

REALMETER® 标准漏孔在半导体材料放气分析系统中的解决方案白皮书（完整版）

版本: v1.1.6 | 2025-12-27 | Document Status: Fab Review Release | 默认中文（可切换英文） | 不删推理/论证 | 图文并茂

核心主张 (Fab 级)： RGA 数据能否用于材料准入/污染风险决策，取决于三件事：量值可信 (I↔Q 可追溯)、全质量段一致 (低/中/高质量段可信)、工程等效 (有机放气可量化可对比)。REALMETER® 通过“单一气体 + 混气 + C12 有机”标准漏孔链路建立完整参考体系。

Executive Summary (Fab Review Release)

文档定位： 本版本为 **Fab Review Release**，用于 Fab/OEM 的技术评审、设备验收讨论与材料准入评估；非概念性或实验室演示稿。

- 统一参考平台：** REALMETER® 标准漏孔体系覆盖 **单一气体 / 混气 / 液态（或饱和蒸汽）** 介质，同一计量框架下实现跨质量段与跨介质的一致性。
- Same Leak Core, Different Actuation：** PSOZV™ 与 MDZV™ 共享同一标准漏孔计量核心，差异仅在阀门驱动方式（气动常闭 vs 手动常闭），不构成计量或介质能力边界。
- Fab 关心的三件事被闭环：** 量值可信 (I↔Q 可追溯)、全质量段一致（含 m/z=131 高质量锚点）、工程等效（有机放气可量化可对比）。
- 可直接落地：** 文中给出 Mass Coverage Map、m/z=131 对齐判据、C12-EOR 计算示例、不确定度预算与 Fab Audit Checklist，可直接写入 SOP / Audit Package。

1. 背景与挑战：为什么材料放气分析成为 Fab 的“硬要求”

先进制程、EUV 与更苛刻的污染控制窗口，使材料放气从实验室表征演进为量产风险评估。Fab 需要的是可决策、可对比、可审计的数据链路，而不是仅凭谱图“看起来像”。

2. 问题定义：RGA 放气分析的三处断点（必须逐一补齐）

2.1 量值断点：RGA 输出是离子电流，不是流量

离子电流受电子能量、离子化截面、传输效率、倍增器状态影响。没有已知流量的外部参考，稳定谱图也可能对应漂移的真实流量，导致跨批次/跨时间对比失真。

2.2 覆盖断点：单点校准无法证明全质量段可信

Fab 关心低质量背景 (H_2/He)、中质量残余 ($\text{N}_2/\text{Ar}/\text{CO}/\text{CO}_2$)、高质量段锚点 (Kr/Xe) 以及有机碎片区。单点校准无法回答“高质量段是否可信”。

2.3 等效断点：真实风险往往来自有机放气

有机放气分子量大、碎片多、易吸附/冷凝并呈时间衰减。惰性气体无法等效其传输与壁面效应；缺少有机参考源时，结果常停留在定性“看谱”。

3. 解决方案总架构: RGA Calibration & Outgassing Reference Stack



4. Fab 级论证：为什么单一 / 混气 / 有机缺一不可

4.1 单一气体标准漏孔：量值可信度的唯一锚点

单一气体标准漏孔提供已知气体与已知流量 Q ，建立 $S = I / Q$ 的标尺。没有这个锚点，绝对放气率缺乏计量意义。

4.2 混气标准漏孔：全质量段一致性的唯一验证

混气标准漏孔一次提供多质量锚点（He/Ar/Kr/Xe 等），用于验证质量轴与低/中/高质量段响应一致性，并识别倍增器高质量段衰减等隐患。

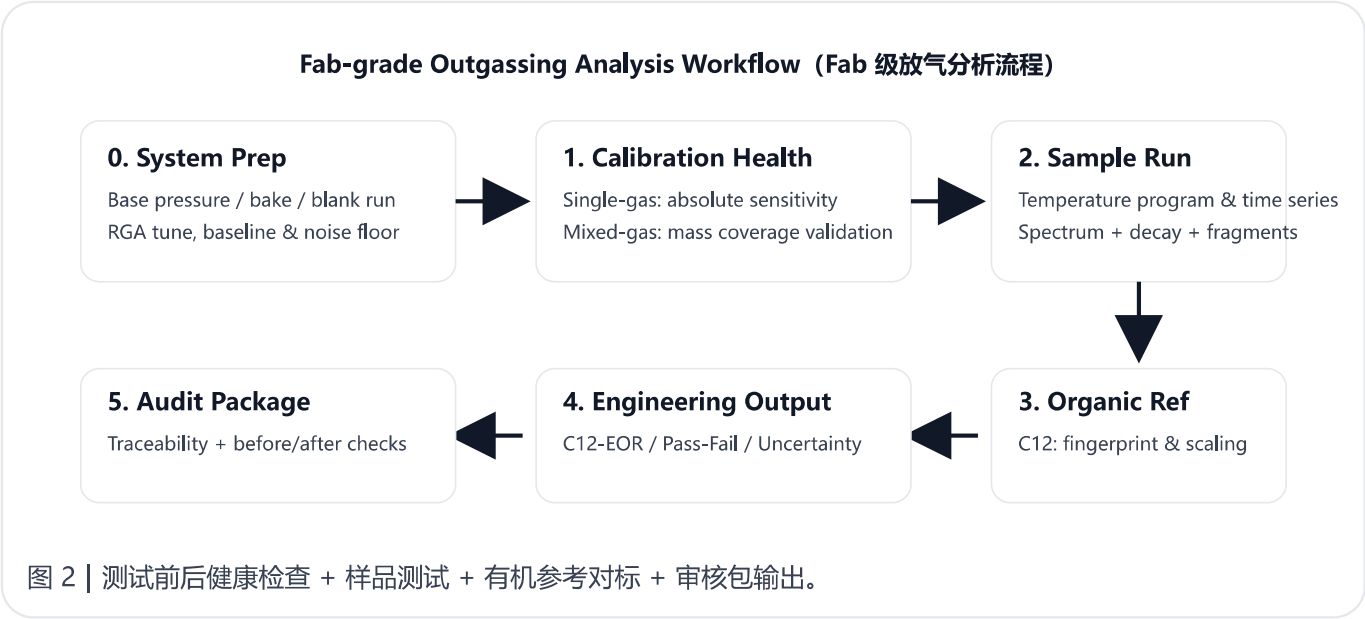
4.3 C12 液态有机标准漏孔：材料放气工程等效的核心

以 C12 为核心的液态有机漏孔提供连续、低通量、有时间行为的有机输入，建立碎片指纹与尺度，将材料放气映射为可对比的工程指标（C12-EOR）。

5. 与方法学直接相关的产品边界条件（必须写入 SOP）

- PSOZV™ 常闭气动阀：支持可控 On/Off 注入与联锁；气源 0.4–0.6 MPa。
- 出口接入真空/RGA 系统：典型真空边界为 <0.1 Pa 或更低等级，确保低背景稳态。
- 对正十二/十四/十六烷：强调管路短、通径尽量大，降低流阻与壁面效应导致的偏差。
- 漏率对温度指数敏感（工程上常用 8–12%/°C 量级描述）：必须规定温稳、记录与必要时的温度修正。
- 预抽时间介质相关：破真空后需重新预抽并记录预处理状态，避免“未稳定”造成的假差异。

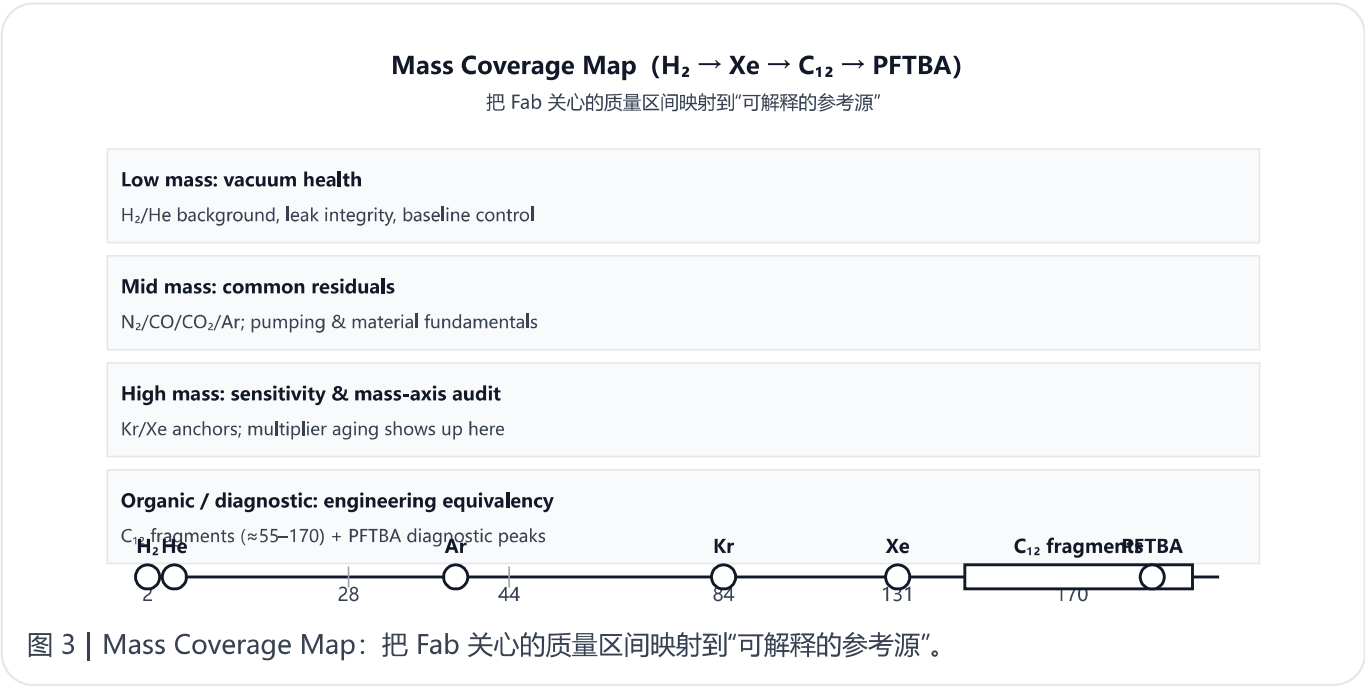
6. Fab 级流程与交付（Audit Package）



6.1 审核包最小集合

- 测试前后：单一气体锚定记录 + 混气质量覆盖验证（质量轴、响应一致性）。
- 测试中：温度曲线、关键质量数时间序列、谱图与碎片比值。
- 测试结论：C12-EOR 与 Pass/Fail 判据；不确定度要点（温度、管路流阻、基压漂移、RGA 增益漂移）。
- 可追溯信息：漏孔序列号/标称漏率/温度/预抽状态/连接方式与管路参数。

7. 增补模块 A | Mass Coverage Map ($H_2 \rightarrow Xe \rightarrow C_{12} \rightarrow PFTBA$)



7.1 为什么 Fab 要求“Mass Coverage Map”而不是一张宽谱图

Fab 审核 RGA 放气分析方案时，不关心“谱能扫到多高”，而关心：**每一个关键质量区间是否都有明确的锚点与解释路径**。这是一种审核思维：它要确保你的数据链路在低/中/高质量段都能自治、可复现、可追溯，而不会出现“某一段看起来正常、另一段完全不可控”的黑箱。

7.2 四类代表点为什么必须同时出现

- **H₂ / He (低质量端, m/z 2 与 4)**：用于证明真空系统健康、基线与噪声底可控。它们不是材料污染本体，但决定你能不能可信地看到“微弱的材料放气”。
- **Xe (高质量端, m/z 131)**：用于高质量段灵敏度与质量轴健康审计。倍增器老化、电子能量分布漂移往往最先在此暴露；Fab 常以此作为高质量可信度的关键证据。
- **C₁₂ (有机等效端, 碎片区≈55–170)**：用于把真实有机放气映射为工程等效量。Fab 关心的“泵油/光刻胶/聚合物碎片”往往落在这一带，并且受到壁面吸附/冷凝与时间衰减影响。
- **PFTBA (诊断与质量轴标尺)**：不是材料放气，但用于证明 RGA 的质量位置、分辨率与高质量诊断能力；它相当于“尺子”，不是“样品”。

7.3 Mass Coverage Map 与 Reference Stack 的关系 (推理链闭环)

Reference Stack 提供“为什么需要三类漏孔”的方法学骨架；Mass Coverage Map 则把这个骨架落到 Fab 审核最关心的“质量区间覆盖证据”。两者合在一起，形成从计量到审核的闭环：

- Layer 1 单一气体锚定 → 证明量值有标尺
- Layer 2 混气验证 → 证明全质量段一致
- Layer 3 C₁₂ 有机参考 → 证明有机放气可工程等效

- PFTBA → 作为质量轴与高质量诊断的外部标尺，降低审核不确定性

8. 增补模块 B | C12-EOR 计算示例页（完整推导 + 数值示例）

8.1 为什么要做“示例页”：把方法从概念变成可执行 SOP

Fab 最怕的是“你给了一个漂亮定义，但现场工程师不知道怎么做”。因此必须给一页从采数到计算的示例，让方法变成可复制 SOP。

8.2 定义与推导（不跳步）

目标：把样品放气谱在“有机碎片集合”上的信号，映射为等效的 C₁₂ 放气率（C12-Equivalent Outgassing Rate, C12-EOR）。

Step 1 | 建立 C₁₂ 标准响应（同一台 RGA、同一状态）

- 已知 C₁₂ 标准漏孔漏率：Q_{C12} = 2.00e-06 Pa·m³/s（示例值；实际取证书/标称）
- 选取碎片集合（建议固定）：m/z = 57, 71, 85, 99, 113...（以 Fab 常用烃类指纹为主）
- 测得碎片集合电流和：I_{C12}^Σ = 1.20e-09 A（示例值）

得到系统对 C₁₂ 的等效灵敏度：

$$S_{C12} = I_{C12}^{\Sigma} / Q_{C12} = 6.00e-04 \text{ A} \cdot \text{s} / (\text{Pa} \cdot \text{m}^3)$$

Step 2 | 测量样品在同一碎片集合上的信号

- 在相同 RGA 设置下，计算样品碎片集合电流和：I_{sample}^Σ = 3.60e-10 A（示例值）

Step 3 | 定义并计算 C12-EOR

$$Q_{\text{sample}}^{\text{C12-EOR}} = I_{\text{sample}}^{\Sigma} / S_{C12} = 6.00e-07 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{s}$$

8.3 温度修正为何必须写进示例（来自“温度指数敏感”的边界条件）

对于液态介质标准漏孔，漏率随温度指数变化（工程上常用 8–12%/°C 量级描述）。因此对跨天/跨批次对比，必须在示例中写清“如何做温度一致性或修正”。

- 示例：温度系数取 10%/°C，若 ΔT = 0.8°C，则漏率尺度变化约为 ×1.080
- 工程建议：将温度作为强制记录字段，并限定温度漂移（如 <1°C/h），否则 C12-EOR 的跨运行可比性会被温度项主导。

9. 增补模块 C | 不确定度预算表（Uncertainty Budget）

9.1 Fab 为什么要求“不确定度预算”：不是要你做得完美，而是要你知道误差从哪来

Fab 审核时通常不会要求你把不确定度做到极小，但会要求你能回答：“误差项是什么、谁是主导项、你如何控制它、它是否会影响 Pass/Fail 决策？”

9.2 C12-EOR 的典型误差源拆解（并给出示例合成）

不确定度来源	典型量级 (示例)	物理原因（为什么会发生）	控制/缓解手段（怎么做）
标准漏孔漏率 标称/证书	±30%	微通道制造与介质装填导致的 个体差异；证书等级不同	同一漏孔做相对对比；必 要时做内部二次标定
温度项	约 10%/°C	蒸汽压指数关系；温漂直接放 大到流量	温控与记录；限定漂移； 必要时做温度修正
管路流阻/壁面 效应	10–20%	低蒸气压烃类在长细管路中的 传输限制与吸附	短管路、大通径、减少死 角、必要时加热/保温
RGA 增益漂移	几 %–10%	倍增器老化、电子能量微变、 背景变化	测前/测后单一气体与混气 健康检查；记录增益
碎片集合选择 与积分窗	~5%	不同材料的碎片分布差异；积 分窗定义不一致	固定碎片集合与积分窗； 在审核包中写入方法

示例合成（RSS，仅用于演示预算思路）：若取漏率 30%、温度（ $\pm 0.5^{\circ}\text{C} \times 10\%/^{\circ}\text{C} = 5\%$ ）、管
路 15%、RGA 5%、碎片 5%，则合成相对不确定度约：

$$u_{\text{rel}} \approx 34.6\%$$

9.3 不确定度预算如何进入 Pass/Fail（工程落地）

建议把判据设置为“安全裕度”形式：例如当 C12-EOR 接近门限时，自动触发复测、延长稳态积
分窗、或要求更严格的温度/管路控制条件。这样可以把“误差预算”变成“决策流程”的一部分，而
不是一段写给审核看的文字。

10. 增补模块 D | Fab Audit Q&A（实战版）

Q1：为什么不用 N₂ 或 Ar 代表有机放气？

A：因为它们不具备有机分子的壁面吸附/冷凝与多碎片行为，也不具备时间相关衰减。用惰性气
体只能证明“仪器能测到气体”，不能证明“对污染风险等效”。Fab 的决策对象是污染风险而非背景
气体。

Q2：为什么选 C₁₂，而不是更重的 C₁₆？

A: C₁₆ 更易冷凝、更“粘壁”、时间响应更慢，对管路几何更敏感，导致跨运行可比性变差。C₁₂ 在蒸汽压、传输可达性、碎片分布落在 RGA 灵敏区等方面取得工程平衡，更容易把方法落到可执行 SOP。

Q3：混气标准漏孔是不是可有可无？

A: 不是。单一气体只解决“有没有标尺”，混气解决“全质量段是否一致”。Fab 的高质量关注（Xe、有机碎片）无法由单点校准背书；缺少混气验证，Audit 通常会质疑高质量段可信度。

Q4：PFTBA 不是材料放气，为什么还要放进方案？

A: 因为它是质量轴与高质量诊断的外部标尺。Fab 审核时经常要求“质量位置是否准确、分辨率与高质量端是否健康”的证据；PFTBA 的角色是“尺子”，不是“样品”。

Q5：这套方法是否只对某一台 RGA/某一套系统有效？

A: 方法的核心是“同一状态下的相对标定 + 参考链路闭环”。只要遵守：单一气体锚定、混气覆盖验证、有机（C₁₂）等效标尺与温度/管路边界条件，任何 RGA 系统都可以实现可审计的工程等效输出。

Q6：如何证明“测试前后仪器没有漂移”？

A: 在审核包中必须包含：测试前后各做一次（1）单一气体锚定检查，（2）混气覆盖一致性检查；若前后差异超出预设阈值，则该次样品数据需标记为“需复核/无效”。

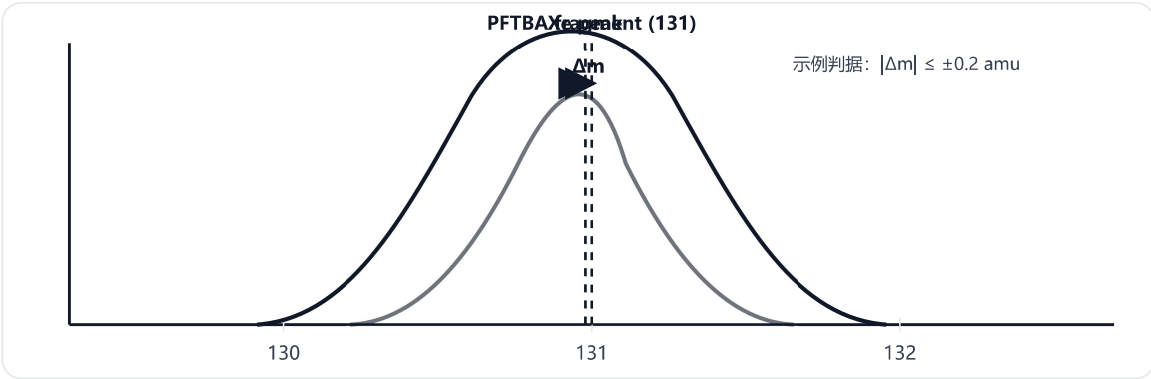
附录 B | RGA Health & Mass Axis Verification（审核用）

B.2 质量轴对齐检查：Xe vs PFTBA 在 $m/z = 131$ 的对齐

Fab 审核常把 $m/z = 131$ 作为高质量段质量轴可信度的检查点：Xe 的 131 来自真实原子质量，PFTBA 的 131 来自稳定碎片。两者在同一台 RGA、同一设置下重合，用于证明质量轴与高质量端健康。

Mass Axis Alignment Check at m/z = 131 (Xe vs PFTBA)

Fab 审核用：用“同一质量数的两种物理来源”证明高质量段质量轴可信



注：峰形为示意（非真实谱线）。审核要点是两条 131 位置的重合程度与偏差 Δm。

图 B-1 | 质量轴对齐示意：比较 Xe(131) 与 PFTBA(131) 的峰位偏差 Δm。

B.3 PFTBA 质量数组合《Fab 审核检查表》（一页版）

目的：用 PFTBA 的特征碎片峰在低/中/高质量段建立“检查点集合”，对 RGA 的质量轴、分辨率、灵敏度与高质量端健康做可审计的快速验收。该表格可直接作为 Fab 审核包附页。

检查集合	质量数 (m/z)	用途与判读要点 (Fab 视角)
Minimal Set 最小集合 (必做)	69, 131, 219	69 (CF₃⁺): 低质量端与碎片完整性; 快速确认 PFTBA 可见。 131: 与 Xe(131) 交叉对齐 (见 B.2) ; 审核高质量段质量轴可信度。 219: 中高质量段灵敏度锚点; 观察倍增器/增益在高质量段是否衰减。
Recommended Set 推荐集合 (审厂常用)	69, 100, 131, 169, 219, 264	100: 低-中质量段连贯性; 对“过碎/欠碎” (电子能量偏离) 更敏感。 169 / 264: 高质量段健康检查; 更早暴露倍增器老化与高质量端“塌陷”。 - 适用: EUV / 有机污染窗口更严的工具, 或供应商/材料准入审核。

Extended Set 深度体检（高端机/上限足够）	69, 131, 219, 264, 414 (±502)	• 414（及更高）：确认高质量端极限能力；仅在扫描上限与灵敏度足够时使用。 • 适用：设备 FAT/SAT、关键工具年度体检、或高风险工艺窗口评估。

验收判据（建议写入 SOP / Audit）

项目	推荐判据	说明
质量轴对齐	$ \Delta m \leq \pm 0.2 \text{ amu}$	以 $m/z=131$ 为关键点 (Xe vs PFTBA)，必要时补充多点对齐。
峰形/分辨率	峰形对称、无明显拖尾	拖尾可能来自源区污染、分辨率设置或离子光学状态异常。
高质量段灵敏度	219/264 相对强度在控制窗内	建议与同机历史基线（同设置）做趋势控制，而非跨机绝对值比较。
重复性	同一注入重复测差异在阈值内	至少做 2-3 次重复；不稳多与阀控/管路/等待时间相关。

必须记录字段（审核包必填）

- PFTBA 注入方式、注入时长、稳定等待时间、基压与背景谱。
- 扫描范围、步进、驻留时间、分辨率设置、电子能量、离子源参数、倍增器电压。
- 各检查点峰位 (m/z)、峰高/积分强度、峰形备注（拖尾/双峰/噪声）。
- 计算项： m/z 131 的 Xe vs PFTBA 峰位差 Δm ；以及 219、264 (414) 相对强度趋势。

Fab 审核提示：该表的核心不是“峰多不多”，而是把 PFTBA 变成**可审计的检查点集合**，并把判据与处置逻辑写进 SOP：一旦超阈值，禁止输出样品放气结论或必须标记需复核。

B.4 应用来源与参考实现（Application Origin & Reference Implementation）

本白皮书中所提出的 **RGA 校准、质量轴验证、有机放气定量与不确定度控制方法**，并非假设性推导或实验室级演示方案，而是基于 **REALMETER® 单一 / 混气 / 液态（或饱和蒸汽）介质标准漏孔系统** 的工程化实现与长期应用经验总结。

- **REALMETER® PSOZV™ / MDZV™ —— 液态（或饱和蒸汽）介质标准漏孔：**提供稳定、可溯源的液态 / 有机介质（例如 C₁₂H₂₆、PFTBA、H₂O、DMC 等）释放基准，用于高质量端、有机碎片区与材料放气定量校准。
- **REALMETER® PSOZV™ / MDZV™ —— 单一 / 混气介质标准漏孔：**提供 He、N₂、Ar、Kr、Xe 等惰性气体及其混气组合，用于质量轴锚点校准、灵敏度一致性验证与仪器健康检查。

注：PSOZV™ 与 MDZV™ 共享相同的标准漏孔计量核心，差异仅体现在阀门驱动方式（气动常闭 / 手动常闭），不构成介质能力或计量基准差异。

参考与来源

1. REALMETER® 《PSOZV™/RGA 标准漏孔（液态介质）产品说明书》：外观与接口、介质参数（DMC/C12/C14/C16/H2O）、使用环境、管路流阻提示、使用步骤与预抽说明等。

说明 / Notes：本 v1.1.6.3.2 在 v1.0 基础上新增：Mass Coverage Map、C12-EOR 计算示例页、不确定度预算表、Fab Audit Q&A，并保持推理/论证不删减。

© 2025 RealMeter Instruments (Shanghai). Draft for engineering communication.