



技 术 白 皮 书

标准漏孔技术白皮书

从原理到实践的行业百科

漏率 · 流态 · 工艺 · 计量 · 应用方法论 · 方案

上海睿米仪器仪表有限公司

RealMeter Instruments (Shanghai)

V3.0 · 全四篇十六章 · 2026 年 9 月

本白皮书以第一性原理系统阐述标准漏孔的物理、工艺、计量与应用方法论：从漏率语言与三大流态，到工艺谱系、寿命物理与不确定度；从检漏方法学、半导体 RGA 定量标定、气密系统级精度，到降氦三件制验证新范式；并给出全漏率、全压力、全介质场景下的技术方案与实证数据。供检漏与密封性工程、计量、质量领域的工程师与决策者参考。

版本：V3.0，2026 年 9 月。

编写说明：本书由"睿米漏孔研究院"技术内容体系整理而成。第一至三篇为行业通用知识（物理、计量、方法论），第四篇为睿米技术方案。书中所有睿米产品参数引自《2026 睿米®标准漏孔产品手册 & 配置指导（修正版）》及公开发布资料。

使用声明：本书用于技术交流与培训，不构成验收依据；验收以双方确认的证书与合同工况为准。引用转载请注明出处。

总目录

前言	4
第一篇 认知篇 第 1 章 标准漏孔是什么：检漏世界的"标尺"	6
第 2 章 漏率的语言：单位、量级与直觉	10
第 3 章 漏孔里的物理学：三大流态与温度效应	14
第二篇 原理篇 第 4 章 标准漏孔工艺路线全谱系	21
第 5 章 漏孔的寿命物理学	25
第 6 章 阀门、呆体积与系统集成	30
第 7 章 不确定度与计量溯源	34
第三篇 应用篇 第 8 章 检漏方法学总览	40
第 9 章 从定性到定量：半导体 RGA 标定专题	43
第 10 章 气密检测的系统级精度	51
第 11 章 降氦范式：等效孔径相对比较法与三件制验证	55
第 12 章 选型方法论与常见误区	62
第四篇 方案篇 第 13 章 四大核心技术体系	66
第 14 章 全场景产品矩阵	69
第 15 章 实证数据：把指标变成证据	72
第 16 章 服务与质量保障体系	75
附录 A 漏率单位换算速查卡	77
附录 B 核心公式卡片集	78
附录 C 术语表	79
附录 D 规范与标准清单	81
附录 E 全书准则索引	82
全书参考文献与依据	83

前 言

标准漏孔是一个"小而重"的行业：产品只有拇指大小，却托着整个制造业的密封性判定。长期以来，这个行业的知识散落在计量规范、真空教科书、检漏仪手册与老师傅的经验里——没有一本书把"从入门到深度理解"完整地串起来。本书尝试补上这个空白。

全书结构：第一篇（认知篇，第 1~3 章）建立语言与物理：漏率是什么、单位怎么换算、漏孔里发生着什么；第二篇（原理篇，第 4~7 章）建立判断力：工艺谱系、寿命物理、阀门呆体积、不确定度与溯源；第三篇（应用篇，第 8~12 章）建立方法论：检漏方法学、半导体 RGA 定量、气密系统级精度、降氦范式、选型与 FAQ；第四篇（方案篇，第 13~16 章）展示一种答案：当这套知识体系被完整工程化之后的产物。附录提供速查工具。

怎么用这本书：新入行的工程师，请从第 1 章顺序读起，前三章会给您比多数从业三年者更扎实的底子；产线工艺与质量工程师，可直读第 8~12 章，四件套、旁路法、三件制降氦明天就能用；计量与审核人员，第 7 章与附录 D 是为你们写的；采购与决策者，第 4、11、12 章的"准则"与"四问"可以直接写进招标文件。

一个承诺：凡是物理结论，本书给出推导；凡是产品参数，本书给出来源；凡是能力边界，本书如实标注（包括我们自己做不到的）。我们认为，这正是一本白皮书赢得信任的唯一方式。

第 一 篇

认知篇 | 读懂漏孔

第 1 章 标准漏孔是什么：检漏世界的"标尺"

本章解决什么问题：标准漏孔为什么存在、它在测量体系中处于什么位置、它和工件上的真实漏点是什么关系。读完本章，您应当能向任何一位非专业同事讲清楚：没有标准漏孔，产线上每一个 OK / NG 判定都失去了依据。

1.1 一个每天都在发生的判定

在动力电池、汽车空调、半导体、医疗器械的产线上，每一秒钟都有成千上万次这样的判定：这只工件，漏还是不漏？OK 放行，NG 剔除。判定由检漏仪做出——氦质谱检漏仪、差压气密检漏仪、卤素检漏仪。但检漏仪本身并不能"知道"多大的泄漏算不合格，它只是一台把气体信号放大成数字的仪器。真正回答"多大算漏"的，是一个拇指大小的器件：**标准漏孔**。

它的角色，与天平上的砝码、万用表计量时的标准电压源完全相同：仪器给出读数，标准器告诉读数是否可信。**检漏仪是秤，标准漏孔是砝码**。砝码不准，秤越精密，错得越自信。产线上两类代价最高的质量事故——误杀（良品被判废）与漏杀（不良品流出）——追查到最后，相当比例都指向同一个根因：标尺本身不可信，或者标尺的工况没有被正确使用。

1.2 标准漏孔的定义：一个被计量过的"标准源"

定义 1-1（标准漏孔，Calibrated / Reference Leak）

标准漏孔是一种在规定工况（气体种类、入口压力、出口压力、温度）下，能够提供已知且稳定漏率、并经由计量机构标定出具证书的参考器件。国家计量技术规范 JJF 1833—2020《真空氦漏孔校准规范》将真空氦漏孔定义为"能提供已知氦气流量的元件，用来校准氦质谱检漏仪的灵敏度"，并按结构将其分为两类：**通道漏孔**（泄漏元件为真实几何通道，如毛细管型、小孔型、金属压扁型）与**渗透漏孔**（以石英玻璃等为渗透元件）^[1]。

定义里有三个关键词，缺一不可，它们构成"标准源"与普通小孔的本质区别：

表 1-1 标准源三要素：随便打个孔为什么不是标准漏孔

要素	含义	反例（随便打个孔会怎样）
可重复	同一工况下，今天、明天、明年的输出一致；温度、振动、运输之后仍一致	孔道随温度漂移、随时间蠕变，读数月月不同
可追溯	漏率值通过不间断的校准链溯源到国家计量基准，且每一环的不确定度已知	漏率只是"厂家说的大概值"，无法证明
可验证	给出证书，写死标定工况与不确定度，第三方可按同口径复核	没有证书，或证书不写工况，验收无据可依

这三要素也是全书的暗线：后面每一章——流态物理（第 3 章）、工艺谱系（第 4 章）、寿命物理（第 5 章）、不确定度（第 7 章）——本质上都是在回答"怎样才能把三要素做到极限"。

1.3 标准漏孔在测量体系中的位置

标准漏孔处在一条完整的信任链的正中间。链条的上游是计量学，下游是产品质量：

- **对上游**，它是被标定者：其漏率值由标准装置（流量计法、定量气体法或相对比较法校准装置）赋予，并溯源至国家计量基准^[1]；
- **对下游**，它是赋予者：检漏仪的灵敏度、产线的判废阈值，都由它标定。

因此标准漏孔有一个其他测量仪器很少见的属性：**它的误差会被放大两次**——先被复制到检漏仪的系统误差里，再被复制到每一次产品判定里。一支漏率偏差 +20% 却毫不知情的标准漏孔，会让整条产线以错误的门槛日夜运行。这就是为什么计量规范对标准漏孔的年稳定性（JJF 1833—2020 要求不大于 3%/年）、校准装置不确定度（相对扩展不确定度优于 10%， $k = 2$ ）做出硬性规定^[1]，也是为什么本书把"衰减"和"不确定度"各用一整章讨论。

1.4 漏孔 ≠ 漏点 ≠ 孔径：等效泄漏通道

三个概念在现场被混用，必须拆开：

表 1-2 三个最易混淆的概念

概念	定义	要点
标准漏孔	人为制造、经计量标定的标准源	故意做出来的"好漏"，越稳定越值钱
漏点	工件上客观存在的缺陷泄漏通道（裂纹、焊缝气孔、密封面缺口）	形状几乎从来不是圆孔，且往往不可复现
等效通道	把漏点在特定压差、特定气体下的运输能力，等效为一段几何通道的能力	工程上唯一可比较、可标定的对象

关键认知是：**检漏测量的是"漏率"，从来不是"孔径"**。一条 50 μm 长的裂纹和一根 5 mm 长的毛细管，只要在同一工况下输运气体的能力相同，对密封性而言就是同一个问题。标准漏孔提供的正是这样一个稳定、可控、可复现的**等效泄漏通道**——用它去"扮演"工件上那个临界缺陷（第 10 ~ 11 章的 OK / NG 判定与降氦体系即建立于此）。所有"这个漏相当于多粗的孔"的换算，离开气体种类、压力与流态都没有意义（第 3 章将给出严格说明）。

1.5 量值传递链：从国家基准到产线判定

漏率量值如何一步步传递到您的产线？下图给出完整链条：

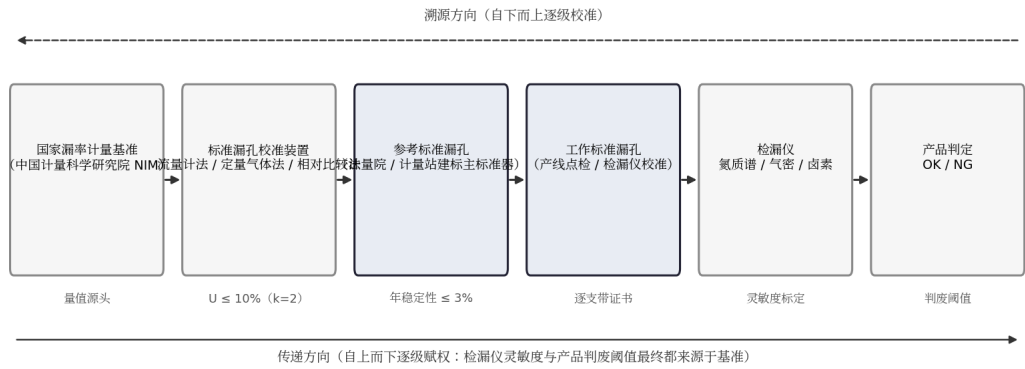


图 1-1 漏率量值传递链：溯源方向自下而上，赋权方向自上而下（示意）

链上每一环都有名字：中国计量科学研究院（NIM）保存的漏率基准 → 各级计量机构的标准漏孔校准装置（JJF 1833—2020 规定流量计法 / 定量气体法装置相对扩展不确定度优于 10%， $k = 2$ ；相对比较法优于 20%）^[1] → 参考标准漏孔（计量院 / 计量站建标用的主标准器，逐支带国家级证书）→ 工作标准漏孔（产线上日常点检、校准检漏仪的漏孔）→ 检漏仪读数 → 产品 OK / NG 判定。

这条链解释了行业中两个常见现象的成因：

- “证书口径不一致，数字就对不上”：链上每一环都绑定工况（气体、压力、温度、出口条件），任何一环换工况，下游数字全部失真；
- “建标是计量院的事，也是漏孔厂家的事”：参考标准漏孔本身必须是一件极其稳定的产品——它要在两次溯源之间（通常 12 个月）守住量值，年稳定性、温度系数、抗运输能力直接决定建标质量。第 15 章将给出符合 JJF 1833—2020 的完整建标漏孔组实例。

1.6 标准漏孔的分类学

标准漏孔不是一个单品，而是一个多维家族。掌握下面六个分类维度，就掌握了本书的“地图坐标系”：

表 1-3 标准漏孔的六个分类维度

维度	类别	物理 / 工程要点
① 结构原理	通道型（毛细管、小孔、压扁、微通道） / 渗透型（石英膜等）	决定温度系数、压力上限、介质适应性（第 3、4 章）
② 气源方式	有源（自带气室 / 储气罐） / 无源（外接气源）	有源可独立使用但有衰减问题（3.8 节）；无源无衰减、可仿真任意工况
③ 出口条件	真空漏孔（入真空） / 正压漏孔（入大气）	同一只漏孔两种口径，2.5 节给出换算条件
④ 介质	单一气体 / 混合气体 / 同位素 / 液体（水、十二烷、DMC 等）	气体走流导、液体走蒸发—输运模型（第 3 章与 6.5 节）

⑤ 检漏方法	氦质谱 / 差压气密 / 氢检 / 卤素冷媒 / RGA 质谱 / MFC 微流量	每种方法对漏孔提出不同要求（第 8 章）
⑥ 形态	气室式 / 探头式 / 微尺寸（最小 $\Phi 2.0\text{ mm}$ 级） / 检漏仪内置 / 可调漏率	形态服务于安装空间与原位标定（第 14 章）

有源与无源是现场最先要做的选择，值得先给出直觉：**有源漏孔**像一个**"自带墨水的标准印章"**——拧开阀门就能用，便携、独立，适合检漏仪校准与计量溯源；**无源漏孔**像一根**"标准化的精密毛细管"**——由现场气源驱动，可以精确仿真工件在任意压力下的泄漏行为，是产线 OK / NG 判定体系与降氦方案的基础件（第 10、11 章）。两者无优劣，只有适用边界。

1.7 为什么这个行业正在升级

过去十年，四个产业级变化把标准漏孔从"检漏仪的附件"推向了"质量体系的底座"：

表 1-4 产业升级对标准漏孔提出的新要求

驱动力	检测需求变化	对漏孔的要求
新能源电池大规模制造	壳体 / 冷却系统高节拍氦检、氢检	抗震抗摔、高频点检、OK / NG 仿真三件套、降氦
氦气供应结构性紧张	纯氦 → 低浓度氦（1% ~ 50%）	低浓度下仍稳定可判定的三件制仿真基准件（第 11 章）
半导体与超高真空	RGA 定量、同位素 / 混气标定	零呆体积阀、全金属密封、极低本底（第 6 章）
计量体系完善	JJF 1833—2020、JJG（军工）165—2024 等规范实施 ^{[1][2]}	参考级漏孔组建标、不确定度评定、规范化证书

1.8 本章小结

- 标准漏孔是检漏世界的"砝码"：检漏仪的读数、产线的判废阈值，最终都溯源到它；
- 标准源三要素——可重复、可追溯、可验证——是评价一切漏孔的元标准；
- 检漏测的是漏率（等效通道能力），不是孔径；
- 量值传递链的每一环都绑定工况，"口径写死"是全部后续工作的前提；
- 六个分类维度（原理 / 气源 / 出口 / 介质 / 方法 / 形态）构成本书的地图坐标系。

下一章先解决这个行业最基础、也最容易出错的语言问题：漏率的单位与量级。

第 2 章 漏率的语言：单位、量级与直觉

本章解决什么问题：Pa·m³/s、mbar·L/s、atm·cc/s、sccm、g/y 之间如何严格换算；"10⁻⁷ mbar·L/s"到底有多大；正压漏率和真空漏率何时可以通用。单位口径是行业沟通的第一语言，也是证书验收的第一现场。

2.1 漏率的物理定义

漏率描述的是单位时间内通过泄漏通道的气体量。真空与检漏领域约定用"压强 × 体积"来度量气体量（因为在给定温度下 pV 正比于分子数），于是：

$$Q = \frac{d(pV)}{dt} \tag{2-1}$$

式中：Q——漏率，Pa·m³/s；pV——气体量（压强 × 体积），Pa·m³；t——时间，s。JJF 1833—2020 规定漏率的计量单位为 Pa·m³/s 或 mol/s^[1]。

式（2-1）有一个重要推论：**漏率不是体积流量**。同一只漏孔，高压侧每秒流出 0.01 cm³，低压侧可能膨胀为 10 L——体积随压力而变，但 pV 流率守恒。这正是"mbar·L/s"这类单位的物理含义：把流量折算成"压强与体积乘积随时间的变化"，与测量位置无关。理解这一点，sccm、g/y 等所有导出单位都迎刃而解。

2.2 六大单位体系与精确换算

行业并存六套单位，各有历史成因与适用场景：

表 2-1 漏率单位体系与精确换算关系

单位	与 Pa·m³/s 的关系	物理含义	典型使用场景
Pa·m³/s	1（SI 主单位）	每秒 1 Pa·m³ 气体量	计量规范、出厂 / 校准证书
mbar·L/s	1 mbar·L/s = 0.1 Pa·m³/s	每秒 1 mbar·L 气体量	欧系检漏仪、真空行业最常用
atm·cc/s	1 atm·cc/s = 0.101325 Pa·m³/s	每秒 1 标准大气压 · cm³	美系仪器、渗透膜漏孔
torr·L/s	1 torr·L/s = 0.133322 Pa·m³/s	每秒 1 托 · 升	真空物理、RGA
sccm	1 sccm = 1.6888×10 ⁻³ Pa·m³/s	每分钟 1 标准状态 cm³ (0 °C、1 atm)	气密检测 (Air / N₂)、MFC
g/y (克/年)	与气体分子量有关，见式 (2-4)	每年泄漏的质量	冷媒 / 卤素行业（法规口径）

三组关键换算的推导如下，建议读者自己动手算一遍——全行业的口径混乱，一半源于这三个换算没算清。

推导一：mbar·L/s → Pa·m³/s。由 1 mbar = 100 Pa、1 L = 10⁻³ m³：

$$1 \text{ mbar} \cdot \text{L/s} = 100 \text{ Pa} \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} = 0.1 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s} \tag{2-2}$$

推导二：Pa·m³/s → sccm。 sccm 的"标准立方厘米"指 0 °C、1 atm（101325 Pa）状态下的 1 cm³。1 Pa·m³ 折合标准立方厘米数为：

$$1 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 = \frac{1 \text{ Pa} \times 10^6 \text{ cc}}{101325 \text{ Pa}} = 9.869 \text{ std.cc} \Rightarrow 1 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s} = 592.2 \text{ sccm} \tag{2-3}$$

于是得到工程上最常用的速查式：1 mbar·L/s ≈ 59.2 sccm ≈ 0.987 std.cc/s，即"1 mbar·L/s 约等于每秒漏 1 cc 标准气体"。

推导三：漏率 → g/y（克/年）。 设气体分子量为 *m*（g/mol），23 °C 下漏率为 *X* mbar·L/s。先换为标准状态摩尔流率，再乘以分子量与一年的秒数：

$$X \text{ mbar} \cdot \text{L/s} = \frac{X \times 365 \times 86400}{22.413 \times 10^3} \times \frac{273}{273 + 23} \times \frac{m}{1.013} \text{ (g/y)} \tag{2-4}$$

式中 22.413 L/mol 为标准状态摩尔体积；273/296 为 23 °C → 0 °C 的体积修正；1/1.013 为 atm → bar 修正。以 R134a（*m* = 102 g/mol）为例，1 mbar·L/s ≈ 1.3×10⁵ g/y，即 1 g/y ≈ 7.6×10⁻⁶ mbar·L/s——冷媒行业"每年几克"的法规语言与真空行业"10⁻⁵ ~ 10⁻⁶ 量级"的技术语言由此打通。

2.3 量级直觉：漏 1 cc 要多久

数字本身没有直觉，时间有。由 2.2 节"1 mbar·L/s ≈ 每秒 1 std.cc"，立即可得各量级漏率漏出 1 cc 标准气体所需的时间：

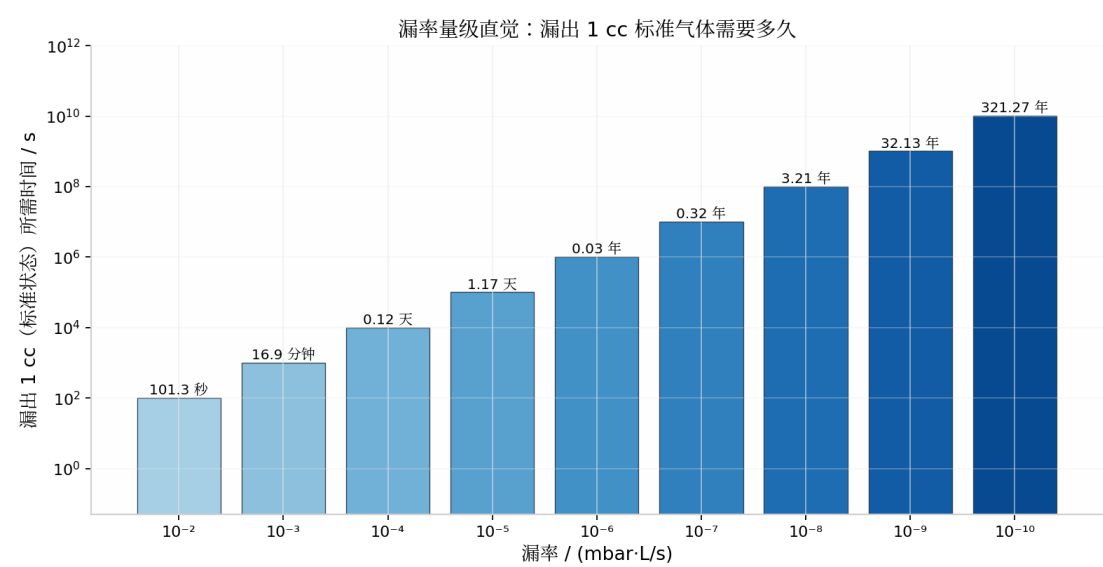


图 2-1 漏率量级直觉：漏出 1 cc 标准状态气体所需时间（对数坐标）

表 2-2 漏率量级与工程锚点

漏率 / mbar·L/s	漏 1 cc 所需时间	典型工程场景
10 ⁻² ~ 10 ⁻³	约 100 s ~ 17 min	气密粗检、大流量 MFC 标定

$10^{-4} \sim 10^{-5}$	2.8 小时 ~ 1.16 天	汽车空调 / 制冷部件合格线
$10^{-5} \sim 10^{-6}$	1.16 天 ~ 11.6 天	动力电池壳体合格线
$10^{-6} \sim 10^{-7}$	11.6 天 ~ 116 天	医疗器械、精密电子
$10^{-7} \sim 10^{-8}$	116 天 ~ 3.17 年	航空航天部件
$10^{-9} \sim 10^{-10}$	31.7 年 ~ 317 年	半导体、超高真空器件
$10^{-11} \sim 10^{-13}$	3170 年 ~ 31.7 万年	科学极限：MEMS、航天长寿命器件标定

这张表值得记住两个推论。其一，**极小漏率不可能靠"接个流量计"直接测出**—— 10^{-10} mbar·L/s 的漏孔一年才漏 0.003 cc，必须依靠质谱类仪器与量值传递链间接标定，这正是标准漏孔存在的根本理由。其二，**微流量漏孔并不存在夸大的"泄漏危险"**：一支 3.5×10^{-6} mbar·L/s 的氢气标准漏孔，每天释放约 0.3 mL 氢气，与氢气燃烧限值所关注的量级相距多个数量级——现场对"氢漏孔"的恐惧，很多源于对量级没有直觉^[3]。

2.4 表压与绝压：一个 1 bar 的低级错误

定义 2-1（表压与绝压）

绝压（absolute pressure）以绝对真空为零点；表压（gauge pressure）以当地大气压为零点。**绝压 = 表压 + 1 atm**。漏孔物理（第 3 章全部公式）只认绝压。

混淆两者的代价在高压侧不大（40 MPa 表压与绝压相差约 0.25%），在低压侧是灾难性的：某气密工件测试压力 20 kPa 表压（绝压约 121 kPa），若误把 20 kPa 当作绝压代入流导公式，漏率估值偏差可达数十倍。本书约定：**凡未注明"表压"者均为绝压；凡涉及流导计算，一律先换算为绝压**。订货与证书口径同样必须写明（第 12 章选型方法论将进一步展开）。

2.5 正压漏率与真空漏率

同一只漏孔，出口对真空（真空漏率）与出口对大气（正压漏率）是不是同一个数？这是选型时最常见的疑问，答案藏在流态公式里（严格推导见第 3 章，此处先用结论）。粘滞流下漏率正比于压力平方差：

$$Q_{\text{粘}} \propto p_1^2 - p_2^2 \tag{2-5}$$

设入口绝压 $p_1 = 11$ bar（即 10 bar 表压），出口对真空时 $p_2 = 0$ ，出口对大气时 $p_2 = 1$ bar，两者之比为：

$$\frac{Q_{\text{正压}}}{Q_{\text{真空}}} = \frac{11^2 - 1^2}{11^2 - 0^2} = \frac{120}{121} = 99.2\% \tag{2-6}$$

差异不足 0.8%；入口压力越高，差异越小。分子流下漏率正比于压差本身：出口对大气时压差由 11 bar 降为 10 bar，正压漏率为真空口径的 $10/11 \approx 90.9\%$ ，偏差约 9%——比粘滞流高一个量级，虽可修正但不可忽略。由此得到工程准则：

准则 2-1：正压口径与真空口径的偏差由流态决定。入口绝压高于约 10 bar（约 9 bar 表压）时：粘滞流元件两者偏差 $< 1\%$ （按 $(p_2/p_1)^2$ 收敛），同一只漏孔可用于两种口径；分子流元件（如微通道）偏差约 9%（按 $(p_1-p_2)/p_1$ 折算），须注明口径并按流态公式修正后使用。低压场景偏差急剧放大——以 2 bar 绝压为例，粘滞流口径偏差 25%、分子流口径达 50%——必须分别标定，不可混用。

2.6 三个最常见的单位误区

误区一：“sccm 就是 cc/min。”

sccm 的“s”是标准状态（0 °C、1 atm）。23 °C 下实测的 1 cc/min 折合约 0.92 sccm；更隐蔽的是，个别厂商默认 20 °C 或 25 °C 为“标准”。证书与验收必须写明标准状态温度。

误区二：“漏率乘个系数就能随便换气体。”

真相是：分子流区 $Q(\text{He}) \approx 2.65 \times Q(\text{空气})$ （轻分子漏得快，式 3-3 的 $1/\sqrt{M}$ 律），粘滞流区 $Q(\text{空气}) \approx 1.06 \times Q(\text{He})$ （粘度反比，式 3-2）——两个系数一个 2.65、一个 0.94（ $= 1/1.06$ ），不仅数值相差近 3 倍，连“谁比谁大”的方向都是反的。气体换算系数取决于流态，而流态取决于压力与孔径——详见 3.6 节，这是全行业被低估最深的坑。

误区三：“证书漏率 = 任何工况下的漏率。”

漏率是工况的函数：气体、入口压力、出口条件、温度四者写死，漏率才有意义。证书上每一个附属条件，都是漏率值本身的一部分。

2.7 本章小结

- 漏率的 SI 主单位是 $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ，物理本质是 pV 流率而非体积流量；
- 核心换算： $1 \text{ mbar} \cdot \text{L}/\text{s} = 0.1 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s} \approx 59.2 \text{ sccm} \approx \text{每秒 } 1 \text{ std.cc}$ ；g/y 需经摩尔质量换算（式 2-4）；
- 量级直觉： $10^{-5} \approx 1.16$ 天漏 1 cc， $10^{-10} \approx 317$ 年——极小漏率只能溯源标定，无法直测；
- 表压 / 绝压之差在低压侧是数量级错误；正压 / 真空口径的偏差由流态决定——高压下粘滞流 $< 1\%$ 、分子流约 9%（准则 2-1）；
- sccm 的标准状态、气体换算系数、证书工况，是单位口径的三大雷区。

掌握了语言，下一章进入物理：同一只漏孔里到底发生着什么——为什么压力变一倍漏率可能变四倍，为什么温度系数有正有负，为什么气体换算系数不是常数。

第3章 漏孔里的物理学：三大流态与温度效应

本章解决什么问题：一只漏孔的漏率由什么决定。本章给出三大流态的判据与流导公式、气体换算与温度系数的严格推导、有源漏孔衰减的数学模型。本章是全书的理论地基——后续“工艺对比”（第4章）、“寿命物理”（第5章）、“不确定度”（第7章）全部建立在这几页公式之上。

3.1 同一个孔，两种物理

把一根细长的圆管接在气源上：高压时，气体像“糖浆”一样被压力推着整体流动，分子之间的碰撞主宰一切；低压时，气体稀薄到分子几乎互不照面，各自沿直线飞行、撞壁反弹，靠热运动“扩散”过管子。前者是**粘滞流**，后者是**分子流**，中间是**过渡流**。同一只漏孔的漏率随压力的变化规律、随气体的变化规律、随温度的变化规律，全部由“它此刻处在哪个流态”决定。不理解流态，漏孔的一切行为都是经验玄学；理解了流态，漏孔的一切行为都可以计算。

3.2 克努森数：流态的裁判

定义 3-1（克努森数 Kn ）

气体分子平均自由程 λ 与通道特征尺寸 d 之比：

$$Kn = \frac{\lambda}{d}, \quad \lambda = \frac{k_B T}{\sqrt{2} \pi d_m^2 p} \quad (3-1)$$

式中： k_B ——玻尔兹曼常数； T ——绝对温度； d_m ——分子直径； p ——气体压强（绝压）。

工程判据： $Kn < 0.01$ 为粘滞流（连续介质）； $Kn > 1$ 为分子流（自由分子）；其间为过渡流。把数字代进去会得到一个极有用的量级估计：**常温空气在 1 atm 下 $\lambda \approx 68 \text{ nm}$** 。这意味着——

- 孔径 $5 \mu\text{m}$ 的漏孔在 1 atm 下 $Kn \approx 0.014$ ，处于**粘滞流边缘**；
- 同一只漏孔入口抽到 100 Pa， λ 增大一千倍， $Kn \approx 13$ ，完全是**分子流**；
- 孔径 50 nm 的极微通道，即使在常压附近也已进入分子流。

一句话：**漏孔工作在哪个流态，由孔径与压力共同决定；而漏孔厂家能做的，是把孔径与长度做成“设计值”而不是“运气值”**。这是第4章全部工艺比较的出发点。

3.3 粘滞流：Hagen–Poiseuille 定律

粘滞流区，长圆管（ $L \gg d$ ）的体积流量由 Hagen–Poiseuille 定律给出。将其改写为漏率形式（对可压缩气体沿管长积分）：

$$Q_{\text{粘}} = \frac{\pi d^4}{256 \eta L} (p_1^2 - p_2^2) \quad (3-2)$$

式中： d 、 L ——通道直径与长度（m）； η ——气体动力粘度（Pa·s）； p_1 、 p_2 ——入口 / 出口绝压（Pa）； Q ——漏率（Pa·m³/s）。

式（3-2）的信息量极大，逐条读出：

1. **漏率 $\propto d^4$** ：孔径差 10%，漏率差 46%。漏孔制造的本质是孔径控制——这解释了为什么"反复压扁试错"的传统工艺一致性差，而几何可控工艺是代差级进步（第 4 章）；
2. **漏率 $\propto (p_1^2 - p_2^2)$** ：出口真空时 $Q \propto p_1^2$ ——压力加倍，漏率变四倍。这正是 2.5 节"高压下正压 $\approx$ 真空漏率"的来源，也是有源漏孔"压力衰减则漏率按平方衰减"的来源（3.8 节）；
3. **漏率 $\propto 1/\eta$** ：不同气体的粘滞流漏率之比等于粘度之反比。He（ $\eta \approx 19.6 \mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ ）与空气（ $\eta \approx 18.5 \mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ ）几乎相等——**粘滞流区 He 与空气的漏率几乎一样**，与多数人的直觉相反。

3.4 分子流：Knudsen 公式

分子流区，分子与管壁的碰撞主宰输运，长圆管的漏率为（含长管修正的常用工程形式）：

$$Q_{\text{分}} = \frac{1}{6} \sqrt{\frac{2\pi RT}{M}} \frac{d^3}{L} (p_1 - p_2) \quad (3-3)$$

式中： R ——气体常数； T ——绝对温度； M ——气体摩尔质量（kg/mol）；其余同式（3-2）。

同样读三条：

1. **漏率 $\propto d^3$** ：比粘滞流的 d^4 缓和，但孔径仍是第一敏感量；
2. **漏率 $\propto \Delta p$** ：压力加倍，漏率只加倍——与粘滞流的"平方关系"截然不同；
3. **漏率 $\propto 1/\sqrt{M}$** ：轻气体漏得快。He（ $M = 4$ ）与 N_2 （ $M = 28$ ）的分子流漏率之比为 $\sqrt{28/4} \approx 2.65$ 。

3.5 过渡流与叠加模型

真实漏孔大多工作在过渡区。工程上广泛采用的近似是把漏率写成两种机制的叠加：

$$Q \approx Q_{\text{分}} + Q_{\text{粘}} = \underbrace{A \sqrt{\frac{T}{M}} (p_1 - p_2)}_{\text{分子流项}} + \underbrace{\frac{B}{\eta} (p_1^2 - p_2^2)}_{\text{粘滞流项}} \quad (3-4)$$

式中 A 、 B 为由通道几何决定的常数。对一只具体漏孔标定 A 、 B 后，任意压力、任意气体下的漏率均可计算——这正是"按指定压力与漏率精确定制"的算法基础（睿米 RMI-Cal™ 流导仿真引擎即建立在此类模型之上，第 13 章展开）。

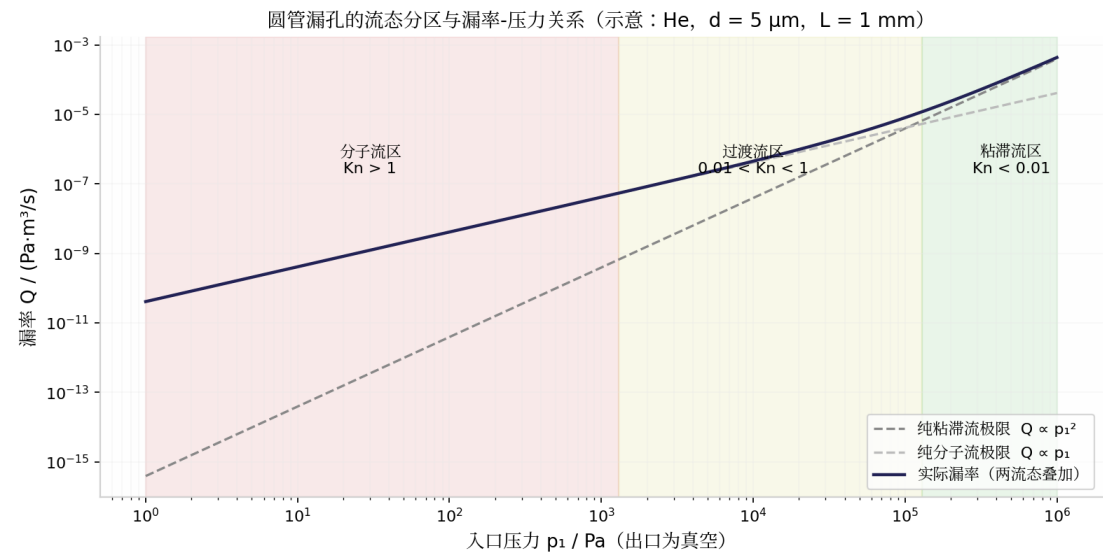


图 3-1 圆管漏孔的流态分区与漏率-压力关系（示意：He, d = 5 μm, L = 1 mm, 出口真空）

图 3-1 值得反复看：低压段漏率-压力曲线斜率为 1（分子流主导），高压段斜率趋近 2（粘滞流主导），中间平滑过渡。一只漏孔没有唯一的“压力-漏率比例系数”，只有唯一的几何。这就是为什么证书必须写死压力，也是为什么“这只漏孔在 2 bar 下标定的漏率”不能直接挪用到 20 bar 工况。

3.6 气体换算系数为什么不是常数

把 3.3 与 3.4 的结论放在一起，得到本书最重要的工程结论之一：

表 3-1 He → 其他气体的漏率换算随流态而变（理论值）

流态	换算律	He → N ₂ / Air	He → H ₂
分子流	$Q \propto 1/\sqrt{M}$	× 0.38 (÷ 2.65)	× 0.71 (÷ 1.41)
粘滞流	$Q \propto 1/\eta$	× 1.06 ($\eta_{\text{He}} / \eta_{\text{air}}$)	× 2.2 ($\eta_{\text{He}} / \eta_{\text{H}_2}$)

同一个“He 漏率换 N₂ 漏率”的问题，分子流区答案是 0.38，粘滞流区答案是 1.06——不仅数值相差近 3 倍，连换算方向都是反的。而一只漏孔工作在哪个流态，取决于它的孔径和使用压力。由此得到准则：

准则 3-1：任何“气体换算系数”都必须绑定流态（即绑定漏孔孔径与使用压力）。严肃的做法是：需要什么气体就按什么气体标定；确需换算时，必须基于流导模型（式 3-4）计算，并注明适用压力区间。随手套用固定系数（如“He × 0.38 = 空气”），在真空分子流场景或许侥幸正确，在气密高压场景必然出错。

3.7 温度系数的物理起源

温度变化 1 °C，漏率变多少？答案同样写在流态公式里。

分子流：由式 (3-3)， $Q \propto \sqrt{T}$ ，故

$$\frac{1}{Q} \frac{dQ}{dT} = \frac{1}{2T} \approx \frac{1}{2 \times 296} \approx +0.17 \text{ \%}/^{\circ}\text{C} \quad (23^{\circ}\text{C} \text{ 附近}) \tag{3-5}$$

粘滞流：由式 (3-2)， $Q \propto 1/\eta$ ；气体粘度随温度上升而增大（Sutherland 律，空气在常温附近 η 约随 $T^{0.7}$ 增长），故

$$\frac{1}{Q} \frac{dQ}{dT} = -\frac{1}{\eta} \frac{d\eta}{dT} \approx -\frac{0.7}{T} \approx -0.24 \text{ \%}/^{\circ}\text{C} \quad (\text{理论下限, 含结构修正后典型约 } -0.6 \text{ \%}/^{\circ}\text{C})$$

渗透膜：机制完全不同——气体在膜中"溶解—扩散—脱附"，扩散系数服从 Arrhenius 关系 $D \propto \exp(-E_a/RT)$ ，指数项把温度敏感度急剧放大：

$$\frac{1}{Q} \frac{dQ}{dT} = \frac{E_a}{RT^2} \approx +3 \text{ \%} \sim +4 \text{ \%}/^{\circ}\text{C} \quad (\text{典型石英渗透膜}) \tag{3-7}$$

三种机制、三种符号、三个量级，汇成一张行业级的对照表：

表 3-2 漏孔类型与温度系数：物理机制决定一切

漏孔类型	主导机制	理论温度系数	微通道工艺实测
通道型（分子流主导，如有源 He 微漏孔）	$\sqrt{T}$	约 $+0.17 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$	约 $+0.1 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$ ^[3]
通道型（粘滞流主导，如气密 Air / N ₂ 漏孔）	$1/\eta(T)$	约 $-0.24 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$ （粘度项）	约 $-0.6 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$ ^[4]
渗透型（石英膜等）	Arrhenius 扩散	$+3 \sim +4 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$ 或更高	——（渗透膜实测约 $+4 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$ ^[5] ）

这张表解释了三个行业现象：**其一**，渗透膜漏孔必须配温度修正表使用，车间昼夜温差 5 °C 即引入约 20% 的漏率漂移，这是它难以胜任产线点检的物理根源；**其二**，通道型漏孔的温度系数比渗透型低数倍至逾一个数量级，常规车间即可使用而不必恒温；**其三**，有源漏孔（ $+0.1 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$ ）与无源气密漏孔（ $-0.6 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$ ）温度系数符号相反，并非质量问题，而是两只漏孔主导流态不同的物理必然。**温度系数不是厂家"调"出来的，是流态"算"出来的**——能用公式预言自家产品温度系数的厂家，才谈得上掌握了漏孔。

3.8 有源漏孔的衰减物理

有源漏孔的气室是有限容积：气体漏一点、压力降一点、漏率跟着变——衰减是宿命，但衰减快慢可以设计。设气室容积 V 、充气绝压 p 、漏率 $Q(p)$ ，气室气体量守恒给出：

$$V \frac{dp}{dt} = -Q(p) \tag{3-8}$$

情形一：分子流主导 ($Q = K_1 p$)，解为指数衰减：

$$p(t) = p_0 e^{-K_1 t/V}, \quad \frac{1}{Q} \left| \frac{dQ}{dt} \right| = \frac{Q}{pV} \tag{3-9}$$

情形二：粘滞流主导（出口真空时 $Q = K_2 p^2$ ），解为双曲衰减：

$$p(t) = \frac{p_0}{1 + K_2 p_0 t / V}, \quad Q(t) = \frac{Q_0}{(1 + K_2 p_0 t / V)^2}, \quad \frac{1}{Q} \left| \frac{dQ}{dt} \right| = \frac{2Q}{pV} \quad (3-10)$$

两种情形的相对衰减率都含有因子 $Q/(pV)$ ——这就是衰减设计的全部秘密：**相对衰减率正比于漏率、反比于气室储能 pV** 。要衰减小，三条路：漏率做小（已由需求定死）、气室容积 V 做大（受体积限制）、充气压力 p 做高。第三条路效果最显著，却恰恰是传统工艺的禁区——玻璃 / 石英类漏孔承压通常不足 1~2 MPa。于是一个行业级结论浮出水面：

准则 3-2：有源漏孔的寿命之争，本质是“谁能把气室压力做高”之争。高压气室（如 11~12 MPa）配合耐压微通道结构，可把同漏率漏孔的衰减压低数倍乃至近一个数量级。

用实测数据验证模型。三支初始漏率同为 3.0×10^{-5} mbar·L/s 的 He 有源漏孔：① 11 MPa / 300 cc；② 11 MPa / 160 cc；③ 1 MPa / 160 cc（普通充气压力）。由 $Q/(pV)$ 得相对衰减率分别为每年 2.9%、5.4%、59%。He 微通道漏孔以分子流为主导流态，按式（3-9）指数衰减；粘滞流口径（式 3-10）漏率以平方关系加速下降，可作保守边界。两种口径的漏率保有率曲线如图 3-2^[3]：

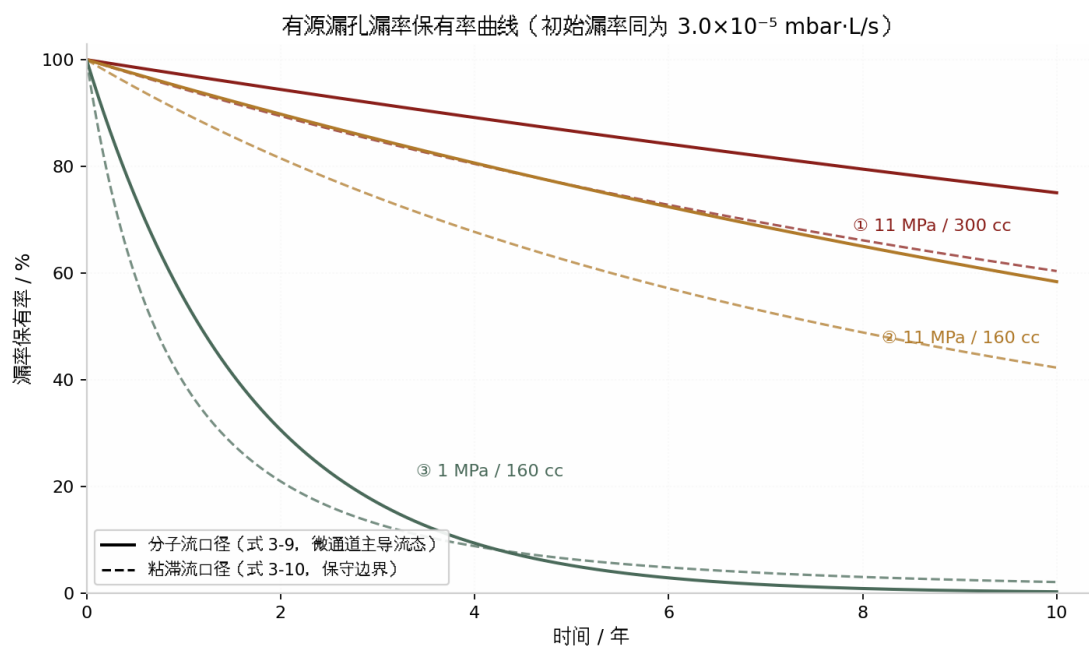


图 3-2 有源漏孔漏率保有率曲线对比（初始漏率同为 3.0×10^{-5} mbar·L/s；实线为分子流口径（式 3-9），虚线为粘滞流口径（式 3-10）保守边界）

① 十年后漏率保有约 75%（分子流口径），保守按粘滞流口径约 60%；② 约 58%，粘滞流口径约 42%；③ 衰减 70% 仅需约 2 年（分子流）乃至 1.4 年（粘滞流）——**同样的初始漏率，仅因充气压力与气室不同，有效寿命相差逾十倍**。模型还给出日常快速估算式：单位时间相对压力衰减 $\approx Q \cdot \Delta t / (pV)$ 。工程读法很直白：选购有源漏孔时只问三个数——初始漏率、充气压力、气室容积，用式（3-9）/（3-10）现场即可算出三年后的漏率还剩多少；储量 pV 小的场景（②③）尤应缩短校准间隔。

3.9 本章小结：三条公式如何决定一只漏孔的一生

- 克努森数（式 3-1）是流态的裁判：孔径与压力决定漏孔"此刻是粘滞流还是分子流"；
- 两条流导定律（式 3-2、3-3）决定漏孔的全部宏观行为：压力特性（平方 vs 线性）、气体特性（ $1/\eta$ vs $1/\sqrt{M}$ ）、温度特性（负 vs 正温度系数）；
- 气体换算系数不是常数（准则 3-1）——严肃做法是全介质实标，或基于流导模型换算；
- 温度系数由物理机制注定：渗透膜 +3~4 %/°C，通道型低一个量级（分子流约 +0.1 %/°C、粘滞流约 -0.6 %/°C）；
- 有源漏孔衰减率 $\propto Q/(pV)$ （式 3-9、3-10）：高压大气室是长寿命的正解（准则 3-2）。

至此，读者已经拥有评价一切漏孔的物理标尺。第二篇（原理篇）将用这把标尺逐一丈量行业中的工艺路线：玻璃拉丝、金属压扁、渗透膜、粉末烧结、临界流喷嘴、MEMS，以及金属基微通道——看它们各自能把 d^4 、 η 、 λ 、呆体积这些物理量控制到什么程度。

第 二 篇

原理篇 | 看懂工艺

第4章 标准漏孔工艺路线全谱系

本章解决什么问题：行业中有哪些漏孔工艺路线，各自的物理原理、能力边界与失效模式是什么。本章不评价任何厂家，只用第3章的物理标尺丈量每一种工艺——读完您将理解：为什么有的漏孔“娇贵易碎”，有的漏孔可以砸、可以冻、可以在40 MPa下工作。

4.1 评价工艺的四把物理尺子

第3章告诉我们，漏孔的宏观行为由四个物理量决定。评价任何工艺，只需问它能把这四个量控制到什么程度：

表 4-1 四把物理尺子：从公式到工艺指标

物理尺子	公式出处	对应的工程指标
孔径 d （及其一致性）	式（3-2）： $Q \propto d^4$ ；式（3-3）： $Q \propto d^3$	漏率公差、批次一致性、可定制性
通道几何规则度	理想圆管假设	漏率有无方向性、防堵性、可计算性
材料与密封本底	渗透、吸附、释气	极小漏率下限、介质纯度、温度系数
结构机械强度	承压、抗冲击、抗热循环	压力上限、抗震抗摔、工作温域、寿命

其中孔径一项最值得量化。由 $Q \propto d^4$ ，漏率公差与孔径公差的关系为：

$$\frac{\Delta Q}{Q} = 4 \frac{\Delta d}{d} \Rightarrow \text{漏率公差} \pm 10\% \text{ 要求孔径公差} \pm 2.4\%； \pm 20\% \text{ 要求} \pm 4.7\% \quad (4-1)$$

对一支 5 μm 孔径的漏孔，±2.4% 意味着孔径必须控制在 ±120 nm 以内。漏孔制造的本质，是亚微米级几何量的控制竞赛——下面每种工艺的差距，最终都落到这一点上。

4.2 玻璃拉丝毛细管：第一代主流

原理：将玻璃管与金属丝（或玻璃棒）熔封后拉细，利用玻璃与金属冷却时热膨胀系数差异形成的微小缝隙作为泄漏通道。**能力边界：**漏率典型 $10^{-4} \sim 10^{-7}$ mbar·L/s，承压一般 < 1 MPa。**失效模式：**其一，缝隙是“环状锥形”而非圆管，孔径沿轴向不均匀——正反向流导不等，即**漏率有方向性**（4.9 节、5.4 节）；其二，玻璃脆性决定了它怕摔、怕冻、怕压力冲击，工业现场寿命短；其三，缝隙几何不可设计，目标漏率靠“拉一批、测一批、挑一批”的筛选实现，一致性靠运气。

4.3 金属压扁：简单但不可控

原理：将金属细管（或金属片夹丝）反复压扁、测量、再压扁，直到漏率落入目标区间。**能力边界：**漏率典型 $10^{-1} \sim 10^{-6}$ mbar·L/s，承压一般 < 2 MPa。**失效模式：**压扁通道是“月牙形”截面的试错过产物——

同样存在方向性；金属在应力下缓慢蠕变，漏率随时间漂移；压扁模具的磨损直接转化为批次差异。它的优点是便宜、漏率大，在粗检场景仍有市场，但“可调、可算、可复现”无从谈起。

4.4 石英渗透膜：极微漏率的旧王

原理：利用 He 等小型分子在石英玻璃中的“溶解—扩散—脱附”渗透过程，通过膜面积与厚度控制渗透率。**能力边界：**可以做出 $10^{-9} \sim 10^{-12}$ 量级的极小漏率，长期是氦检漏仪内置校准漏孔的主流。**失效模式：**其一，温度系数高达约 $+4\%/^{\circ}\text{C}$ （式 3-7 的 Arrhenius 机制），车间温差 5°C 即漂移约 20%，必须配温度修正表使用；其二，膜两侧压差受限（膜是承压薄弱点），玻璃质脆；其三，**介质被锁死**——只有 He、 H_2 等小分子能渗透， N_2 、Ar、冷媒、混气一概无缘；其四，石英对 He 的渗透本身就是约 $10^{-10} \text{ atm}\cdot\text{cc/s}$ 量级的“本底”，继续做小会被自己的本底淹没（5.2 节）。

4.5 粉末烧结与多孔介质

原理：金属或陶瓷粉末烧结成多孔体，依靠大量并联微孔的统计平均形成流导。**能力边界：**适合 $10^{-1} \sim 10^{-4}$ 的较大漏率，耐压尚可。**失效模式：**孔径分布宽，一致性靠统计而非几何；多孔体表面积巨大，**吸附/脱附效应显著**（5.3 节），湿度与污染会使漏率缓慢漂移；无法跨量级做小。

4.6 临界流喷嘴：大流量的特解

原理：当喷嘴下游压力与上游压力之比低于临界比（空气约 0.528），喉部达到音速，流量只取决于上游压力与喉部面积，与下游无关。**能力边界：**是大流量（sccm 到 L/s 级）气体流量标准的正解，广泛用于 MFC 标定。**失效模式：**必须维持足够的压差比才能“临界”，低压差场景失效；做不成小漏率；对上游洁净度敏感。它是流量计量器件而非检漏标准件，与本书主角是“远亲”。

4.7 MEMS 蚀刻：半导体思路的尝试

原理：在硅片上光刻蚀刻出微通道，键合封装。**能力边界：**几何可控、理论上可批量复制，是学术与初创方向的热点。**失效模式：**硅基脆性与玻璃阳极键合的密封本底限制了压力上限与极小漏率能力；封装环节的胶/焊料引入释气与渗透；批间一致性与长期稳定性数据尚不充分。方向值得关注，但“从晶圆到产线标尺”的路还没走完。

4.8 金属基微通道：把漏孔从“手艺”变成“设计”

前面六种工艺有一个共同的宿命：**漏率是“做出来再测”的结果，而不是“算出来再造”的设计**。金属基微通道工艺（睿米 RMI-MTC™）的逻辑相反：在金属基体内直接加工出几何确定的圆形微通道（孔径 $50 \text{ nm} \sim 200 \mu\text{m}$ 连续可控），先按流导公式（式 3-2、3-3、3-4）计算出目标孔径与长度，再按图施工。对照四把尺子：

1. **孔径与一致性：**几何量为设计值，漏率公差 $\pm 10\%$ 起步、可按需 $\pm 5\%$ 乃至更高（式 4-1 的 $\pm 2.4\%$ 孔径公差对数控加工是常规能力），批次一致性不再靠筛选；

- 2. **通道规则度**：接近理想圆管 $\Rightarrow$ **漏率无方向性**、抗堵（均匀孔道无节流喉部）、全流态可计算；
- 3. **材料本底**：金属基体 + 全金属密封（渗透 $< 10^{-15} \text{ atm}\cdot\text{cc/s}$ ，见 5.2 节），不引入有机材料；
- 4. **机械强度**：金属一体结构 $\Rightarrow$ 无源漏孔承压达 40 MPa、通过 1.2 m $\times$ 5 次跌落测试、工作温度 $-20 \sim +65 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[3]。

由此获得一组传统工艺无法同时成立的组合：**全漏率**（100 mL/s $\sim 10^{-13} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ ） $\times$ **全压力**（0.1 Pa $\sim 40 \text{ MPa}$ ） $\times$ **全介质**（任意非腐蚀气体 / 混气 / 液体） $\times$ **指定压力与漏率同时定制**。这不是某一项指标的领先，而是四把尺子全部换了一代。

4.9 七种工艺能力对比总表

表 4-2 标准漏孔工艺谱系对比（典型量级，供选型参考）

工艺	漏率范围 / mbar·L/s	压力上限	温度系数	方向性	介质适应性	本质局限
玻璃拉丝	$10^{-4} \sim 10^{-7}$	$< 1 \text{ MPa}$	约 $\pm 0.3 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$	有	通用 但 怕 污染	缝隙几何不可设计、易碎
金属压扁	$10^{-1} \sim 10^{-6}$	$< 2 \text{ MPa}$	约 $\pm 0.5 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$	有	通用	试错制造、蠕变漂移
石英渗透膜	$10^{-9} \sim 10^{-12}$	$< 0.2 \text{ MPa}$ 级	约 $+4 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$	无（渗透）	仅 He / H ₂ 等小分子	温漂大、介质锁死、膜脆
粉末烧结	$10^{-1} \sim 10^{-4}$	约 5 MPa	约 $\pm 0.8 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$	无	通用 但 怕 湿	统计一致性、吸附漂移
临界流喷嘴	大流量专用	约 20 MPa	约 $\pm 0.3 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$	无	通用	需压差比维持、非检漏件
MEMS 蚀刻	$10^{-6} \sim 10^{-9}$ 级	$< 1 \text{ MPa}$	约 $\pm 0.3 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$	无	受封装限制	封装本底、强度、数据积累
金属基微通道	$10^2 \sim 10^{-12}$ （全量级）	40 MPa	$+0.1 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ （分子流） / $-0.6 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ （粘滞流）	无	全介质	——

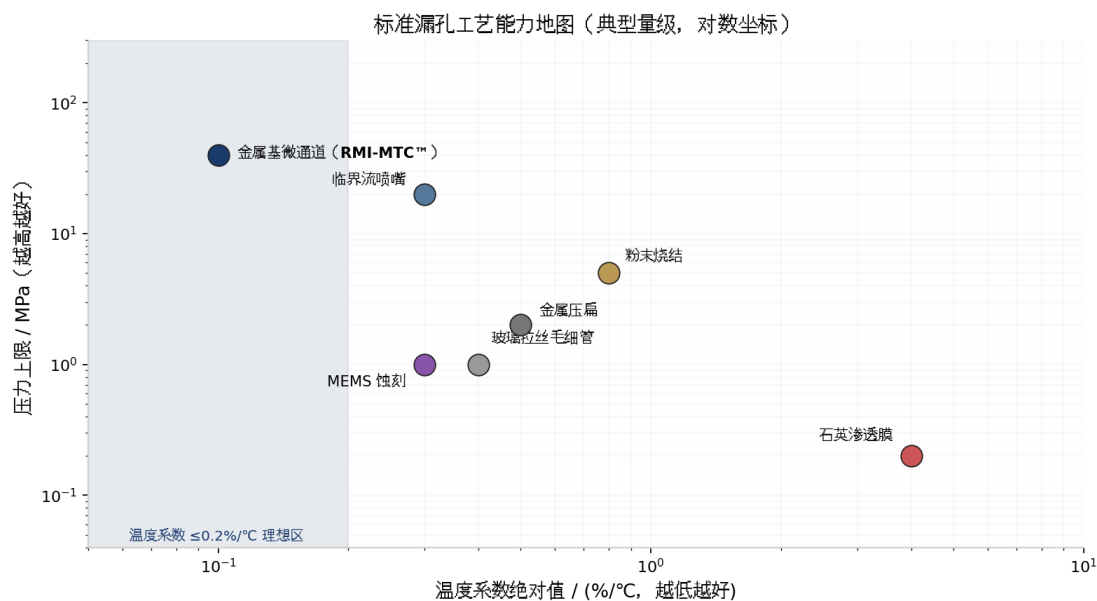


图 4-1 标准漏孔工艺能力地图：温度系数（越低越好）× 压力上限（越高越好）

读图方法：越靠左（温度系数小）、越靠上（耐压高）的工艺越强。七种工艺在图上自然分层——这不是任何厂家的宣传结论，而是第 3 章物理的直接推论：温度系数由流态与材料机制决定，压力上限由结构与密封决定。

准则 4-1（真伪微通道的直判法）：把漏孔反接，在同一压差下复测漏率。理想圆管正反向流导严格相等；玻璃拉丝与金属压扁因孔道几何不对称，双向漏率必有差异。**漏率无方向性，是微通道工艺最朴素也最难伪造的指纹。**

4.10 本章小结

- 评价工艺只需四把尺子：孔径控制（ d^4/d^3 ）、通道规则度、材料本底、机械强度；
- 传统六艺的共同宿命是“漏率靠试错与筛选”；微通道的本质是“漏率可设计、可计算、可复制”；
- 温度系数与压力上限是物理机制的产物，不是工艺宣传的产物；
- 双向漏率相等试验，是识别理想圆管通道的一分钟判据。

工艺决定了漏孔的“先天”，下一章讨论它的“后天”：堵塞、本底、吸附、蠕变——漏孔在寿命周期内要面对的全部敌人。

第 5 章 漏孔的寿命物理学

本章解决什么问题：一支标准漏孔为什么会“死”——漏率漂移、读数异常、彻底失效的物理原因是什么，如何从设计与使用两端把寿命做到以十年计。第 3.8 节已讨论有源漏孔的衰减，本章讨论密封本底、吸附释气、方向性、机械与温度损伤等寿命威胁（堵塞的机理与防御并入 5.1 清单与 5.6 节），并以一张“失效模式 × 工艺路线”矩阵把各工艺的死法谱完整收口。

5.1 寿命威胁清单：漏孔的五种“死法”

表 5-1 漏孔寿命威胁总览

威胁	物理机制	宏观表现	防御策略
衰减（有源）	气室储能 pV 有限， $Q/(pV)$ 衰减率（式 3-9/3-10）	漏率逐年缓慢下降	高压大气室；按需补气或换孔；无源方案根除
堵塞	颗粒卡塞喉部自锁（锥形 / 压扁喉部天然存在）；油雾、水汽开尔文凝聚成液桥（孔径越小越易结露）	漏率骤降或归零	均匀圆管无喉部 + 入口拦截；洁净干燥气源（防御两端见 5.6 节）
密封本底	密封材料渗透 / 微漏叠加在标称漏率上	极小漏率测不准、做不出	全金属密封（5.2 节）
吸附释气	表面物理吸附层的脱附形成“幽灵漏率”	读数虚高、本底恢复慢	低表面能材料、烘烤、短通路
机械 / 温度损伤	跌落、振动、冻融、压力冲击	几何或密封突变，漏率跳变	金属一体结构；宽温设计验证

读这张清单时，有一条比“五种”更重要的分类轴——**按死因所在的位置分**。一类是**外源侵入**：颗粒、液膜自外部突破过滤元件进入通道，触发在使用端，是用户唯一能主动防御的死法；另一类是**内生失效**：死因写在材料与几何的基因里，使用端再精心也无法改写。内生失效又分两族——**内生堵塞**（材料自己“长”出阻塞：氧化皮渐进缩孔、渗透界面表面膜中毒、烧结孔道蠕变、老化产物剥落）与**结构破坏**（脆裂、松弛回弹、热失稳——直接或经失真改写漏率）。现场统计中，传统工艺漏孔的失效约 90% ~ 99% 属于内生失效两族（5.6 节失效矩阵按此轴展开）；外源侵入只是小头。认清这条轴，才能读懂后面每一节“防御策略”到底该下在设计端还是使用端。

5.2 密封本底：谁淹没了 10^{-12}

做一支标称 $10^{-12} \text{ atm}\cdot\text{cc/s}$ 的通道型漏孔，真正的难点不在“做出这么小的通道”，而在“证明测到的 10^{-12} 全部来自通道本身”。漏孔总输出是通道漏率与系统本底的叠加：

$$Q_{\text{测}} = Q_{\text{通道}} + Q_{\text{密封渗透}} + Q_{\text{界面微漏}} + Q_{\text{释气}} \tag{5-1}$$

工程准则（与第 3 章的 SNR 思想同源）：**本底各项之和应低于标称漏率的 1/10**。常见密封方案的自身渗漏量级：

表 5-2 密封方案自身渗漏率典型量级

密封方案	自身渗漏率 / atm·cc/s	能做的漏孔下限（10:1 准则）
环氧胶 / 树脂粘接	约 10^{-9}	10^{-8}
橡胶弹性体（O 圈 / 垫）	约 $10^{-8} \sim 10^{-7}$	10^{-7}
石英玻璃封装（对 He 渗透）	约 10^{-10}	10^{-9}
全金属熔铸密封（RMI-Metal™）	$< 10^{-15}$	10^{-14} 量级仍有裕度

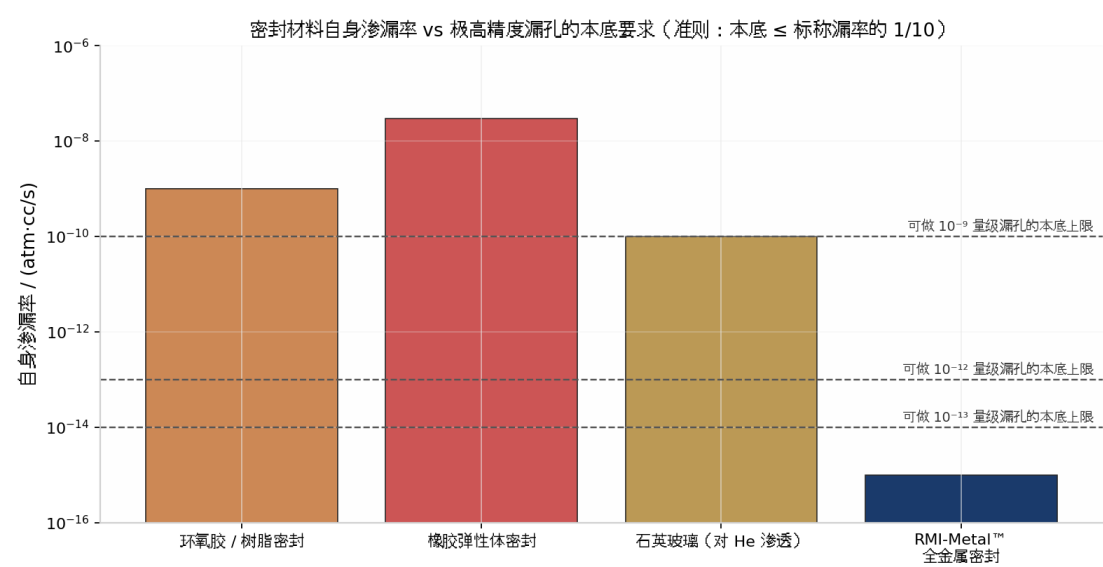


图 5-1 密封材料自身渗漏率 vs 极高精度漏孔的本底要求

这张图解释了一个行业事实：**为什么 $10^{-11} \sim 10^{-13} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ($10^{-10} \sim 10^{-12} \text{ mbar} \cdot \text{L/s}$) 的通道型 He 漏孔长期只有渗透膜方案可选**——不是通道做不出来，而是常规密封的本底 ($10^{-9} \sim 10^{-10}$) 恰好卡在这个区间，通道信号会被本底淹没。密封本底每压低一个数量级，漏孔的下限才能跟着下探一个数量级。这就是为什么“全金属密封 $< 10^{-15} \text{ atm} \cdot \text{cc/s}$ ”这个数字（领先常规密封工艺 5~6 个数量级^[3]）是极高精度漏孔的入场券，也是第 13 章 $10^{-11}/10^{-12}/10^{-13}$ 系列能够存在的前提。

5.3 吸附与释气：看不见的“幽灵漏率”

任何暴露在气体中的固体表面都吸附着气体分子层。做个量级估算： 1 cm^2 表面一个单分子层约含 10^{15} 个分子，折合气体量：

$$pV = Nk_{\text{B}}T \approx 10^{15} \times 1.38 \times 10^{-23} \times 296 \approx 4 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 = 4 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{L} \quad (5-2)$$

这些分子在真空下缓慢脱附，等效为一路“幽灵漏率”：对 10 L 容积、目标本底 10^{-6} Pa 的真空系统，仅 1 cm^2 的单分子层全脱附就足以把压力顶高 $4 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ ——超标约 400 倍（逾两个数量级）。这就是 RGA /

超高真空场景的真实日常：**系统里最大的“漏”往往不是漏孔，而是表面**。防御策略因此明确：

- **材料端**：不用胶、不用高分子密封，全金属 + 电解抛光降低比表面积；
- **结构端**：阀门与漏孔一体化，消除装配界面（每个装配界面都是藏气口袋）；
- **使用端**：UHV 系统烘烤除气；标准漏孔接入前预抽，避免把大气吸附层带进去。

吸附问题还有一个更隐蔽的化身：**混气的分层与记忆**——重组分在有机密封与死角的吸附 / 释放速率与轻组分不同，会使混气漏孔输出组分随时间漂移。这一点与 6.2 节呆体积的“记忆效应”是同源的。

5.4 方向性：一个被忽视的真伪判据

理想圆管的流导只取决于几何与流态，与流向无关——正接、反接，漏率严格相等。而锥形缝隙与压扁通道因几何不对称（入口处突然收缩、出口处渐扩），正反向流导可差出可观的比例，极端情况下成倍。方向性带来两个实际危害：

- 标定与使用若方向不一致，漏率直接错误；
- 同一支漏孔被现场“无意反接”后，读数毫无预警地失真。

因此方向性既是使用陷阱，也是工艺试金石（准则 4-1）：**双向复测漏率相等，是“接近理想圆管”最直接、最难伪造的证据**。采购验收时加做这一个动作（正接测一次、反接测一次），成本五分钟，信息量极大。

5.5 机械与温度损伤：工业现场的日常暴力

实验室漏孔与产线漏孔的区别，在于后者活在振动、跌落、温差、油雾里。损伤的物理本质是**几何突变**：通道裂纹、密封界面松动、毛细管移位——任何一项都直接改写 d 或密封本底，漏率随之跳变且不可逆。因此机械耐受性必须作为设计指标而非使用注意事项：

- 金属一体结构（无粘接、无玻璃件）从根本上消除脆性失效模式；
- 量化验证：如 1.2 m 跌落 $\times 5$ 次后漏率复测不变、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 急冻后复测不变（第 15 章给出实测数据与视频索引^[14]）；
- 宽温设计：工作 $-20\sim +65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、可耐受 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷冻，使漏孔可以跟随工件进入真实工况而非温室。

还有一笔账常被漏算：**结构破坏最危险的结局不是死亡，而是失真**。摔裂的玻璃漏孔当天就会被发现更换——显性失效只损失一支漏孔；而几何松弛、微变形后“带伤工作”的通道漏孔不会断气，只会悄悄改变漏率，在产线上“健康地”给出错误基准数月——隐性失真会污染整条产线的每一次判定（第 10 章“盲判”的微观机制正在于此）。因此评价机械耐受性时，“摔不坏”只是及格线，“摔过以后漏率复测不变”才是满分线——量化验证之所以必须要求复测数据（上条），原因正在这里。

准则 5-1：评价一支漏孔的寿命，不要问“它能用多久”，要问四件事：衰减率 ($Q/(pV)$)、防堵结构（有无喉部）、密封本底（比标称漏率低几个数量级）、机械验证（跌落 / 冻融后复测数据）。前两项算得出，后两项看得见。

5.6 失效矩阵：四种工艺的"死法地图"

把第4章的工艺路线与本章的失效机制叠加，得到一张完整的失效矩阵。先看三个读表约定：

- **过滤元件是常量，不是变量：**精密过滤（防尘、防液）在各工艺间已是标配，防护能力大体拉平，不构成差异——差异只在"通道本身怕不怕"与"还有哪些内生失效"；过滤器的布置按污染路径设计（无源漏孔两端设防，有源漏孔因气室密封、唯一侵入路径是出气端，故仅出气端设防）；
- **分母必须点明：**现场统计中传统工艺的失效约90%~99%属于**内生失效两族——内生堵塞与结构破坏**（含结构破坏导致的漏率失真与二次堵塞），外源侵入只占小头；而微通道把内生两族结构性删除后，残余死法几乎只剩"突破过滤元件的外部污染"——两句话不矛盾，因为分母不同：一个是传统工艺的失效构成，一个是微通道清零后的残余构成；
- **本表不构成对任何工艺的贬损：**每种工艺都有它的适用窗口与历史贡献，矩阵的价值在于让失效谱完整可见，让选型成为知情决策——这正是工艺改进的前提；
- **"渗透型不堵塞"只有一半成立：**渗透膜无贯通孔道，氦以溶解-扩散穿过玻璃体，颗粒堵孔对它天然免疫（矩阵第一行）——这是它数十年来的立身之本；但泵油返流与碳氢蒸气在膜表面凝膜、改变氦的溶解度与界面梯度的"表面膜中毒"，是它的等效死法（第三行）。而"通道型易堵"的口碑属于有喉部的旧工艺（锥形缝隙、压扁月牙天然存在尖锐喉部，颗粒进入即自锁）——均匀圆管没有喉部，颗粒要么通过、要么被挡在入口端面，配合过滤元件，外源堵塞已降级为小概率可防事件。简言之：**通道型怕"颗粒堵孔"，渗透型怕"表面中毒"，污染敏感性两边都有，只是形态不同。**

失效模式×工艺路线矩阵（免疫/低/中/高=主要死因）

失效模式	失效属性	渗透型（玻璃膜）	玻璃拉丝毛细管	压扁金属毛细管	微通道（RMI-MTC™）
颗粒堵孔	外源侵入	免疫 （无贯通孔道）	高（锥形喉部自锁）	高（月牙喉部自锁）	低（无喉部+双端过滤，可防）
液膜/油雾堵塞	外源侵入	中（表面成膜，见下行）	中（毛细凝聚）	中（毛细凝聚）	低（过滤拦截+可烘烤）
表面膜污染（渗透界面中毒）	内生堵塞	高 （液膜改写溶解度）	——（无此模式）	——（无此模式）	——（无此模式）
机械脆裂（跌落/扭矩/热冲击）	结构破坏	高 （玻璃脆性，主死因）	高 （玻璃脆性）	低	低（金属一体，15.1节实测）
温度漂移（使用误差）	结构破坏（热失稳）	高（约+3~4%/℃，指数型）	低（<0.5%/℃）	低（约0.5%/℃）	低（0.1%/℃，宽温验证）
迟滞/回弹/记忆	结构破坏	高（玻璃氦记忆，开关迟滞）	中（几何不对称）	高（冷作硬化松弛回弹）	低（几何稳定，双向一致）
密封/材料老化漂移	内生堵塞+结构破坏	中（膜老化）	中（封装界面）	中（氧化渐进堵塞）	低（全金属密封<10 ⁻¹⁵ atm·cc/s）

外源堵塞的防御分设计与使用两端。**设计端**：均匀圆管没有喉部，颗粒要么通过、要么被挡在入口端面（可加防护过滤），这是“防堵性好”的几何本质；入口端加防尘 / 防水结构（如真空场景防水防尘罩），把拦截做在通道之外。液相凝聚同理——油雾、水汽在微孔内毛细凝聚（开尔文效应：孔径越小，饱和蒸气压越低，越易结露成液桥），无喉部几何加上加热烘烤能力使其可逆。**使用端**：气源加过滤与干燥（油含量 $< 0.01 \text{ mg/m}^3$ 级）、避免气源带液、储存时封堵接口。一条经验：**凡是需要“轻拿轻放、恒温保存、专用气源”伺候的漏孔，都是设计端没做完的功课转嫁到了用户头上。**

矩阵的最后一列揭示了一个结构性事实：微通道漏孔的失效模式**收敛**——机械脆性、热漂移、迟滞、密封老化这一整族“内生失效”被整体金属结构、均匀几何与全金属密封从物理上删除，残余死法几乎只剩“突破过滤元件的外部污染”一种。死法的性质因此改变：**传统工艺的漏孔多死于“病死”（写在结构基因里的失效），微通道漏孔只剩“他杀”（来自系统外部的污染侵入）**——凶器在用户的管路里，不在漏孔里。批量供货的售后数据与此模型一致：在头部新能源客户的产线供货中，微通道漏孔的故障率较传统工艺低 $1 \sim 2$ 个数量级，服役寿命相应为数倍——“寿命长”由此从宣称变为可拆解的机理。一句话收口：**漏孔的最大死法不是“堵”，而是“坏”——内生堵塞与结构破坏写不进使用规程，只能写进设计图纸。**

5.7 本章小结

- 漏孔的死法有五种：衰减、堵塞、本底淹没、吸附释气、机械温度损伤，各有明确的物理机制与防御策略；
- 堵塞防御的第一性原理是“均匀孔道无喉部 + 拦截做在通道之外”；
- 极小漏率的天花板由密封本底决定（10:1 准则），全金属密封（ $< 10^{-15} \text{ atm}\cdot\text{cc/s}$ ）是 $10^{-11} \sim 10^{-13}$ 通道型漏孔存在的前提；
- 单分子层脱附（每 cm^2 约 $4 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{L}$ ）是 UHV / RGA 场景最大的“幽灵漏率”；
- 双向漏率复测是成本五分钟、信息量极大的验收动作；
- 失效矩阵（5.6 节）：漏孔的最大死法不是“堵”而是“坏”——内生堵塞与结构破坏两族占传统工艺失效的 $90\% \sim 99\%$ ，写不进使用规程、只能写进设计图纸；微通道漏孔的内生两族被结构性清除后，残余死法只剩外源侵入一种，故障率因此低 $1 \sim 2$ 个数量级；

下一章把视野从漏孔本体扩大到它的“附件”：阀门。一个指甲盖大小的呆体积，足以推翻本章精心设计的一切。

第6章 阀门、呆体积与系统集成

本章解决什么问题：为什么阀门不是漏孔的"附件"而是"系统的一部分"；呆体积如何定量地吃掉气体、冲击真空、制造记忆效应；混气漏孔的分漏率为什么不是简单的浓度百分比；液态介质漏孔为什么温度系数高达 10%/°C 量级。

6.1 呆体积：阀门里藏着的"暗气室"

定义 6-1（呆体积，Dead Volume）

阀门关闭时，被封闭在阀座、流道与接头内的气体体积。它在每次阀门开启时被瞬间释放，在关闭时被封存滞留——既不被设计，也不被察觉，却全程参与每一次测量。

传统标准漏孔阀门的呆体积普遍在 0.01 ~ 0.1 cc (10 ~ 100 μL) 量级。听起来微不足道，下面三笔账会改变这个印象。

6.2 呆体积的三大代价（定量）

代价一：开关损失。每次阀门开启，呆体积内的高压气体被放掉：

$$\Delta G = V_{\text{呆}} \times p \quad (6-1)$$

以 $V_{\text{呆}} = 0.1 \text{ cc}$ 、充气 10 MPa (100 atm) 计：单次损失 = $0.1 \times 100 = 10 \text{ atm}\cdot\text{cc} \approx 10 \text{ mL}$ 标准气体。一支有源漏孔开关 100 次，白白损失 1 L 标准气体——对普通 He 是钱，对 Xe、Kr、 ^3He 同位素是不可接受的浪费。把呆体积压到 0.098 μL ，同样条件单次损失 0.0098 atm·cc，开关 100 次仅约 1 mL，可以忽略（图 6-1）。

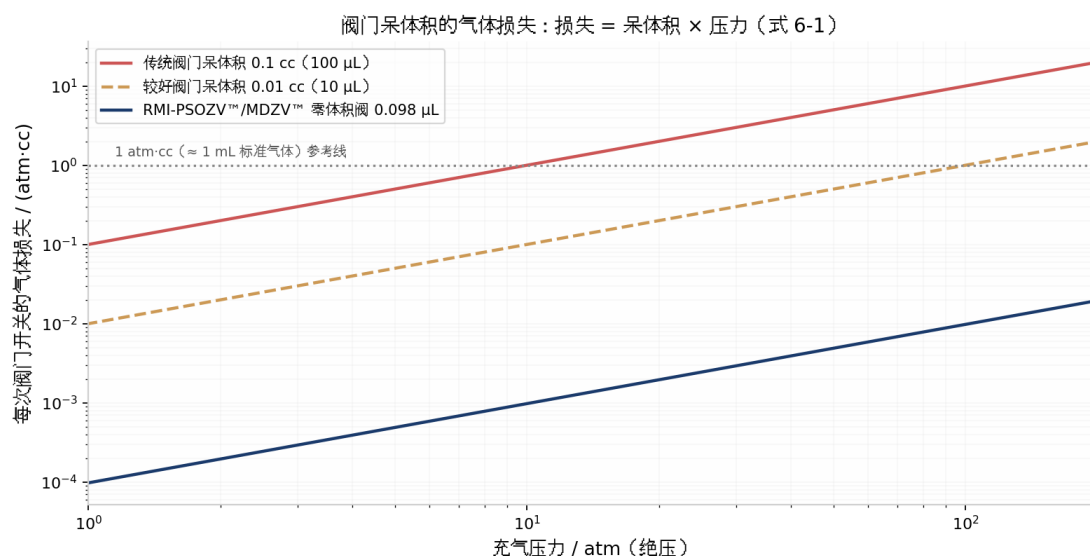


图 6-1 阀门呆体积的开关损失：损失 = 呆体积 × 压力（式 6-1，对数坐标）

代价二：真空冲击。呆体积内封存的高压气体在开阀瞬间冲入真空系统。估算： $0.1 \text{ cc} \times 100 \text{ atm} = 10 \text{ atm} \cdot \text{cc} \approx 10^3 \text{ Pa} \cdot \text{L}$ ，冲入 100 L、本底 10^{-3} Pa 的真空室，瞬时压力增量高达 +10 Pa——本底的 10^4 倍，轻则信号淹没数分钟，重则触发保护宕机。这就是“普通漏孔接 RGA 必须先预抽”的原因，也是零体积阀“无论关闭多久、开阀不冲击系统”的物理基础： $0.098 \mu\text{L} \times 100 \text{ atm} \approx 0.01 \text{ atm} \cdot \text{cc} \approx 1 \text{ Pa} \cdot \text{L}$ ，同一场景瞬时增量仅 10^{-2} Pa 量级——比传统阀低三个数量级。这笔理论账有公开实测佐证：RGA 系统本底真空 $4 \times 10^{-6} \text{ hPa}$ 时，接入气室充有 100 bar 氮气的 PSOZV™ 零体积阀漏孔并开阀，系统压力仅升至 $3 \times 10^{-5} \text{ hPa}$ （增量约 $+2.6 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ ，不足一个数量级），分子泵与灯丝无任何扰动；而传统阀漏孔在同等条件开阀，系统压力瞬时跳升数个数量级，甚至触发分子泵保护重启^[15]。实测增量与本章估算同处 $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ Pa}$ 量级——理论账与实测账对得上。

代价三：记忆效应。呆体积是一个“慢气室”：上一次使用的气体（尤其是混气中的重组分、水汽）被吸附封存在内，下一次测量时缓慢释放，形成虚假本底与组分漂移。它直接拉长系统的**本底恢复时间**——在高节拍产线上，恢复时间每缩短一秒都是产能。呆体积缩小三个数量级，记忆效应的气体量同比例缩小，这就是“本底恢复快”的定量解释。

6.3 零体积阀：把 100 μL 压缩到 0.098 μL

零体积（Zero-Volume）阀的设计目标是把呆体积压缩到接近结构允许的物理极限。以 RMI-PSOZV™/MDZV™ 为例，其呆体积空间为 $\Phi 0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ ：

$$V_{\text{呆}} = \pi \left(\frac{0.5}{2} \right)^2 \times 0.5 \text{ mm}^3 \approx 0.098 \text{ mm}^3 = 0.098 \mu\text{L} \quad (6-2)$$

相比传统阀门的 10 ~ 100 μL ，缩小 2 ~ 3 个数量级，第 6.2 节的三笔账全部同比例改写^[3]。两类形态的分工：

- **MDZV™ 手动零体积阀：**计量与实验室场景，人控开关，追求极简与可靠；
- **PSOZV™ 常闭气动零体积阀：**自动化场景。常闭设计的价值在于**主动防呆**——忘关阀门是有源漏孔气体损失的第一大人为原因，常闭阀把“人会不会忘”从风险清单里删除，配合自动化节拍实现近似零自然衰减，对昂贵同位素气体（Xe、Kr、³He）意义尤其大。

准则 6-1：评估一支带阀漏孔，问三个数：呆体积多少（决定开关损失与真空冲击）、常开还是常闭（决定人为风险）、阀与漏孔是否一体化（决定界面微漏与附加死体积）。阀门呆体积 < 0.1 μL ，是大漏率有源漏孔、UHV / RGA、昂贵气体三类场景的硬门槛。

6.4 混气漏孔的分漏率物理

RGA 标定与半导体工艺监控大量使用混气标准漏孔（如 $\text{H}_2/\text{He}/\text{N}_2/\text{Kr}/\text{Xe}$ 各 1% 余 Ar，或 1 ppm Kr/Xe 余 N_2 ）。这里有一个被广泛误解的物理点：**分子流状态下，各组分独立输运，分漏率之比不等于摩尔分数之比**。由式 (3-3)，组分 i 的分漏率：

$$Q_i \propto \frac{x_i p}{\sqrt{M_i}} \Rightarrow \frac{Q_i}{Q_{\text{总}}} = \frac{x_i / \sqrt{M_i}}{\sum_j x_j / \sqrt{M_j}} \quad (6-3)$$

算一个例子：1% He + 99% Ar 的混气，分子流下 He 的分漏率占比为

$$\frac{Q_{\text{He}}}{Q_{\text{总}}} = \frac{0.01 / \sqrt{4}}{0.01 / \sqrt{4} + 0.99 / \sqrt{40}} = \frac{0.005}{0.005 + 0.1565} \approx 3.1\% \quad (6-4)$$

氦只占 1% 的浓度，却贡献了 3.1% 的漏率——轻组分被"放大"了。三个工程推论：

- 混气漏孔的"漏率"必须指明口径：**某组分的分漏率（P 口径，如 95P 指主组分分漏率）还是总漏率（T 口径，95T）**。口径写错，标定全错^[7]；
- 粘滞流区没有 $\sqrt{M}$ 放大效应（各组分被粘度"绑"在一起），同一支混气漏孔在两个流态区的组分输出不同——又是流态决定一切的一例；
- 气室内的轻组分漏得快，长期封存后气室组分会缓慢"变重"，这也是混气有源漏孔需要关注衰减口径的原因。

6.5 液态介质漏孔：蒸发—输运模型

半导体放气分析、EUV 碳污染监控、航天质量法验收需要液态介质标准源（水、正十二烷 $\text{C}_{12}\text{H}_{26}$ 、DMC、PFTBA 等）。其物理与气体漏孔根本不同：**液体先蒸发，蒸气再经通道输运**，漏率由蒸气压主导：

$$Q_{\text{液}} \propto p_{\text{vap}}(T) \cdot C(T, M) \quad (6-5)$$

蒸气压对温度的依赖是指数型的（Clausius–Clapeyron 关系），因此液态漏孔的温度系数高达每摄氏度数个百分点——以正十二烷为例，温度修正约 10 %/°C 量级（指数型，随温区变化）^[8]。三个使用要点由此而来：

- **控温是刚需**：±0.5 °C 的温控误差即对应约 5% 的漏率漂移，液态漏孔必须在证书温度 ±0.5 °C 内使用，或严格按指数修正；
- **温度系数大不是缺陷而是物性**：它由介质的蒸发焓决定，任何厂家都无法"改进"，能改进的是把修正曲线测准、把零体积阀做成常闭（防止液体蒸气无谓损耗）；
- **长链烷烃的价值**：十二烷（ $M = 170$ ）、十四 / 十六烷等高质量数介质填补了 RGA 高质荷比区标定与 EUV 重碳氢污染定量的空白——这是气体漏孔原理上无法替代的品类。

6.6 本章小结

- 呆体积三大代价可定量：开关损失 $\Delta G = V \cdot p$ 、真空冲击（0.1 cc×100 atm 可使 100 L 真空室瞬时 +10 Pa）、记忆效应拉长本底恢复；
- 零体积阀（0.098 μL ）把三项代价压低 2~3 个数量级；常闭气动阀消除“忘关”这一最大人为风险；
- 混气分漏率 $\neq$ 摩尔分数：分子流下轻组分被 $1/\sqrt{M}$ 放大（1% He 贡献 3.1% 漏率），证书必须写明 P/T 口径；
- 液态漏孔的漏率由蒸气压决定，温度系数约 10 %/°C 量级是物性而非缺陷，控温与指数修正是使用前提。

至此，漏孔的“物理与硬件”全部讲完。下一章进入计量学：如何用不确定度语言给一支漏孔的“准”打分，以及中国的漏率量值是如何从国家基准走到您手中的。

第 7 章 不确定度与计量溯源

本章解决什么问题：一支标准漏孔的“准”如何被科学地表达与证明。本章给出 GUM 不确定度评定的最小必要知识、一份可直接套用的漏孔不确定度预算示例、中国漏率计量规范的完整地图，以及读懂任何一张漏孔证书的五要素核对清单。本章是计量院读者与审核员的试金石。

进入不确定度之前，先把三个最常被混为一谈的概念分立开来——它们描述一支漏孔的三种不同品质，轴与轴之间不能互相替代：

表 7-1 漏孔品质的三条正交轴

概念	回答的问题	由什么决定	典型表达
加工精度	做得准不准（符合性）	工艺与仿真能力：漏率是“设计参数”还是“涌现结果”	制造公差，如 $\pm 10\%$
不确定度	量得准不准（量值知识）	测量体系：上级标准、方法、被校件在校准期间的表现	$U = 8\% \ (k = 2)$
稳定性	变得慢不慢（时间轴）	漏孔自身：衰减率、温度系数、抗损伤能力（第 5 章）	年衰减 $0.1\% \sim 1\%$

三轴正交，但互相支撑：加工精度再高，没有低不确定度的标定就无法向第三方证明；标定再准，稳定性差则数月后量值作废。客户侧最高频的混淆是把**制造公差当作不确定度**——一支按 $5 \times 10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{L/s} \pm 10\%$ 制造的漏孔，经标定后证书写的是“实测 5.12×10^{-6} ， $U = 8\% \ (k = 2)$ ”：“ $\pm 10\%$ 描述的是制造能力（靶心附近的落点散布），8% 描述的是对落点位置的认知精度，两者的数字含义完全不同，在合同与验收文件中绝不可互换。

实例·加工精度到底是什么：一支无源仿真漏孔，工况约束为纯 He、入口测试压力 4.2 MPa、出口入真空，目标漏率 $5 \times 10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{L/s}$ 。微通道工艺配合 RMI-Cal™ 流导仿真，可以把交付漏率一次做到 $5 \times 10^{-6} \pm 10\%$ ——先由式（3-4）的叠加模型算出孔径与长度，再加工、再实标复核。对“漏率涌现型”工艺（压扁、渗透），漏率是成型后才“长出来”的结果，同时命中“指定压力 + 指定漏率”两个约束极其困难，只能靠成批制作后分级筛选、逼近靶值。这就是加工精度的本质分野：**漏率是设计出来的参数，还是涌现出来的结果。**

7.1 没有不确定度的漏率不是量值

“这支漏孔是 $1.0 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ”——这句话在计量学上是不完整的。它缺少不确定度：这个值可能偏移多少、以多大的置信概率。正确的表达是：“ $Q = 1.0 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ， $U = 10\% \ (k = 2)$ ”，含义是：以约 95% 的置信概率，真值落在 $[0.90, 1.10] \times 10^{-6}$ 之内。两句话的差别，就是“数字”与“量值”的差别。**不确定度不是对误差的遮掩，而是对测量质量的打分**——它越小，说明这支漏孔背后的测量体系越强。

7.2 不确定度评定的 GUM 框架

国际通行的评定方法由 GUM（《测量不确定度表示指南》，国内等同采用为 JJF 1059.1—2012^[11]）规定，三步走：

- 1. **建立测量模型：**输出量 $Y = f(X_1, X_2, \dots)$ 。漏孔校准的典型模型：被校漏孔漏率 = 标准值 × 信号比 × 温度修正 × 压力修正 × 流态修正；
- 2. **评定各输入量的标准不确定度：**A 类（多次测量统计， $u = s/\sqrt{n}$ ）与 B 类（证书、仪器规格、经验分布——均匀分布取 $u = a/\sqrt{3}$ ，正态取 $u = a/2$ ）；
- 3. **合成与扩展：**

$$u_c = \sqrt{\sum_i (c_i u_i)^2}, \quad U = k \cdot u_c \quad (k = 2 \approx 95\%)$$

(7-1)

式中 c_i 为灵敏系数（输入量变化 1 个单位引起输出量变化的倍数）。温度修正项的灵敏系数就是温度系数本身——这就是温度系数 0.1 %/°C 与 4 %/°C 在预算表中天壤之别的原因。

7.3 漏孔校准的不确定度预算（示例）

以相对比较法校准一支 10^{-6} 量级 He 标准漏孔为例，典型预算如表 7-2（数值为示例，实际以实验室评定为准）：

表 7-2 漏率校准不确定度预算示例（相对比较法，相对值）

不确定度分量	类型	来源与取法	$u_i / \%$
上级标准漏孔校准值	B	上级证书 $U = 8\% \ (k=2) \rightarrow u = 4.0$	4.0
比较测量重复性	A	$n = 10$ 次比对， $s/\sqrt{n}$	1.5
期间稳定性	B	两次溯源间漂移估计	2.9
读数 / 仪器线性	B	质谱计线性区间	1.0
温度影响	B	温控 $\pm 2.5\text{ }^\circ\text{C} \times$ 温度系数 $0.1\text{ } \%/^\circ\text{C}$ ，均匀分布 $\div\sqrt{3}$ （渗透膜 $4\text{ } \%/^\circ\text{C}$ 则达 5.8）	0.15
压力测量	B	压力计示值误差	0.3

$$u_c = \sqrt{4.0^2 + 1.5^2 + 2.9^2 + 1.0^2 + 0.15^2 + 0.3^2} \approx 5.3\text{ } \% \Rightarrow U \approx 11\text{ } \% \ (k = 2)$$

(7-2)

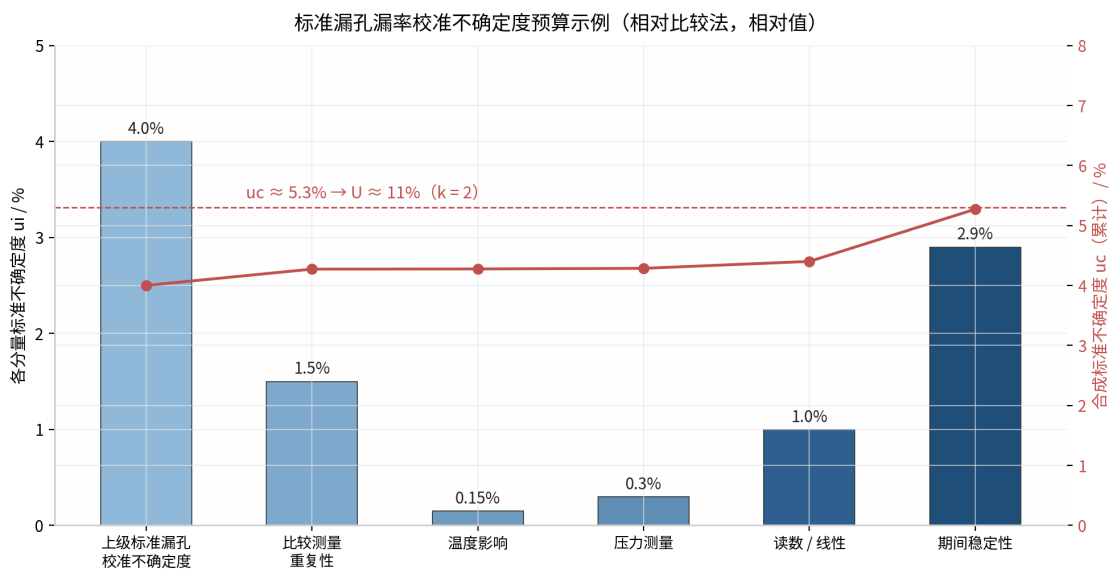


图 7-1 不确定度预算的帕累托视图：谁主导，先压谁

预算表的读法比算法更重要：**先看谁主导，再决定压谁**。本例中"上级标准值"与"期间稳定性"两项贡献了近 90% 的方差——这意味着：把检漏仪读数做得再精也没用，提升路径只有两条：用更好的上级标准（溯源层级往上走）、用更稳定的漏孔（把"期间稳定性"分量从设计上压小）。若温度系数换成渗透膜的 $4\%/^{\circ}\text{C}$ ，仅温度一项（ $u = 4 \times 2.5/\sqrt{3} \approx 5.8\%$ ）就把 u_c 抬高到近 8%——**温度系数在不确定度预算里是要被平方放大的**，这就是第 3.7 节的工程回声。

7.4 中国漏率计量规范地图

行业内最容易混淆的一点是："漏孔"的规范与"检漏仪"的规范是两套体系。下表一次理清：

表 7-3 中国漏率计量规范地图（截至 2026 年，现行有效）

规范编号	名称与对象	适用范围	要点
JJF 1833—2020	真空氦漏孔 校准规范 （对象：漏孔）	$(1 \times 10^{-10} \sim 1 \times 10^{-4}) \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$	通道型 / 渗透型分类；装置 $U \leq 10\%$ （流量计法 / 定量气体法）、 $\leq 20\%$ （比较法）；年稳定性 $\leq 3\%$ ^[1]
JJF 1627—2017	皂膜流量计法标准漏孔 校准规范 （对象：漏孔）	1 mL/min ~ 10 L/min；进气 1 kPa ~ 1.5 MPa，出口大气	正压 / 气密漏孔的主要标定方法之一 ^[6]
JJG（军工）165—2024	真空标准漏孔 检定规程 （国防军工体系）	真空标准漏孔检定	2025-01-01 实施；上海睿米为参与起草单位 ^[2]
JJF 1986—2022	差压式气密检漏仪 校准规范 （对象：检漏仪）	测试压力 $\leq 700 \text{ kPa}$ ；泄漏率 $(0 \sim 100) \text{ mL/min}$	泄漏率误差 $\pm 10\%$ ；测量标准含数字压力计与标准漏孔 ^[9]

JJF 1964—2022	卤素检漏仪校准规范（对象：检漏仪）	可检漏率 ($10^{-6} \sim 10^{-5}$) $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$	冷媒 / 制冷剂检漏仪校准依据 ^[10]
---------------	-------------------	---	---------------------------------

这张地图的战略含义：检漏仪规范（1986、1964）都规定以标准漏孔为测量标准——漏孔是两套体系的交汇点，漏孔不准，两类检漏仪的校准全部失效。而漏孔自身的规范（1833、1627、军工 165）把“通道型 / 渗透型”“年稳定性”“不确定度”写成了强制语言——这正是本书第 3 ~ 5 章物理在法规层面的投影。

7.5 用户侧建标与溯源：计量院怎么做，企业怎么配

计量机构建立真空氮漏孔标准装置，需要一组覆盖各数量级、逐支溯源的参考标准漏孔组。一个符合 JJF 1833—2020 的典型配置（15.3 节有完整实测清单）：6 支漏孔覆盖 ($3 \times 10^{-10} \sim 3 \times 10^{-5}$) $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 六个数量级，每量级一支；年稳定性 0.1% ~ 1.0%（规范要求 $\leq 3\%$ ）；温度系数 0.1 %/°C；逐支经中国计量科学研究院（NIM）等国家级机构溯源；复校周期 12 个月^[3]。气密与冷媒介质另有对应的建标漏孔组（JJF 1627 / JJF 1964 体系）。

企业侧的配合逻辑随之清晰：工作漏孔跟着参考漏孔走，参考漏孔跟着国家基准走。建议的资产管理动作：

- 产线工作漏孔：每班点检（ Q_0 信号漂移监控），每年送检一次；
- 参考漏孔：固定用途、固定工况、专人保管，12 个月复校；
- 证书档案：漏率值、不确定度、标定工况、溯源机构四要素齐全可查证。

关于证书体系的澄清（全书只讲一次）

漏孔制造与计量认可可是两件事。睿米作为制造商，对每支出厂漏孔出具出厂检测证书；睿米标准漏孔经国家计量机构计量，被多家计量院 / 计量站采购作为建标用参考标准漏孔（主标准器），并作为参与起草单位加入了 JJG（军工）165—2024 的制定^[2]。客户如需 CNAS / ISO 17025 校准证书，由睿米外送计量院（或客户自行送检）出具。本书中所有“证书”“溯源”表述均以此为口径。

7.6 证书怎么读：五要素核对清单

拿到任何一张标准漏孔证书，按以下顺序核对，30 秒即可判断它能不能用：

表 7-4 漏孔证书五要素核对清单

要素	核对要点	不合格的常见表现
① 介质与口径	气体种类、浓度；混气须写 P/T 口径（6.4 节）	只写“空气”不写浓度；混气口径缺失
② 入口压力	数值 + 绝压 / 表压 + 单位（2.4 节）	“5 bar”未注明绝压表压
③ 出口条件	真空 / 大气 / 指定背压（2.5 节）	缺失或与使用场景不符
④ 温度与修正	标定温度、温度系数、标准状态（sccm 的 0 °C 约定）	无温度系数，非 23 °C 使用无依据

准则 7-1：五要素缺任何一项，这张证书在您现场就等于没有——因为您无法按"同口径"复现它的量值。验收时比对双方证书，先对五要素，再对数字。

按这五要素读一张极限量级的真实证书（ 10^{-12} Pa·m³/s 级 He 漏孔，国防科技工业真空一级计量站，2026-07^[16]）：漏率值、 $U_r = 22\%$ （ $k = 2$ ）、出口入真空、氦气介质、上级标准与有效期逐项齐全——完整实例见 15.2 节表 15-2。

7.7 本章小结

- 漏率 + 不确定度（U，k=2）才是完整的量值表达；
- 预算表先看主导分量：漏孔场景中"上级标准值"与"期间稳定性"通常贡献 90% 方差——稳定性是漏孔厂家的核心竞争力；
- 温度系数在不确定度合成中被平方放大，0.1 %/°C 与 4 %/°C 的差距在预算表上是天壤之别；
- 规范地图分两套：漏孔规范（JJF 1833 / 1627 / 军工 165）与检漏仪规范（JJF 1986 / 1964），漏孔是交汇点；
- 证书五要素（介质口径 / 入口压力 / 出口条件 / 温度 / 不确定度与溯源）缺失即不可用。

原理篇至此完成：工艺（第 4 章）、寿命（第 5 章）、系统（第 6 章）、计量（第 7 章）四块拼图，构成评价任何漏孔的完整知识体系。第三篇（应用篇）将带着这套体系进入现场：检漏方法学、气密系统级精度、降氦范式与选型方法论。

第 三 篇

应用篇 | 用对漏孔

第 8 章 检漏方法学总览

本章解决什么问题：面对一个密封性需求，该选哪种检漏方法？本章给出主流检漏方法的原理、灵敏度边界、速度成本画像，以及每种方法对标准漏孔提出的具体要求。方法选错，再好的漏孔也救不回来。

8.1 一张地图：灵敏度 × 成本

检漏方法的选择，本质是在"最小可检漏率"与"单件检测成本 / 节拍"之间找交点：

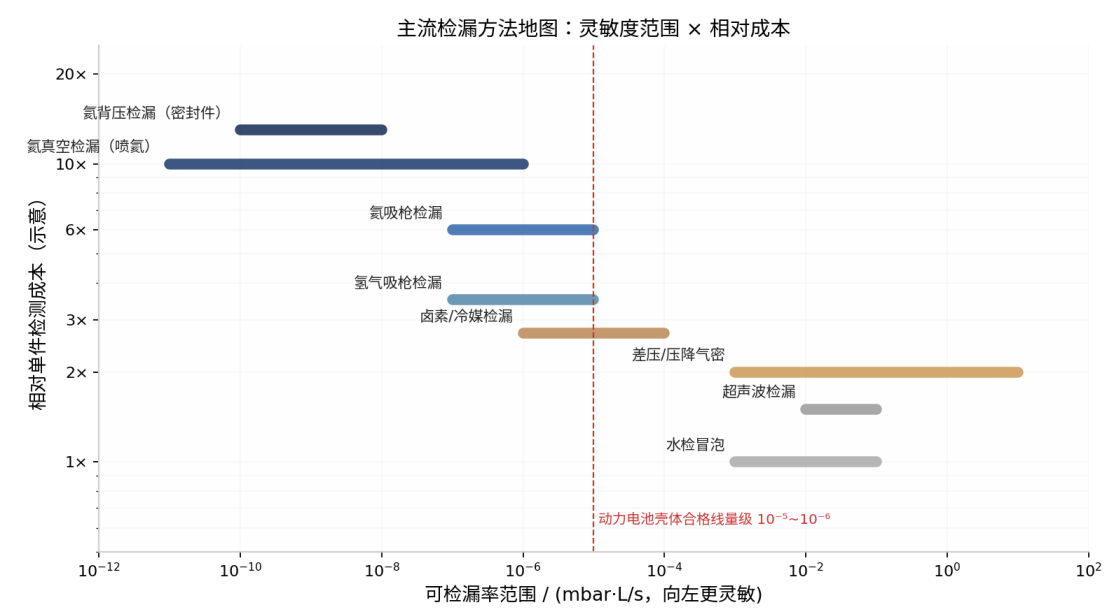


图 8-1 主流检漏方法地图：灵敏度范围 × 相对单件检测成本

读图三原则：**其一，灵敏度必须留裕度**——方法的可检下限应比判定阈值低 1~2 个数量级（例如阈值 10⁻⁵，方法下限应到 10⁻⁶~10⁻⁷）；**其二，成本是跳变的**——从压降法跨到氮检，设备与单件成本上一个台阶，"能不能用压降法解决"永远是第一问；**其三，没有全能方法**——高端产线的常态是组合：压降法粗检大漏 + 氮检精检小漏。

8.2 氮质谱检漏：真空法 / 吸枪法 / 背压法

氮质谱检漏仪用一台小型磁偏转质谱计专门"数"质量数 4 的离子。选择氮作示踪气的原因本身就是教科书知识点：天然丰度极低（大气中仅 5.2 ppm，本底干净）、分子小穿透力强、惰性安全。三种基本模式对漏孔的要求截然不同：

表 8-1 氮质谱检漏三种模式

模式	原理	灵敏度与特点	对标准漏孔的要求
真空法（喷氮 / 真空罩）	工件抽真空接检漏仪，外部喷氮或罩氮	最灵敏（10 ⁻¹¹ 量级）、可定位漏点	有源真空漏孔（校准灵敏度）、吸枪标定用正压漏孔

吸枪法 （充氮正压）	工件内充氮（或混氮），吸枪在外部扫查	$10^{-5} \sim 10^{-7}$ 量级，产线主力，可定位	与工件同压力同介质的无源仿真漏孔 （OK/NG 件）
背压法 （密封器件）	器件先在高压氮罐"加压充氮"，再入真空室测放出氮	封装器件专用（ $10^{-9} \sim 10^{-11}$ ），分粗漏/细漏两步	真空标准漏孔；需按 MIL-STD 类方法换算等效标准漏率

吸枪法是产线最常用、也是最容易被误用的模式：仪器读数强烈依赖吸枪与漏点的距离、移动速度、环境氮本底——它是一台**"相对比较器"**而非**"绝对测量仪"**。正因如此，吸枪法产线的判定体系必须靠同工况的标准漏孔仿真件建立（第10章四件套、第11章三件制验证均由此展开）。

8.3 差压与压降气密法： $\Delta P = Q \cdot \Delta t / V$

气密法不需要示踪气体：向被测容积充入空气 / 氮气至测试压力，稳压后监测压力变化。由漏率定义（式 2-1）与气体状态方程，泄漏引起的压降为：

$$\Delta P = \frac{Q \cdot \Delta t}{V} \Rightarrow Q = \frac{\Delta P \cdot V}{\Delta t} \quad (8-1)$$

式中： V ——被测容积（含管路）， m^3 ； Δt ——检测时间， s ； ΔP ——压降， Pa 。例： $V = 2 \text{ L}$ 、 10 s 内压降 $10 \text{ Pa} \rightarrow Q = 2 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s} = 2 \times 10^{-2} \text{ mbar} \cdot \text{L}/\text{s} \approx 1.2 \text{ sccm}$ 。

式（8-1）是气密行业的"牛顿第二定律"，它同时揭示了方法的三个固有属性：

1. **灵敏度 $\propto$ 时间 / 容积**：同一阈值，容积大 10 倍，要么等 10 倍时间，要么灵敏度差 10 倍——大容积工件是气密法的天生难点；
2. **测的是"容积归一化漏率"**：同一工件换工装（容积变了），同一 ΔP 对应的漏率就变了；
3. **一切影响压力的物理量都是干扰**：温度（式 10-1）、绝热效应、夹具弹性变形——这是第 10 章全部内容的入口。

差压式（被测件与基准件之间接差压传感器）用"双通道共模抵消"抑制温度与充压波动，是主流机型；直接压降式结构简单但对气源与环境更敏感。JJF 1986—2022 规范了差压式气密检漏仪的校准（测试压力 $\leq 700 \text{ kPa}$ 、泄漏率 $0 \sim 100 \text{ mL}/\text{min}$ ），其测量标准之一就是标准漏孔^[9]。

8.4 氢检、卤素与其他方法

氢检：以 $5\% \text{ H}_2 + 95\% \text{ N}_2$ （非可燃混合气）为示踪气，半导体传感器吸枪检测，灵敏度 $10^{-5} \sim 10^{-7}$ 量级、成本远低于氮检、无氮资源依赖，是"降氮"路线上的重要替代方案；对漏孔的要求与氮吸枪法同构（同压力同介质的 H_2/N_2 仿真漏孔）。**卤素 / 冷媒检漏**：利用冷媒自身（R134a、R1234yf 等）作示踪介质，是制冷行业的法规符合性手段（JJF 1964—2022，可检漏率 $10^{-6} \sim 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ^[10]）；由于介质就是产品工质，漏孔必须用真实冷媒标定、按 g/y 口径出证（式 2-4）。**水检冒泡与超声波**： $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 量级以上的粗检手段，胜在直观便宜，常作氮检前的"大漏拦截"。

8.5 RGA 定量与微流量标定：两个"仪器级"场景（地图先行，第 9 章专题展开）

两类场景不直接检产品，却是标准漏孔的高端战场：其一，残余气体分析仪（RGA）定量——半导体与 UHV 系统用 RGA 监控工艺气氛与放气成分，定量标定需要已知分压 / 分漏率的标准源：单气、混气（各组分分漏率，见 6.4 节）、同位素（³He、D₂、¹⁸O₂ 等）、乃至液态介质蒸气（6.5 节）。此类场景对阀门呆体积与本底极端敏感（零体积阀是硬门槛，准则 6-1）。其二，质量流量控制器（MFC）标定：以 sccm ~ L/min 级标准漏率作流量基准，正压出口、JJF 1627—2017 皂膜流量计法是其溯源路径之一^[6]。这里值得一句定位语：标准漏孔与 MFC 不是竞争关系而是互补——MFC 是主动控制件（实时调节流量），标准漏孔是被动基准件（提供已知、稳定、可溯源的流量真值）；用前者执行工艺，用后者校准前者，分工正如变频器与标准电阻。

8.6 方法选择决策

表 8-2 检漏方法选择速查

需求特征	首选方法	标准漏孔形态
阈值 ≥ 10 ⁻³ mbar·L/s，节拍快、成本低	差压 / 压降气密	无源气密漏孔（Air / N ₂ ，同压同容积仿真）
阈值 10 ⁻⁵ ~ 10 ⁻⁷ ，需定位漏点	氦 / 氢吸枪	无源仿真漏孔组（OK / NG / Q ₀ ）
阈值 ≤ 10 ⁻⁷ ，或封装器件	氦真空法 / 背压法	有源真空漏孔（含内置校准漏孔）
制冷行业法规符合性	卤素 / 冷媒检漏	冷媒标准漏孔（g/y 口径）
RGA 定量 / 半导体工艺监控	——（仪器标定）	单气 / 混气 / 同位素 / 液态介质漏孔 + 零体积阀
MFC 与流量标定	——（流量基准）	sccm 级正压标准漏孔

8.7 本章小结

- 方法选择 = 灵敏度裕度（低 1~2 个数量级）× 成本节拍约束，高端产线常态是"压降粗检 + 氦检精检"组合；
- 氦吸枪法是相对比较器，判定体系必须靠同工况标准漏孔建立；
- 气密法的第一公式 $\Delta P = Q \cdot \Delta t / V$ ：灵敏度换时间、换容积，温度是头号干扰；
- 每种方法都有对应的漏孔形态要求——漏孔选型从"检漏方法"开始，而不是从"漏率数字"开始。

下一章进入仪器级主战场、也是战略意义最重的一章：半导体 RGA 定量标定——从定性到定量，为中国高端制造装上"可计量的眼睛"。

第9章 从定性到定量：半导体 RGA 标定专题

本章解决什么问题：半导体先进制程的污染容忍度已进入 ppb 乃至 ppt 量级，残余气体分析仪（RGA）是真空腔室里唯一的“眼睛”——但没有标定体系，这双眼睛只能看趋势、不能读数字。本章系统给出 RGA 从定性走向绝对定量的方法论、标准漏孔在其中的角色，以及这一场景对高端制造自主可控的战略意义。与前八章相同，本章的方法论不靠断言：9.5~9.7 节给出三组实测证据——厂家灵敏度表的本机检验、取样几何效应、有机蒸气的指纹边界。

9.1 为什么半导体值得单独一章

先进制程的核心工艺——PVD、CVD、ALD、等离子体刻蚀、离子注入、EUV 光刻——全部在真空中进行。制程节点每推进一代，对真空本底纯净度的要求就收紧约一个量级：

表 9-1 半导体关键工艺对真空本底的典型要求^[13]

工艺环节	典型真空度 / mbar	关键监控气体	污染物容忍度
PVD 金属沉积	$10^{-8} \sim 10^{-9}$	Ar、H ₂ O、O ₂ 、N ₂	H ₂ O < 1 ppb
CVD 介质沉积	$10^{-6} \sim 10^{-8}$	SiH ₄ 、NH ₃ 、副产物	交叉污染 < 10 ppb
ALD 高 k 介质	$10^{-7} \sim 10^{-9}$	H ₂ O、TMA、载气	H ₂ O < 0.1 ppb
等离子体刻蚀	$10^{-3} \sim 10^{-5}$	CF ₄ 、SF ₆ 、BCl ₃ 、副产物	终点检测精度 ±1%
EUV 光刻	$10^{-8} \sim 10^{-10}$	H ₂ 、Xe、Sn 蒸气	镜面污染 < 1 ppt

这张表的含义是：**先进制造的竞争，在底层是“痕量污染计量能力”的竞争**。ppm 级污染即可报废整批晶圆，而真空环境中唯一能同时分辨多种气体成分及其分压的仪器就是 RGA（四极质谱残余气体分析仪）。RGA 是高端装备的“眼睛”；而本书前八章的全部论证归结为一句话：**眼睛必须有标尺，标尺必须可溯源**。半导体设备的真空验收、工艺腔室的污染监控、高纯材料的入厂检验、失效分析的根因追溯——这些环节长期依赖进口标定手段。把 RGA 标定体系做成自主可控，就是为高端制造补上“计量底座”这块最底层的拼图。这正是本章单列的原因，也是标准漏孔行业未来十年最大的增量市场。

9.2 RGA 定量原理与三阶段演进

RGA 的定量基础是离子电流与分压的线性关系：

$$I_g = S_g \cdot P_g \tag{9-1}$$

式中： I_g ——气体 g 特征峰的离子电流（A）； P_g ——分压（mbar）； S_g ——灵敏度因子（A/mbar），由电子能量、离子源几何、四极杆传输函数、检测器增益共同决定，并随灯丝老化与污染漂移。

式（9-1）与气密法的式（8-1）结构神似：**仪器给出的都是“信号”，信号到“量值”之间隔着一颗必须定期标定的系数**。RGA 应用的三个阶段，本质是这颗系数的标定史：

表 9-2 RGA 应用的三阶段演进^[13]

阶段	能力	局限 / 突破
① 定性监测 (1970s~90s)	看水峰 (m/z 18)、空气特征峰 (28/32) 判断真空是否正常	"有没有异常", 无数字
② 半定量 (1990s~2010s)	内置气体库 + 灵敏度因子, 常见气体 粗略定量	误差 ±30% ~ ±100%; 有机蒸气与痕量杂质失明
③ 绝对定量 (2010s~)	标准漏孔原位标定, 覆盖永久气体 → 有机蒸气 → ppm 痕量	标定体系决定精度 : 液态介质与混气漏孔补齐盲区

核心洞察：RGA 的定量精度不取决于仪器本身，而取决于标定体系的质量与覆盖范围。没有可靠的标准漏孔，RGA 永远只是"趋势观察仪"；有了精准可溯源的标定工具，RGA 才能成为工艺控制的"计量传感器"。

9.3 标定方法论四件套

其一，灵敏度因子法。将已知漏率的纯气标准漏孔接入系统，在稳定流量下记录离子电流，直接解出 $S_g = I_g / P_g$ 。两个工程要点：零体积阀使标定可在生产设备原位进行而不冲击真空（第 6 章）；漏孔年衰减 < 0.2% 量级使标定结果可移植、可复用。

其二，标准漏孔比对法。对无法直接测量的目标源，在相同抽速下与已知漏孔比较信号：

$$Q_{\text{test}} = Q_{\text{ref}} \times \frac{I_{\text{test}}}{I_{\text{ref}}} \tag{9-2}$$

对极低漏率 (< 10⁻¹¹ Pa·m³/s)，用静态累积法：隔断抽气，测容积 V 内的压力上升率：

$$Q = V \times \frac{dP}{dt} \tag{9-3}$$

注意式 (9-3) 与气密法式 (8-1) 是同一个公式——**真空的累积法与正压的压降法在物理上是镜像**，这就是本书反复强调的"漏率只有一个物理"。

其三，碎片模式解析法。混气中每个质量峰是多组分的线性叠加：

$$H_M = \sum_g S_g \alpha_{Mg} P_g \tag{9-4}$$

式中 α_{Mg} 为气体 g 在质量数 M 处的碎片因子。CO / N₂ / C₂H₄ 的主峰在 m/z 28 完全重叠，区分必须靠碎片差异（CO 的 m/z 12、C₂H₄ 的 m/z 27）——而碎片因子数据库的校准，需要已知精确配比的混气标准漏孔作输入。

其四，液态介质定量突破。水蒸气、光刻胶溶剂（DMC）、泵油示踪剂（PFTBA）、正构烷烃（有机污染指纹）长期是 RGA 的"有机蒸气盲区"：蒸气压随温度指数变化、缺乏气相标准、高质荷比区无响应基准。微通道控释液态漏孔（液-气平衡 + 微通道流阻控释）配合已知温度系数（9~12 %/°C，6.5 节）把

盲区变成了可定量区（±10% 量级）——其中 PFTBA 碎片覆盖 m/z 69~671，是高质量数区公认的校准金标准^[13]。

9.4 痕量标定：两级稀释与质量标尺

先进制程需要的是"工艺本底中 ppb 级杂质"的验证能力。ppm 级混气漏孔的两级稀释架构给出答案：气源中 Kr/Xe 浓度为 1 ppm（第一级稀释），漏孔总漏率与系统抽速之比进一步压低分压（第二级）：

$$P_{\text{Kr}} = \frac{Q_{\text{total}} \times C_{\text{Kr}}}{S_{\text{eff}}}$$

(9-5)

式中： Q_{total} ——漏孔总漏率； C_{Kr} ——气源中 Kr 摩尔分数； S_{eff} ——系统有效抽速。决定 RGA"看到"多少 Kr 的，是 Kr 分漏率与抽速之比。

表 9-3 两级稀释：不同漏率-抽速组合下的 Kr 分压^[13]

总漏率 / mbar·L/s	Kr 气源浓度	Kr 分漏率 / mbar·L/s	系统抽速 / L/s	Kr 分压 / mbar	相对量级
10 ⁻³	1 ppm	10 ⁻⁹	100	10 ⁻¹¹	100 ppm 级
10 ⁻³	1 ppm	10 ⁻⁹	1000	10 ⁻¹²	10 ppm 级
10 ⁻⁶	1 ppm	10 ⁻¹²	100	10 ⁻¹⁴	100 ppb 级
10 ⁻⁶	1 ppm	10 ⁻¹²	1000	10 ⁻¹⁵	10 ppb 级
10 ⁻⁹	1 ppm	10 ⁻¹⁵	1000	10 ⁻¹⁸	10 ppt 级

注：表中"相对量级"指 Kr 分压相对 10⁻⁷ mbar 典型系统本底的占比（如 10⁻¹¹/10⁻⁷ = 100 ppm）。

同一张表横跨 6 个数量级——痕量验证的"输入端"就此可溯源。另一半问题是**质量歧视**：四极杆传输效率随质量数变化， m/z 132 处的响应与 m/z 28 处可差出量级。Kr（78~86 amu）与 Xe（124~136 amu）的多同位素天然丰度是"写在物理常数里的质量标尺"：对比实测同位素比值与理论值，即可解出各质量数的传输修正因子，建立跨质量数的灵敏度响应曲线（图 9-1）。

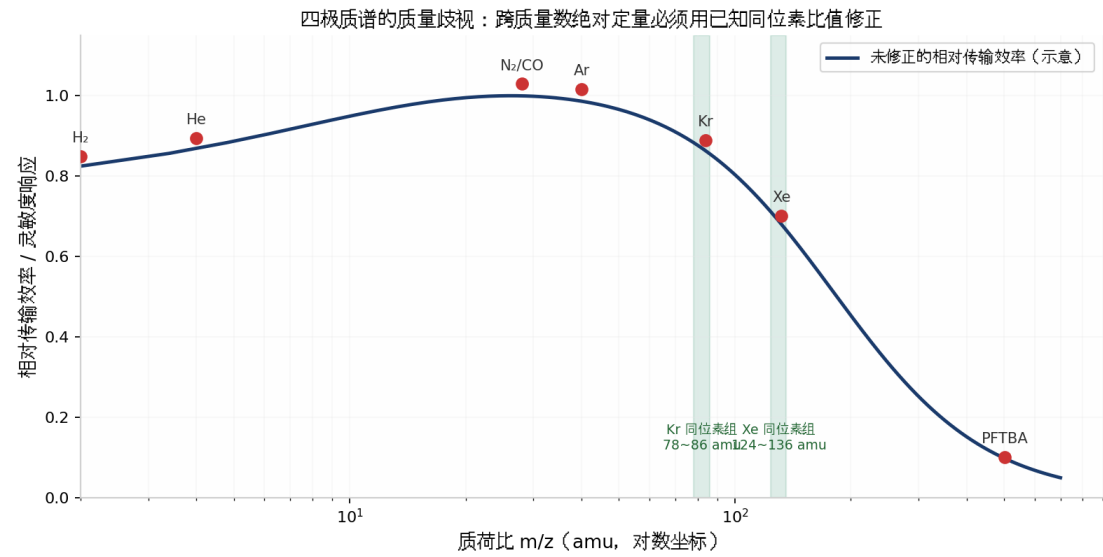


图 9-1 四极质谱的质量歧视与 Kr / Xe 天然质量标尺（示意）

案例·PFTBA：高质量数区的调谐标尺。全氟三丁胺（C₁₂F₂₇N，M = 671）的特征碎片峰（m/z 69、219、502 等）覆盖全质量轴，是行业公认的质谱调谐介质。以 PFTBA 液态标准漏孔提供受控注入（典型 3.13×10⁻⁶ mbar·L/s，约合 2.7 g/y 质量损耗），既可为 RGA 建立高质量数区的灵敏度锚点，也可直接核查质量轴与碎片相对丰度——它与 Kr / Xe 同位素标尺互补：前者回答“峰位与谱形对不对”，后者解出“传输效率随质量数怎么变”^[20]。

9.5 厂家 RSF 表可信吗：五组分标气的实测检验

9.2 节的三阶段表把半定量阶段的误差估计为 ±30% ~ ±100%——那是经验口径。2026 年完成的五组分标气实验把这个问题做成了定量实证，结论比经验估计更差，也更清楚。

第一层证据：表从哪来。主流厂家手册的表注自证：其随附的相对灵敏度因子（Relative Sensitivity Factor, RSF）表编译自 Summers 1969 年 NASA 技术笔记 TN D-5285——一部针对热阴极电离真空规的文献汇编，而非对任何一台四极质谱计的实测^[21]。数值指纹与文献来源互证：表中 He 灵敏度 0.14 即 70 eV 电子轰击电离截面比 0.138，偏差仅 1.4%；同一厂家不同手册的 Xe 表值分别为 3.0 与 0.27，相差 11 倍；全表不注明测量条件与不确定度。按第 7 章的计量学口径判决：有标称值、无不确定度、溯源链断裂，三缺一——它不是“不准的测量值”，而是**不可溯源的非测量值**。

第二层证据：本机实测差多少。以称量法定值（GB/T 5274—2008^[24]）的 He : N₂ : Ar : Kr : Xe 五组分同位素标气，经两只可溯源标准漏孔进样，对一台在役商用四极 RGA 逐气体反推本机响应^[25]：

表 9-4 五组分标气实测：本机响应与厂家表值的偏差（0.85~3.4 倍，方向不一）^[25]

气体	本机实测 / 厂家表值	方向
He	2.7 倍	偏高
Ar	0.85 倍	偏低

Xe

3.4 倍

偏高

偏差方向混杂意味着**不存在全局修正因子**——乘任何一颗常数都修不回来，唯一出路是逐台、逐气体实测。文献侧证同向：Daresbury 实验室 Marshall 等（2025）对 11 台商用 RGA（MKS 与 HIDEN 两品牌）、21 组校准的系统比对证明：灵敏度系数逐台不可移植，原位校准是定量分析的前提^[23]。

第三层证据：锚本身够不够稳。同次实验中，两只标准漏孔的 N_2 分漏率一致性为 0.88%，而同一台 RGA 的漂移约 5%——**标准器比被检仪器稳定约 6 倍**。第 7 章“标准器不确定度应显著优于被检对象”的原则，在此实测成立。

应对规程：本机自校准五步法。表不可信不等于仪器不可用——RGA 缺的不是精度潜力，而是锚。以标准漏孔为锚的操作规程已经双批次实测闭环^[25]：①**差分扣本底**——样品谱与本底谱在相同仪器状态下配对采集，净信号才有唯一定义；②**本机 RSF 自校准**——以已知漏率的标准漏孔进样反推本机响应系数，不信任任何外部标称值；③**固定积分窗口与取值口径**——峰高与峰面积口径不可混用，窗口一经固定不随批次改动；④**检测限诚实化**——报数时报该质量数的实际检测限：干净质量数约 10~100 ppm，被本底淹没的质量数（如 m/z 28）等效检测限可达 10^3 ppm 量级；⑤**定期复校**——工况变动实测引入约 6% 交叉偏差，灯丝开关循环引入 2%~4% 灵敏度漂移，复校周期由漂移容限倒推。这套规程与 ISO 14291 的明确建议一致：RSF 应在每次定量测量前于本机实测^[22]。

9.6 取样几何：RGA 定量的第五元

9.5 节证明 RSF 是“气体 × 仪器 × 参数 × 日期”的四元函数，对策是逐台校准、固定参数、定期复校——四元各有着落。但整条论证隐含着—一个未言明的前提：被测分压在腔体内是唯一的。这个前提不成立。RGA 测量的不是“气体的性质”，而是其头部所在位置、所在流路上的气体状态——**安装几何不改变 RSF 的定义，却改变被测量的定义**，在一阶近似下以独立因子与四元函数相乘^[25]。

两种构型测量的不是同一个量。并联取样（RGA 浸在腔体气氛中，与泵并列）测的是静态分压谱。稳态下每种气体满足流量守恒：

$$p_i = Q_i / S_i \quad (9-6)$$

式中： p_i ——组分 i 的稳态分压； Q_i ——该组分的入气速率； S_i ——泵组对该组分的有效抽速。关键在于 S_i 不是常数：分子泵对 H_2 、He 等轻气体压缩比低、返流大，有效抽速显著小于重气体——同样的漏入流量，轻气体在腔内相对富集，读数是经 $1/S_i$ 加权后的成分，而不是进气本身的成分。串联取样（气体必经 RGA 所在流道才能到达泵）测的是通量谱：各组分按流量比例出现，不经抽速加权。同一瓶标气、同一只漏孔、同一台 RGA，两种接法给出系统性不同的相对成分——两者都不“错”，它们测量的是两个不同的物理量：一个是腔内的状态，一个是流出的流量。

位置效应的实测量级。同一股气流经三通阀组切换近源口与近泵口，五种气体的净信号相差 1.22~1.74 倍，比值随分子质量增大而上升并趋于饱和（He 最低约 1.22~1.34，重气体约 1.5~1.75）；以 Ar 为基准的表观 RSF 同样随接法改变（He 约 18%）。对比同轮实验的其他扰动——两只漏孔的漏率差异仅改变信号量级 1%~4%，灯丝开关循环影响在 5% 以内——**取样几何是比漏率、灯丝大数倍至逾一个数量级的系统因素，是定量测量必须最先固定的条件**^[25]。

三条工程规则。①标定位置等于使用位置；②漏孔出口不得正对 RGA 离子源（直视束流会叠加方位依赖，计量级比对实验均将注气管路与 RGA 成直角布置以规避分子束效应）；③比对测量须对称布口并固化布口，几何配置随数据一同发布。第 6 章讲的呆体积决定"系统能不能测准"，本节的几何决定"测的是哪里的量"——系统集成纪律在真空侧同样成立。

9.7 有机蒸气："指纹"的边界

9.3 节其四给出液态介质定量的突破，把有机蒸气从盲区变成可定量区。本节补一条同样重要的边界：**在有机体系中，不可移植的不只是绝对灵敏度，还有碎裂比本身**^[25]。

物理原因很简单：永久气体只有一条主电离通道与极少碎片，谱形由同位素丰度（核性质）决定，跨仪器稳定；而长链有机分子有数十条阈值分布在 10~20 eV 区间的平行解离通道，碎裂比是各通道在有效电子能量分布下竞争的动力学结果——标称电子能量的微小偏差、空间电荷展宽、灯丝状态差异都会被放大，甚至改变碎片峰的主次顺序。

案例：一次事故级风险的谱图争议。客户在其真空系统上测得正十二烷标准漏孔的谱图中 m/z 43 强于 m/z 57，而 NIST 标准谱库以 m/z 57 为基峰，据此怀疑介质中混入异构十二烷——同批次上百套产品已在客户系统运行，疑问具有事故级风险。两条不依赖新实验的判据先行：支化异构体的碎裂倾向应使 m/z 57 增强，实测却是 43 增强，方向相反，异构体假设被否定。继而受控对照实验完成闭环：以有证标准物质（GBW06162，纯度 99.5%，U = 0.3%，k = 2）与试剂级正十二烷分别制作标准漏孔，在同一台仪器、同一套参数下比对，谱图吻合度 0.9997——**差异来自仪器条件，而非介质成分**^[25]。

本节给读者一条硬边界：凡以峰强比匹配库谱作为定性依据的做法，在有机体系中都可能给出错误结论——包括"检出杂质"这类肯定性判断。有机蒸气的定量不能沿用"单一 RSF × 主峰信号"的框架，必须采用**本机全谱参考指纹 + 固定条件 + 定期复校**的模式，且参考指纹应记录全谱而非单一比值。9.3 节其四的液态介质定量（±10% 量级）成立的前提，正是这套本机标定。

9.8 全链路场景地图与覆盖度

表 9-5 半导体产业链 RGA 标定场景与漏孔配置^[13]

环节	标定任务	漏孔配置
设备制造与验收	极限真空本底"气体指纹"、检漏仪灵敏度、泵速验证、材料放气率	He / N ₂ / Ar / H ₂ O 单气漏孔 + 混气漏孔
PVD	Ar 工作气纯度、<1 ppb 水蒸气定量	Ar 漏孔（m/z 40 灵敏度）+ H ₂ O 液态漏孔
CVD / ALD	前驱体残留、清洗后基线恢复、H ₂ O 前驱体残留	N ₂ / Ar 基准 + ppm 混气 + H ₂ O 漏孔
等离子体刻蚀	终点检测 ±1%（如 m/z 69 CF ₃ ⁺ 响应）	Ar / CF ₄ 类混气仿真漏孔
光刻 / EUV	光刻胶挥发物定量、Xe 残留、purge 后痕量验证	DMC 液态漏孔 + Xe 漏孔 + 1 ppm Kr/Xe 混气

腔室清洗验证	Wet-to-Dry 时间优化、水峰定量跟踪	Ar / N ₂ 指纹 + H ₂ O 漏孔
材料入厂检验	高纯气体 ppb 级杂质、特气水分	ppm 级混气漏孔 + H ₂ O 漏孔
后道封装 / 失效分析	封装内气氛、湿气、污染物谱库	He / N ₂ / Ar + H ₂ O / 有机蒸气漏孔

按环节评估的标定覆盖度：设备真空验收 > 95%、PVD > 95%、光刻 / 清洗验证 > 90%、封装测试 > 95%、材料入厂 > 90%；CVD / ALD / 刻蚀 / 注入等涉及反应性特气的环节约 65% ~ 70%——受限原因见下一节^[13]。

场景聚焦·水蒸气：从“估算”到“定量”。UHV 系统中水蒸气占残余气体的 90% 以上，却长期是最难定量的成分——强吸附与相变特性使水汽标准源稀缺，行业惯用 H₂ / Ar 灵敏度查表估算水峰，误差可达 50% ~ 100%^[19]。H₂O 标准漏孔（蒸馏水介质 + 内壁钝化微通道 + 零体积阀）把水峰变成可原位绝对定量的对象。三个使用要点直接来自物性：温度系数约 9.5 %/°C（指数型，需恒温环境或严格数学修正，6.5 节）；首次使用或破真空后需预抽约 24 h 建立解吸平衡，常规使用约 10 min；典型漏率区间 10⁻⁶ ~ 10⁻⁸ Pa·m³/s。应用面：材料脱附动力学定量、烘烤终点判定（建立水峰分压与注入流率的量化模型）、PVD / CVD 工艺水残留验证——表 9-5 各环节的 H₂O 配置由此落地^[19]。

场景聚焦·EUV 光刻 HHC 污染的量化监控。EUV 腔室内的重碳氢（HHC）污染导致反射镜碳沉积与寿命衰减；RGA 能识别质量数，却缺乏大分子烷烃的灵敏度因子，无法给出污染速率。以 C₁₂ / C₁₄ / C₁₆ 正构烷烃标准漏孔（典型漏率 10⁻⁶ ~ 10⁻⁹ Pa·m³/s）为 RGA 建立“离子电流—质量流率”线性关联（72 h 连续监测线性 R² > 0.98，对照传统针阀 R² ≈ 0.80 ~ 0.90），污染等级从“看谱估计”变为实时定量，反射镜寿命变为可预测参数^[20]。实操三要点：温度系数约 10 %/°C 量级（指数修正，6.5 节）；首次使用预抽约 2 h；正常使用约 10 min 即达热平衡——液态介质中响应最快的一族。

场景聚焦·动力电池电解液检漏的“介质归位”。氢分子与粘稠电解液的穿透行为差异悬殊，用氢检结果等效换算电解液泄漏存在系统性失真。DMC（碳酸二甲酯，电解液主溶剂之一）标准漏孔直接以真实介质提供约 2×10⁻⁵ mbar·L/s 量级的稳定蒸发流率，检漏仪按 DMC 信号直接标定判定阈值，消除介质错位^[20]。注意分工：氢检回答“封装密封性”（第 11 章的降氢方案于此完全适用），DMC 标定回答“电解液真实泄漏速率”——两者互补而非替代。DMC 温度系数约 9.0 %/°C，控温与修正要求同 6.5 节。

9.9 技术边界：诚实清单与互补架构

负责任的白皮书必须写清边界。SiH₄、AsH₃、PH₃、WF₆、TMA、Cl₂、HBr、NF₃、F₂ 等反应性 / 腐蚀性 / 剧毒特气，目前无法制作稳定的标准漏孔——原因在气体物性本身（微通道内分解、剧毒安全风险、腐蚀通道、强吸附），而非工艺能力；即便在标准漏孔技术最发达的市场，这类漏孔同样稀缺或不存在。“替代气体标定”只能在“单一质量数、无重叠峰、无记忆效应”的窄窗口内用于趋势判断，引入 20% ~ 100% 系统误差——**战术上可用、战略上不可依赖**。

工业界的成熟解法是跨传感互补架构：特气直接测量交给 FTIR、OES、电化学传感器；RGA 回归“环境看门狗”角色——工艺指纹基线、交叉污染监控、清洗验证、关联参数间接推断（如 WF₆ 不看 m/z 298，而看副产物 SiF₄ 的 m/z 85）。在这一架构中，标准漏孔的任务是**保证 RGA 长期响应稳定**——这恰是低

衰减、零呆体积漏孔的价值区。同源性最佳实践：灵敏度因子每 3~6 个月复校、原位优先、混气交叉验证高质量区、液态介质每 6 个月专项标定^[13]。

9.10 战略意义：为高端制造补上计量底座

把本章放回大图景：半导体装备的自主可控，最终要落到“每一台设备出厂时真空性能被可信地验证、每一片晶圆的工艺环境被可信地监控”。验证与监控的可信度，又最终落到标定体系是否自主、可溯源。长期以来，高端标定漏孔与 RGA 定量方法捆绑在进口供应体系内；微通道工艺把“全介质（单气 / 混气 / 同位素 / 液态）、全漏率（ $10^{-3} \sim 10^{-10}$ mbar·L/s）、原位零冲击标定”做成国产常态供应之后，**RGA 从“参考工具”升级为“计量仪器”的最后一公里——标定环节——随之打通**。随着产线扩张与节点推进（2 nm 以下把容忍度推向 ppt），这一市场的需求不是线性的，而是随“验证工位数 × 标定频次”乘性放大。方向同样清晰：更低浓度（ppb → ppt 混气）、更宽质量数（> 500 amu 前驱体）、反应性气体标定的材料学突破、以及与 RGA 软件集成的自动化周期标定。

9.11 本章小结

- 先进制程的竞争在底层是痕量污染计量能力的竞争：ppb/ppt 容忍度要求 RGA 从“趋势观察仪”升级为“计量传感器”；
- RGA 定量精度由标定体系决定：灵敏度因子法、比对法（式 9-2/9-3，与气密压降法互为镜像）、碎片模式法（式 9-4）、液态介质定量突破；
- ppm 混气 + 两级稀释（式 9-5）实现 ppb → ppt 痕量输入；Kr / Xe 多同位素是天然质量标尺；
- 三组实测划定边界：厂家 RSF 表不可溯源（本机偏差 0.85~3.4 倍、方向不一），须以标准漏孔为锚走本机自校准五步法；取样几何是比漏率与灯丝大数倍至逾一个数量级的系统因素，标定位置必须等于使用位置；有机蒸气中碎裂比本身不可移植，定性定量都须用本机全谱参考指纹；
- 反应性特气做不出标准漏孔是全球性物理边界——诚实标注边界、用跨传感互补架构覆盖，才是负责任的技术路线；
- RGA 标定体系自主可控 = 高端制造计量底座的关键拼图，也是标准漏孔未来十年最大的增量市场。

下一章回到产线应用的主战场：气密检测的系统级精度。

第 10 章 气密检测的系统级精度

本章解决什么问题：为什么差压气密检漏仪"说明书精度 0.1 Pa"，产线判定却天天在误杀与漏杀之间摇摆。本章给出一个残酷的推导（1 °C 温漂如何吃掉约 400 Pa）、一套经过验证的系统级解决方案（金件四件套 + 旁路法），以及用 GR&R 说话的最终验证路径。

10.1 为什么"容许压降 ΔP"不能作判据

由式（8-1），判定泄漏 = 判定压降。问题是：**压力不是只被泄漏改变**。对密闭容积，气体状态方程给出温度对压力的直接影响：

$$\frac{\Delta P_T}{P} = \frac{\Delta T}{T} \tag{10-1}$$

代入典型产线工况：测试压力 20 kPa 表压（绝压约 121 kPa）、环境温度 27 °C（300 K）、检测周期内工件或环境漂移 1 °C：

$$\Delta P_T = P \cdot \frac{\Delta T}{T} = 121 \text{ kPa} \times \frac{1}{300} \approx 400 \text{ Pa} \tag{10-2}$$

1 °C 的温度漂移 ≈ 400 Pa 的压力漂移。而气密检测的典型判定 ΔP 是多少？几十 Pa 量级。也就是说，**温度噪声比泄漏信号大一个数量级**——任何"设定一个容许压降就判 OK/NG"的做法，在物理上等同于用一把热胀冷缩的尺子量微米。差压式架构（基准件与被测件共模对比）能抵消缓变的共模温度场，但抵消不了两类残余：被测件与基准件的**温差**（来料温度不均、刚下线的热工件），以及**绝热效应的非对称性**（充气瞬间气体被压缩升温，随后向壁面散热，压力按指数回落，时间常数几秒——见图 10-1）。

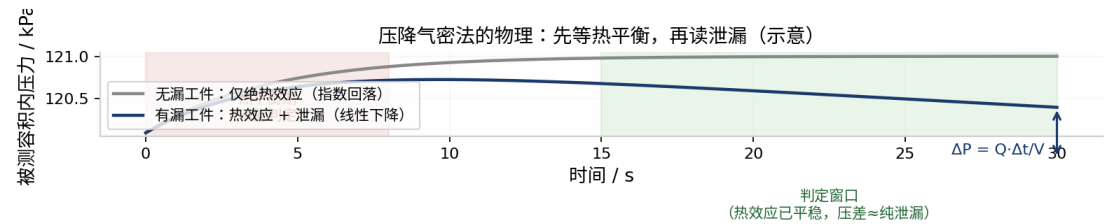


图 10-1 压降法的压力构成：绝热效应（指数回落）+ 泄漏（线性下降）——判定窗口必须等热平衡之后

表 10-1 气密检测误差源预算（量级印象，20 kPa 表压、2 L 工件、10 s 检测）

误差源	物理机制	典型量级	对策
环境温度 / 工件温差	式 (10-1), $\Delta P = P \cdot \Delta T / T$	1 °C → 约 400 Pa	恒温区、来料温度管理、差压共模
绝热压缩效应	充气升温 → 向壁面散热	数百 Pa, 按秒级指数衰减	足够稳压时间 (图 10-1 判定窗口)
夹具 / 工件弹性变形	容积随压力变化, V 改变	取决于结构, 可超泄漏信号	刚性夹具、限位、基准件同形
传感器零漂与分辨力	差压传感器自身	0.1 ~ 数 Pa	定期校准 (JJF 1986—2022 ^[9])
容积标定误差	$Q = \Delta P \cdot V / \Delta t$ 中 V 不准	百分之几 (相对)	用标准漏孔实测标定而非图纸估算

结论： ΔP 判定法的本质是“用物理假设代替验证”——假设温度均匀、假设容积已知、假设热平衡完成。这三个假设在实验室成立，在产线全部存疑。出路不是更贵的传感器，而是把“判定能力”做成可每日验证的系统：金件四件套。

同样的认知陷阱也存在于氦检测，且更隐蔽：其一，**检漏仪显示的不是漏率而是离子电流**——灯丝老化（长期口径）可使同一漏率的信号差出数倍，读数必须经校准系数（CF）赋予物理意义，未经现场校准的读数只是没有量纲的数字；其二，**单点标定管不了全量程**——离子源污染会使不同量级的离子捕获效率漂移，系统流导又随流态变化（大漏呈粘滞流、小漏呈分子流，第 3 章），跨量程外推的“线性”是危险的假设；其三，**100% He 漏孔不能折算低浓度工况**——分压不等于全压，混气在微孔中的输运行为与纯氦不同（6.4 节），低浓度检测必须用同浓度仿真漏孔在真实工况下验证。三条指向同一条准则：**就近标定、真实工况验证**——下一章的三件制正是这一准则的体系化。

10.2 从仪器精度到系统精度：视角的转换

仪器说明书上的“精度 0.1% FS”描述的是传感器，而产线要的是**判定**。两者的差距由工装、环境、工件状态、操作四个环节拉开。系统级思维把检漏判定拆成三层，每层用不同的标准件验证：

- **机器级**：检漏仪本身是否还准？——用外置 / 内置标准漏孔（ Q_0 点检件）每日验证；
- **工装级**：检漏仪 + 夹具 + 管路 + 程序参数，构成系统后是否还能分辨临界漏？——用 OK / NG 仿真假件验证；
- **系统级**：连续生产中判定是否稳定？——用边界件定期复测与 GR&R 统计验证。

三层架构有一个常见反例必须点名：**只依赖检漏仪“自检”的产线，本质是黑盒**。自检用内置漏孔校准仪器，但内置漏孔自身的漂移无人验证——用一把未检定的尺子检定尺子，构成循环论证；且内置漏孔通常只有一个漏率点，单点拟合外推到其他量级并不可靠（10.1 节末的认知陷阱之二）。可信的做法是**双重证据链**：有源漏孔验证仪器本体（机器级，回答“表准不准”），无源仿真漏孔在真实压力、真实介质、真实节拍下验证系统（工装级 / 系统级，回答“事对不对”）——前者失控时仪器在“盲飞”，后者缺失时整条产线在“盲判”，缺一不可。

10.3 金件四件套：把判定体系装进工装

四件套是系统级验证的最小完备配置^[7]：

表 10-2 金件四件套的构成与分工

件	物理构成	验证目标与频次
Q ₀ 点检件	标准漏孔（漏率 = 判定阈值或灵敏度量级）	每班 / 每日点检：仪器读数漂移监控，机器级验证
OK 假件	金件工件 + 内置 / 旁接标准漏孔，总漏率 = (1/3 ~ 1/2) × 阈值	工装级：必须稳定判 OK（防误杀验证）
NG 假件	金件工件 + 标准漏孔，总漏率 = (2 ~ 3) × 阈值	工装级：必须稳定判 NG（防漏杀验证）
金件工件	经氦检等方法确认不漏的基准工件（或等效封堵件）	作为 OK / NG 假件的载体与基准件

四件套的逻辑闭环：**OK 件守住误杀线，NG 件守住漏杀线，Q₀ 守住仪器漂移，金件提供可信载体**。每天开班用四件各测一遍，判定体系的"今日健康度"即刻可知——这把第 10.1 节的物理困境从"假设"变成了"每日实测"。两个工程细节：其一，OK/NG 假件的漏孔应内置或旁接于金件内部，使泄漏路径、容积、温度响应与真实工件一致（仿真五工况：同容积、同压力、同介质、同温度、同节拍^[7]）；其二，漏孔自身的稳定性是四件套可信的前提——假件漏孔若随温度漂移（渗透膜 +4 %/°C）或衰减失准，等于用一把自己会变的尺子做裁判，这正是四件套优先选通道型低温度系数漏孔的原因（表 3-2）。

术语说明：四件套中的 Q₀ + OK + NG 三件构成验证逻辑的核心，金件是压降法场景下三件的真实载体（使泄漏路径、容积、温度响应与真实工件一致）。在示踪气体（氦）检测场景中，这一验证体系直接称为**三件制**——判定判据同样是 GR&R ≤ 15% + 三档分离（第 11 章展开）。OK / NG 假件漏率取 (1/3~1/2) Q₀ 与 (2~3) Q₀，全书口径统一。

10.4 连接方式精度阶梯与旁路法 SOP

标准漏孔接入检测系统的方式，直接决定验证值的可信度。四种方式按精度从低到高排成阶梯：

表 10-3 漏孔接入方式的精度阶梯

方式	做法	主要误差	适用
① 快插直连	漏孔插在仪器标定口	与工装完全脱钩	仅验仪器（机器级）
② 管路并联	漏孔接入充气管路	路径与工件不一致	粗验证
③ 假件内置	漏孔埋入金件假件内部	需加工假件	OK/NG 假件标准做法
④ 旁路法	漏孔经旁通阀并联在被测容积上，测试中途开阀注入已知泄漏	最小（真实工件、真实管路、真实节拍）	系统级验证与容积标定的最高规格

旁路法 SOP（系统级精度验证与等效容积标定）：

1. 真实工件装夹，按正常程序充气、稳压；
2. 进入检测段后，开启旁通阀，将已知漏率 Q_0 的标准漏孔并联注入；
3. 读取压力变化增量 ΔP_0 ，由式（8-1）反解系统等效容积 $V = Q_0 \cdot \Delta t / \Delta P_0$ ；
4. 关闭旁通阀恢复常态。该 V 值含全部真实管路、夹具与工件，远优于图纸估算；
5. 定期重复， V 的漂移即系统状态变化的早期信号。

准则 10-1：气密判定的可信度不取决于传感器位数，而取决于“今天系统能不能稳定分辨 OK 假件与 NG 假件”。四件套每日验证 + 旁路法定期标定容积，是把 ΔP 判定从物理假设变成工程证据的最小成本路径。

10.5 用 GR&R 收口：统计验证判定体系

体系建成后，用计量学的方式证明它：取边界附近样品（含 OK 假件、NG 假件与临界工件），多名操作者、多次重复测量，做 GR&R（量具重复性与再现性）分析；对属性判定（OK/NG）做属性一致性分析（Kappa）。行业惯例门槛：计量型 GR&R $\leq 10\%$ 为可接受、 $10\sim 30\%$ 视风险、 $> 30\%$ 不可用；对 OK / NG 判定体系，工程上更直接的可用判据是 **GR&R $\leq 15\%$ + 三档分离**（OK、 Q_0 、NG 读数清晰分档无重叠，11.3 节）。GR&R 报告同时是主机厂与审核方最认可的语言——**四件套是每天的体温计，GR&R 是定期的体检报告**。

10.6 本章小结

- $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温漂 $\approx 400\text{ Pa}$ 压力漂移（式 10-2），比典型判定 ΔP 大一个数量级——裸 ΔP 判据在物理上不成立；
- 判定体系分三层验证：机器级（ Q_0 点检）、工装级（OK/NG 假件）、系统级（GR&R）；
- OK 件守误杀、NG 件守漏杀、 Q_0 守漂移、金件做载体——四件套是最小完备配置；
- 旁路法是精度阶梯的顶端：用已知漏孔反标系统等效容积，真实工件、真实管路、真实节拍；
- 四件套假件的漏孔必须自身稳定（低温度系数、可预期衰减），否则裁判自己先变了。

气密篇解决“空气检”的系统精度；下一章解决“氦检”的成本困局：在氦气 300+ 元/ m^3 的时代，如何把氦用量砍掉一到两个数量级而不损失判定能力。

第 11 章 降氦范式：等效孔径相对比较法与三件制验证

本章解决什么问题：2026 年氦气供应链危机之下，如何把氦用量降到 1/10 乃至 1% 而不损失判定能力。本章给出三层答案：认知层的物理第一性（等效孔径比较）、方法层的三件制验证（ $Q_0 + OK + NG$ ）、工程层的降浓度迭代法（寻找最小工作浓度 MWC），并诚实披露方法的适用边界。这是本书方法论含量最高的一章，也是氦检产线未来十年的主流方向^[12]。

11.1 氦气危机与三种认知姿态

2026 年 3 月，中东地缘政治冲突升级，卡塔尔拉斯拉凡工业城（Ras Laffan，全球第二大氦气生产基地）设施严重损毁，修复周期预计 3~5 年——卡塔尔占全球氦气供应的 30%~39%，与美国并列为双支柱。工业级氦气中国到岸价从 2025 年的 50~70 元/m³ 飙升至 2026 年 4 月的 300~400 元/m³，涨幅 5~10 倍。中国氦气消费对外依存度约 90%，其中 54%~66% 来自卡塔尔——即使愿意承担高价，也未必拿得到稳定配额^[12]。“降低单位检测氦耗”从成本优化选项升级为产业生存选项。

危机之下，行业呈现三种认知姿态：

表 11-1 检漏行业的三种认知姿态

姿态	心理状态	问题所在
纯氦坚守派	"纯氦是唯一标准，任何浓度降低都意味着风险"	信仰未经充分验证——纯氦本身不能保证可靠性（11.3 节）
被迫降氦派	已降到 80%、60% He，但"身体诚实、信仰没跟上"，打算氦价回落就回到纯氦	不安来自"没有验证"，不是来自"浓度降了"——在 80% He 下没做过三件验证，在 100% He 时同样没做过
三件制验证派	"三件制验证通过 = 系统可靠，与浓度无关"	认知正确，需要推广

关键认知转换是：从"浓度决定可靠性"到"验证决定可靠性"。"80% He 不如 100% He 可靠"是一个未经检验的假设——正确的比较是"80% He + 三件验证 = 可靠性确认"对"100% He + 无验证 = 可靠性未知"。浓度焦虑是无解的（氦价不由你控制），验证焦虑是有解的（三件制，每班几分钟）。

11.2 物理第一性：等效孔径比较的四层框架

一切气密与泄漏检测，本质只有一件事：比较工件上等效泄漏通道的大小（1.4 节）。把这个判断拆成四层，行业的全部误区一览无余：

表 11-2 气密检测的四层框架

层次	内容	是否可变	行业误区
物理真实	工件上的等效泄漏孔径 d_0	不可变	被忽视
目的	判定 $d > d_0$ (NG) 还是 $d < d_0$ (OK)	不可变	被扭曲为"精确测量"

手段	示踪气体：100% He / 1% He / Air / N ₂	可替换	认为"只有纯氦可行"
读值	仪器显示的 mbar·L/s 数字	随手段而变	把数字当成了物理真实

无论充 100% 氦气还是 1% 氦气，工件上的物理孔径一微米都没有改变——漏率 Q 是气体种类、压差、温度与流态的函数（式 3-1 ~ 3-4），不是泄漏通道的固有属性；浓度切换改变的只是混合气体的平均摩尔质量与有效分压。**行业的核心误区，是把第四层（读值）当成第一层（物理真实），把第三层中的某个选项（100% He）当成唯一选项。**

一个长期被忽视的事实是：**空气检漏仪早已证明非氦气也能可靠比较孔径**。差压气密检漏仪用压缩空气（含氦仅约 5 ppm）作介质，没有质谱仪，照样在产线上稳定判定 Pass / Fail（第 10 章）。从空气检漏 → 低浓度氦检漏 → 纯氦检漏是一条连续光谱，不是黑白分明的界限——如果检测的本质是"仪器读数绝对准确"，空气检漏仪根本不可能工作；它在工作，说明本质是"区分度足够"。产线检漏的终极输出只有 Pass / Fail 二元判定，核心需求是**判定一致性而非绝对精度**。

在理想条件下，这个判断可以写成干净的数学。氦检（吸枪或真空法）对泄漏 Q 的信号为：

$$S = k \cdot c \cdot Q \tag{11-1}$$

式中： S ——仪器信号（漏率读数）； k ——仪器灵敏度系数（含传输效率、离子化效率、放大倍数）； c ——示踪气体中氦的浓度； Q ——工件泄漏点的总漏率。

让工件与标准漏孔在**同一浓度**的示踪气体下测量（同源），取信号比：

$$R = \frac{S_{\text{工件}}}{S_{\text{漏孔}}} = \frac{k \cdot c \cdot Q_{\text{工件}}}{k \cdot c \cdot Q_{\text{漏孔}}} \approx \frac{Q_{\text{工件}}}{Q_{\text{漏孔}}} \tag{11-2}$$

比值 R 中 k 与 c **近似**消去——这是判定的理想模型。但请注意：它只是零阶近似，偏离来源与工程对策见 11.3 节。

原理 11-1（等效孔径比较）：检漏判定的本质是"比大小"，不是"测数字"。这里的"大小"指**等效泄漏通道的漏率**（1.4 节）——比较的是"孔"输运气体的能力，而不是"孔"的几何形状，更不是仪器读数的绝对值。比值 R （式 11-2）给出理想模型：工件与标准漏孔同浓度、同仪器测量时，灵敏度 k 与浓度 c 近似消去，氦浓度从 100% 降到 1%，判定能力原则上不变。**但本原理的工程落地不依赖该消元严格成立——实际系统存在流态非线性、系统漂移与浓度波动（11.3 节），判定的最终依据是三件制实测验证（GR&R ≤ 15% + 三档分离），而非理论推算。**适用域请注意：本原理覆盖一切"判定"场景（OK / NG）；计量与溯源场景（第 7 章）的任务是"测数字"，绝对测量依然需要满灵敏度与规范浓度——判定靠比较，计量靠溯源，两者不要混用。

11.3 从数学消元到工程比较：三件制验证

早期版本的降氦论述（包括本书 V1.2 及之前）把式（11-2）的消元表述为"严格成立"。经过深入工程实践检验，这一表述**理想化过度**，需要修正。实际系统中存在三类偏离：

- **流态非线性：**He 浓度从 100% 降到 1%，混合气体平均摩尔质量从 4 变为约 28。分子流区（ $Kn \gg 1$ ）流导与 $\sqrt{M}$ 成反比，信号近似随浓度线性缩放；但过渡流区（ $0.01 < Kn < 1$ ）粘滞分量不可忽

略，混合气体粘度遵循复杂的非线性混合规则——信号下降可能偏离浓度比例（不是 100 倍，而是 80 倍或 120 倍），不同孔径的工件甚至可能因流态跨越而表现不一致；

- **系统非理想**：灯丝老化、电子学温漂、真空本底波动，使 k 并非严格恒定；
- **浓度非恒定**：混气罐动态消耗、管路吸附 / 解吸，使 c 并非严格恒定。

因此方法论必须完成三个转向：**从"数学消元"转向"工程比较"**——不再追求证明浓度项严格消去，三件实测验证替代数学消元成为判定依据；**从"单件 Q_0 标定"转向"三件制验证"**—— $Q_0 + OK + NG$ 三件同时验证，确保系统在当天的实际状态下可靠工作；**从"理论确定浓度"转向"迭代找到 MWC"**——不预设 1% 一定可行，用降浓度迭代法实测找到每个场景的最优浓度（11.4 节）。这一修正不是削弱方案的可靠性，而是增强方案的诚实性与可操作性。

三件制 ($Q_0 + OK + NG$) 是气密检测的黄金标准——无论用 100% He 还是 1% He，也无论是否降氦：

表 11-3 三件制的构成与分工（类比：每天校秤）

件	漏率	验证目标	校秤类比
Q_0 临界阈值件	= 合格阈值	锚定 Pass / Fail 边界	1 kg 砝码——秤显示 1 kg 吗？
OK 件	$(1/3 \sim 1/2) Q_0$	验证"不误判"（合格件不被错杀）	0.5 kg 砝码——不会显示 1.2 kg 吧？
NG 件	$(2 \sim 3) Q_0$	验证"不漏检"（不合格件必被检出）	2 kg 砝码——不会显示 0.8 kg 吧？

每天 / 每班开始时三件各过一遍——这才是气密检测的正确打开方式。**系统可用的判定条件只有两条**：
① **系统 $GR\&R \leq 15\%$** （测量系统分析通行标准）；② **三档分离（OK、 Q_0 、NG 三件读数清晰分档、无重叠区域）**。两条同时满足，系统即可正常工作——不管用的是 100% He、1% He 还是空气。其中区分比（实测读数比）是两条条件的自然结果而非独立约束：在 $OK = (1/3 \sim 1/2)Q_0$ 、 $NG = (2 \sim 3)Q_0$ 的常规选择下，即使 SNR 低至 3，区分比通常也在 2~5 之间； $GR\&R \leq 15\%$ 保证每档内部波动远小于档间间隔，三档之间不存在"灰色地带"（图 11-1）。

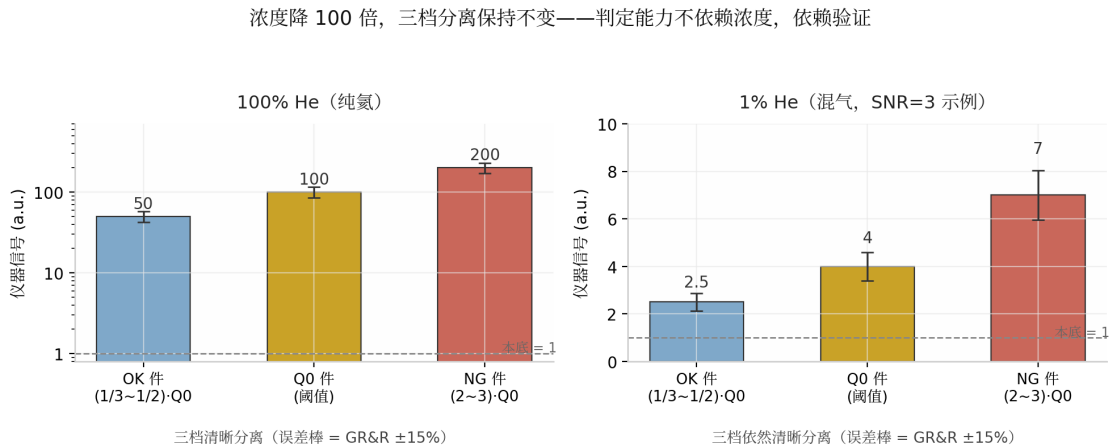


图 11-1 三件制三档分离：浓度从 100% 降到 1%（信号降 100 倍），只要 $GR\&R \leq 15\%$ ，OK / Q_0 / NG 三档依然清晰分离（SNR = 3 示例：本底 1，三件读数 2.5 / 4 / 7，区分比 2.8）——判定能力不依赖浓度，依赖验证

这是范式转换带来的红利：**传统"绝对计量"范式要求 $SNR \geq 10$ （需要精确知道漏率值）**；**"比较大小"范式下 $SNR \geq 3 \sim 5$ 即可，前提是 $GR\&R \leq 15\%$** ——从"精确测量"到"足够区分"，门槛大幅降低。

三件制还有一个常被因果倒置的定位问题：**它不是降氦的附属品，在纯氦条件下同样是最佳方案**。100% He 只解决了"信号强度"这一个维度，而检测可靠性是涉及仪器、环境、操作、标准的系统工程——仪器灵敏度漂移（灯丝老化、电子学温漂与浓度无关）、大漏后环境本底飙升（纯氦下大漏排放的氦更多、污染更严重）、标准漏孔自身漂移（渗氦漏孔年衰减 1%~5% 与浓度无关）、夹具与操作差异、真空系统微漏，这五类问题在纯氦条件下一个都不会自动消失。思想实验：两条都用 100% He 的产线，从不做三件验证的 A 线可能在灯丝老化 30% 后"盲飞"数月、造成批量漏检而无人察觉；每天三件验证的 B 线第三天就会发现 Q_0 读数漂移 18% 并立即处置。**问题从来不在浓度，在有没有验证**。降氦是三件制的延伸应用——既然每天本来就该验证，顺便找到最低可行浓度，就是纯粹的降本增效：**降氦降的只是成本，不是质量**。

11.4 降浓度迭代法：寻找最小工作浓度（MWC）

最小工作浓度（Minimum Working Concentration, MWC）不是理论算出来的，是实测三件验证出来的。操作流程：先在 100% He 下建立三件基准读数并记录区分比（Step 0）；再按 50% → 20% → 10% → 5% → 2% → 1% 逐级降浓度，每级完整重做三件验证——三档清晰分离则继续降，三档重叠或 $GR\&R > 15\%$ 则停止，**MWC = 上一档浓度**。每个工件-设备组合都能找到自己的最优浓度，这就是从"拍脑袋选 1%"到"科学找最优"的方法论升级。两个执行细节：其一，迭代必须在**目标节拍条件**下进行——产线节拍多快，验证就用多快的积分时间（最小可检漏率与积分时间相关，3~5 秒/件的超高速产线与几十秒/件的常规产线余量不同，但即使最快产线，工业氦检的余量仍然很大）；其二，建议同步记录温度、湿度等环境参数。

不同漏率量级的参考起始浓度（迭代起点，非结论）：

表 11-4 分级降氦参考（最终浓度以目标节拍下三件实测验证为准）

阈值量级	典型应用	参考起始浓度	说明
10^{-4} mbar·L/s	汽车空调管路、普通制冷件、一般工业密封件	1% ~ 3%	余量极大区间，高低节拍均无压力
10^{-5} mbar·L/s	电池包壳体、制冷压缩机、中等密封工业件	1% ~ 5%	核心应用区间，经济价值最大的"甜点区"
10^{-6} mbar·L/s	高密封继电器、部分医疗器械、航天关键密封件	10% ~ 20%	需适当浓度保证三件验证通过，仍比纯氦省 80% ~ 90%

低浓度还有一个反直觉的红利：**主动降噪效应**。纯氦产线的检测排气（约占排放总量 60%~70%）、接头与密封面微漏、工件表面解吸、标准漏孔标定排放，可使车间局部氦本底从天然 5 ppm 飙升至数百甚至上千 ppm；改用 1% 混气后，每次检测向环境排放的氦绝对量减少约 100 倍，车间氦排放总量锐减约 99%，本底回归自然水平。大漏工件的"记忆效应"（氦在质谱室金属表面吸附后缓慢释放，传统需数分钟至十几分钟清扫等待）在混气方案下因冲入氦绝对量降两个数量级而缩短至数秒，无需停机。在 $SNR = \text{信号} / \text{噪声}$ 中：信号分子按浓度比例下降，噪声分母（环境氦干扰）下降幅度更大——**在环境氦污染严重的现场，有效信噪比可能不降反升**。这是低浓度方案"反直觉"却"物理严谨"的核心洞察。

流态判断简易指南：**分子流** ($Kn \gg 1$) 信号-浓度近似线性，仍须三件实测验证；**过渡流** ($0.01 < Kn < 1$) 可能非线性，必须通过三件实测验证；**粘滞流** ($Kn < 0.01$) 非线性显著，不建议降氦。所有流态影

响都被三件制比较所包容——降浓度迭代的每一步都靠实测，不靠理论推算。

11.5 成本账：从 300 元/m³ 说起

氮耗成本 $\approx$ 用量 $\times$ 浓度（回收率不变时，图 11-2）：

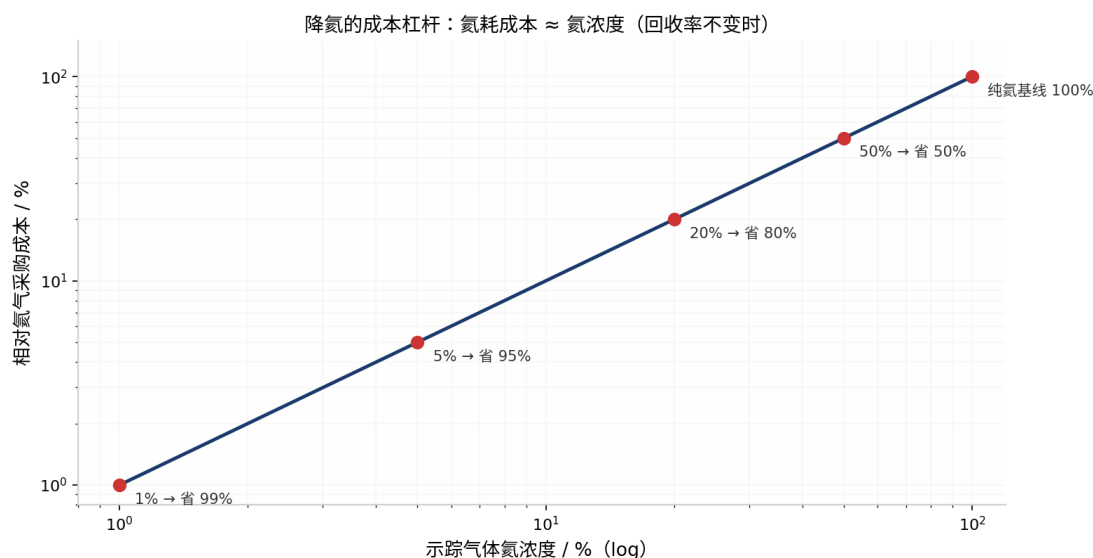


图 11-2 降氮的成本杠杆：氮耗成本与浓度成正比（回收率不变时）

算一笔实账（电池包氮检产线，年产 500~600 万件，行业实际运行数据口径^[12]）：纯氮方案年耗氮约 300 瓶（50 L $\times$ 20 MPa 规格，约 3000 元/瓶），年氮气成本约 90 万元；降至 10% 浓度后年耗约 30 瓶、成本约 9 万元，**年省约 80 万元**——而三件制验证的一次性投入仅 1~3 万元（Q₀ 标准漏孔 + OK / NG 假件制作），混气设备成本远低于回收系统。隐性收益同样可观：三件制每日验证杜绝系统性漂移导致的批量误判（误报率可降 50% 以上）；大漏后清零时间从数分钟缩至数秒，有效节拍提升 3%~8%；每班次三件校准记录使质量审计有据（满足 IATF 16949 等体系要求）；低消耗本身就是供应链风险对冲。

成本账还有第二个维度——标准件自身的全生命周期成本（TCO）。传统渗透型 / 玻璃工艺漏孔的隐性支出分散在三处：易碎导致的运输损耗与意外报废、较短复校周期带来的频繁送检费用与停线等待、以及漂移失准造成的批量误判。低衰减（0.1%~2.5%/年，16.3 节）、通过跌落与冻融实测（15.1 节）、宽温免特殊储运的漏孔，把复校周期稳定拉长到 12 个月（15.3 节建标实例），把“轻拿轻放”从日常操作中删除——这部分节约不以氮气计价，却同样计入利润表。选型时把“单价”换成“TCO = 购置价 + 复校费 $\times$ 年限 + 报废率 $\times$ 重置价 + 误判风险成本”，结论常常反转。

降氮不是单点技术，是“浓度 $\times$ 回收 $\times$ 判定方法”的三元乘积——而判定方法这一环（三件制验证）恰恰是成本最低、纯度最高的认知杠杆。更大的图景是：当工业氮检的氮用量降到原来的 10%，同等进口量可支撑 10 倍以上的检测需求，国产有限产能变得“够用”，氮气危机在需求侧被化解——这是一次“需求侧革命”，也让中国有机会成为低浓度氮检漏标准的定义者^[12]。

11.6 适用边界与诚实披露

诚实的白皮书必须写清方法的边界。各检测方法的适用性：

表 11-5 各检测方法的降氦适用性评估

方法	适用性	核心要求	备注
真空法	论证最充分	腔体密封、抽速足够	降 He 有双重收益（信号↓、本底↓↓）
正压累积法	充分可行	累积腔封闭、时间控制	与真空法本质类似，电池包行业常用
吸枪法	可行但门槛更高	吸入流量必须恒定（MFC / 恒流泵）	大气 He 本底固定约 5 ppm，降 He 不降噪，SNR 严格下降，MWC 通常高于真空法
压降 / 压差法	不适用	——	以空气为介质，不存在示踪浓度概念（其系统级验证体系见第 10 章）

- **双轨制**：强制要求绝对漏率数值报告的行业（航空航天 GJB、医疗器械等），建议日常产线检测用低浓度三件制，型式试验或客户验收时保留纯氦法能力出具报告；
- **量级边界**： $10^{-4} \sim 10^{-5}$ mbar·L/s 量级（真空法 / 正压累积法）技术成熟可靠； 10^{-6} 量级经谨慎验证后具备可行性； 10^{-7} 及以下量级不在本方案主张范围；
- **温度影响**：低温系数漏孔（0.1 %/°C 量级）在一般工业环境（±2 °C）可忽略，但工件本身漏率可能随温度变化（聚合物密封件热胀冷缩等），温度波动 > 10 °C 的环境建议做温度敏感性测试；
- **浓度波动控制**：混气罐容积按 > 200 倍单次消耗量设计、安装在线浓度监测、多工位产线分区供气、选择 2 家以上混气供应商；
- **响应时间**：低浓度下信号建立时间变长，节拍设计需留稳定时间；
- **仿真漏孔三硬指标**：漏率与指定压力同时定制（阈值即目标）、温度系数低（产线无恒温）、抗震抗摔（产线环境）；且必须与工件**同浓度、同压力、同介质**——混气仿真漏孔按现场实际浓度定制、按总漏率口径出证（6.4 节 P/T 口径），漏孔用纯氦而工件用混气的“假同源”会让比值失去意义。方法论最终仍要落回器件物理（第 3~5 章）。

准则 11-1：降氦的正确顺序：先建三件制验证体系（任何浓度下都该做，纯氦也不例外），再用降浓度迭代法实测找到 MWC（不拍脑袋定浓度），同步控本底（保住 SNR），最后叠加回收（尾氦提纯回用）。顺序错了，钱就白花。

11.7 本章小结

- 检漏的本质是比较等效泄漏孔径：气体只是示踪媒介，读值只是手段的响应，唯一不变的是 d_0 （四层框架，表 11-2）；空气检漏仪早已证明非氮气也能可靠比较孔径；
- 比值 $R = Q_{\text{工件}} / Q_{\text{漏孔}}$ 是零阶近似（式 11-2）——流态非线性、系统漂移、浓度波动使“完全消去”不成立，工程判定依据是三件实测验证而非数学消元；
- 三件制 ($Q_0 + OK (1/3 \sim 1/2) Q_0 + NG (2 \sim 3) Q_0$) 是气密检测的黄金标准：系统可用的唯一判据是 $GR\&R \leq 15\% + \text{三档分离}$ ，与氮浓度无关；纯氮不验证同样在“盲飞”；
- 比较范式的红利： $SNR \geq 3 \sim 5$ 即可（绝对计量要求 ≥ 10 ）；低浓度还有主动降噪效应，环境氮污染严重的现场 SNR 可能不降反升；
- MWC 用降浓度迭代法实测确定 ($100\% \rightarrow 50\% \rightarrow 20\% \rightarrow 10\% \rightarrow 5\% \rightarrow 2\% \rightarrow 1\%$)，参考起点： 10^{-4} 量级 1%~3%、 10^{-5} 量级 1%~5%、 10^{-6} 量级 10%~20%；
- 电池包产线实账：氮气成本年省约 80 万元，三件制投入 1~3 万元一次性——降氮降的只是成本，不是质量；
- 边界：真空法 / 正压累积法充分可行，吸枪法需恒定吸入流量且不降噪，压降法不适用；强制绝对报告行业用双轨制； 10^{-7} 量级以下不主张。

应用篇最后一章回到最日常的问题：面对一份需求，如何一步步选对一支漏孔——以及那些年我们踩过的坑。

第 12 章 选型方法论与常见误区

本章解决什么问题：给您一个检漏需求，如何一步步收敛到一支正确的漏孔（以及证书）；以及行业中最常犯的十五个错误。本章是全书的"实用终点"，适合打印贴在采购与工艺工程师的工位上。

12.1 五步选型法

选型的本质是固定第 2 章说的"工况四要素 + 形态"。按以下顺序五步收敛，每一步都对应前文章节：

表 12-1 五步选型法

步骤	要回答的问题	对应章节与要点
① 定介质	检什么气？纯气 / 混气 / 冷媒 / 液体？ 浓度与 P/T 口径？	6.4 节混气口径；6.5 节液态介质；冷媒 g/y（式 2-4）
② 定漏率	判定阈值多少？灵敏度验证还是 OK/NG 仿真？	阈值 × (1/3~1/2) 做 OK 件、× (2~3) 做 NG 件（10.3 节）
③ 定压力	入口压力（绝压！）、出口条件（真空 / 大气）？	2.4 节表压绝压；2.5 节正压/真空口径（准则 2-1）
④ 定形态	有源还是无源？接口与安装空间？要 不要阀门？	1.6 节分类；第 6 章阀门三问（准则 6-1）
⑤ 定证书	出厂证书 / 计量院校准证书？不确定 度要求？	第 7 章五要素核对（准则 7-1）

五步走完，得到的不是一个型号，而是一行"工况语句"——例如："N₂，2.0×10⁻⁴ Pa·m³/s，入口 6 bar 绝压，出口大气，无源，VCR 1/4"，任何严肃的漏孔厂家都应能据此报价与交期。说不清这行语句的需求，报价单上省的钱都会在验收时加倍付回去。

12.2 有源还是无源：一张决策表

表 12-2 有源 / 无源决策表

场景特征	推荐	理由
检漏仪灵敏度校准、计量溯源、移动点检	有源	独立气源、便携、证书完备；衰减可用式（3-9/3-10）管理
产线 OK/NG 假件、四件套、降氦仿真	无源	零衰减、与工件同源同压、可定制任意压力/介质
大漏率（> 10 ⁻³ mbar·L/s）有源需求	有源 + 零体积阀	呆体积损失与衰减在高压大漏率下被放大（准则 6-1）

RGa / UHV / 昂贵同位素	有源（零体积阀）或无源	本底与气体损失硬约束
高压（> 10 bar）工况仿真	无源	微通道无源件承压可达 40 MPa，有源气室另有体系

12.3 读懂订货逻辑：一行代码里的五个承诺

规范的订货号应能逐段解码（示意结构）：介质 - 漏率 - 入口压力 - 接口 - 证书等级。验收时逐段与证书五要素对表（表 7-4）：订货号写"6 bar 绝压"而证书写"6 bar 表压"，差一个大气压，低压侧就是数量级错误（2.4 节）。**订货号、铭牌、证书三者口径一致，是收货验收的第一道手续。**

12.4 定制流程与交期预期

微通道工艺的意义之一是"定制即常态"：指定压力 + 指定漏率 + 指定介质，由流导仿真（式 3-4）先算几何、再加工、再实标出证。合理预期：常规定制 3~5 个工作日量级可交付；极限规格（ 10^{-12} 以下、40 MPa、特殊介质）需技术评审。**判断厂家是否掌握工艺的试金石：能否接受"指定压力与漏率同时定制"，而非只让你从货架表里挑。**

12.5 高频 FAQ 十五问

- 漏孔能用多久？** 无源通道型无自然寿命上限（定期送检即可）；有源看 $Q(pV)$ （3.8 节），高压大气室产品年衰减可低至 0.1%~2%。
- 漏率不准了能修吗？** 微通道漏孔多数情况是堵塞或污染，清洗疏通后可复标；几何损伤不可修。玻璃件基本不可修。
- 摔了一下还能用吗？** 玻璃 / 石英件默认报废；通过跌落验证的金属一体漏孔（如 1.2 m×5 次）复测漏率即可确认。
- 证书过期还能用吗？** 量值失去溯源，只能当"参考件"不能当"标准件"；送检复标后恢复。
- 为什么新漏孔和旧漏孔读数对不上？** 先对五要素（表 7-4）：介质、压力口径、出口条件、温度、不确定度——八成是口径不同，不是漏孔坏了。
- 冬天车间读数偏低正常吗？** 看温度系数符号：粘滞流主导的气密漏孔降温升漏率、分子流主导的氮漏孔降温降漏率（表 3-2），幅度约 0.1~0.6 %/°C——先修正再怀疑仪器。
- 渗透膜漏孔为什么要温度修正表？** +3~4 %/°C 的 Arrhenius 机制（3.7 节），不修正等于自带每月百分之十几的漂移。
- 标准漏孔能不能当产品漏点用？** 不能反过来用：漏孔是"标准源"，工件漏点是"被测对象"；用 OK/NG 假件仿真临界漏点（10.3 节）。
- sccm 和 mbar·L/s 混用会出多大事？** 差 59.2 倍（式 2-3）。报需求时单位写全，验收时先换算。
- 有源漏孔忘关阀会怎样？** 持续漏放缩短寿命——选常闭阀或养成点检习惯（6.3 节）。
- 氢气标准漏孔危险吗？** 微漏率量级每天释放 0.3 mL 量级，远低于安全关注限（2.3 节量级直觉）；遵守常规通风即可。

12. 为什么 10 MPa 下的漏率证书，现场 5 MPa 用读数不对？粘滞流区 $Q \propto p^2$ （式 3-2）：压力减半漏率约变 1/4。按使用压力定制，勿跨压力挪用。
13. 混气漏孔的“漏率”指哪个？必须问清 P 口径（某组分分漏率）还是 T 口径（总漏率），两者差 $\sqrt{M}$ 加权（6.4 节）。
14. 计量院建标买什么？参考漏孔组：覆盖 5~6 个数量级、逐支国家级溯源、年稳定性与不确定度满足 JJF 1833—2020（7.5 节）。
15. 怎么快速判断一家漏孔厂的真实水平？四问：温度系数多少（能否给出流态解释）？双向漏率是否相等（准则 4-1）？能否指定压力与漏率同时定制？敢不敢给跌落 / 冻融复测数据？

12.6 本章小结

- 五步选型：介质 → 漏率 → 压力（绝压）→ 形态 → 证书，产出一行完整“工况语句”；
- 有源 / 无源按场景决策：溯源校准用有源，产线仿真用无源；
- 订货号 = 铭牌 = 证书，三者口径一致是验收第一道手续；
- “能否指定压力与漏率同时定制”是工艺真伪的试金石；
- 十五问覆盖了现场 80% 的纠纷场景——多数纠纷不是产品质量问题，是口径问题。

应用篇至此完成。读者至此已拥有从物理到方法论的完整装备。第四篇（方案篇）将展示：当这套知识体系被一家工厂完整掌握并工程化之后，会长出什么样的产品矩阵与技术体系。

第 四 篇

方案篇 | 睿米答案

第 13 章 四大核心技术体系：对前十二章物理问题的回答

本章解决什么问题：前十二章建立了一套评价标准漏孔的完整物理标尺。本章回答：把这套标尺工程化到极致，会长出什么样的技术体系。每一项技术都回扣前文的物理问题——这不是产品宣传的结构，而是"问题—回答"的结构。

13.1 回应的逻辑：一张问题清单

表 13-1 前十二章的物理问题与四大核心技术的对应

前十二章提出的问题	出处	技术回答
孔径必须做成"设计值"而非"运气值" (d^4/d^3 敏感)	第 3 章、4.1 节	RMI-MTC™ 微通道毛细管工艺
理想圆管才能无方向性、防堵、全流态可计算	4.9 节准则 4-1、5.6 节	RMI-MTC™ (双向漏率相等)
密封本底决定极小漏率下限 (10:1 准则)	5.2 节、式 (5-1)	RMI-Metal™ 全金属密封 $< 10^{-15}$ atm·cc/s
吸附释气是 UHV / RGA 的"幽灵漏率"	5.3 节、式 (5-2)	RMI-Metal™ + 一体化设计 (无胶、无装配界面)
呆体积三大代价：损失、冲击、记忆	第 6 章、式 (6-1)	RMI-PSOZV™ / MDZV™ 零体积阀 (0.098 μ L)
混气分漏率与全流态换算必须可计算	式 (3-4)、6.4 节	RMI-Cal™ 流导仿真引擎
有源漏孔衰减率 $\propto Q/(pV)$ ，寿命之争是压力之争	3.8 节准则 3-2	高压气室 (≤ 12 MPa) + 零体积阀常闭防呆
温度系数由流态注定，能做到多低？	3.7 节表 3-2	分子流有源 +0.1 %/°C、粘滞流无源 -0.6 %/°C 实测兑现理论值

13.2 RMI-MTC™ 微通道毛细管工艺：把漏孔从手艺变成设计

在金属基体内直接加工几何确定的微通道，孔径 50 nm ~ 200 μ m 连续可控，按流导公式 (式 3-2、3-3、3-4) 先计算、后加工^[3]。对照第 4 章的四把尺子：

- **孔径设计值：**指定压力与漏率同时定制 (如"34 bar 表压下 2.3×10^{-7} Pa·m³/s")，公差 $\pm 10\%$ 起步、可按需 $\pm 5\%$ 乃至更高——式 (4-1) 的 $\pm 2.4\%$ 孔径公差对数控微加工是常规能力；
- **理想圆管：**漏率无方向性 (准则 4-1 的直接证据)、均匀孔道无喉部故防堵 (5.6 节)、全流态行为可被式 (3-4) 完整描述；
- **机械强度：**金属一体结构——无源漏孔承压 40 MPa、支持 400 bar 高压反复冲击、1.2 m×5 次跌落测试通过、工作温度 -20 ~ +65 °C (可承受 -30 °C 冷冻)^[3]；

- **温度系数兑现理论：**有源（分子流主导） $+0.1\%/^{\circ}\text{C}$ 、无源（粘滞流主导） $-0.6\%/^{\circ}\text{C}$ ——正是式（3-5）/（3-6）预言的量级，比渗透膜低数倍至逾一个数量级（表 3-2）。

13.3 RMI-Metal™ 全金属密封：把本底压到 10^{-15}

密封本底 $< 1 \times 10^{-15} \text{ atm} \cdot \text{cc/s}$ ，领先常规密封工艺（ 10^{-9} 量级）5~6 个数量级^[3]。按 5.2 节的 10:1 准则重读这个数字：它意味着本底不再是任何可预见漏率规格的约束——通道型漏孔的下限由此推进到 $10^{-12} \text{ atm} \cdot \text{cc/s}$ （ $10^{-13} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ）量级。同时，无胶、无高分子、一体化的结构消除了吸附 / 释气通道（5.3 节），这是半导体 RGA、超高真空、同位素场景的入场条件。

13.4 RMI-PSOZV™ / MDZV™ 零体积阀：0.098 μL 的系统工程

呆体积分空间 $\Phi 0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm} = 0.098 \mu\text{L}$ ，把第 6 章的三笔账全部改写^[3]：

- **开关损失：**传统阀 $0.1 \text{ cc} \times 100 \text{ atm} = 10 \text{ cc/次}$ ；零体积阀 0.01 cc/次 ——开关 100 次损失约 1 cc，可忽略（式 6-1、图 6-1）；
- **真空冲击：**无论关闭多久，开阀瞬时释放量不冲击高真空 / RGA 系统——生产设备原位标定成为可能（9.3 节）；
- **衰减极小化：**仅开启时损失气体，配合常闭气动设计（PSOZV™）主动规避“忘关阀”这一最大人为风险——对 Xe、Kr、 ^3He 等昂贵同位素，实现近似零自然衰减。实测口径示例：MDZV™ H_2 漏孔（160 cc，He 等效漏率 $1.60 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ @ 10.8 bar，多压力校准点），年衰减 $< 2.5\%$ （按年使用 60 次 $\times 60 \text{ min}$ 计）；PSOZV™ 混气漏孔（Xe-132 / Kr-84 同位素组），年衰减 $< 1\%$ ^[3]。

13.5 RMI-Cal™ 数字化流导引擎：从“试出来”到“算出来”

RMI-Cal™ 是气体物性库 + 流导仿真算法（式 3-4 叠加模型的工程实现）：输入介质（单气 / 混气 / 液态）、入口压力、目标漏率，输出孔径与长度的加工参数；混气分漏率按式（6-3）计算、P/T 口径自动换算；液态介质按蒸气压模型（式 6-5）计算。它把定制的本质从“反复压扁试错”变成“先仿真、后加工、再实标”，交付周期从传统的数周压缩到 3~5 个工作日（CNAS 证书 +1 周）^[3]。对用户而言，其最直观的存在形式是订货号矩阵——介质、漏率、压力、接口、阀门、证书逐段编码（见 16.1 节），一行代码就是一份完整的工况合同。需要说明的是，RMI-Cal™ 的理论底座并不神秘，正是本书第 3 章的公开物理：流态判据（Kn）、粘滞流 / 分子流公式与 $1/\sqrt{M}$ 换算构成计算内核，气体物性库提供粘度与分子量数据——它的价值在于把这套物理变成可执行、可复核、可批量的工程计算，而非任何“黑箱秘方”。

13.6 闭环：四项技术如何互相成就

单独看，每项技术解决一类物理问题；合起来，它们构成一个闭环：**RMI-Cal™ 负责“算得准”（设计层）** → **RMI-MTC™ 负责“做得准”（制造层）** → **RMI-Metal™ 负责“封得住”（本底层）** → **RMI-PSOZV™/MDZV™ 负责“用得久”（系统层）**。任何一环缺位，极限规格都不成立：没有金属密封，微

通道做不到 10^{-13} ；没有零体积阀，高压气室的衰减优势会在使用中流失；没有仿真引擎，全介质定制就退回到试错。这就是"全漏率 × 全压力 × 全介质"覆盖得以同时成立的结构性原因。

第 14 章 全场景产品矩阵：全漏率·全介质·全工况

本章解决什么问题：四大技术落地为怎样的产品版图。本章给出产品形态总览、极限能力边界与分行业选型映射，是第 12 章选型方法论的“货架侧”对照。

14.1 产品形态总览

表 14-1 睿米®标准漏孔产品形态总览^[3]

形态	要点	对应场景（章节）
有源漏孔（带气室 / 储气罐）	He 全系列 $5 \times 10^{-2} \sim 5 \times 10^{-12}$ mbar·L/s；H ₂ 、N ₂ 、Ar、Kr、Xe、Ne、D ₂ 、CH ₄ 、C ₂ H ₆ 、丙烯等任意单气 / 混气；气室 50 ~ 1000 cc、冷媒双气室；充气压力 ≤ 12 MPa	检漏仪校准、计量溯源（第 1、7 章）
无源漏孔（模拟仿真）	100 mL/s ~ 10^{-9} mbar·L/s；0.1 Pa ~ 40 MPa；指定压力与漏率同时定制；双向漏率相等	产线 OK/NG 假件、四件套、降氦仿真（第 10、11 章）
微尺寸 / 原位测试漏孔	最小体积规格 $\Phi 2.5 \times 3.0$ mm（系列覆盖 $\Phi 2.0 \times 5.0 \sim \Phi 3.0 \times 3.2$ ）	手机、耳机、可穿戴等精密电子原位测试
零体积阀漏孔（PSOZV™ / MDZV™）	呆体积 0.098 μ L；手动 / 常闭气动； $10^{-3} \sim 10^{-6}$ Pa·m ³ /s 大漏率低衰减	RGA / UHV、同位素、自动化产线（第 6、9 章）
RGA 混气 / 同位素漏孔	H ₂ /He/N ₂ /Kr/Xe 各 1% 余 Ar；Xe-132 / Kr-84 同位素组；1000 ppm、1 ppm Kr/Xe 系列	RGA 定量、痕量标定（第 9 章）
液态介质漏孔	DMC、正十二 / 十四 / 十六烷、H ₂ O、PFTBA；液-气平衡 + 微通道控释	半导体放气、EUV 碳污染、航天质量法（6.5、9.3 节）
卤素 / 冷媒漏孔（双气室）	R134a、R22、R290、R410a、R1234yf、SF ₆ 等，g/y 口径	制冷行业法规符合性（8.4 节）
专项形态	可调漏率（TLS3-5 / TLS4-6）、检漏仪内置漏孔（Pfeiffer ASM 系列、Inficon / Leybold 等）、电磁阀真空漏孔、 μ L 级背压漏孔、质谱大气取样 / 探针漏孔	整机配套与特殊集成

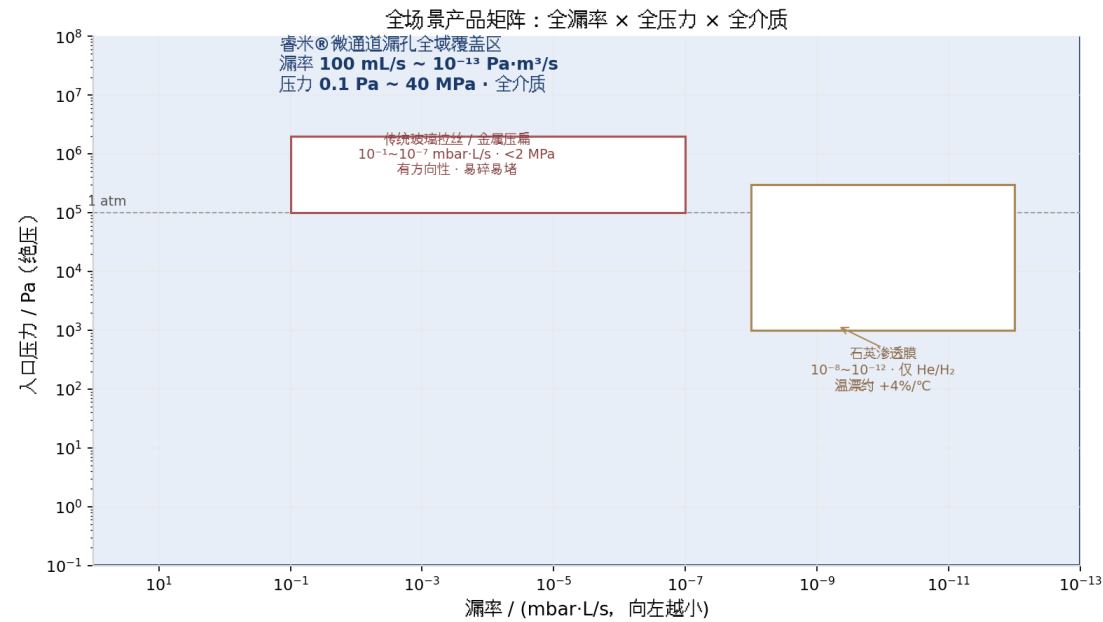


图 14-1 全场景产品矩阵：全漏率 × 全压力 × 全介质（与传统工艺覆盖区对比）

14.2 极限能力边界与行业首创

- **漏率下限**：通道型 He 漏孔 $10^{-11} / 10^{-12} / 10^{-13} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 稳定量产，打破该量级长期只有渗透膜可选的局面（5.2 节物理分析）；
- **压力上限**：无源 40 MPa、有源 12 MPa 气室——有源漏孔寿命之争的正解（准则 3-2）；
- **介质边界**：全球首发正十二烷标准漏孔系列并批量应用（攻克 EUV / 真空系统重碳氢定量难题）；全球首发航天级 $\text{C}_{14} / \text{C}_{16}$ 高质量数有机物漏孔（通过航天质量法验收）；首个 H_2O 漏孔、首个 PFTBA 全质量数质谱漏孔^{[3][13]}；
- **氢检产业化**：某新能源头部厂家 He 改 H_2 大规模商用检测线指定 H_2 漏孔唯一生产厂家^[3]；
- **微尺寸**：全球首个微通道微尺寸漏孔（最小 $\Phi 2.5 \times 3.0 \text{ mm}$ ），支撑精密电子原位测试。

14.3 分行业选型映射

表 14-2 行业 → 需求 → 产品映射

行业	核心需求	推荐配置
动力电池	壳体 / 盖板氦检与氢检、高节拍点检、降氮	无源仿真漏孔组（OK/NG/ Q_0 ）+ 有源 He / H_2 漏孔 + 降氮方案（第 11 章）
汽车 / 制冷	冷媒法规符合性、空调部件氦检	冷媒双气室漏孔（g/y）+ 有源 He 漏孔
半导体 / UHV	RGA 定量、设备验收、放气分析、EUV 监控	零体积阀 + 混气 / 同位素 / 液态介质漏孔（第 9 章）
3C 精密电子	整机气密、原位测试、小空间集成	微尺寸漏孔 + 无源气密漏孔

航空航天 / 科研 长寿命器件标定、质量法验收、极限漏率 $10^{-11} \sim 10^{-13}$ 系列 + C_{14}/C_{16} 液态漏孔 + 零体积阀

第 15 章 实证数据：把指标变成证据

本章解决什么问题：前几章的所有指标，用可复核的实证数据收口：极限环境测试、国家级计量证书、计量机构建标实例、批量一致性与重复性实测。本章的原则是——每一个数字都能被第三方复现。

15.1 极限环境测试：急冻与暴力砸摔之后

标准漏孔的传统形象是"轻拿轻放、防震防摔的娇贵品"。两组公开视频测试给出反例^[14]：

表 15-1 极限性能测试记录

对象	处理	处理前标称	处理后复测
无源 He 漏孔	-20 °C 冰箱急冻 1 晚 + 暴力砸摔	4.75×10^{-5} mbar·L/s （2 bar 表压）	$4.80 \sim 4.90 \times 10^{-5}$ mbar·L/s （保持率 101% ~ 103%）
有源 He 漏孔	-20 °C 冰箱急冻 1 周 + 暴力砸摔（温差约 40 °C）	1.16×10^{-7} mbar·L/s	1.10×10^{-7} mbar·L/s （保持率约 95%）

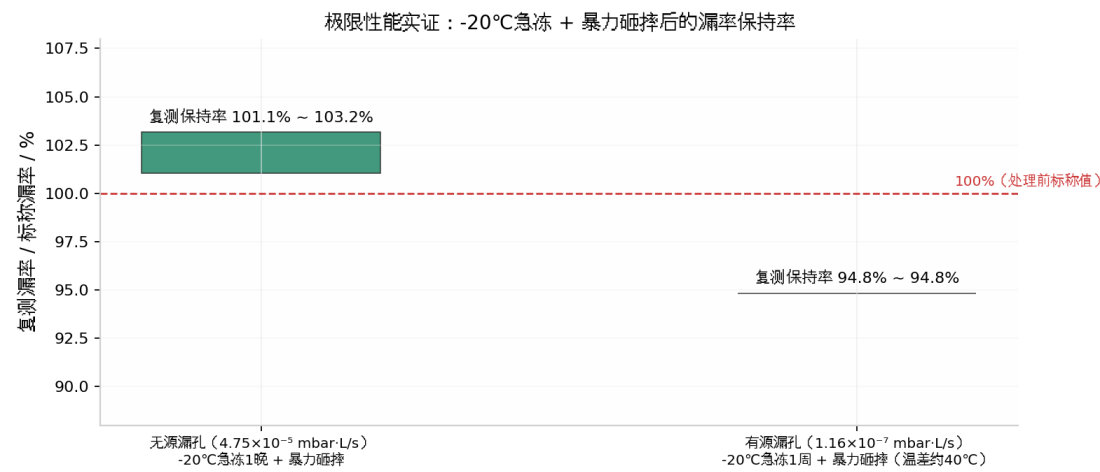


图 15-1 极限处理后的漏率保持率（数据来源：公开测试视频^[14]）

两点读法：其一，无源漏孔复测值甚至略升——方向与第 3 章的理论一致（粘滞流主导的无源漏孔温度系数为负，且测试在温差约 40 °C 的非恒温条件下进行，±5% 内的波动属于温度效应而非漂移）；其二，有源漏孔 -5% 的读数变化同样可用温度系数（ $+0.1\% / ^\circ\text{C} \times (-40\text{ }^\circ\text{C}) \approx -4\%$ ）解释——**所谓"抗造"，本质是没有发生不可逆的几何或密封损伤**，温度回复后读数即回复。这正是第 5 章"机械损伤不可逆、温度效应可逆"判据的实证。同属硬件耐受性证据的还有真空冲击实测——零体积阀漏孔开阀对 RGA 系统的压力扰动不足一个数量级，数据见 6.2 节^[15]。

15.2 国家级计量证书

10^{-10} 、 10^{-11} mbar·L/s He 标准漏孔及 H_2 标准漏孔，可提供国防科技工业真空一级计量站校准证书；常规规格可按需外送中国计量科学研究院（NIM）等机构校准^[3]。证书要素遵循第 7.6 节五要素口径：介质与口径、入口压力、出口条件、温度与修正、不确定度与溯源逐项写明。对计量用户而言，一级计量站证书意味着这些极限规格（ 10^{-11} 以下）的量值不是“厂家自报”，而是国家计量体系确认的结果。2026 年 7 月的一张证书实例^[16]：

表 15-2 10^{-12} Pa·m³/s 量级校准证书要素实例（国防科技工业真空一级计量站，2026-07）^[16]

证书要素	内容
被校对象	有源 He 标准漏孔 RM51X-121711V0/6（出口入真空）
校准结果	$Q = 8.12 \times 10^{-12}$ Pa·m ³ /s（校准气体：氦气）
扩展不确定度	$U_r = 22\%$ （ $k = 2$ ）
上级标准	$(5 \times 10^{-13} \sim 5 \times 10^{-5})$ Pa·m ³ /s 气体微流量标准装置：动态比较法 $U_r = 14\%$ 、静态累积比较法 $U_r = 18\%$ （ $k = 2$ ）；[2017] 国防计标最高证 C249 号，有效期至 2027-12-19
溯源主标准器	磁悬浮转子真空计（SRG）、电容薄膜真空计（CDG）等

这张证书同时是第 7 章不确定度语言在极限量级的实例：22% 的相对不确定度并非工艺不精，而是 10^{-12} Pa·m³/s 已逼近国家计量体系的能力边界——上级标准装置自身的 U_r 即达 14% ~ 18%，合成后被校值的不确定度不可能优于它。反过来读，能在这一量级给出带不确定度与完整溯源链的证书，本身即说明国内量值传递体系对 10^{-12} Pa·m³/s 级微通道漏孔已经闭环。

顺带说明一个客户常见的疑问：同一支漏孔在不同机构获得的不确定度并不相同——它主要由测量装置的能力决定（第 7 章预算表的上级标准分量）。以常规量级（ $10^{-5} \sim 10^{-9}$ mbar·L/s）为例：国防科技工业真空一级计量站可给 3% ~ 5%，国家计量院常规为 10%，地方计量机构一般为 15%；睿米出厂证书的內部标定值（ 10^{-5} mbar·L/s 量级 5.5%、 $10^{-6} \sim 10^{-9}$ mbar·L/s 量级 $\pm 8\%$ ）介于其间，源于厂家参考漏孔组的多次比对与工艺先验。当然，这一切的前提是漏孔本身够好——短期不稳定性会直接进入重复性分量，漏孔差的话，再好的装置也给不出小不确定度。

15.3 计量机构建标案例

多家省市计量院 / 计量站采用睿米参考标准漏孔组建立真空氦漏孔标准装置（JJF 1833—2020 体系），典型配置：6 支参考漏孔覆盖 $(3 \times 10^{-10} \sim 3 \times 10^{-5})$ Pa·m³/s 六个数量级、每量级一支；温度系数 0.1 %/°C；年稳定性优于规范要求（ $\leq 3\%$ /年）；逐支经国家级机构溯源；复校周期 12 个月^[3]。一套已公开的完整建标实例（某市标准计量检验检测中心，2026 年）^[18]：

表 15-3 真空氦漏孔标准装置参考漏孔组建标实例（JJF 1833—2020 体系）^[18]

型号	目标漏率 / Pa·m ³ /s	实测漏率 / Pa·m ³ /s	NIM 证书编号	年衰减率
TLS-5P	3.0×10^{-5}	3.01×10^{-5}	RGyz2025-07108	约 0.8%

TLS-6P	3.0×10^{-6}	3.01×10^{-6}	RGyz2025-07109	< 1.0%
TLS-7P	3.0×10^{-7}	3.14×10^{-7}	RGyz2025-07110	< 0.7%
TLS-8P	3.0×10^{-8}	3.14×10^{-8}	RGyz2025-07111	约 0.3%
TLS-9P	3.0×10^{-9}	2.97×10^{-9}	RGyz2025-07112	< 0.1%
TLS-10P	3.0×10^{-10}	3.04×10^{-10}	RGyz2025-07107	< 0.1%

统一规格：100% He、通道型（微通道）、KF25 出口、工作温度 $-20 \sim +65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、温度系数 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$ 、不确定度 $\pm 10\%$ ($k = 2$)、复校周期 12 个月；6 支全部经中国计量科学研究院（NIM）校准溯源。

对照 JJF 1833—2020 第 6.2.1 条（标准装置应配备多支标准漏孔、覆盖测量范围各数量级、稳定性不大于 3%/年）：该组漏率覆盖 $3 \times 10^{-10} \sim 3 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 六个数量级、每量级一支，年衰减 0.1% ~ 1.0%，优于规范要求一个数量级。衰减率的逐支差异恰是式（3-10）衰减定律 $Q/(pV)$ 的教科书式呈现——漏率越大的型号配越大的气室（TLS-5P / 6P 配 300 ~ 1000 cc，TLS-9P / 10P 配 100 cc），把大漏率端的衰减同样压到 1% 以下。**建标的本质不是买六支漏孔，而是买一套“每个数量级都有、每支都扛得住年复校”的量值梯队。**此外，睿米作为参与起草单位加入了 JJG（军工）165—2024《真空标准漏孔检定规程》的制定^[2]——从“被检定者”到“规则共建者”，这是制造企业在计量体系中最深的背书。

15.4 批量一致性与交付数据

RMI-Cal™ 仿真驱动 + 微通道几何可控，使定制从“筛选”变为“设计”：标准公差 $\pm 10\%$ ，可定制 $\pm 5\%$ 乃至更高（ $10^{-10} \sim 10^{-12} \text{ mbar} \cdot \text{L}/\text{s}$ 极高精度区间为 $\pm 20\% \sim \pm 50\%$ ，受上级计量能力约束）；常规定制 3~5 个工作日交付（CNAS 证书 +1 周）^[3]。对用户最直接的对照是：传统工艺“指定压力 + 指定漏率”的定制周期以周计且常被拒单，而订货号矩阵把任意工况组合变成了标准流程。

出厂重复性的公开实证：一支 $1.0 \text{ mL}/\text{min} @ 20 \text{ kPa}$ 气密性 Air 标准漏孔，出厂前进行 32 组连续重复性测试，流量波动满足额定技术要求、重复性合格，测试全过程视频与数据记录公开可查^[17]。这类“N 组连续复测”应成为气密漏孔验收的常规动作——它直接对应第 10 章的系统级验证逻辑：单点标定值只是入场券，连续重复性才是产线可信度的证据。

第 16 章 服务与质量保障体系

本章解决什么问题：买到一支好漏孔之后，如何让它在整个生命周期内持续可信。定制流程、证书体系、复校制度与技术支持的总览。

16.1 定制流程：从"工况语句"到交付

1. **需求确认：**用户按第 12.1 节五步法给出工况语句（介质 / 漏率 / 压力 / 形态 / 证书）；
2. **RMI-Cal™ 仿真：**计算孔径-长度参数与全流态行为，混气给出 P/T 口径，液态给出温度修正曲线；
3. **加工与实标：**微通道加工 → 全金属密封 / 零体积阀集成 → 实测标定（每支实测，非抽样）；
4. **出证交付：**出厂检测证书（或外送计量院 CNAS 证书），3~5 个工作日（CNAS +1 周）^[3]。

订货号矩阵是这套流程的用户界面：介质代码 - 漏率值与量级 - 校准点数 - 阀门 - 气室 / 接头 - 出口条件 - 压力值与绝压/表压口径 - 混气浓度与 P/T 口径，逐段编码、逐段可验收（"订货号 = 铭牌 = 证书"三口径一致，见 12.3 节）。

16.2 证书与溯源体系

每支出厂漏孔附出厂检测证书；需要 CNAS / ISO 17025 证书的用户，由睿米外送计量院（或用户自行送检）出具——证书体系口径的完整说明见第 7.5 节，此处不再重复。生命周期建议：**工作漏孔每年送检一次；参考漏孔 12 个月复校；Q₀ 点检件纳入每日点检记录**（第 10.3 节）。

16.3 生命周期管理

- **有源漏孔：**按式（3-9） / （3-10）预测衰减曲线，到期选择补气、换芯或复标；高压气室 + 零体积阀组合把年衰减压到 0.1% ~ 2.5% 量级（13.4 节）；
- **无源漏孔：**无自然衰减，年度复标即可；堵塞等异常多数可清洗疏通后复标；
- **使用支持：**储存运输无特殊要求（金属一体结构），常规防尘即可——与"恒温恒湿、轻拿轻放"的传统保管要求形成对照。

16.4 技术支持与行业共建

服务不止于产品：选型与工况咨询、产线判定体系设计（四件套 / 旁路法 SOP）、降氦方案设计（三件制与降浓度迭代实施框架）、计量院建标方案、RGA 标定体系设计。知识输出以"睿米漏孔研究院"为载体持续进行——本书即其中之一。行业共建方面：参与 JJG（军工）165—2024 起草^[2]，发布半导体 RGA 应用、降氦方法等技术白皮书^{[13][7]}。**我们的立场始终如一：先把行业教会，再把产品做好。**

16.5 全书结语

回到第 1 章的那句话：检漏仪是秤，标准漏孔是砝码。这本书用十六章讲清了砝码的物理（流态与温度）、砝码的寿命（衰减与本底）、砝码的计量（不确定度与溯源）、砝码的用法（方法与体系），以及砝码可以做到什么程度（四大技术与全场景矩阵）。如果您只记住三句话，请记住这三句：**漏率是工况的函数，口径写死才有意义；判定是比大小不是测数字，三件验证才可信；评价漏孔用物理尺子，不用宣传尺子。**愿这本书成为您手边常翻的“漏孔百科”。

附录 A 漏率单位换算速查卡

表 A-1 单位换算（以 $1 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 为基准）

目标单位	$1 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s} =$	$1 \text{ mbar}\cdot\text{L}/\text{s} =$	备注
$\text{mbar}\cdot\text{L}/\text{s}$	10	1	欧系 / 真空行业主用
$\text{atm}\cdot\text{cc}/\text{s}$	9.869	0.9869	美系 / 渗透膜
$\text{torr}\cdot\text{L}/\text{s}$	7.501	0.7501	真空物理 / RGA
sccm (0°C)	592.2	59.22	气密 / MFC, 注意标准状态
$\text{std.cc}/\text{s}$	9.869	0.9869	“ $1 \text{ mbar}\cdot\text{L}/\text{s} \approx$ 每秒 1 cc”
mol/s	4.403×10^{-4}	4.403×10^{-5}	$22.414 \text{ L}/\text{mol}$ (0°C)
g/y	与分子量有关, 式 (2-4)	同左	冷媒法规口径

量级直觉： $10^{-5} \text{ mbar}\cdot\text{L}/\text{s} \approx 1.16$ 天漏 1 cc； $10^{-7} \approx 116$ 天； $10^{-9} \approx 31.7$ 年； $10^{-13} \approx 31.7$ 万年。

附录 B 核心公式卡片集

表 B-1 全书核心公式索引

公式	内容	编号	用途
漏率定义	$Q = d(pV)/dt$	(2-1)	一切换算的起点
sccm 换算	$1 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s} = 592.2 \text{ sccm}$	(2-3)	气密行业每日使用
克/年换算	$X \text{ mbar} \cdot \text{L}/\text{s} \rightarrow \text{g}/\text{y}$ (含分子量)	(2-4)	冷媒法规口径
克努森数	$Kn = \lambda/d$	(3-1)	流态判据
粘滞流流导	$Q = \pi d^4(p_1^2 - p_2^2)/(256\eta L)$	(3-2)	高压 / 气密工况
分子流流导	$Q = (1/6)\sqrt{(2\pi RT/M)} \cdot d^3/L \cdot \Delta p$	(3-3)	真空工况
叠加模型	$Q \approx Q_{\text{分}} + Q_{\text{粘}}$	(3-4)	定制仿真基础
温度系数	分子流 $+1/(2T)$; 粘滞流 $-(1/\eta)d\eta/dT$	(3-5) (3-6)	温漂修正
有源衰减	指数 (分子流) / 双曲 (粘滞流), 率 $\propto Q/(pV)$	(3-8) ~ (3-10)	寿命预测
密封本底	$Q_{\text{测}} = Q_{\text{通道}} + Q_{\text{渗透}} + Q_{\text{微漏}} + Q_{\text{释气}}$	(5-1)	极小漏率可行性
呆体积损失	$\Delta G = V_{\text{呆}} \times p$	(6-1)	阀门选型
混气分漏率	$Q_i/Q = (x_i/\sqrt{M_i})/\Sigma(x_j/\sqrt{M_j})$	(6-3)	混气口径
压降法	$Q = \Delta P \cdot V/\Delta t$	(8-1)	气密检测第一公式
温度-压力	$\Delta P = P \cdot \Delta T/T$ ($1^\circ\text{C} \approx 400 \text{ Pa @ } 121 \text{ kPa}$)	(10-1) (10-2)	气密误差主源
等效孔径比较	$R \approx Q_{\text{工件}}/Q_{\text{漏孔}}$ (零阶近似, 判定靠三件实测)	(11-2)	降氮方法论
RGA 定量	$I = S \cdot P$; 比对法; 累积法 $Q = V \cdot dP/dt$	(9-1) ~ (9-3)	RGA 标定
两级稀释	$P_{\text{Kr}} = Q_{\text{total}} \cdot C_{\text{Kr}}/S_{\text{eff}}$	(9-5)	ppb/pppt 痕量输入
分压-抽速	$p_i = Q_i/S_i$ (构型与位置敏感)	(9-6)	RGA 取样几何
不确定度	$u_c = \sqrt{\Sigma(c_i u_i)^2}$; $U = k \cdot u_c$ ($k=2$)	(7-1)	计量表达

附录 C 术语表

表 C-1 核心术语速查

术语	释义
标准漏孔	在规定工况下提供已知稳定漏率、经计量标定的参考器件
通道型 / 渗透型	泄漏元件为几何通道 / 依靠膜渗透的两类漏孔（JJF 1833 分类）
有源 / 无源漏孔	自带气室 / 外接气源
真空漏孔 / 正压漏孔	出口对真空 / 出口对大气（口径不同，见 2.5 节）
漏率	单位时间通过泄漏通道的气体流量（pV 流率），Pa·m³/s
克努森数 Kn	分子平均自由程与通道尺寸之比，流态判据
粘滞流 / 分子流 / 过渡流	Kn<0.01 / Kn>1 / 其间
温度系数	每摄氏度漏率相对变化，由主导流态 / 渗透机制决定
衰减	有源漏孔气室压力下降引起的漏率下降，率 $\propto Q/(pV)$
呆体积	阀门关闭时封闭在阀内的气体体积（开关损失 / 真空冲击 / 记忆效应之源）
零体积阀	呆体积 < 0.1 μL 的阀门（睿米 0.098 μL）
方向性	正反向漏率不等的现象，理想圆管无方向性
密封本底	密封材料自身渗透 / 微漏 / 释气叠加在标称漏率上的分量
金件四件套	Q ₀ 点检件 + OK 假件 + NG 假件 + 金件工件
旁路法	漏孔经旁通阀并联被测容积、测试中途注入已知泄漏的系统级验证法
等效孔径相对比较法	检漏判定 = 比较等效泄漏通道大小；比值为零阶近似，工程判定依据是三件制实测验证（11.2~11.3 节）
三件制（Q ₀ +OK+NG）	临界阈值件 + OK 件 (1/3~1/2)Q ₀ + NG 件 (2~3)Q ₀ 的每班验证体系；可用判据 GR&R ≤ 15% + 三档分离
MWC（最小工作浓度）	用降浓度迭代法实测确定的最低可用氦浓度——逐级降浓度、每件三件验证，三档重叠即停（11.4 节）
P/T 口径	混气漏率的组分分漏率 / 总漏率口径
不确定度 U（k=2）	以约 95% 置信概率给出的量值区间半宽
量值传递链	国家基准 → 校准装置 → 参考漏孔 → 工作漏孔 → 检漏仪 → 产品判定
GR&R	量具重复性与再现性分析，判定体系的统计验证
相对灵敏度因子 RSF	RGA 离子流到分压的换算系数；逐台、逐气体不同，厂家表不可移植，须本机实测
碎裂比 / 碎片因子	电子轰击下各碎片峰的相对强度分配；有机蒸气中随仪器条件改变，不可跨仪器比对

取样几何 (第五元)	RGA 安装构型与位置对读数的影响; 同一气流换位可差 1.22~1.74 倍, 标定位置须等于使用位置
同位素丰度修正	只取主峰会丢失其余同位素的贡献, 定量时须按天然或富集丰度归一

附录 D 规范与标准清单

表 D-1 漏率计量相关规范（现行）

编号	名称	对象 / 范围
JJF 1833—2020	真空氦漏孔校准规范	漏孔； $(1\times10^{-10} \sim 1\times10^{-4}) \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$
JJF 1627—2017	皂膜流量计法标准漏孔校准规范	漏孔； $1 \text{ mL/min} \sim 10 \text{ L/min}$ ， $1 \text{ kPa} \sim 1.5 \text{ MPa}$
JJG （军 工） 165—2024	真空标准漏孔检定规程	漏孔；国防军工体系（睿米参与起草）
JJF 1986—2022	差压式气密检漏仪校准规范	检漏仪； $\leq 700 \text{ kPa}$ ， $0\sim100 \text{ mL/min}$
JJF 1964—2022	卤素检漏仪校准规范	检漏仪； $10^{-6} \sim 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$
JJF 1059.1—2012	测量不确定度评定与表示	通用方法论（GUM）

附录 E 全书准则索引

表 E-1 全书十一条工程准则与方法索引

准则	内容	出处
准则 2-1	正压 / 真空口径偏差由流态决定：高压下粘滞流 < 1%、分子流约 9%；低压必须分别标定	2.5 节
准则 3-1	气体换算系数必须绑定流态；严肃做法是全介质实标或流导模型换算	3.6 节
准则 3-2	有源漏孔寿命之争 = 气室压力之争：高压大气室是长寿命正解	3.8 节
准则 4-1	真伪微通道直判法：双向复测漏率相等	4.9 节
准则 5-1	寿命四问：衰减率、防堵结构、密封本底、机械验证	5.5 节
准则 6-1	带阀漏孔三问：呆体积、常开常闭、是否一体化	6.3 节
准则 7-1	证书五要素缺一项即不可用；验收先对五要素再对数字	7.6 节
原理 11-1	等效孔径比较：判定是比大小不是测数字；比值是零阶近似，三件实测验证是工程判据	11.2 节
准则 10-1	气密判定可信度 = 系统能否稳定分辨 OK / NG 假件（四件套 + 旁路法）	10.4 节
准则 11-1	降氦顺序：先建三件制验证，再迭代找 MWC，同步控本底，最后叠加回收	11.6 节
选型五步	介质 → 漏率 → 压力（绝压）→ 形态 → 证书	12.1 节

高频 FAQ 十五问见第 12.5 节；证书五要素核对清单见表 7-4。

全书参考文献与依据

1. 国家市场监督管理总局. JJF 1833—2020 真空氦漏孔校准规范[S]. 北京: 中国质检出版社, 2020.
2. 国家国防科技工业局. JJG (军工) 165—2024 真空标准漏孔检定规程[S]. 2024. (上海睿米仪器仪表有限公司参与起草)
3. 上海睿米仪器仪表有限公司. 2026 睿米®标准漏孔产品手册 & 配置指导 (修正版) [Z]. 2026.
4. 上海睿米仪器仪表有限公司. 睿米® Air & N₂ 气密性标准漏孔技术白皮书 V1.0[Z]. 2026-03.
5. 上海睿米仪器仪表有限公司. 挑战物理禁区: 睿米发布全球首款 10⁻¹¹ 到 10⁻¹³ Pa·m³/sec 量级微通道 He 标准漏孔[EB/OL]. (2026-02-27). <http://www.realmeter.cn/news/350.html>.
6. 国家质量监督检验检疫总局. JJF 1627—2017 皂膜流量计法标准漏孔校准规范[S]. 2017.
7. REALMETER® 睿米漏孔研究院. REALMETER® 标准漏孔全场景应用白皮书[EB/OL]. (2026-01-29). <http://www.realmeter.cn/news/342.html>.
8. 上海睿米仪器仪表有限公司. 十二烷 (Dodecane, C₁₂H₂₆) 标准漏孔产品资料[EB/OL]. <http://www.realmeter.cc>.
9. 国家市场监督管理总局. JJF 1986—2022 差压式气密检漏仪校准规范[S]. 2022.
10. 国家市场监督管理总局. JJF 1964—2022 卤素检漏仪校准规范[S]. 2022.
11. 国家质量监督检验检疫总局. JJF 1059.1—2012 测量不确定度评定与表示[S]. 2012.
12. 上海睿米仪器仪表有限公司. 氦检漏本质回归与范式革命——基于物理第一性的三件制验证方案 (V4) [Z]. 2026-07. 另见: 睿米®氦氮混气仿真漏孔产品资料[EB/OL]. <http://www.realmeter.cn>.
13. 上海睿米仪器仪表有限公司. 睿米标准漏孔在半导体 RGA 分析全场景应用技术白皮书[Z]. 2025.
14. 上海睿米仪器仪表有限公司. 睿米®标准漏孔极限环境测试实录: -20 °C 急冻 + 暴力砸摔 (图文 + 视频) [EB/OL]. (2026-07-12). <https://www.realmeter.cc/news/view?id=486>; 同步发布: 微信公众号"睿米漏孔研究院", <https://mp.weixin.qq.com/s/G1xcF6iyn2p0cs5Pd77GFQ>.
15. 上海睿米仪器仪表有限公司. PSOZV™ 零体积阀标准漏孔对 RGA 真空系统冲击的实测 (两篇) [EB/OL]. (2025-07). <https://www.realmeter.cc/news/view/2.html>; <https://www.realmeter.cc/news/view/3.html>.
16. 上海睿米仪器仪表有限公司. 10⁻¹¹ mbar·L/s (10⁻¹² Pa·m³/s) He 标准漏孔国防科技工业真空一级计量站校准证书[EB/OL]. (2026-07-16). 微信公众号"睿米漏孔研究院".
17. 上海睿米仪器仪表有限公司. 1.0 mL/min @ 20 kPa 气密性 Air 标准漏孔 32 组连续重复性测试实录[EB/OL]. (2026-03-27). 微信公众号"睿米漏孔研究院".
18. 上海睿米仪器仪表有限公司. 真空氦漏孔标准装置建标方案——符合 JJF 1833—2020 规范[EB/OL]. (2026-04-19). <http://www.realmeter.cn/news/358.html>.
19. 上海睿米仪器仪表有限公司. H₂O 水蒸气标准漏孔 (PSOZV™ 系列) 技术说明[EB/OL]. (2026-02-03). <https://www.realmeter.cc/news/view/4.html>.
20. 上海睿米仪器仪表有限公司. PSOZV™/RGA 系列液态介质标准漏孔技术白皮书 (C₁₂/C₁₄/C₁₆、H₂O、PFTBA、DMC) [EB/OL]. (2026-02-12). <http://www.realmeter.cn/news/349.html>.
21. Summers R L. Empirical Observations on the Sensitivity of Hot Cathode Ionization Type Vacuum Gauges[R]. NASA Technical Note TN D-5285, 1969.
22. ISO 14291:2012 Vacuum gauges — Definitions and specifications for quadrupole mass spectrometers[S]. 2012. (等同采用: GB/T 4033—2021 《真空技术 四极质谱计 定义与规范》)
23. Marshall E, Malyshev O B, Luff R. Comparison of residual gas analyser sensitivity coefficients in high to ultra-high vacuum[J]. Vacuum, 2025, 241: 114668. DOI: 10.1016/j.vacuum.2025.114668.

24. 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 5274—2008 气体分析 校准用混合气体的制备 称量法[S]. 2008.
25. 上海睿米仪器仪表有限公司. RGA 定量化白皮书 (Part I 从指纹分析到可溯源测量; Part II 有机蒸气); RGA 五组分混合气定量方法研究[Z]. 2026.

修订记录: V3.0 (2026-09-24) ——第 9 章新增 9.5~9.7 三节实证内容: 厂家 RSF 表的五组分标气实测检验 (9.5)、取样几何第五元 (9.6)、有机蒸气指纹边界 (9.7), 原 9.5~9.8 节顺延为 9.8~9.11; 附录 B 新增式 (9-6) 卡片, 附录 C 新增 RGA 定量术语四条, 参考文献新增 [21]~[25]。发布前经全书交叉审核, 同步修正: 准则 2-1 按流态区分正压 / 真空口径偏差 (粘滞流 < 1%、分子流约 9%); 3.8 节保有率改为分子流 / 粘滞流双口径表述并重绘图 3-2; 附录 A mol/s 换算修正为 4.403×10^{-4} mol/s; 第 3、7、9、15 章表号体系统一 (表 3-1~3-2、表 7-1~7-4、表 9-1~9-5、表 15-1~15-3); ISO 14291 标准题名按标准原文更正; 另有数值、引用与文字勘误若干。

声明: 本书第一至三篇的物理推导为真空技术公识; 睿米产品参数与实证数据引自上述公开资料, 以最新版产品手册为准。本书用于技术交流, 不构成任何验收依据; 验收以双方确认的证书与合同工况为准。