

正式发布版

小白友好

Fab / OEM 视角

v1.3

REALMETER® 标准漏孔技术白皮书（正式发布版 HTML） v1.3

Chapter 1–6 + Appendix A | 统一修正版：复合流（分子/粘滞/壅塞/湍流）+ 几何等效路径 | 面向零基础读者（小白友好）

发布日期：2025-12-28

覆盖范围： 1×10^{-12} mbar·L/s $\rightarrow$ 100 mL/s（甚至更大）

关键词：Standard Leak Source · Micro-capillary · Choked Flow · RGA Calibration

阅读提示：本书把读者当成“小白”，每个概念先用人话解释，再给工程结论；同时保持物理口径严谨（复合流 + 几何等效路径）。

目录

- 5 分钟速读
- 小白词典
- Chapter 1 | 为什么“泄漏”会成为工程基准
- Chapter 2 | REALMETER® 标准漏孔的物理工作原理（含几何等效路径图）
- Chapter 3 | 工程适用边界与不可用场景
- Chapter 4 | 行业应用版图（Fab 视角）
- Chapter 5 | 工程对比：为什么“不是所有流量器件都能当基准”
- Chapter 6 | REALMETER® 产品体系映射（工程中立版）
- Appendix A | 工程参考（全流态模型 + 统一判据 + 不确定度来源）

v1.3 修正要点：系统化“复合流 + 几何等效路径 + 大流量壅塞/湍流也可标准”的工程事实。

5 分钟速读（给第一次接触的人）

面向第一次接触真空与气体工程的读者

你只需要先记住 4 句话（v1.3 统一口径）

1. 标准漏孔不是“坏掉的泄漏”，而是“被设计成稳定输出的小流量/大流量参考源”。

- 2. 它的用途不是控制工艺气体，而是校准/验证：设备读数是否可信、是否一致、是否漂移。
- 3. 标准漏孔并不要求单一分子流。它可以处于分子流、粘滞流、壅塞流，甚至伴随湍流。
- 4. “标准性”来自稳定机制（几何/压降/临界流）与可标定可复现，而不是流态标签。

一张图看懂：标准漏孔在系统中的位置

（它是“参考注入源”，用于校准/验证，不是过程控制器）

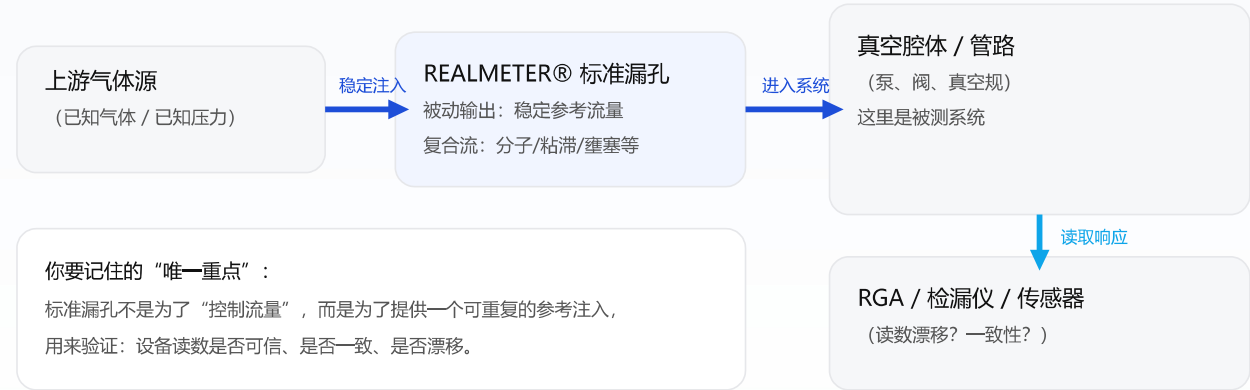


图 0 | 标准漏孔在系统中的位置：它是“参考注入源”，用于校准/验证，而不是过程控制器。

怎么读这份白皮书？

- 只想快速理解：先读 Chapter 1，再看 Chapter 2 的“几何等效路径图”。
- 要做采购/评审：读 Chapter 1–6，重点看 Chapter 5（工程对比）与 Appendix A（全流态工程参考）。
- 你是工程师要“抠机制”：直接读 Appendix A，里面给出统一判据与不确定度结构。

小白词典（看不懂就回这里）

小白词典（看不懂就回到这里）

词	一句话解释
真空	压力比大气低得多的状态；压力越低，越接近“高真空/超高真空”。
标准漏孔	被设计成“稳定输出参考流量”的器件，用于校准/验证/健康检查。

分子流	高真空中分子彼此很少碰撞，主要撞壁面；此时“几何 + 温度”更主导。
粘滞流	分子彼此碰撞为主的流动；压降分布与黏度影响更明显。
壅塞流	在一定压比下局部达到声速，质量流量对下游压力不敏感，常用于大流量稳定输出。
RGA	残余气体分析仪：真空里的质谱仪，按质量数读峰。
mbar·L/s	常用的吞吐量/泄漏率单位，可理解为“每秒进入系统的气体量”。
MFC	质量流量控制器：用于过程供气的主动控制器（擅长控制，不擅长当基准）。
可溯源	结果可追溯到校准链路 with 参考标准（有证据、有路径）。

目标：让你理解“为什么一个被设计的泄漏，可以变成工程基准”。

(从 1×10^{-12} mbar·L/s 到 100 ml/s 甚至更大: 分子流、粘滞流、壅塞流、湍流都可能出现)

趋势：流量越大 → 壅塞/湍流概率上升

图 1 | 多流态覆盖示意：标准漏孔的“标准性”来自稳定机制（几何/压降/临界流），而不是单一流态标签。

工业里提到“泄漏 (Leak)”往往意味着缺陷。但在计量与真空工程里，有一种“泄漏”是被**故意制造**出来的：它的几何结构、材料、气体、温度条件都是可控的，因此它输出的是**稳定、可重复**的参考流量。

小白理解法：把它当作“真空系统里的标准滴定器”。不是为了让你系统漏气，而是为了给仪器一个**已知的参考刺激**，看看仪器读数是否靠谱。

1.2 “标准性”来自稳定机制，而不是流态标签

在不同流量区间，流动可能呈现分子流、粘滞流、壅塞流甚至湍流。但只要存在一个主导的、被动的约束机制把**时间平均质量流量**锁定（例如几何约束、压降分布约束或临界质量流约束），它就可以成为工程基准。

1.3 从“检漏”到“计量基准”：行业真实演化

1. **早期：**用来判断“有没有漏”。
2. **中期：**用来验证检漏仪是否还能工作（稳定性开始重要）。
3. **现在：**在 RGA、流量计、检漏系统里，标准漏孔成为“参考注入源”，用于校准/一致性验证/健康检查。

REALMETER® 标准漏孔的定位：**工程参考基准（Engineering Reference）**。

Chapter 2 | REALMETER® 标准漏孔的物理工作原理（含几何等效路径图）

目标：让你明白“你到底在相信什么”，以及为什么它可复现。

2.1 REALMETER® 标准漏孔“本质上是什么”

REALMETER®（睿米）标准漏孔的核心结构是**几何高度可控的微通道**。从物理意义上讲，它就是**工程化的理想圆管毛细管（Micro-capillary）**：孔径、长度、入口/出口边界、气体与温度条件都可定义，从而实现可建模、可标定、可规模复现。

2.2 被动气体输运（Passive Gas Delivery）的真正含义

“被动”不是落后，而是把稳定性建立在物理约束上：无传感器、无控制回路、无主动调节。标准漏孔的目标不是“设定并控制某个流量”，而是在给定工况下输出一个**不会自己动**的参考点。

小白理解法：MFC 像“自动水龙头”，能调；标准漏孔更像“标准量杯/滴定器”，你要的是它一直一样。

2.3 标准漏孔并不要求单一分子流

REALMETER® 标准漏孔覆盖范围可从 1×10^{-12} mbar·L/s 到 100 mL/s（甚至更大）。在这一跨度里，微通道内可能出现分子流、粘滞流、壅塞流，甚至在高流量下伴随湍流。**这不否定标准性——标准性来自稳定机制（几何/压降/临界流）与可标定、可复现。**

2.4 同一目标漏率/流量的“几何等效路径”（核心）

在指定目标漏率或质量流量下，**可以通过不同（d, L）组合实现同一工程输出**。因此，“流量相同 ≠ 内部流动状态相同”；分子/粘滞/壅塞/湍流的比例是**设计结果**，而不是“是否标准”的前提。



图 2 | 几何等效路径图：同一目标漏率/流量可由不同（d, L）组合实现；在相同目标下，细短与粗长的内部流态占比不同，但都可形成稳定、可复现、可标定的标准漏孔。

2.5 不同流量区间的稳定性来源（直观版）

流量/漏率区间	常见流动特征	稳定性主要来源
极低漏率（ $\sim 10^{-12}$ mbar·L/s）	分子流为主	几何 + 温度
中低漏率（ $\sim 10^{-8} \sim 10^{-6}$ mbar·L/s）	分子/粘滞复合（比例连续变化）	可建模/可标定的连续区约束
较大漏率（ $\sim 10^{-3}$ mbar·L/s）	粘滞流为主	压降分布 + 几何
大流量（10–100 mL/s 甚至更高）	壅塞流 / 可能伴随湍流	临界质量流锁定 + 几何

Chapter 2 小结： REALMETER® 标准漏孔的工程能力在于：在不同流量区间选择合适几何路径，把流量用稳定机制“钉死”为可复现、可标定的参考输出。

Chapter 3 | 工程适用边界与不可用场景

目标：把“能用/不能用”说清楚，避免误用带来工程灾难。

先说结论：标准漏孔是“基准器件”，不是“万能流量器件”。

你必须确保它在选定工况下的稳定机制成立，并能被监测与管理（尤其是温度与上游供气状态）。

3.1 必须满足的三条前提

- **稳定的边界条件：**上游供气状态、温度条件在使用周期内可控/可监测。
- **可标定与可复现：**输出可通过证书或校准链路被量化。
- **避免强反应/强吸附导致几何或表面状态缓慢变化：**否则基准会漂移。

3.2 明确不适合的场景（不要硬用）

- 你需要**动态调节**流量（那是 MFC 的工作）
- 你需要“快速闭环控制”而不是“参考注入/验证”
- 强反应/强吸附气体导致通道性质变化不可管理
- 你想把它当“唯一绝对流量计”而不做误差预算

3.3 三个最常见误用（见到就要警惕）

1. **当 MFC 用：**试图“设定一个流量”。标准漏孔提供的是“参考流量”。
2. **当缺陷件用：**把它理解成随机泄漏。标准漏孔恰恰相反，是“被设计得可重复”。
3. **忽略边界条件：**不监测温度与供气状态，却要求绝对不变。

Chapter 4 | 行业应用版图（Fab 视角）

目标：用 Fab / 设备厂工程师的语言说明：它在系统里到底解决什么问题。

4.1 半导体 / 光刻：RGA 体系的“锚点”

Fab 的真实痛点：RGA 会漂移、不同腔体响应不一致、维护窗口有限。

你需要的不是“完美绝对值”，而是“可重复的参考刺激”。

- **质量轴锚定**：用已知气体峰确认质量轴没有跑偏
- **灵敏度一致性验证**：同样注入，响应是否一致（跨时间/跨腔体）
- **健康检查**：漂移趋势是否异常（提前发现问题）

4.2 新能源：氦检与判定阈值的工程现实

产线最怕的不是“指标严”，而是**读数不稳导致误判**。标准漏孔更像一个“系统自检件”，帮助区分：是产品漏，还是设备/状态变化。

- 班前/班后自检
- 多台设备横向一致性对比
- 接近判定阈值时的溯源辅助

4.3 材料放气 / AMC：重分子参考源的不可替代性

重分子碎片谱复杂、系统记忆效应强，很多时候你真正需要的是一个**长期稳定的参考注入**，用于做趋势对比与仪器健康判断。

关键点：重分子标准漏孔不是“代表某种材料”，而是“代表分析系统的已知行为”，便于长期对比。

Chapter 5 | 工程对比：为什么“不是所有流量器件都能当基准”

目标：把“为什么不能用别的东西替代标准漏孔”一次性说透（v1.3 统一口径：稳定机制视角）。

本章一句话：这不是“谁更先进”的问题，而是“你要控制，还是你要基准”。
控制器擅长控制，但往往不擅长当基准。

5.1 先澄清：稳定 $\neq$ 分子流 $\neq$ 层流

标准漏孔可跨越分子流、粘滞流、壅塞流甚至伴随湍流。只要时间平均质量流量被主导物理约束“钉死”（几何/压降/临界流），就可以稳定、可复现、可标定。

5.2 为什么“普通毛细管” $\neq$ “标准漏孔”

“毛细管不好当基准”这句话只对**未工程化**的毛细管成立：几何不可控、表面状态不可控、入口边界不可控，导致长期可比性差。

REALMETER® 的关键不同：微通道漏孔本质就是工程化理想圆管毛细管（Micro-capillary）。在同一目标流量下，可通过“细短”或“粗长”的等效几何路径实现，流态比例随设计而变，但都可形成稳定基准。

5.3 为什么不用 MFC（作为基准）

- 低流量接近噪声底：零点漂移与噪声成为主要误差
- 闭环引入新的失效模式：滞后、振荡、参数漂移
- 个体差异与老化：跨设备一致性难保证

工程总结：MFC 适合“执行与调节”，标准漏孔适合“提供固定参考点”。

5.4 为什么孔板/Orifice 在跨数量级基准用途上受限

孔板计量常依赖压差模型。对跨越多个数量级的真空/低流量场景，模型适用性与边界条件敏感性会变得难以统一管理，因此更适合特定工况的工业测量，而不是全区间工程基准。

5.5 大流量标准漏孔：壅塞流/湍流并不否定“标准性”

在 10–100 mL/s 甚至更高流量段，微通道可能进入壅塞流并伴随湍流。壅塞条件下质量流量对下游扰动不敏感，主导机制是**临界质量流锁定 + 几何固定**，因此时间平均流量仍可高度稳定，常用于 MFC/流量计校准。

5.6 工程对比总结：看“稳定机制”，不看“流态标签”

器件	主要目的	稳定性来源	做工程基准的适配性
普通毛细管	简单限流	偶然几何 + 不可控边界	✗
REALMETER® 微通道标准漏孔	参考注入/校准/验证	几何/压降/临界流（被动约束）	✓
MFC	过程控制	闭环控制	⚠️（不适合作为基准）
孔板 Orifice	特定工况测量	压差模型	⚠️（跨区间受限）

Chapter 5 终极结论：标准漏孔的“标准性”来自稳定机制与可标定可复现，而不是流态纯净性。REALMETER® 能覆盖 1×10^{-12} mbar·L/s 到 100 mL/s（甚至更大），正是因为它围绕工程稳定性设计，而非执着于单一流态。

Chapter 6 | REALMETER® 产品体系映射（工程中立版）

目标：用工程中立语言说明“产品体系在计量坐标系里的位置”。

6.1 不按“型号”分，而按“解决的不确定性”分

工程上更关心：你在校准/验证什么？是单点锚定，还是系统一致性？是轻质气体，还是重分子？

6.2 单一气体标准漏孔：基础锚点

- 用于单质量点/单通道锚定
- 用于检漏系统灵敏度验证
- 作为更复杂校准体系的底座

6.3 混气标准漏孔：系统一致性桥梁

- 一次注入覆盖多个质量点
- 验证质量轴线性与相对灵敏度一致性
- 更适合“对比/健康检查”，而非追求单点绝对值

6.4 重分子标准漏孔：高质量区参考

- 为材料放气/AMC 提供长期可比的参考注入
- 帮助区分“材料变化”与“仪器变化”

6.5 PSOZV™ / MDZV™（阀+漏孔集成）：工程化落地

它们的核心意义不是“控制流量”，而是控制“是否接入基准源”，并尽量减少死体积/背景变化，让基准使用更工程化、更可流程化（PM）。

工程结论：这不是一堆零散定制件，而是一套“可规模化复现”的基准体系：
单点锚定 → 系统一致性 → 重分子参考 → 工程集成落地。

Appendix A | 工程参考（全流态模型 + 统一判据 + 不确定度来源）

本附录给工程评审/技术尽调使用（v1.3：全流态 + 统一判据）。

先给一句总论（统一口径）：

标准漏孔不要求“单一分子流”。它要求：在选定工况下存在主导的被动物理约束机制（几何/压降/临界流）把时间平均质量流量锁定为稳定、可复现、可标定的输出。

A.1 真实本质：工程化理想圆管微通道（Micro-capillary）

REALMETER® 微通道标准漏孔在物理意义上就是毛细管，但属于几何、边界与材料状态被工程化定义、并可规模复现的理想圆管微通道体系。

A.2 连续区：分子流与粘滞流的复合输运

在大量典型漏率区间（例如 $10^{-8} \sim 10^{-3}$ mbar·L/s），分子流与粘滞流往往同时存在，比例随压力、流量与几何连续变化。工程关键是：该连续区内关系可建模、可标定、可复现。

A.3 大流量：壅塞流/湍流并不破坏标准性

在 10–100 mL/s 甚至更高流量段，微通道可能进入壅塞流并伴随湍流。壅塞条件下质量流量对下游压力扰动不敏感，主导机制是临界质量流锁定与几何固定，因此时间平均流量仍可高度稳定，可用于流量计/MFC 校准。

A.4 “几何等效路径”是核心工程自由度

在同一目标漏率/流量下，可通过不同 (d, L) 组合实现同一工程输出。细短与粗长路径将导致不同的流态比例与敏感性，但都可以形成稳定基准。流态比例是设计结果，而不是资格证。

A.5 不确定度来源结构化总表（评审用）

不确定度来源	影响强度	能否监测	工程处理方式
温度变化	常见一阶主导	是	监测/恒温/修正
几何偏差 (d, L, 入口边界)	制造一阶	间接	批次一致性与统计控制
气体物性差异	固有	是	单气体基准；混气做系统一致性
表面状态变化	二阶	部分	老化管理与趋势监测
上游供气状态	可显著	是	稳压/稳流/监测

A.6 统一判据（工程结论）

一个判据管全区间：

只要主导的被动约束机制稳定，且输出可标定、可复现、可溯源，标准漏孔就成立。

流态（分子/粘滞/壅塞/湍流）是结果，不是资格证。

版权与使用：本文件用于技术交流与工程评审。若需对外引用或转载，请保留来源信息与版本号。

提示：如需导出 PDF，可用浏览器打印功能（**Ctrl** + **P**）选择“另存为 PDF”。

[回到顶部](#)