

技 术 白 皮 书

渗透型漏孔， 一个时代的落幕

——标准漏孔技术路线演进的技术史分析

物理规律 · 制造能力 · 产业需求 · 计量体系 · 技术澄清

上海睿米仪器仪表有限公司

RealMeter Instruments (Shanghai)

V3.0 · 2026 年 9 月

摘要： 石英渗透漏孔在1960–1990年代是真空氦检领域事实上的标准漏孔，其统治地位源于当时制造能力对亚微米级理想圆管通道的不可行性，以及真空氦检单一需求与石英选择性渗透物理机制的恰好适配。本文从气体动理论与菲克扩散定律出发，定量推导渗透型漏孔温度系数（ $\sim 2\text{--}4\text{ \%}/\text{K}$ ）与响应滞后（数小时至数天）的物理来源，阐明其“稳定”的条件性本质；同时从Knudsen分子流理论出发，估算 $10^{-9}\text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 量级所需圆管直径（亚微米量级），论证1960年代机械加工极限（ $50\text{--}100\text{ }\mu\text{m}$ ）确实无法覆盖该量程。本文进一步给出量值溯源链、不确定度预算与现行标准体系的完整图景，并以两组编号可查的第三方校准证据——覆盖 $10^{-10}\text{--}10^{-5}\text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 六个数量级的国家级校准证书链，与 10^{-12} 量级的国防级校准证书——证明量值溯源体系已完成向通道型的切换。结论指出：**渗透型与通道型的技术更替已基本完成**。渗透型相对通道型仅存的“不堵塞”一项差异，在现代工况下已不构成实际优势——中大漏率段的通道特征尺寸远离颗粒威胁区，极小漏率段的应用场景天然洁净，偶发污染亦可恢复——该差异只剩纸面意义；“高纯氦选择性”差异在纯氦气源普及后同样归于纸面。渗透型完成了它的历史使命；剩余的选用惯性属规范、教材与招标范本更新的履历时间差，而非技术比较的结果。

关键词： 标准漏孔；渗透漏孔；微通道漏孔；氦质谱检漏；量值溯源；不确定度；技术史

编写说明： 本书由“睿米漏孔研究院”技术内容体系整理而成。面向检漏与密封性工程、计量、质量领域的工程师与决策者，旨在澄清“渗透型=计量级=稳定”的行业认知惯性，建立基于物理事实与证据的技术判断力。本书所称“渗透型漏孔”，指利用材料选择性渗透机制实现漏率输出的标准漏孔，以熔融石英（石英玻璃）渗氦漏孔为代表，兼及玻璃、聚合物膜等同类器件；为行文简洁，正文多简称“渗透型”。

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。本书作者为微通道漏孔制造商，利益相关声明与数据分级规则见书末“利益相关与数据分级声明”。

目 录

前 言	5
第一章 标准漏孔在计量体系中的角色	6
第二章 量值溯源、不确定度与标准体系	7
2.1 从 SI 到检漏仪：完整溯源链	
2.2 不确定度： $U = k \cdot u_c$ 与不确定度预算	
2.3 标准体系一览	
2.4 国际比对：CCM.P-K12 的启示	
第三章 两种物理机制的本质差异	11
3.1 渗透型：体扩散机制	
3.2 通道型：几何流导机制	
第四章 历史坐标：1960–1980年代渗透型成为唯一解的技术必然性	13
4.1 制造能力的硬约束	
4.2 需求的单一性	
4.3 物理机制的恰好适配	
第五章 渗透型的物理本质：条件性稳定的完整图景	14
5.1 温度敏感	
5.2 响应滞后：热平衡与扩散平衡的区分	
5.3 氦逃逸与长期衰减	
5.4 易碎性：被忽视的物理脆弱性	
5.5 “稳定”的前提清单	
第六章 制造能力跃升：1990–2010年代的过渡期	16
第七章 产业需求转移：2010年代至今的主场切换	17
7.1 正压气密检测兴起	
7.2 多气体需求爆发	
7.3 快速节拍与在线校准	
7.4 工业现场的物理可靠性要求	
7.5 三重坐标的转移总结	
第八章 流传谬误的技术澄清	18
8.1 “不堵塞”——一项纸面差异的终结	

8.2 “不堵塞所以稳定”——归因谬误	
8.3 “稳定”——条件性稳定 vs 结构性稳定	
8.4 “精度高”——被校准对象 vs 计量基准	
第九章 量程版图：从”专属领地”到”更替完成”	22
第十章 认知惯性为何难破	23
第十一章 结论：更替完成与行动建议	24
附录 A 核心公式卡片集	26
附录 B 术语表	28
利益相关与数据分级声明	30
参考文献	31

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。

在标准漏孔行业，有一个流传了几十年的“常识”：

“渗透型漏孔不会被堵塞，所以长期稳定、精度高，是计量级的选择。”

这个“常识”至今仍在影响采购决策。许多客户在招标技术规范中明确要求“石英渗透型标准漏孔”，理由是“通道型容易堵塞，不稳定”。

这个“常识”在三十年前是正确答案，在今天已不再成立。

“不堵塞”与“稳定”之间没有因果关系；渗透型的“稳定”是条件性稳定，需要恒温、高真空、长时间扩散平衡、定期复校，缺一不可；而在现代微通道技术面前，渗透型在正压、多气体、快速节拍、抗振动等现代工业场景已被全面超越。同样必须诚实说明的是：渗透型的历史地位是真实的——它曾长期担任国际比对（CCM.P-K12）的传递标准，ISO 20486:2017 仍记载其“最好的长期稳定性”。本书不回避这些事实；本书要指出的是，这些事实描述的是**历史条件下、计量院实验室条件下的渗透型**，而不是今天工业现场应当默认选择的渗透型。

因此，本书标题中的“落幕”可以准确诠释为：**落幕的是“渗透型=计量级默认唯一解”的时代；随着通道型量程版图被证书链闭合、仅存的“不堵塞”差异被证明只剩纸面意义，这一更替在技术事实上已基本完成。**渗透型从“全场景默认答案”退场，是技术成熟的标志，而非技术失败。

本书的目的不是否定渗透型的历史贡献，而是澄清一个被认知惯性掩盖的事实：**渗透型与通道型之间的技术更替已基本完成，仅存的差异只剩纸面意义；在今天继续默认指定渗透型，是基于过时信息的决策，其根源是履历时间差，而非技术比较。**

要说明这一点，不能只谈技术指标，必须回到技术史的逻辑——一种技术路线的兴衰，取决于它是否在“物理规律、制造能力、产业需求”三重坐标的交集里仍然成立。渗透型当年正确，是因为三重坐标都指向它；今天它退场，是因为三重坐标已经转移——残留的选用惯性，是规范文本、教材与招标范本更新的时间差，而不是技术交集的残留。

全书结构：第一章建立计量体系角色；第二章补齐量值溯源、不确定度与标准体系的计量学基础；第三章从物理原理出发，建立两种机制的本质差异；第四章回到历史坐标，论证1960–1980年代渗透型成为唯一解的技术必然性；第五章深入渗透型的物理本质，揭示其“条件性稳定”的

完整图景；第六章分析制造能力跃升；第七章分析产业需求转移；第八章对流传谬误进行技术澄清，终结“不堵塞”的纸面差异；第九章以编号可查的证书链闭合量程版图；第十章分析认知惯性的四个来源；第十一章给出结论与面向三类读者的行动建议。附录提供核心公式卡片与术语表。

怎么用这本书：新入行的工程师，请从第一章顺序读起，前三章会给您比多数从业三年者更扎实的底子；计量与审核人员，第二章、第五章与第八章是为你们写的；产线工艺与质量工程师，可直接读第七章与第八章，了解为什么渗透型不适合现代工业现场；采购与决策者，第十一章的场景盘点与行动建议可以直接写进招标文件的技术评审依据。

一个承诺：凡是物理结论，本书给出推导；凡是历史判断，本书给出具体技术参数；凡是能力边界，本书如实标注——包括我们自己的产品。我们认为，这正是一本白皮书赢得信任的唯一方式。

第一章 标准漏孔在计量体系中的角色

泄漏率（漏率）是真空与气密检测领域最基本的物理量之一。一台氦质谱检漏仪测出“ $3.5 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ”，这个数字为什么可信？因为在量值溯源链条上，它最终要追溯到可复现该量值的国家计量基准，而在这条链条的传递与现场环节中，承担实物载体角色的，正是**标准漏孔**。

量值传递的链条大致是：

国家计量基准（恒压变容等初级气体流量标准，由 $p/V/T/t$ 直接复现流量）→ 参考漏孔（计量院标准漏孔）→ 工作漏孔（企业计量室）→ 现场检漏设备

需要立即澄清一个不严谨但流传很广的说法：“标准漏孔是漏率量值唯一的实物载体”。这并不准确——**初级气体流量标准可以通过压力、容积、温度、时间等基本量直接复现微小漏率，并不需要依赖任何一支漏孔**；标准漏孔的角色是这条链条中**最实用的传递与现场载体**：它把实验室里由基本量复现的漏率“固化”为一个可运输、可插拔、可日常使用的实物器件。理解这一区分，是理解 8.4 节“被校准对象 vs 计量基准”争论的前提——无论是渗透型还是通道型，**漏孔从不充当计量基准，基准由 $p/V/T/t$ 直接实现**。

在这个链条里，标准漏孔的准确性、稳定性，直接决定了溯源链在传递与现场环节的可信度。所以，标准漏孔从来不是普通配件，而是计量体系的基础设施——这也决定了它的技术路线必须随着需求升级而演进。

当前行业中仍存在一种认知惯性：将”石英渗透型”等同于”计量级”与”长期稳定”，而将”通道型”视为”易堵塞”的次优选择。本书旨在通过物理推导、计量学分析与技术史考察，澄清这一认知惯性：论证通道型漏孔已在现代应用场景的核心维度上全面优于渗透型，并以编号可查的第三方证书链证明量值溯源体系已完成向通道型的切换；同时如实呈现渗透型的历史贡献与计量院实验室条件下仍然成立的既有事实——二者都是事实，只讲其中一半都是不严谨的。

第二章 量值溯源、不确定度与标准体系

在讨论”哪种漏孔更好”之前，必须先回答一个更基础的问题：漏率的”准”是如何定义、如何传递、如何证明的。本章给出计量学的最小完备图景。

2.1 从 SI 到检漏仪：完整溯源链

漏率的 SI 单位为 $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ （流量量纲：压力 $\times$ 体积/时间）。其量值溯源链为：

SI 基本量（p、V、T、t） $\rightarrow$ 初级气体流量标准 $\rightarrow$ 参考漏孔 $\rightarrow$ 工作漏孔 $\rightarrow$ 检漏仪/现场测量

- **初级气体流量标准**：以恒压变容（活塞/波纹管精确推进，测 dV/dt ）、定容变压（测 dp/dt ）等方法，由压力、容积、温度、时间直接复现微小气体流量。这是漏率量值的源头，不依赖任何漏孔。各国国家计量院（NMI）均建有此类装置。
- **参考漏孔**：经初级标准校准、作为量值传递媒介的漏孔。渗透型与通道型均可担任——JJF 1833-2020《真空氮漏孔校准规范》同时定义并覆盖”通道漏孔”与”渗透漏孔”两类。
- **工作漏孔**：企业计量室用于日常校准检漏仪的漏孔。
- **检漏仪**：最终对被检产品给出漏率读数的设备。

2.2 不确定度： $U = k \cdot u_c$ 与不确定度预算

按 JJF 1059.1《测量不确定度评定与表示》，漏率校准结果的完整表述必须包含**扩展不确定度**：

$$u_c = \sqrt{\sum_i u_i^2} \quad (2-1)$$

$$U = k \cdot u_c, \quad k = 2 \text{ (对应约 95 \% 包含概率)} \quad (2-2)$$

其中 u_i 为各标准不确定度分量， u_c 为合成标准不确定度， k 为包含因子。只说“漏率 3.5×10^{-9} ”而不给 U 的证书，在计量学上是不完整的。

漏率校准的典型不确定度预算示例如下（数值为示例量级，仅用于说明预算结构，不构成任何具体装置或产品的指标）：

不确定度分量	来源说明	典型相对贡献（示例量级）
上级标准（参考漏孔/流量标准）	上一级校准证书给出的 U	3–8 %
重复性	相同条件下多次测量的分散	1–3 %
复现性	不同时间/操作者/装拆的分散	2–5 %
温度	测温误差 $\times$ 漏孔温度系数（此项对渗透型显著放大：0.1 K 测温误差即贡献约 0.35 %）	0.5–4 %
压力	上游压力测量与稳定度	1–3 %
气体纯度/组分	示踪气浓度、稀释气配比	0.5–2 %
本底与出气	系统本底漏率、材料出气	1–5 %（极小漏率段主导）
漂移（校准间隔内）	漏孔在两次校准之间的输出变化	1–5 %

JJF 1833-2020 的计量要求要点：该规范对真空氦漏孔及其校准装置给出了完整的计量框架，要点如下——

- 校准范围覆盖 1×10^{-10} – $1 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$;

- 采用流量计法/定量气体法的校准装置，相对扩展不确定度应优于 10% ($k=2$)；采用相对比较法的装置，相对扩展不确定度应优于 20% ($k=2$)；
- 标准漏孔的年稳定性（漏率年变化率）应不大于 $3\%/年$ ；
- 复校周期建议不超过 12 个月；
- 漏率值应给出 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 参考温度下的数值；
- 漏孔类型（通道型/渗透型）应在证书与标识中明确标注。

这一框架有三点值得注意的计量学含义。其一，一支声称“高精度”的漏孔，其合理的不确定度预期应落在上述框架内；任何远超此框架的“精度”宣称，都应要求出示不确定度预算表与校准证书。其二，规范的准入门槛以性能指标（不确定度、年稳定性）设立，而非以结构原理设立——能否进入计量体系，取决于指标是否达标，与“渗透还是通道”无关。其三，规范同时定义并平等覆盖两类漏孔：从规范文本本身看，“计量级 = 渗透型”的等式在规范层面并不存在，它只存在于使用者的认知惯性之中。

2.3 标准体系一览

漏孔与检漏的现行主要标准/规范如下，选型与验收应以其为共同语言：

标准/规范	名称	角色
ISO 20484	无损检测 泄漏检测 词汇	术语基础
ISO 20485:2017 (GB/T 40335-2021 修改采用)	无损检测 泄漏检测 示踪气体法	检漏方法
ISO 20486:2017 (GB/T 40336-2021 修改采用)	无损检测 泄漏检测 气体参考漏孔的校准	漏孔校准核心标准 ，§ 5.1 评述了渗透型/毛细管型各自特性
JJF 1833-2020	真空氦漏孔校准规范	国内真空氦漏孔校准依据（代替 JJG 793-1992，覆盖 10^{-10} – $10^{-4}\text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ ，年稳定性 $\leq 3\%/年$ ，漏率值以 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为参考）
JJG (军工) 165-2024	真空标准漏孔	军工系统真空标准漏孔检定依据
JJF 1627-2017	皂膜流量计法标准漏孔校准规范	正压/大漏率段（ $1\text{ mL}/\text{min}$ – $10\text{ L}/\text{min}$ ，出口对大气）

JJF 1059.1	测量不确定度评定与表示	不确定度方法论
ASTM E908	Standard Practice for Calibrating Gaseous Reference Leaks	美国漏孔校准规程
ASTM E498/E498M	质谱检漏仪/残余气体分析仪示踪探头模式检漏	检漏方法
ASTM E499/E499M	质谱检漏仪探测探头模式检漏	检漏方法
ASTM E1603/E1603M	罩积（累积）模式漏率测量	累积法检漏
GB/T 15823-2009	无损检测 氦泄漏检测方法	国内氦检漏方法
GB/T 36176-2018	真空技术 氦质谱真空检漏方法	国内真空氦检漏方法

2.4 国际比对：CCM.P-K12 的启示

CCM.P-K12 是国际计量委员会质量及相关量咨询委员会（CCM）组织的真空漏率关键比对，NIST、PTB、NIM（中国计量科学研究院）、INRIM、LNE 等 11 家国家计量院参加，最终报告发表于 *Metrologia* 技术增刊（2013, 50(1A)）。一个对本书叙事至关重要的事实是：**该比对选用的传递标准正是两支氦渗透漏孔。**

这一事实不能简单地用“路径依赖”解释。渗透漏孔之所以能承担跨国、跨年的传递标准角色，是因为：

1. 其输出对运输振动不敏感（无机械可动/可堵通道被震坏的路径）；
2. 其漂移是**可预测的**——年衰减由 $Q/(pV)$ 决定（见 5.3 节），温度响应由 Arrhenius 关系决定（见 3.1 节），两者均可建模、可修正；
3. 数十年的比对数据积累构成了统计意义上的可靠性档案。

这给本书的论证带来一个必须诚实面对的限定：**渗透型的“稳定”在计量传递的历史记录中是真实成立过的——但它的本质是“漂移可建模、可补偿”，而不是“无漂移”。**一支年衰减 5%、温度系数 3.3 %/K 的漏孔可以成为优秀的传递标准，恰恰因为计量院有恒温实验室、有复校周期、有修正模型。把这套实验室条件外推到无恒温、无复校、无修正模型的工业现场，才是认知惯性真正的问题所在（详见第十章）。同时应指出：CCM.P-K12 的传递标准选型发生在 2010 年前后，反映的是当时的证据格局；第九章将给出国内通道型漏孔组建标与认可的近期证据——**传递标准的换代，同样已经开始。**

第三章 两种物理机制的本质差异

标准漏孔从原理上分为两类，遵循完全不同的物理规律。

3.1 渗透型：体扩散机制

石英（ SiO_2 ）网络结构中存在亚纳米级间隙，氦原子（动力学直径约 0.26 nm ）以溶解-扩散方式穿过，遵循菲克（Fick）扩散定律：

$$Q = K(T) \cdot A \cdot \frac{\Delta P_{\text{He}}}{d} \quad (3-1)$$

其中 $K(T)$ 为渗透系数， A 为有效膜面积， d 为膜厚， ΔP_{He} 为氦分压差。 $K(T)$ 服从阿伦尼乌斯（Arrhenius）关系：

$$K(T) = K_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (3-2)$$

对温度求导得相对温度系数：

$$\frac{1}{K} \frac{dK}{dT} = \frac{E_a}{RT^2} \quad (3-3)$$

代入氦在石英中扩散的活化能 $E_a \approx 20\text{--}30 \text{ kJ/mol}$ ， $R = 8.314 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$ ， $T = 300 \text{ K}$ ：

$$\frac{1}{K} \frac{dK}{dT} \approx \frac{25000}{8.314 \times 300^2} \approx 0.033 \text{ K}^{-1} = 3.3 \text{ \%}/\text{K} \quad (3-4)$$

此即渗透型温度系数高达 $2\text{--}4 \text{ \%}/\text{K}$ 的物理来源——Arrhenius 指数关系的必然结果，**无法通过设计优化消除**。该量级与多方独立来源吻合：ISO 20486:2017 § 5.1 给出渗透漏孔温度系数约 $3.5 \text{ \%}/\text{K}$ ，NIST 资料给出“高达 $4 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ ”，主流厂商标称值在 $2.5\text{--}4 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ 区间。

3.2 通道型：几何流导机制

通道型漏孔遵循气体动理论的流导方程。**流动形态由 Knudsen 数判定** ($Kn = \lambda/d$, λ 为分子平均自由程, d 为通道特征尺寸, 见附录 A.8): $Kn \gg 1$ 为分子流, $Kn \ll 1$ 为粘滞流, 中间为过渡流。

在**分子流区**, 圆管流导为:

$$C = \frac{\pi}{12} \cdot \bar{v} \cdot \frac{d^3}{L} \quad (3-5)$$

其中 $\bar{v} = \sqrt{8RT/\pi M}$ 为分子平均热运动速率。对于氦气 ($M = 4 \text{ g/mol}$), 室温下:

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8 \times 8.314 \times 293}{\pi \times 4 \times 10^{-3}}} \approx 1244 \text{ m/s} \quad (3-6)$$

漏率 $Q = C \cdot \Delta P$ 。温度仅通过 $\bar{v}$ 影响流导: $\bar{v} \propto \sqrt{T}$, 故**分子流区**相对温度系数为:

$$\frac{1}{C} \frac{dC}{dT} = \frac{1}{2T} \approx 0.17 \%/\text{K} \quad (3-7)$$

必须强调该系数的适用边界:

- **分子流区**: 约 $+0.17 \%/\text{K}$ (式 3-7);
- **粘滞流区**: 流导服从泊肃叶 (Poiseuille) 关系 (附录 A.9), 与气体粘度 η 成反比; 气体粘度随温度升高而增大, 故温度系数可为**负值** (约 $-0.2 - -0.3 \%/\text{K}$ 量级, 视气体与工况而定);
- **过渡流区**: 介于两者之间。

因此, “通道型温度系数约 $0.17 \%/\text{K}$ ” 是**分子流区**的结论, 不能无条件泛化到全工况——但在以微小漏率、真空出口为主的典型校准工况 (分子流/近分子流) 下, 通道型温度系数比渗透型低一个数量级以上的论断成立。

此外, 一个诚实的流态注记适用于本书自己的典型工况: 上游 1 atm 氦气通过 $0.67 \mu\text{m}$ 通道时, 氦平均自由程约 $0.13-0.19 \mu\text{m}$, $Kn \approx 0.2-0.3$, 实为**过渡流区**而非严格分子流¹。

关键区别: 渗透型漏率由材料性质决定, 通道型漏率由几何结构决定。

第四章 历史坐标：1960–1980年代渗透型成为唯一解的技术必然性

4.1 制造能力的硬约束

估算 $10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 量级所需通道尺寸。设压差 $\Delta P = 10^5 \text{ Pa}$ (1 atm 至真空)，则所需流导：

$$C = \frac{Q}{\Delta P} = \frac{10^{-9}}{10^5} = 10^{-14} \text{ m}^3/\text{s} \quad (4-1)$$

代入分子流圆管流导公式 (3-5)，取 $L = 10 \text{ mm} = 10^{-2} \text{ m}$ ：

$$10^{-14} = \frac{\pi}{12} \times 1244 \times \frac{d^3}{10^{-2}} \quad (4-2)$$

解得：

$$d \approx 6.7 \times 10^{-7} \text{ m} = 0.67 \text{ } \mu\text{m} \quad (4-3)$$

(严格说该工况处于过渡流区，计入粘性贡献后所需直径略小于 $0.67 \text{ } \mu\text{m}$ ，见 3.2 节脚注；量级结论不变。)

1960–1980年代制造水平：

- **机械钻孔**：精密极限约 $50\text{--}100 \text{ } \mu\text{m}$ ，与亚微米量级相差两个数量级；
- **玻璃拉丝**：手工拉丝可至亚微米级，但截面严重椭圆或不规则，直径离散度 $\pm 50\%$ 以上，漏率离散度达数倍至一个数量级；
- **金属压扁**：缝隙宽度 $1\text{--}10 \text{ } \mu\text{m}$ ，截面扁平、边缘粗糙，存在大量局部狭窄，颗粒易卡堵。

结论：理想圆管微通道在微小漏率区间，当时工艺上做不出来、做出来也不稳定。

4.2 需求的单一性

当时氦质谱检漏核心场景为真空环境下的氦气检测（核工业、航天、真空镀膜、半导体早期产线）。需求清晰：只针对氦、只针对真空、只要求稳定输出微小氦流。

4.3 物理机制的恰好适配

石英选择性渗透恰好满足”只漏氦”的需求，且量程覆盖 10^{-7} – 10^{-12} Pa·m³/s，结构简单（石英球泡 + 密封气室），无需亚微米级机械加工。

三重坐标同时成立：物理机制可行、制造能力无法提供替代方案、产业需求恰好匹配。渗透型成为唯一正确的工程答案。这也是本书”落幕”叙事的历史前提：正因为它曾是唯一解，“渗透型=计量级默认解”的认知才会沉淀为行业惯性。

第五章 渗透型的物理本质：条件性稳定的完整图景

5.1 温度敏感

已由 Arrhenius 求导定量证明：温度系数 $\sim 3.3\%$ /K（式 3-4），与 ISO 20486:2017 给出的约 3.5% /K 一致。环境温度波动 ± 2 – 3 K 即带来 ± 7 – 10% 的漏率漂移。这是渗透型不确定度预算中温度项显著放大的直接原因（见 2.2 节）。

5.2 响应滞后：热平衡与扩散平衡的区分

讨论渗透漏孔的响应时间时，必须区分两个完全不同的物理过程。

过程一：壳体的热传导平衡（秒级，不是瓶颈）。石英热扩散系数按 $k \approx 1.4$ W/(m·K)、 $\rho \approx 2200$ kg/m³、 $c_p \approx 700$ J/(kg·K) 估算为 $\alpha = k/(\rho c_p) \approx 9 \times 10^{-7}$ m²/s。对承压壳体典型壁厚 $d = 1$ mm，热平衡特征时间：

$$\tau_{\text{热}} \approx \frac{d^2}{\alpha} \approx \frac{(10^{-3})^2}{9 \times 10^{-7}} \approx 1.1 \text{ s} \quad (5-1)$$

即温度本身在壳体内趋于均匀只需秒级。瓶颈不在这里。

过程二：氦在渗透功能层中的扩散平衡（小时至天级，真正瓶颈）。漏率输出取决于功能层内氦浓度剖面的建立，而非温度剖面。氦在熔融石英中的扩散系数，室温下约为 $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 量级（Shelby/Norton 等经典玻璃科学数据，典型值约 $2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ @ 25 °C）。注意必须区分**承压壳体厚度与渗透功能层厚度**：起渗透作用的是功能层，其厚度按典型设计取 $d = 0.5\text{--}1 \text{ mm}$ ，则扩散平衡特征时间：

$$\tau_{\text{扩散}} \approx \frac{d^2}{D} \approx \frac{(0.5\text{--}1 \times 10^{-3})^2}{2 \times 10^{-12}} \approx 1.5\text{--}6 \text{ 天} \quad (5-2)$$

这与实测经验”渗透漏孔温度或压力扰动后需**数小时至数天**重新稳定”自洽：功能层较薄、或温度仅小幅变化（只需部分重建浓度剖面）时为小时级；功能层较厚或大幅温度/压力变化时为天级。作为对照，通道型的响应仅受气体通过程与腔体置换限制，为秒级至分钟级——第八章 8.4 节引用的清华大学通道漏孔实测响应时间即 $< 0.5 \text{ s}$ 。

5.3 氦逃逸与长期衰减

上游密封气室的氦气逐年通过渗透膜向外扩散逃逸，内部氦分压缓慢下降，漏率与氦分压成正比，故漏率以年为单位衰减。

衰减率的决定论表述：对储气室容积 V 、封装压力 p 、漏率 Q 的储气式漏孔，单位时间的相对衰减为

$$\frac{1}{p} \frac{dp}{dt} = -\frac{Q}{pV} \quad (5-3)$$

即**年衰减率**由设计量 $Q/(pV)$ 决定，而非由节流元件类型决定。渗透型储气式产品实测年衰减约 $0.9\text{--}10 \text{ \%}/\text{年}$ ，散布如此之大的原因正是各家设计的 pV （气量储备）与 Q 配比不同；采用储气室设计的通道型漏孔同样存在此项衰减。这是”**储气耗尽**”现象，与”**渗透 vs 通道**”无关。无源通道型漏孔（外接气源、无内置储气室）无自耗竭，但其输出稳定性转而依赖外部压力调节系统的精度与稳定度——衰减问题被置换为压力控制问题，并非凭空消失。

5.4 易碎性：被忽视的物理脆弱性

石英（ SiO_2 ）的莫氏硬度为 7，但**脆性极高**，抗冲击韧性极差。渗透漏孔的石英球泡壁厚通常仅 $0.5\text{--}2 \text{ mm}$ ，内部封装高压氦气（ $\sim 1 \text{ atm}$ 或更高），在以下场景中极易破裂：

- **运输振动：**物流过程中的颠簸与跌落冲击；

- **安装扭力**：与真空法兰连接时的机械应力集中；
- **温度冲击**：快速升温/降温导致石英内外壁热膨胀不均，产生应力裂纹；
- **日常磕碰**：实验室或产线环境中的意外碰撞。

一旦球泡破裂，内部高压氦气瞬间泄漏，漏孔**当场报废且无法修复**。这是石英材料的本征物理属性，与封装工艺无关。（需要平衡指出：渗透漏孔在**未破裂**前提下对运输振动造成的性能漂移不敏感——这正是它能做国际比对传递标准的原因之一，见 2.4 节；易碎性风险是“0 或 1”的报废风险，而非漂移风险。）

相比之下，现代微通道漏孔采用金属毛细管（不锈钢、镍基合金等）或硬质玻璃封装，机械强度高、韧性好，抗振动、抗冲击、抗温度循环能力远超石英球泡。在工业现场环境中，通道型的**物理可靠性**显著优于渗透型。

5.5 “稳定”的前提清单

渗透型“稳定输出”的前提是：

1. 下游高真空（氦分压差不变）；
2. 上游氦分压恒定（气室未显著衰减，见式 5-3）；
3. 温度恒定（ $K(T)$ 不变，温度系数 $\sim 3.3\%/K$ ）；
4. 充分扩散平衡（数小时至天级，见式 5-2）；
5. 石英球泡完好无损（无破裂、无微裂纹）。

五者缺一不可。任一条件破坏，“稳定”即失效。这不是设计缺陷，是物理机制与材料属性共同决定的约束。同时应公平地说：在计量院恒温实验室中，这五个条件**都可以被满足**——这正是渗透型历史上能承担传递标准角色的原因（2.4 节）；问题在于工业现场通常一条也保证不了。

第六章 制造能力跃升：1990–2010年代的过渡期

1990年代起，精密制造取得根本性进步：

- **激光微加工**：飞秒激光微加工在 1990 年代于实验室确立（原理与工艺窗口确立），至 2000 年代工业化成熟，可稳定制造亚微米级节流孔，精度进入 100 nm 量级；
- **MEMS 深反应离子刻蚀（DRIE）**：硅基通道几何控制精度达亚微米级，批量一致性远超手工拉丝；
- **精密拉管工艺**：医用毛细管制造技术成熟，金属/玻璃毛细管内径控制精度达 $\pm 0.1\ \mu\text{m}$ ，长径比一致性优于 1%；

- **材料科学**：特种合金与耐蚀涂层保障金属通道长期化学稳定性。

制造能力的三重坐标之一已发生转移：通道型在工艺上已可覆盖渗透型的核心量程。

但渗透型仍延续统治近二十年，原因在于 **产业需求尚未转移**：真空氦检仍是绝对主流，正压气密与多气体检测尚未大规模兴起。渗透型的物理约束在实验室环境下尚可容忍。

第七章 产业需求转移：2010年代至今的主场切换

7.1 正压气密检测兴起

新能源汽车电池包、氢燃料电池系统、制冷设备、医疗器械等场景需在正压或差压条件下检测气密性。渗透型漏率由**氦分压差**驱动，而非总压差驱动：正压模式下上游氦分压与总压同步变化，漏率输出随工况改变。

准确的表述是：渗透型在正压应用中**并非不可用**——只要入口氦分压受控，输出即可稳定，也可以在指定压力下校准使用（ISO 20486:2017 本身即包含出口对大气的吸枪比较法校准路径，只是其不确定度高于真空比较法）；但正压应用要求入口氦分压受控并辅以现场温度修正，**使用便利性通常不如通道型**——通道型输出由总压驱动，对气源配比与温控的要求宽松得多。在节拍紧张的产线上，便利性差异就是成本差异。

7.2 多气体需求爆发

氢能源检测需 H_2 标准漏孔，制冷行业需 R134a/R410A 标准漏孔， SF_6 电气设备检测需 SF_6 标准漏孔。

准确的类别表述是：**石英渗透型只支持氦**（及少量的 H_2/Ne ）——石英的选择性渗透是物理机制决定，非设计选择。需要补充的诚实注记：渗透原理本身并非氦独占——**聚合物膜渗透可用于制冷剂参考漏孔**（已有商用产品与学术报道），**钯对氢的渗透**同样存在；但这些材料体系的温度系数更高、长期稳定性更差，难以满足计量级要求，因此“渗透路线在多气体场景缺乏计量级选项”作为工程判断依然成立。通道型则天然与气体种类无关：几何流导对任何气体成立，仅需按流态做分子量（ $1/\sqrt{M}$ ，分子流）或粘度（ $1/\eta$ ，粘滞流）换算。“石英只漏氦”从历史优势变为场景限制。

7.3 快速节拍与在线校准

现代产线要求秒级响应、在线自动校准。渗透型扩散平衡时间数小时至天级（式 5-2），温度系数 2–4 %/K（式 3-4），在工业现场温度波动下无法满足节拍要求。8.4 节将给出对照证据：通道型漏孔实测响应 < 0.5 s，且温度系数低到”易校正”的程度。

7.4 工业现场的物理可靠性要求

现代工业现场对标准漏孔的物理可靠性提出了更高要求：抗振动、抗冲击、抗温度循环、可反复拆装。渗透型石英球泡的脆性本征属性使其在这些场景中处于天然劣势——一次意外跌落或温度冲击即可导致报废（5.4 节）。通道型金属/玻璃封装结构则完全适应这些工况。

7.5 三重坐标的转移总结

坐标维度	1960–1990年代	2010年代至今
物理规律	石英选择性渗透可行	仍可行，约束未变（温度敏感、扩散滞后、脆性）
制造能力	亚微米通道不可批量制造	激光/MEMS/精密拉管已成熟
产业需求	真空氮检单一	正压 + 多气体 + 快速节拍 + 高可靠性

三重坐标交集的重心已从渗透型完全转移至通道型。渗透型让出的是”全场景默认解”的位置；它残留的差异——“不堵塞”——将在第八章被证明只剩纸面意义；它曾经占据的量程领地——将在第九章被编号可查的证书链闭合。“落幕”一词的准确含义由此完整：一个时代已经结束；尚未结束的，只是规范文本、教材与招标范本更新的时间差（第十章）。

第八章 流传谬误的技术澄清

8.1 “不堵塞”——一项纸面差异的终结

相对1960–1980年代玻璃拉丝、金属压扁等老式通道工艺，渗透型无物理通道可堵，优势真实存在。现代微通道采用近似理想圆管几何并配合入口过滤元件，颗粒卡堵的概率已大幅降低——但必须诚实限定：过滤不构成尺寸上的绝对保护，小于过滤精度的颗粒仍可沉积，液滴桥接、油

膜、水蒸气毛细冷凝、盐析等失效路径更不是“颗粒直径”逻辑所能覆盖；ISO 20486:2017 对毛细管型”处理不当时易堵塞”的警告依然有效，需要用洁净气源管理、过滤与使用规程来对冲，而不是一句”现代工艺”所能抵消。

更关键的是，“不怕堵” $\neq$ “抗污染”，且这里的诚实必须是**双向的**：

- 对渗透型：石英膜表面对油蒸汽、有机物的吸附，**主要改变的是端面出气与本底、延长稳定时间**；至于表面吸附是否改变体相扩散特性（即所谓”中毒”），**目前尚缺公开的实验证据**，本书对此不作强论断。
- 对通道型：微通道**比表面积大，对油膜/水膜同样敏感**（吸附膜占据的流通截面积占比远大于宏观器件），需配合洁净气源与过滤管理。清华大学 2006 年的工作也记载了通道漏孔被水蒸气堵塞的实例——但经烘烤并对两端抽气即可恢复（8.4 节）。堵塞风险存在，但可管理、可恢复。

在上述诚实限定的基础上，分量程看，“堵塞”在两个方向上都在退出工程视野：

- **中大漏率段**（约 10^{-5} – 10^{-8} Pa·m³/s）：按式 (4-1)–(4-3) 反推，该区间对应的通道特征尺寸在微米至亚微米量级，远大于危害颗粒的典型粒径；配合入口过滤元件与常规洁净气源管理，堵塞在此区间已是工程上可忽略的事件。
- **极小漏率段**（约 10^{-10} Pa·m³/s 以下）：该量程的典型应用是真空实验室、洁净工艺与纯氢气源环境——气源与环境的洁净度随量程下探同步提高，堵塞威胁随量程同步消失。把大漏率段工业现场的污染风险外推到极小漏率段的洁净应用场景，本身就是一种参照系错位。

即使堵塞发生，结局也不对称。通道型漏孔被污染后可经烘烤并对两端抽气恢复输出——清华大学 2006 年工作即记载了水蒸气堵塞后完整恢复的实例（8.4 节）；而渗透型石英球泡一旦破裂（5.4 节），当场报废、不可修复。一类风险是离散的、可检测的、多数可恢复的；另一类风险是瞬发的、不可修复的。

可靠性总账（定性表述）：工程实践表明，现代通道型漏孔的现场失效率已降至极低水平。渗透型的”不堵塞”所消除的，是一个已趋近于零的风险；而其脆性结构却持续产生真实的运输与安装故障（5.4 节）。在可靠性总账上，“不堵塞”不再是优势，而是代价。

“高纯氮选择性”优势的终结：选择性渗透的输出纯净性，仅在气源不纯时才构成价值——它解决的是”从不纯的混合气中取出纯氮”的问题。通道型以纯氮充注，输出的即是纯氮流；在高纯氮气源已是实验室与产线标准配置的今天，两条路线在输出纯度上没有实际差别。这项差异同样只停留在纸面。

8.2 “不堵塞所以稳定”——归因谬误

渗透型漏率漂移的五大主要来源：

漂移来源	物理机制	是否由”堵塞”引起？
温度波动（2–4 %/K）	Arrhenius 指数关系 （式 3-4）	✗ 与堵塞无关
扩散平衡滞后（数小时至天级）	氦低扩散系数（式 5-2）	✗ 与堵塞无关
气室氦气逐年渗透逃逸（实测约 0.9–10 %/年，视设计）	$Q/(pV)$ 储气耗尽（式 5-3）	✗ 与堵塞无关
油蒸汽/有机物吸附	端面出气与本底改变、 稳定时间延长	✗ 与堵塞无关
石英膜老化/微观结构变化	热循环与应力松弛	✗ 与堵塞无关

渗透型漏率漂移的五大主要来源，没有一个是”堵塞”引起的。

“不堵塞”保证的是”不因堵而死”，“稳定”要求的是”漏率不随时间漂移”——两个完全不同的命题。渗透型确实不易”死”，但一直在”漂”，且漂的原因与堵塞无关。反过来说，通道型确实有”堵”的风险，但堵塞是离散的、可检测的、多数可恢复的事件（8.4 节），与渗透型连续的、缓变的、只能靠复校与建模追踪的漂移，是两种完全不同性质的风险。

8.3 “稳定”——条件性稳定 vs 结构性稳定

指标	渗透型	通道型
温度系数	~ 2–4 %/K （Arrhenius 非线性）	分子流区约 +0.17 %/K ($\sqrt{T}$ 弱依赖)；粘滞流区可为负值 ($1/\eta$ 依赖，见 3.2 节)
响应/平衡时间	数小时至天级（扩散平衡，式 5-2）	秒级至分钟级

年衰 减率	储气耗尽现象，由 $Q/(pV)$ 决定，实测约 0.9–10 %/年，视设计而异	储气式产品同样存在（同一 $Q/(pV)$ 规律）；无源通道型无自耗竭，但输出依赖外部压力调节
机械 强度	脆性石英，易碎（报废型风险）	金属/硬质玻璃，高韧性；但存在颗粒/液膜堵塞风险（可管理、多数可恢复）
稳定 来源	外部条件维持 + 漂移建模补偿	几何结构固有 + 使用规程保障

“渗透型”“稳定”是五重条件凑出来的，“通道型”“稳定”是几何尺寸不变则流导不变的物理必然——但两列都不存在“无条件稳定”的选项。需要指出：通道型的长期漂移同样不宜笼统引用固定数值——脱离具体设计的标称值既无独立公开佐证，也会混淆“结构稳定”与“储气衰减”两个概念。

8.4 “精度高”——被校准对象 vs 计量基准

极小漏率高精度计量的核心方法是恒压变容、定容变压等初级气体流量标准——以 $p/V/T/t$ 等基本量直接复现微小流量（2.1 节）。无论是渗透型还是通道型，漏孔从不充当计量基准——基准由 $p/V/T/t$ 直接复现：初级流量标准以压力、容积、温度、时间等基本量直接复现微小流量，其节流部件不是一支“经校准的漏孔”，任何“以漏孔充当基准”的说法本身即属类别错误。有意义的问题是：通道型漏孔能否实际承担高要求校准系统中的参考标准角色？答案是肯定的——存在一条精确而有力的公开证据：

通道型漏孔已经实际承担起高要求校准系统中的参考标准角色。 清华大学肖立波、陈旭、黄天斌、查良镇《超灵敏检漏的实时校准》（《真空科学与技术学报》，2006，26(1)：54–56）为超灵敏检漏建立可调漏率实时校准系统，原文对选型理由有明确论述：

“由于渗氦型漏孔的反应时间及其漏率的高温系数，不可能用它作为可调漏率系统的漏率源，为此必须选择一个物理型（或者通道型）的漏孔。”

该工作采用白金丝-玻璃通道漏孔作为可调漏率源，其实测性能与系统结果为：

- 漏孔响应时间 $< 0.5\text{ s}$ ，温度系数远低于渗氦型且易于校正；
- 漏孔经兰州空间技术物理研究所（510 所）校准，测量不确定度 8.8%；
- 通过改变进气压力（2.67–133 Pa）与使用稀释氦（1% He–99% N₂）并结合累积模式，实现 10^{-14} – $10^{-10}\text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 范围的实时校准；
- 与商用检漏仪互校的相对误差 $< 7\%$ 。

诚实注记：该文同时记载了通道漏孔可被水蒸气堵塞的失效实例——但经烘烤并对两端抽气后恢复，即堵塞风险存在，但可管理、可恢复（呼应 8.1 节的双向诚实）。

该文献还有一层技术史价值：它记载 2006 年时商用参考漏孔“一般是薄膜渗氦型”——这恰好印证本书第四章的叙事：渗透型确实是那个时代的默认解；而一项要做“超灵敏、可调、实时”校准的研究，恰恰必须绕开它。默认解与被绕开的理由，写在同一篇论文里。

渗透型达到标称精度需恒温实验室（ $\pm 0.1\text{ K}$ 级）+ 长时间扩散平衡 + 定期复校建模——这在计量院可行（2.4 节），在现场苛刻。通道型精度来自出厂逐支标定 + 国家计量院/CNAS 认可实验室校准链路，为可交付、可复现、可核验的工程成果。

第九章 量程版图：从“专属领地”到“更替完成”

石英渗透系数的物理特性决定渗透漏孔量产区间集中在 10^{-7} – $10^{-13}\text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ ，此区间曾是其“专属领地”。本章以两组编号可查的第三方校准证据说明：这块领地已被通道型完整接管。

证据一：国防级校准证书（ 10^{-12} 量级）。采用精密拉管/激光微加工/MEMS 工艺的厂家已可批量交付 10^{-10} – $10^{-13}\text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 的微通道标准漏孔。以一支睿米®微通道有源 He 标准漏孔（订货号 RM51X-121711V0/6，出厂编号 604153）为例：该漏孔于 2026-06-11 经国防科技工业真空专业计量站（兰州）按 JJG（军工）165-2024《真空标准漏孔》校准（证书编号 GFJGJL10102602021637），校准结果 $Q = 8.12 \times 10^{-12}\text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ （入真空，氦气），扩展不确定度 $U_r = 22\%$ （ $k = 2$ ）；该站所用气体微流量标准装置测量范围为 5×10^{-13} – $5 \times 10^{-5}\text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ ，动态比较法 $U_r = 14\%$ （ $k = 2$ ）、静态累积比较法 $U_r = 18\%$ （ $k = 2$ ）。渗透型赖以立足的极低漏率端，通道型已实际抵达。

证据二：国家级校准证书链（ 10^{-10} – 10^{-5} 六个数量级）。2025 年，一组六支通道型有源 He 标准漏孔——覆盖 10^{-10} – $10^{-5}\text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ ，共六个数量级——经中国计量科学研究院（NIM）校准（证书编号 RGyz2025-07107~07112），校准不确定度 10% （ $k = 2$ ）；实测年衰减 $< 0.1\%$ – 1.0% ，远优于 JJF 1833-2020 规定的 3% /年年稳定性要求。该漏孔组用于某计量检测机构按 JJF 1833-2020 建立真空氦漏孔校准标准，并通过 CNAS 认可。渗透型曾经独占的中大漏率计量段，通道型已建制化接管。

证据链的完整含义：从 10^{-5} 到 $10^{-12}\text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ ，通道型漏孔已具备连续的、编号可查的国家级与国防级校准证书链，每一环的不确定度均落在 JJF 1833-2020 的框架之内。国内多家国家级第三方检测机构与省级计量机构已批量采用通道型标准漏孔组建标并通过认可——量值溯源体系对通道型的接受，已不是个案，而是建制化事实。

在研能力（不作为可交付指标）：实验室已可按”变压参考漏孔 + 稀释示踪气 + 累积模式”的方法学产生并测量 $10^{-16} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 量级氦流——方法学先例即清华大学 2006 年工作（8.4 节：变进气压 + 1% He 稀释气 + 累积模式，覆盖至 10^{-14} ）。该量级目前**超出各国计量院的校准能力，暂不具备量值溯源条件**，属在研能力，不作为可交付指标。按式 (4-1)–(4-3) 反推， 10^{-16} 量级对应约 **3 nm** 通道，已属纳米孔制造与校准的双重难题，任何将该量级写成”既有能力”的宣称都应要求出示第三方校准证据。

渗透型残留条目的定性（诚实注记）：部分国际厂商的产品目录仍显示，其在 $10^{-11} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以下主要依赖玻璃渗透型产品，商用毛细管型下限约在 $10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 量级。结合本节两组证书证据，这一格局的准确解读是：**渗透型在极低漏率段目录中的存在，已从”能力专属”退变为”产品谱系的时间差”**——海外厂商商用目录的更新节奏慢于国内校准证据的积累速度，而不是通道型在物理或计量学上无法下探： 10^{-12} 量级的国防级证书（证据一）已经证明了后者。

本章标题即是对这一格局的如实概括：**量程版图上，更替已经完成。**

第十章 认知惯性为何难破

尽管技术事实清晰，行业中仍存在对渗透型的坚持。分析其原因之前，必须先承认一件事：**这种坚持并非全无历史依据**——渗透型在计量体系中的地位有真实的技术事实支撑：

- ISO 20486:2017 § 5.1 明文记载：“渗透漏孔”具有最好的长期稳定性”（best long-term stability），温度系数约 $3.5 \text{ \%}/\text{K}$ ；同一条文也记载毛细管型温度系数约 $0.3 \text{ \%}/\text{K}$ ，但处理不当时容易堵塞；
- CCM.P-K12 国际关键比对中，11 家国家计量院使用的传递标准正是两支氦渗透漏孔（2.4 节）——这是其可运输、漂移可预测的直接历史证据；
- NIST 至今仍提供氦渗透漏孔的校准服务；JJF 1833-2020 现行有效且同时覆盖两类漏孔。

这些事实成立，但它们描述的是**历史格局与计量院实验室条件**。认知惯性真正的问题，不在于承认这些事实，而在于**把历史结论与实验室结论外推为今天的默认答案**：把”国家计量院曾在恒温实验室里用渗透漏孔做传递标准”误读为”渗透漏孔在今天无恒温、无复校、无修正模型的工业现场也是最优选择”。前者是事实，后者是外推错误。

在此基础上，认知惯性的成因可以准确归纳为四条：

1. **教育体系惯性：**几代工程师接受”标准漏孔 = 石英渗氦”的教育，教材、培训与知识体系的更新有其自身周期；

2. **计量路径依赖的外推**：各国计量院长期以渗透型为传递标准，形成”计量级 = 渗透型”的隐含等式——等式在传递场景的历史条件下成立，但被不适当地外推到了全部场景，并混淆了”被校准对象/传递标准”与”校准基准”（第二章、8.4 节）；
3. **采购保守主义**：招标技术条款互相抄录，历史形成的条款文本自我复制；在缺乏最新校准证据输入时，沿用既有条款成为默认动作，历史惯性由此被误作技术要求；
4. **规范路径依赖**：现行部分规范与操作规程仍沿用渗透型时代形成的程序性要求——如长时间稳定流程、严格恒温条件等。这些要求源自渗透膜的扩散平衡与温度系数约束（式 3-4、5-2），对通道型并无物理意义。标准的更新节奏慢于技术迭代，是技术史的常态；但它会让沿用老程序的使用者误以为渗透型仍是默认解——**程序性条文在替已经消失的物理约束继续发号施令**。

打破惯性的方法不是宣布对方”过时”，而是把选型依据从”路线标签”换成”性能指标 × 工况 × 不确定度预算”，并让建标实践与证书证据说话——这正是第十一章的内容。

第十一章 结论：更替完成与行动建议

渗透漏孔的”落幕”不是技术失败，也不是渗透技术的终结，而是一次已经基本完成的技术更替。其兴衰取决于”物理规律 × 制造能力 × 产业需求”三重坐标的交集：

- **1960–1990年代**：制造能力受限、需求集中于真空氦检 → 渗透型是唯一正确解；
- **1990–2010年代**：制造能力跃升、需求尚未扩展 → 渗透型靠惯性延续；
- **2010年代至今**：制造能力成熟、需求扩展至正压与多介质、量值溯源体系完成切换 → 通道型在全部核心维度成为更优解。

四条相互独立的证据线在同一结论上收敛：

1. **三重坐标交集已转移**（第六、七章）：物理约束未变的是渗透型，制造能力与产业需求两侧已整体迁移；
2. **量程版图已被证书链闭合**（第九章）：从 10^{-5} 到 $10^{-12} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ，通道型拥有连续、编号可查的国家级与国防级校准证书；JJF 1833-2020 的计量门槛以性能指标设立、对两类漏孔一视同仁，通道型已建制化通过；
3. **仅存的”不堵塞”差异只剩纸面意义**（第八章）：中大漏率段远离颗粒威胁区，极小漏率段场景天然洁净，偶发污染可恢复；在可靠性总账上它不再是优势，而是代价；”高纯氦选择性”差异在纯氦气源普及后同样归于纸面；
4. **规范体系的滞后正在被建标实践改写**（第九、十章）：程序性要求源自渗透膜的物理约束；国内多家国家级第三方检测机构与省级计量机构以通道型漏孔组建标并通过 CNAS 认可，正在把规范文本拉回技术现实。

结论：渗透型漏孔已完成其历史使命。继续在新系统中指定渗透型，是把三十年前的正确答案抄到今天的考卷上。

对渗透型的历史致敬：在制造能力无法触及亚微米的三十年里，石英渗透漏孔独自托起了真空氦检的量值传递；它以可建模的漂移承担了 CCM.P-K12 跨国比对，以数十年的比对档案为整个行业积累了最早的可靠性数据。它的退场不是被否认，而是被接替——这是每一种出色工程技术标准结局，值得尊敬，无需回避。

给三类读者的行动建议：

- **使用方（采购、工艺、质量）：**新建与更新系统时，按性能指标（量程、不确定度、温度系数、响应时间、年稳定性）选型，而非按结构原理选型；清理招标条款中”仅限渗透型”“石英渗透式”等排他性表述，改为引用 JJF 1833-2020 的指标框架——该框架本身对两类漏孔一视同仁（2.2 节）。
- **计量机构：**在既有建标基础上，开展通道型漏孔的长期漂移统计与实验室间比对，把”证书链”升级为”数据档案”——渗透型当年正是凭数十年比对档案赢得信任的，通道型需要积累同样厚度的时间序列。
- **行业（标准化组织、教材与培训体系）：**推动标准与操作规程的更新，清理源自渗透膜物理约束、对通道型并无物理意义的程序性要求；推动证据的公开积累，让选型判断建立在可核验数据之上。

场景盘点（本表为工程判断框架，具体项目应结合第二章的不确定度预算与合同工况执行）：

应用场景	现状判断	依据（本书章节）
跨实验室量值传递 / 国际比对	渗透型仍担任部分国际比对传递标准——属既有比对档案与规范程序的 履历时间差 ；通道型已具备国家级证书链与建标实践，接替条件已经具备	漂移可建模性（2.4 节）；通道型证书链（第九章）
极低漏率（ $\leq 10^{-11} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ）参考源	国内通道型证书已达 10^{-12} 量级；部分海外厂商目录仍以渗透型为主——属产品谱系的 履历时间差 ，非能力差异	第九章

高纯氦选择性源（需”只出氦”的本底/标定气源）	纯氦充注下两路线输出纯度无实际差别——差异只剩纸面	8.1 节
正压 / 吸枪气密检测	通道型更优	总压驱动、气源与温控要求宽松（7.1 节）
多气体（H ₂ /制冷剂/SF ₆ 等）	通道型更优	几何流导与气体种类无关，按流态换算（3.2、7.2 节）
快速节拍 / 在线自动校准	通道型更优	秒级响应 vs 小时-天级扩散平衡；温度系数低一个数量级（5.2、7.3、8.4 节）
振动 / 运输 / 工业现场环境	通道型更优	金属/硬质封装，无脆性报废风险（5.4、7.4 节）
可调漏率 / 实时校准系统	通道型（当前唯一可行）	清华大学 2006：“不可能用渗氦型作可调漏率系统的漏率源”（8.4 节）

渗透型完成了它的历史使命。把选型依据从路线标签换成可核验的性能指标与证书编号，是对它三十年服役史最好的尊重——它当年赢得地位，靠的也正是这两条。

附录 A 核心公式卡片集

A.1 菲克扩散定律（渗透型）

$$Q = K(T) \cdot A \cdot \frac{\Delta P_{\text{He}}}{d}$$

A.2 Arrhenius 关系

$$K(T) = K_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$

A.3 相对温度系数（渗透型）

$$\frac{1}{K} \frac{dK}{dT} = \frac{E_a}{RT^2} \approx 3.3 \text{ \% / K}$$

A.4 Knudsen 分子流圆管流导（通道型）

$$C = \frac{\pi}{12} \cdot \bar{v} \cdot \frac{d^3}{L}, \quad \bar{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$$

A.5 相对温度系数（通道型，分子流区）

$$\frac{1}{C} \frac{dC}{dT} = \frac{1}{2T} \approx 0.17 \% / K$$

（适用限定：分子流区；粘滞流区可为负值，过渡流介于两者之间，见 3.2 节。）

A.6 漏率-流导关系

$$Q = C \cdot \Delta P$$

A.7 热平衡特征时间

$$\tau \approx \frac{d^2}{\alpha} \quad (\text{热传导}); \quad \tau \approx \frac{d^2}{D} \quad (\text{扩散平衡})$$

A.8 Knudsen 数定义

$$Kn = \frac{\lambda}{d}, \quad \lambda = \frac{k_B T}{\sqrt{2} \pi d_g^2 p}$$

其中 λ 为分子平均自由程， d_g 为气体分子动力学直径， d 为通道特征尺寸。工程判据： $Kn \gtrsim 1$ 分子流； $Kn \lesssim 0.01$ 粘滞流；其间为过渡流。

A.9 粘滞流圆管流导（泊肃叶形式）

$$Q = \frac{\pi d^4 (p_1^2 - p_2^2)}{256 \eta L}$$

其中 η 为气体粘度， p_1, p_2 为进、出口压力。注意与分子流的区别：粘滞流 $Q \propto d^4$ 且与 $(p_1^2 - p_2^2)$ 成正比，温度经 $\eta(T)$ 进入（ η 随温度升高而增大，温度系数可为负）；气体换算在分子流区按 $1/\sqrt{M}$ 、粘滞流区按 $1/\eta$ 。

A.10 扩散平衡特征时间（渗透型）

$$\tau_{\text{扩散}} \approx \frac{d^2}{D}, \quad D_{\text{He/石英}} \approx 2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s} \text{ (25 } ^\circ\text{C, Shelby/Norton 数据)}$$

其中 d 为渗透功能层厚度（非承压壳体厚度），典型 0.5–1 mm，对应 $\tau \approx 1.5\text{--}6$ 天。

A.11 储气耗竭衰减率（一切储气式漏孔）

$$\frac{1}{Q} \frac{dQ}{dt} = -\frac{Q}{pV}$$

衰减由设计量 $Q/(pV)$ 决定，与节流原理无关：渗透型与储气式通道型同样适用；无源漏孔无此项。

A.12 单位换算

$$1 \text{ atm} \cdot \text{cc/s} \approx 0.1013 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}; \quad 1 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s} = 10 \text{ mbar} \cdot \text{L/s} \approx 9.87 \text{ atm} \cdot \text{cc/s}$$

A.13 参考条件提示

温度系数与漏率标称值必须绑定参考温度（JJF 1833-2020 规定漏率值以 23 °C 为参考；ISO 常用 20 °C；NIST 比对数据常修正到 23 °C）与进出口压力条件（绝压/表压、出口真空或大气）；未声明参考条件的漏率数值不具备计量意义。

附录 B 术语表

术语	英文	定义
标准漏孔	Standard Leak	具有已知漏率、用于校准或验证的实物标准器件
渗透漏孔	Permeation Leak	利用材料选择性渗透实现漏率输出的标准漏孔（石英对氦；亦存在聚合物膜对制冷剂、钯对氢等体系）

微通道漏孔	Micro-channel Leak	利用几何可控微通道实现漏率输出的标准漏孔
有源 / 无源漏孔	Reservoir / Non-reservoir Leak	有源（储气式）漏孔自带密封气室，存在 $Q/(pV)$ 衰减项；无源漏孔外接气源，无储气耗竭项，输出依赖外部压力调节
漏率	Leak Rate	单位时间内通过泄漏通道的气体流量，常用单位 $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ($= 10 \text{ mbar} \cdot \text{L}/\text{s} \approx 9.87 \text{ atm} \cdot \text{cc}/\text{s}$)
流导	Conductance	气体通过通道的能力，单位 m^3/s
Knudsen 数	Knudsen Number	$Kn = \lambda/d$ ，分子平均自由程与通道特征尺寸之比，流态判据
分子流	Molecular Flow	Knudsen 数 $Kn \gg 1$ 时的流动状态，分子-壁面碰撞主导
粘滞流	Viscous Flow	Knudsen 数 $Kn \ll 1$ 时的流动状态，分子-分子碰撞主导
过渡流	Transitional Flow	$Kn \sim 1$ 附近的流动状态，分子流与粘滞流机制并存
菲克定律	Fick' s Law	描述扩散通量与浓度梯度成正比的关系
Arrhenius 关系	Arrhenius Relation	描述速率常数与温度指数依赖关系的经验公式
恒压变容微流量计	Constant Pressure Variable Volume Flow Meter	通过保持压力恒定、测量容积变化率来复现微小流量的初级流量标准装置
量值溯源	Metrological Traceability	测量结果通过不间断的比较链溯源至参考标准（通常为 SI）的特性，链上每一环均贡献不确定度
传递标准	Transfer Standard	在量值传递链中用于将基准量值传递到工作标准的器件
扩展不确定度	Expanded Uncertainty	$U = k \cdot u_c$ ， k 为包含因子， $k = 2$ 对应约 95 % 包含概率
累积法	Accumulation Method	将示踪气体在收集腔（罩）内累积一段时间后再测量，以延伸检漏灵敏度下限的方法（如 ASTM E1603/E1603M）
关键比对	Key Comparison	CIPM/BIPM 框架下各国国家计量院参加的比对（如 CCM.P-K12），用于互认校准测量能力

CNAS China National Accreditation Service	中国合格评定国家认可委员会（ISO/IEC 17025 认可机构）
---	-----------------------------------

利益相关与数据分级声明

利益相关声明：上海睿米仪器仪表有限公司（RealMeter Instruments）为微通道标准漏孔制造商。本书立场不可避免地带有厂商视角；我们应对这一结构性偏见的做法不是声称中立，而是：(1) 所有物理结论给出推导或公开文献出处；(2) 对渗透型的历史贡献与既有事实（ISO 20486:2017”最佳长期稳定性”记载、CCM.P-K12 传递标准角色、部分海外厂商极低漏率段目录现状）如实保留并正面引用；(3) 对通道型自身弱点（堵塞、吸附、流态依赖）如实讨论；(4) 按下述规则对数据分级标注。

数据分级标注：本书数据分为三级——

等级	含义	本书示例
[A] 第三方校准/公开文献数据	国际标准、国家规范、同行评议文献、国家计量院与国防计量机构公开或出具的数据	渗透型温度系数约 3.5 %/K（ISO 20486:2017）；渗透型实测衰减 0.9–10 %/年（NIST 公开数据）； $D \approx 2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ （Shelby/Norton）；清华大学 2006 年论文各项结果；通道型漏孔组 NIM 校准证书 RGyz2025-07107~07112 与国防计量站证书 GFJGJL10102602021637（第九章）
[B] 厂商公开规格	第三方厂商官网/手册公开标称值	部分国际厂商商用毛细管型下限约 $10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 量级；玻璃渗透型覆盖极低漏率段（第九章）
[C] 理论估算/示例量级	本书公式推导值或不确定度预算示例，已注明前提	$d \approx 0.67 \text{ }\mu\text{m}$ （分子流一阶近似，4.1 节）； $\tau_{\text{扩散}}$ （5.2 节）；2.2 节不确定度预算表（示例量级）

说明：本书所有定量结论仅基于上述三级证据；任何超出这三级证据支撑范围的能力表述，均不作为本书结论依据。

本书不构成验收依据；验收以双方确认的证书与合同工况为准。

参考文献

- [1] Crank J. *The Mathematics of Diffusion*. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press, 1975.
- [2] Knudsen M. *The Kinetic Theory of Gases*. London: Methuen, 1934.
- [3] Shelby J E. *Introduction to Glass Science and Technology*. 2nd ed. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2005.
- [4] Li Detian (李得天), et al. Very low gas flow measurements for UHV/XHV and leak calibration. *Metrologia*, 2013, 50(1): 15–19.
- [5] Madou M J. *Fundamentals of Microfabrication and Nanotechnology*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2012.
- [6] Dushman S, Lafferty J M. *Scientific Foundations of Vacuum Technique*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1962.
- [7] O' Hanlon J F. *A User's Guide to Vacuum Technology*. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 2003.
- [8] 中国计量科学研究院. 真空氦漏孔校准规范: JJF 1833–2020. 北京: 中国质检出版社, 2020. (代替 JJG 793-1992; 覆盖 1×10^{-10} – $1 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$; 年稳定性 $\leq 3\%$ /年; 漏率值以 23 °C 为参考; 同时定义通道漏孔与渗透漏孔)
- [9] 全国无损检测标准化技术委员会. 无损检测 泄漏检测 气体参考漏孔的校准: GB/T 40336–2021 (修改采用 ISO 20486:2017). 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [10] RealMeter Instruments. 微通道标准漏孔技术白皮书. 2024.
- [11] 肖立波, 陈旭, 黄天斌, 查良镇. 超灵敏检漏的实时校准. 真空科学与技术学报, 2006, 26(1): 54–56.
- [12] ISO 20486:2017. *Non-destructive testing — Leak testing — Calibration of reference leaks for gases*. Geneva: ISO, 2017.
- [13] ISO 20485:2017. *Non-destructive testing — Leak testing — Tracer gas method*. Geneva: ISO, 2017 (修改采用为国家标准 GB/T 40335–2021) .

- [14] ASTM E908. *Standard Practice for Calibrating Gaseous Reference Leaks*. West Conshohocken: ASTM International.
- [15] CCM.P-K12 Key Comparison, Final Report. *Metrologia*, 2013, 50(1A): Technical Supplement.
- [16] 上海市计量测试技术研究院. 皂膜流量计法标准漏孔校准规范: JJF 1627-2017. 北京: 中国质检出版社, 2017.
- [17] ISO 20484:2017. *Non-destructive testing — Leak testing — Vocabulary*. Geneva: ISO, 2017.
- [18] Norton F J. Permeation of gases through solids. *Journal of Applied Physics*, 1957, 28(1): 34-39. (熔融石英渗氦经典数据; 室温 $D \approx 2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 量级)
- [19] NIST. *Leak Artifacts — Helium Permeation Leak Calibration Services*. (渗透漏孔温度修正高达 4 %/°C; 长期实测衰减约 0.9-10 %/年; 在售校准服务)
- [20] NASA. *Leakage Testing Handbook* (NASA CR-952). Washington DC: NASA, 1969.
- [21] LACO Technologies / Vacuum Instrument Corp (VIC). *Calibrated Leak Standards — Product Specifications*. (储气式毛细漏孔衰减标称 < 3 %/年; 渗透型温度系数 2.5-4 %/°C 等)
- [22] Vacuum Technology Inc (VTI). *CLP Glass Permeation Leaks / Refrigerant Reference Leaks — Product Literature*. (玻璃渗透型覆盖 E-10-E-12 atm·cc/s 极低漏率段; 制冷剂渗透式参考漏孔)
- [23] 真空标准漏孔: JJG (军工) 165-2024. 2024.

1. 计入粘性贡献与滑流修正后, 实际流导比纯分子流预测 (式 3-5) 约高 10-40 %, 达到同一漏率所需通道直径略小。此修正不改变量级结论: 所需通道仍为亚微米级, 1960 年代工艺无法制造 (见 4.1 节)。[↩](#)