
2.2	理想气体基本定律及状态方程	25
2.2.1	理想气体	25
2.2.2	波义耳定律	25
2.2.3	盖·吕萨克定律	25
2.2.4	查理定律	26
2.2.5	阿伏伽德罗定律	26
2.2.6	理想气体状态方程	26
2.2.7	道尔顿定律(分压力定律)	27
2.3	气体分子的平均自由程	27

2.3.1	平均自由程	27
2.3.2	单一气体分子的平均自由程	27
2.4	气体流量和管道流导	28
2.4.1	气体量	28
2.4.2	流量	28
2.4.3	流导	29
2.4.4	管道串联的流导	29
2.4.5	管道并联的流导	29
2.5	气体的流动状态	29
2.5.1	真空管道中的气体流动	29
2.5.2	漏孔中的气体流动	30
2.6	真空泵	31
2.6.1	油封式旋转机械真空泵	31
2.6.2	油扩散泵	34
2.6.3	涡轮分子泵	36
2.7	真空计	38
2.7.1	静态变形真空计	38
2.7.2	电阻真空计	39
2.7.3	热偶真空计	41
2.7.4	热阴极电离真空计	43
2.7.5	冷阴极磁控放电真空计(潘宁真空计)	45
2.7.6	分压力真空计	47

第3章 常用的检漏方法

3.1	静态升压法	49
3.2	静态降压法	51
3.3	气泡检漏法	51
3.3.1	气泡检漏法的原理	51
3.3.2	产生气泡的条件	51
3.3.3	产生压差的方法	52

3.3.4	打气试漏法及注意事项	54
3.4	高频火花检漏法	55
3.4.1	火花法	56
3.4.2	放电法	56
3.5	卤素检漏法	57
3.5.1	卤素检漏法原理及仪器结构	57
3.5.2	卤素检漏法注意事项	59
3.6	质谱仪检漏法	60
3.7	其他检漏方法	60
3.7.1	真空规法	60
3.7.2	离子泵检漏法	69
3.7.3	声波检漏法	70
3.7.4	氨检漏法	70
3.7.5	放射性同位素法	76
3.7.6	着色渗透法	78
3.7.7	荧光渗透法	79
3.7.8	正压漏率算法	79

第4章 标准漏孔及其校准

4.1	真空标准漏孔	83
4.1.1	概述	83
4.1.2	真空标准漏孔的种类	83
4.1.3	真空标准漏孔的比较	88
4.2	正压标准漏孔	89
4.3	标准漏孔的校准及使用注意事项	89

第5章 氦质谱检漏仪法

5.1	氦质谱检漏仪工作原理	93
5.2	仪器结构	94
5.2.1	质谱室	94

5.2.2	真空系统	97
5.2.3	电气部分	98
5.2.4	普通型氮质谱检漏仪 (ZJS-23B) 与逆扩散型 氮质谱检漏仪 (ZQJ-230D) 的比较	98
5.3	示漏气体选择	99
5.4	最小可检漏率与校准	100
5.4.1	检漏仪的最小可检漏率	101
5.4.2	有效最小可检漏率	101
5.4.3	检漏仪的最小可检漏率校准方法	101
5.4.4	有效最小可检漏率的校准方法	102
5.4.5	注意事项	103
5.5	反应时间与清除时间及其校准	104
5.6	氮质谱检漏仪的选择	106
5.7	氮质谱检漏技术	107
5.7.1	氮质谱检漏方法	107
5.7.2	实际漏孔漏率	123
5.7.3	大容器检漏	124

第 6 章 四极质谱计检漏法

6.1	四极质谱计的结构	135
6.2	四极质谱计的工作原理	135
6.3	四极质谱计的工作模式	136
6.3.1	模拟峰质量扫描	136
6.3.2	棒峰质量扫描	136
6.4	四极质谱计的性能指标	137
6.4.1	质量范围	137
6.4.2	分辨本领 R	137
6.4.3	灵敏度 S	138
6.4.4	最小可检分压力 $p_{\min}$	139
6.4.5	最高工作压力 $p_{\max}$	139

6.4.6	最小可检浓度	140
6.5	四极质谱计检漏方法	140
6.5.1	残气分析法	140
6.5.2	单一示漏气体检漏法	140
6.5.3	多种示漏气体检漏法	140
6.6	应用举例	142
6.7	质谱图的识别	144

第 7 章 检漏实践和检漏安全

7.1	检漏实践	149
7.1.1	检漏实践的原则——在真空工作的各个阶段都要考虑检漏工作	149
7.1.2	检漏工作人员与检漏试验室（车间）	151
7.1.3	如何进行检漏	152
7.2	检漏安全	153
7.2.1	安全事项	153
7.2.2	安全防护	154
7.2.3	压力防护	155
7.2.4	安全装置	156
7.2.5	示漏气体的危害与安全性	157
7.2.6	监测设备的类型	158
7.2.7	安全规则	158

参 考 文 献

编 后 语

第 1 章 检漏的一般概念

1.1 检漏技术的地位和应用

在真空技术中，检漏与真空获得、测量是并驾齐驱的重要分支，凡应用到真空技术的领域就会伴有检漏技术的出现。然而，检漏技术又远远超出了真空技术领域。航天密封产品大部分处于正压工作状态，这就出现了正压检漏与校准的新课题。比如气体、液体、蒸气的贮存和输送都存在密封问题，特别是易燃易爆、有毒、腐蚀性介质更为突出。低温液体的储运是一项综合技术，其中检漏技术也是关键之一。

现代科学技术的发展，对检漏技术的应用越来越广，要求也越来越高。在真空技术、低温技术、航天与航空技术以及化工、畜牧、电子、汽车、空调、冰箱、医疗、通信等诸多领域都得到了广泛应用。

1.2 检漏技术的主要术语

漏气——气体通过装置、容器上的漏孔或间隙，从高压侧流到低压侧去的现象叫漏气，也叫实漏。

虚漏——在系统内，由于气体或蒸气的放出所引起的压力增加现象。

渗漏——气体通过材料从高压侧渗到低压侧去的现象。

检漏——检测漏气部位及漏率大小的过程。

漏孔——气体在压力或浓度差的作用下，从器壁的一侧通到另一侧的孔洞、缝隙、渗透元件或封闭容器上的其他结构。

漏率——在规定条件下，一种特定气体通过漏孔的流量。

冷漏——仅当设备冷却时才明显表现出来的漏孔，当温度恢复室温后漏气现象也随之消失。

超漏——是一种特殊的冷漏现象，仅当低于 λ 点（液氮Ⅰ转变为液氮Ⅱ的温度）的液氮才出现的漏气现象。在2.19K以下的液氮Ⅱ，能以大于2.19K以上的几个量级的流动速率泄漏。

标准漏孔——在规定的条件下，漏率已知的一种校准用漏孔。

探索（示漏）气体——用来对被检件进行检漏的气体。

通道漏孔——可以把它理想地当作长毛细管的通道组成的一种漏孔。

薄膜漏孔——气体通过渗透穿过薄膜的一种漏孔。

检漏仪——用来检测被检件漏孔位置及漏率大小的仪器。

检漏仪的最小可检漏率——当存在本底噪声时，将仪器调到最佳工作状态，纯示漏气体通过漏孔时，检漏仪所能检出的最小漏率。

有效最小可检漏率——当存在本底噪声时，将检漏仪及其外部检漏系统调整到具体检漏工作状态（允许有分流），当示漏气体通过被检件上的漏孔时，全部（或部分）示漏气体进入检漏仪，在此情况下所能检出的最小漏率。

反应时间——从示漏气体施加到漏孔进气端开始，到检漏仪净偏转达到最大漏气信号的63%所经历的时间，用 τ 表示。可以认为它与漏孔大小及施氮浓度无关。

观察时间——从示漏气体施加到漏孔进气端开始，到检漏仪净偏转达到最大漏气信号的90%所经历的时间，用 t 来表示。一般 $t=2.3\tau$ 。

灵敏度——检漏仪对示漏气体泄漏的响应（即单位漏率显示的表盘刻度值）。

1.3 压力与漏率关系

1.3.1 动态真空

$$p = \frac{1}{S}(Q_0 + \sum Q_1) + p_0 \quad (1-1)$$

式中 p ——系统达到的平衡压力；

S ——系统的有效抽速；

Q_0 ——系统外部向内部的总漏率；

$\sum Q_1$ ——虚漏所形成的总“漏”率；

p_0 ——真空泵所抽到的极限压力。

一般干燥处理和长时间抽气后， p_0 和 $\sum Q_1$ 很小，故：

$$p \approx \frac{Q_0}{S} \quad (1-2)$$

1.3.2 静态真空

只要放气和吸附、吸收小得可以忽略，那么：

$$Q = V \frac{\Delta p}{\Delta t} \quad (1-3)$$

1.4 检漏的任务

1.4.1 真空抽不好的原因

① 抽气情况不良。即抽气系统本身存在问题。比如：扩散泵工作不正常，这可能是由于泵油过多或过少，泵加热功率不合适，泵油氧化或太脏，泵冷却效果不良，机械泵油太脏或含水量高，内部零件磨损或划伤，反扩散增大等原因造成的。

② 放气。真空系统或容器内部存在气体或蒸气源。主要是真空清洁处理（清洗、干燥）不良，材料选择不当或设计有死空间等

原因引起的。

③ 漏气。主要由于焊接加工或安装不良，低温下密封圈失去弹性或压缩量不足，不清洁等原因造成的。

1.4.2 不能保持压力的原因

① 负压静态不能保持，主要是放气或漏气造成的。

② 正压不能保持，主要是漏气或吸收造成的。

放气和吸收经过较长时间后会达到平衡，而漏气达到压差为零时方可动态平衡。

1.4.3 检漏的任务

漏气是绝对的，“不漏”是相对的。所谓“不漏”是指漏孔的漏率远小于容许漏率或检漏仪的最小可检漏率。

检漏的任务是：

① 用适当的方法迅速判断漏气是否是主要矛盾。

② 确定漏率是否在容许范围内。

③ 选择合适的检漏方法找出漏孔的确切位置，以便修补。

必须指出，某些产品除了规定总漏率不得超出某一允许值外，还规定了单个漏孔不得超过某一特定值，以免形成腐蚀中心。只要某一漏孔超出了该特定值，就必须找到确定位置加以修补。

1.5 漏孔及其表示

真空技术中所指的漏孔一般是极其微小的，其截面形状极不规则，漏气路径也各式各样。出现的位置随机性较大，并与生产技术的熟练程度关系很大。

1.5.1 焊缝及原材料的缺欠

焊缝及原材料的缺欠如图 1-1、图 1-2 所示，具体说明如下。

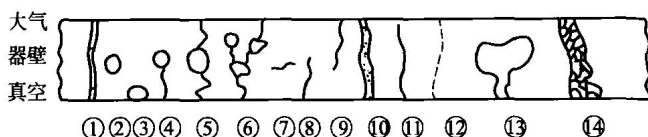


图 1-1 焊缝及容器的缺欠



图 1-2 棒料中心夹渣线

①穿透孔或缝，是检漏的主要对象；②中间气泡，对真空无影响；③近真空侧气泡，它与真空只隔一层薄膜，有可能会渗漏气体，对真空影响与放气现象类似；④内通气泡，它与真空之间的流导极小，属虚漏，类似放气；⑤内外通气泡，由于流导很小，检漏时反应时间极长，故难以检出；⑥组合气泡，它由几个气泡联合组成，更难发现；⑦中间裂纹，它与内部不通，对真空无影响；⑧内通裂纹，可能会产生虚漏；⑨外通裂纹，不影响真空度；⑩阻塞漏孔，受温度影响大，且不稳定，难以发现；⑪冷漏孔，漏率很小，只在低温时才表现出来，难以检出；⑫超漏，漏率极小，但在2.19K以下的液氮Ⅱ漏率确很大；⑬大流导内通气泡，对真空几乎无影响；⑭夹渣及变质通孔，严重漏气；⑮棒料中心夹渣线，切圆片使用时中心容易漏气。

1.5.2 常见漏孔的形式

①细圆管或环形管状；②截面极不规则的管状；③隙缝；④多孔组织；⑤空穴组织结构；⑥薄壁渗漏。

1.5.3 漏孔出现位置及产生原因

①可拆密封——划痕、杂质、垫圈老化或未压紧；②动密封——磨损，未压紧；③焊缝搭头——搭接短，夹生焊；④应力集