

白皮书 v1.0 (工程实施版)

《用无源 He 标准漏孔构建氦检产线 OK/NG 判定体系：临界漏率仿真、假件（Master Part）系统级验证与降氦用气》

REALMETER® (睿米®)

2026-01-26

版权与声明

本文为工程方法学与落地建议，面向产线工艺/设备工程师与质量工程师。文中给出的阈值比例、允差与点检频次为“起步可执行版本”，实际项目应结合产品风险、客户规范、现场背景控制能力与试产数据（例如 MSA/GR&R）进行收敛。本文所述“同浓度基准”属于工程近似，必须通过系统级 OK/NG 假件验证确认可行性。

目录

版权与声明	2
目录	2
0 摘要	4
0. 1 适用范围	4
1 背景：为什么需要“无源 He 标准漏孔”的工件仿真与系统级验证	4
2 核心概念与定义	5
2. 1 临界漏率 Q0 与工程口径	5
2. 2 等效孔径 vs 等效通道：如何避免误用	5
2. 3 同浓度基准与降氦用气	5
3 Q0/OK/NG 三件套：稳健判定窗口的工程化设计	5
3. 1 推荐比例与公差带	5
3. 2 为什么推荐 $0.5 \times$ 与 $2 \times$	5
4 降氦浓度-背景要求-可分辨性（SNR 视角）	5
4. 1 两条推荐背景门槛（写入 SOP）	5
4. 2 工程关系图（示例）	6
4. 3 降氦的经济意义分析（OPEX / ROI 视角）	6
5 假件（Master Part）系统级仿真：让标准件像工件一样被测	7
5. 1 三同原则（必须执行）	7
5. 2 结构规范：低压 M/G+0-ring；高压 NPT	7
6 三层验证体系：机器级→工装级→系统级（记录表与放行逻辑）	8
6. 1 机器级（日点检/每班）	9
6. 2 工装级（换线/换治具/维修后）	9

6.3 系统级（试产/周期性能力验证）	9
7 技术协议/验收条款（可直接复制）	9
7.1 标准件定义	9
7.2 同浓度基准与变更控制	9
7.3 背景门槛（Signal-to-Noise Ratio, SNR）	9
7.4 系统级验收（目标 CT, Cycle Time 节拍/循环时间）	9
8 实施示例（贯穿案例）	10
8.1 需求输入	10
8.2 降氦策略示例（10%He）	10
9 常见失效模式与排坑清单	10
附录 A 记录表模板（建议）	10
A.1 《日点检（机器级）》	10
A.2 《变更再验证（工装级）》	10
A.3 《系统能力验证（系统级）》	10

0 摘要

本白皮书给出一套可直接在量产/试产产线落地的氦检判定体系：用无源 He 标准漏孔把工件“临界漏率”工程化为 Q0/OK/NG 三件套标准件，并通过假件（Master Part）同路径上机，形成机器级、工装级与系统级三层验证闭环。在标准件与被测工件输入 He 浓度一致的前提下，可按 SNR 视角设定背景门槛，实现降低 He 体积分数（降氦用气）而不牺牲 OK/NG 可分辨性，从而降低长期 OPEX 并提升可审计交付能力。



假件（Master Part）

本方案对 H₂ 等示踪气体检测同样适用。

0.1 适用范围

- 适用于质谱氦检的真空法（Vacuum）、吸枪法（Sniffer，定位为主）与累积法（Accumulation）。
- 适用于需要高灵敏度与可审计证据链的产线：新能源电池包与冷却系统、热交换器/冷凝器/蒸发器、压缩机/发动机部件、压力容器、航空航天密封件、核电与化工高风险介质系统等。

1 背景：为什么需要“无源 He 标准漏孔”的工件仿真与系统级验证

在先进制造场景中，“是否合格”越来越多地等价于：产品在规定压力与介质条件下的泄漏能力必须低于某一临界值。传统的压降/差压/流量法在大容积、温漂、软材料形变、复杂总成上易出现伪漏或漏不出信号。氦检（示踪气体法）灵敏度上限高、更接近“真漏”，但产线落地常遭遇氦气成本、背景氦抬升、本底漂移、阈值卡边、换线/维修后缺少快速再验证等问题。

本文的核心思想是：用无源 He 标准漏孔把“临界缺陷”固化为可交付的标准件（Q0/OK/NG），并通过假件同路径上机把治具/阀组/装配动作/节拍全部纳入验证范围，从而把氦检判定从“仪器读数”升级为“系统级证据链”。

2 核心概念与定义

2.1 临界漏率 Q₀ 与工程口径

临界漏率必须绑定工况（入口压力、介质与浓度、方法形态/出口条件、温度范围）。示例： $Q_0=1 \times 10^{-5} \text{ mbar} \cdot \text{L/s} @ 5 \text{ bar} @ 100\% \text{He}$ 。该阈值的物理意义是：工件上的潜在泄漏通道综合泄漏能力不得超过一个等效通道能力上限。

2.2 等效孔径 vs 等效通道：如何避免误用

严格物理上，漏率不唯一对应一个孔径，因为还与通道长度、形状与流态相关。工程上更严谨的说法是“等效泄漏通道能力”。无源标准漏孔提供的是一个稳定、可复制、可追溯的等效通道，用于仿真临界缺陷。

2.3 同浓度基准与降氦用气

在工程近似下，当泄漏通道与压差条件不变时，氦检信号与氦分压（氦体积分数 x）近似成正比。因而在标准件与被测工件输入 He 浓度一致的前提下， $Q_0/\text{OK}/\text{NG}$ 体系可按 x 等比例缩放： $Q(x) \approx x \cdot Q(100\%)$ 。是否可行必须通过系统级 OK/NG 假件验证确认。

3 Q₀/OK/NG 三件套：稳健判定窗口的工程化设计

3.1 推荐比例与公差带

推荐用三件套构建判定窗口：标定件 Q_0 （等于拒收阈值）、OK 件 $Q_0/2$ 、NG 件 $2 \cdot Q_0$ 。 Q_0 建议配套标定/制造公差（示例：±10%），并在证书中明确标定工况。

3.2 为什么推荐 0.5× 与 2×

产线最怕“卡边”。0.5×与2×设计让OK与NG相差4倍，显著提升抗漂移与抗噪声能力。即使叠加 Q_0 公差、背景波动与装配差异，也更容易保证 OK/NG 清晰可分，从而把氦检从“极限测量”转为“稳健判定工程”。

4 降氦浓度-背景要求-可分辨性（SNR 视角）

降氦的工程本质是：把判定体系整体缩放到更低的 He 分压，前提是背景/本底与系统噪声也必须同步下降，否则 OK 将被背景淹没或 OK/NG 分离度不足。

4.1 两条推荐背景门槛（写入 SOP）

- 规则 A（更严格，推荐作为产线门槛）：Background $\leqslant \text{OK}/10$ ($S/B \geqslant 10$)。
- 规则 B（分离度门槛）：Background $\leqslant (\text{NG}-\text{OK})/10$ 。

4.2 工程关系图（示例）

图 3 给出在示例 $Q_0=1 \times 10^{-5}$ mbar · L/s@5 bar@100%He, $OK=0.5Q_0$, $NG=2Q_0$ 条件下, 不同 He 体积分数下的允许背景上限。读图结论: He 浓度每降低 10 倍, 允许背景上限也必须降低 10 倍, 否则 OK/NG 会贴边甚至不可分。

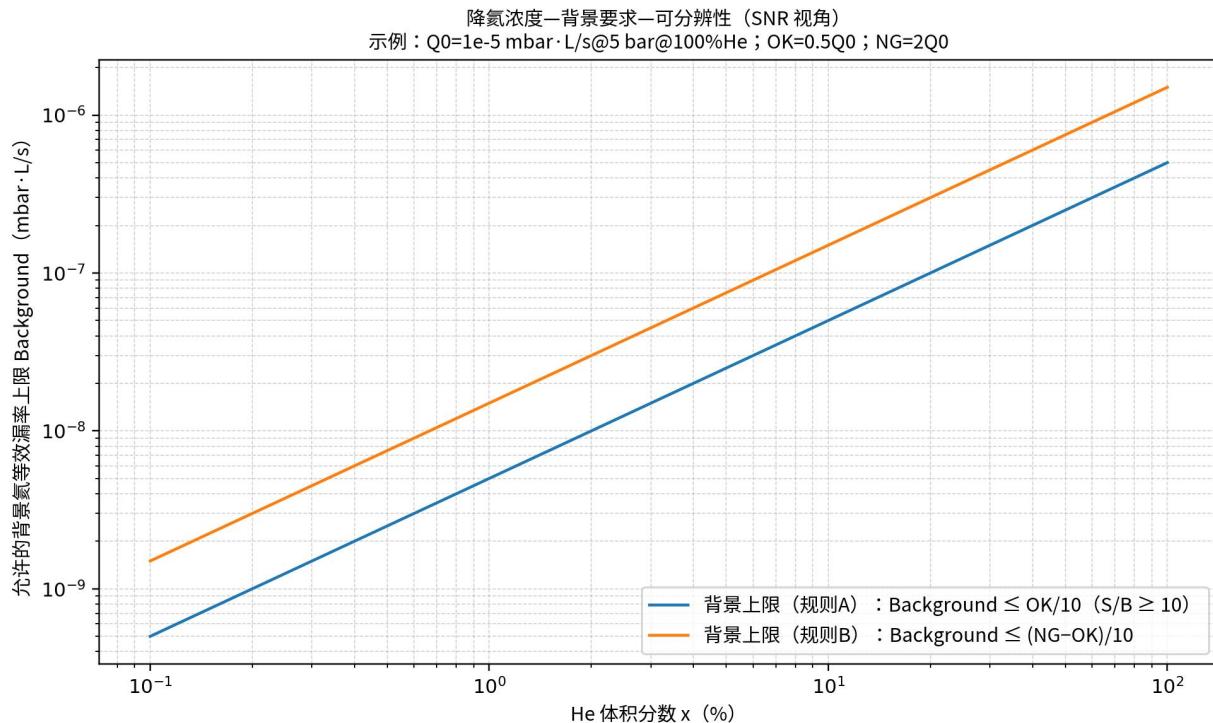


图 3 降氦浓度-背景要求-可分辨性 (SNR 视角, 示例: $Q_0=1e-5$, $OK=0.5Q_0$, $NG=2Q_0$)

4.3 降氦的经济意义分析 (OPEX / ROI 视角)

降氦（降低 He 体积分数）不仅是“省气”，更重要的是把氦检从“高成本高不确定性”变成“可控 OPEX + 可审计交付”。为了避免拍脑袋，本节给出一套可直接套用的成本模型与算账口径。

(1) 年度用氦成本 = 年产量 × 单件等效 He 消耗 × He 单价。单件等效 He 消耗建议分解为三块: ①充气/置换的 He 量; ②吹扫/排放/泄放损失; ③吸枪法等连续流量消耗 (若适用)。

(2) 单件 He 消耗的“线性项”通常随 He 体积分数 x 近似等比例变化, 因此在不改变其他流程的理想情况下: 从 100%He 降到 10%He, 变量项可近似降低到原来的 10%。但要注意: 排放/泄放中可能存在与 x 无关的固定损失 (例如抽空回填、氮气置换、工位漏入空气导致的额外清洗等), 这会让总节省比例低于 x 的比例。

建议计算模板 (把空格处填入你们现场数据即可) :

单件等效 He 消耗 $H_{\text{part}} \approx x \cdot (H_{\text{fill}} + H_{\text{purge}} + H_{\text{process}}) + H_{\text{fixed}}$

年度 He 成本 $C_{\text{year}} = N_{\text{year}} \cdot H_{\text{part}} \cdot \text{Price}_{\text{He}}$

降氦节省 $\Delta C_{\text{year}} = C_{\text{year}}(\text{方案 A}) - C_{\text{year}}(\text{方案 B})$

投资回收期 Payback = CAPEX / ΔC_{year}

- H_fill: 工件充气（或腔体置换）所需 He 量（按实际压力、有效容积与放空方式统计）。
- H_purge: 吹扫/排空/回填导致的 He 损失（与阀组策略、排放方式、是否回收有关）。
- H_process: 测试过程中的 He 消耗（例如累积法的补气、吸枪法的连续吸入流量对应的 He 分量）。
- H_fixed: 与 He 体积分数几乎无关的固定损失（例如某些必须全放空的步骤、不可避免的残留/清洗损耗）。
- Price_He: 你们采购的实际 He 单价（可按瓶装/液氦/管道气折算到统一单位）。

示例（仅用于演示算账方法，数字需替换为你们现场数据）：假设某工位年产量 N_year=300,000 件，在 100%He 方案下统计到单件等效 He 消耗 $H_{part} \approx 1.0$ 单位（含充气+吹扫+过程损失），He 单价 Price_He=1.0 元/单位，则年度 He 成本 $C_{year} \approx 30$ 万元。若在满足背景门槛与系统级 OK/NG 验证的前提下降低到 10%He，并且固定损失占比不高，则 H_{part} 可接近降到 0.1 单位，年度成本 ≈ 3 万元，理论节省 ≈ 27 万元/年。若为实现降氦需要新增混气系统/回收/排风改造等 CAPEX，即可用 Payback=CAPEX/ ΔC_{year} 快速评估回收期。

- 除直接用氦成本外，建议同时量化以下“隐性收益”（很多项目的 ROI 主要来自这里）：
- ①背景氦更易控制→误报/复测降低→节拍更稳；
 - ②换线/维修后的再验证更快（用 OK/NG 假件）→停线时间下降；
 - ③氦气物流与储存压力降低→供应风险下降；
 - ④更容易做到“可审计交付”（阈值、验证、漂移监控有证据链）。

同时必须明确风险边界：降氦不是无条件成立。若背景控制能力不足、或为补偿低 He 而被迫延长测量/累积时间导致 CT 上升，则节拍损失可能抵消用氦节省。因此降氦决策必须与图 3 (SNR 门槛) 和系统级 OK/NG 验证绑定，做到“先验证可分辨性，再算经济账”。

5 假件（Master Part）系统级仿真：让标准件像工件一样被测

很多情况下，OK 漏孔、NG 漏孔与标定漏孔 (Q0) 通过密封螺纹连接到假件上，形成 OK 假件、NG 假件与标定假件；并与被测工件一样放入氦检系统进行测试与标定。其目的不是仅验证检漏仪本体，而是验证整条系统链路：密封界面、装配动作、治具、阀组、管路与目标节拍下的稳定性。

5.1 三同原则（必须执行）

1. 同路径：同治具、同阀组、同管路、同充放气路径。
2. 同工况：同 He%、同入口压力、同稳压时间、同测量/累积时间、同 CT。
3. 同动作：同装配工具与扭矩窗口（或同旋入深度/圈数），同密封件状态。

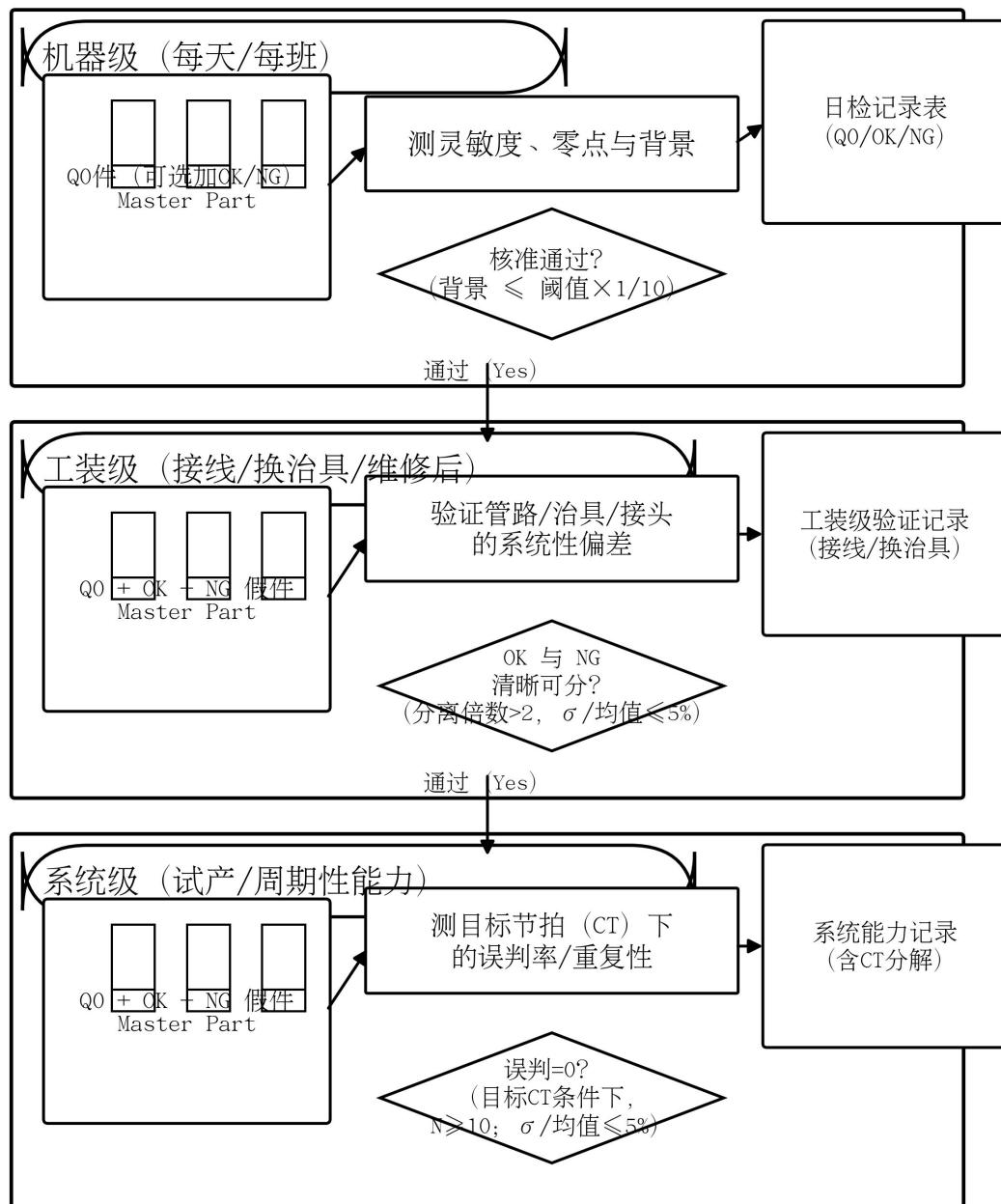
5.2 结构规范：低压 M/G+O-ring；高压 NPT

低压段 ($\leq 10\text{bar}$) 推荐 M 或 G 直螺纹配合 O-ring 密封（结构密封，复装一致性更好）；高压段常采用 NPT 锥螺纹（装配密封，必须固化旋入深度/圈数、密封材料用量与扭矩窗口）。

6 三层验证体系：机器级→工装级→系统级（记录表与放行逻辑）

三层验证体系用于把“可测”变成“可交付”。机器级保证检漏仪本体与本底稳定；工装级保证治具/阀组/管路/装配动作未引入系统偏差；系统级在目标 CT 下证明 OK 必 OK、NG 必 NG，形成可审计证据链。

氦检产线三层验证流程



通过 → 放行；否则 → 处置：停线/重测/维护/复验

图 2 三层验证流程图（机器级→工装级→系统级；对应记录表与放行逻辑）

6.1 机器级（日点检/每班）

- 目的：确认检漏仪本体、零点与背景本底稳定。
- 推荐：用 Q0 标定件点检，必要时附加 OK/NG 快速分离检查。
- 放行门槛：背景满足规则 A（推荐），Q0 读数在允差内。

6.2 工装级（换线/换治具/维修后）

- 目的：验证阀组/管路/治具/密封界面与装配动作未引入系统偏差。
- 推荐：Q0 按与工件同路径接入，并跑 OK+NG 假件验证分离度。
- 放行门槛：OK 判 OK、NG 判 NG（建议 $N \geq 10$ ），且背景门槛满足。

6.3 系统级（试产/周期性能力验证）

- 目的：在目标 CT 条件下证明误判为 0，并给出重复性与漂移数据。
- 推荐：OK 与 NG 假件在目标 CT 下连续跑 N 次（试产建议 $N \geq 30$ ）。
- 验收输出：均值、 σ 、 $\sigma/\text{均值}$ 、首末漂移、误判次数、背景曲线。

7 技术协议/验收条款（可直接复制）

7.1 标准件定义

- Q0: ____ mbar • L/s @ ____ bar @ ____%He @ 温度 ____ °C (范围)。
- Q0 允差: ____ (示例: ±10%)；必须提供证书编号/标定工况/有效期。
- OK: 0.5Q0; NG: 2Q0; 建议以假件形式交付并明确接口与密封方式。

7.2 同浓度基准与变更控制

- 产线 He%: ____ % (允许偏差 ____)；标准件与工件必须同浓度。
- He% 变更、混气系统变更、气源切换或软件口径变更视为变更：必须重做工装级与系统级验证并记录。

7.3 背景门槛 (Signal-to-Noise Ratio, SNR)

- 推荐强制：Background \leq OK/10 (S/B \geq 10)。
- 可选增强：Background \leq (NG-OK)/10。

7.4 系统级验收（目标 CT, Cycle Time 节拍/循环时间）

- OK 假件判 OK=100%，NG 假件判 NG=100% ($N \geq 10$ ，试产建议 $N \geq 30$)。
- 重复性： $\sigma/\text{均值} \leq 5\%$ (起步值，可按风险收紧)。
- 漂移：首末均值差 $\leq 10\%$ (起步值，可收紧)。
- 记录项：背景、温湿度、He%、入口压力、稳压时间、CT 分解、统计结果、处置闭环。

8 实施示例（贯穿案例）

8.1 需求输入

设工件临界漏率为 $Q_0=1\times10^{-5}$ mbar • L/s@5 bar@100%He。建议制备 Q_0 标定件（示例允差 $\pm 10\%$ ），并配套 $OK=Q_0/2$ 与 $NG=2Q_0$ 。

8.2 降氦策略示例（10%He）

若采用 10%He ($x=0.1$) 并保持标准件与工件同浓度，则 $Q_0(x) \approx 1\times10^{-6}$, $OK(x) \approx 0.5\times10^{-5}$, $NG(x) \approx 2.0\times10^{-5}$ (均为 He 等效信号口径)。此时必须检查背景是否满足 $Background \leq OK/10$ (即 $\leq 0.05\times10^{-5}=5\times10^{-7}$) 以及系统级 OK/NG 在目标 CT 下是否误判为 0。若不满足，可提高 He%、降低背景（工位分区/排风/回收/密封改造）或调整测量策略（视方法形态）。

9 常见失效模式与排坑清单

- 标准件与工件 He% 不一致（违反同浓度基准），导致阈值口径错位。
- 未量化背景门槛，OK 信号被背景淹没却不自知。
- 高压 NPT 装配不受控（圈数/深度/密封材料用量/扭矩漂移），导致假件输出漂移。
- 低压 O-ring 压缩量/扭矩不一致，导致系统级波动增大。
- 稳压不足或阀切换瞬态误判，把瞬态峰当泄漏。
- 标准件只接校准口而非同路径，系统误差被隐藏。

附录 A 记录表模板（建议）

A.1 《日点检（机器级）》

- 日期/班次/设备 SN/软件版本
- 方法形态/He%/入口压力/稳压时间/测量时间（或累积时间）
- Background（背景）
- Q_0 读数（可选：OK/NG 快速分离检查）
- 结论：Pass/Fail + 处置/恢复条件

A.2 《变更再验证（工装级）》

- 变更类型：换线/换治具/维修/更换阀组或接头
- 假件接口与装配记录：扭矩（或圈数/深度）、密封件批次、复装次数
- $Q_0/OK/NG$ 读数 + Background
- 结论与放行签字

A.3 《系统能力验证（系统级）》

- 目标 CT 分解（抽空/充气/稳压/测量/回填等）

- OK 与 NG 假件连续 N 次数据表
- 统计：均值、 σ 、 $\sigma/\text{均值}$ 、首末漂移、误判次数、背景曲线
- 结论：放行/停线/整改项与复验结果