



技 术 白 皮 书

氦检的本质回归，比较泄漏孔的大小 ——三件制验证与降氦范式革命

基于物理第一性原理：验证决定可靠性，降氦10-100倍只是副产品

等效孔径 · 三件制验证 · 降氦革命 · 物理第一性 · 产线可靠性

上海睿米仪器仪表有限公司

RealMeter Instruments (Shanghai)

V4.0 正式版 · 十章 · 2026 年 7 月

本白皮书从气密检测的物理第一性出发——即所有气密检测的本质都是比较等效泄漏孔的大小——提出基于 Q_0 +OK+NG三件制验证的降氦技术方案。论证表明：三件制是确保检测可靠性的唯一判据，与氦气浓度无关；降氦10-100倍只是三件制验证的副产品而非目标。供新能源汽车、半导体、制冷、航空航天等领域的检漏工程师与决策者参考。

目录

序章 从《三体》到检漏仪——神秘源于无知，常识源于理解

执行摘要

第一章 氦气供应链危机：从价格波动到结构性断供

1.1 2026年中东地缘政治冲击与卡塔尔设施损毁

1.2 全球氦气供需格局与价格传导

1.3 中国氦气供应的结构性脆弱

第二章 物理第一性：等效孔径比较——所有气密检测的本质

2.1 从"纯氦信仰"到"被迫降氦"：三种认知姿态

2.2 物理真实：唯一不变的等效泄漏孔径

2.3 四层框架：从物理真实到仪器读数

2.4 产线检漏的二元判定本质

2.5 空气检漏仪早已证明：非氦气也能可靠比较孔径

2.6 纯氦信仰的认知误区：浓度焦虑不是可靠性焦虑

第三章 等效孔径相对比较法：三件制与降浓度迭代

3.1 "盲信仪器"与"被迫降氦"：产线检漏的两种危险模式

3.2 三件制 ($Q_0+OK+NG$)：气密检测的黄金标准

3.3 三件制的可行性与核心条件

3.4 降浓度迭代法：寻找最小工作浓度 (MWC)

3.5 关于"同源消元"的修正说明

3.6 为什么三件制在纯氦条件下同样是最佳方案

第四章 RMI-MTC™单通道毛细管标准漏孔：关键技术支撑

4.1 传统标准漏孔的技术瓶颈

4.2 RMI-MTC™单通道毛细管与RMI-CAL算法

4.3 性能指标与计量溯源

第五章 低浓度氮气的主动降噪效应

5.1 环境氮污染的成因与量化

5.2 大漏记忆效应的消除

5.3 基线稳定性改善与误报率降低

第六章 分级降氮方案：三件实测为最终依据

6.1 10^{-4} mbar·L/s量级

6.2 10^{-5} mbar·L/s量级

6.3 10^{-6} mbar·L/s量级

6.4 流态非线性的诚实讨论

6.5 客户常见顾虑：混气均匀性与混气精度

第七章 工程实施路径

7.1 Phase 1：三件基准建立（1-2周）

7.2 Phase 2：降浓度迭代验证（2-4周）

7.3 Phase 3：产线部署与持续监控

7.4 吸枪法与正压累积法的实施要点

第八章 经济分析

第九章 战略意义：降本增效与供应链安全

第十章 适用条件、风险边界与诚实披露

结语：物理学不仅存在，而且美妙

参考文献

序章 从《三体》到检漏仪——神秘源于无知，常识源于理解

刘慈欣在《三体》中描述了这样一个情节：物理学家汪淼眼前的宇宙微波背景辐射突然开始"闪烁"，以莫尔斯电码的方式向他传递信息。在这一刻，他感到"物理学不存在了"——那些曾经坚不可摧的物理定律，似乎被某种超自然力量随意篡改。

但随着故事深入，真相逐渐浮出水面。所谓的"神秘闪烁"并非超自然现象，而是三体文明通过"智子"锁死人类科技的手段。一旦理解了背后的物理规律——智子干扰实验数据的机制——"神秘"就变成了"常识"。

检漏行业正在经历类似的"三体时刻"。

数十年来，行业默认"纯氮是唯一可靠的检测条件"——这如同汪淼眼中的"宇宙闪烁"般不可动摇。2026年氮气价格暴涨5-10倍，许多从业者感到"检漏技术不存在了"——没有纯氮，检测如何继续？

但真相同样简单：所谓的"纯氮不可替代"并非物理定律，而是我们在数十年廉价氮气供应条件下形成的路径依赖。一旦理解了气密检测的物理第一性——比较等效泄漏孔的大小——"神秘铁律"就变成了"工程常识"。

正如《三体》中那句名言："物理学不仅存在，而且美妙。" 气密检测的物理规律不仅存在，而且让我们有了一条不必忍受天价氮气的出路。

本白皮书正是那条出路的完整地图。

执行摘要

摘要

2026年中东地缘政治冲突导致全球约三分之一氦气供应面临中长期断供，工业级氦气价格从50-70元/立方米飙升至300-400元/立方米。依赖氦质谱检漏的新能源汽车、半导体、制冷、航空航天等产业面临严峻的成本压力与供应链风险。

本白皮书提出一套基于“等效孔径相对比较法”的降氦技术方案。该方法从气密检测的物理第一性出发——即**所有气密检测的本质都是比较等效泄漏孔的大小**——通过 $Q_0+OK+NG$ 三件制验证体系和降浓度迭代法，实现了在1%-10%极低浓度氦气条件下的等效检漏能力。

方案的核心创新在于：**三件制（ $Q_0+OK+NG$ 日常验证）是确保检测可靠性的唯一判据，与氦气浓度无关**。纯氦本身不能保证可靠性——没有三件验证，100%He条件下的检测同样可能是不可靠的。而有了三件验证，即使降至1%He，检测精度和可靠性也丝毫不受影响。以电池包氦检为例，年产500-600万件，年氦气消耗约300瓶（50L×20MPa，3000元/瓶），年氦气成本约90万元。降至10%浓度后，年氦气成本降至约9万元，节省约80万元。三件制验证投入仅1-3万元（主要为标准漏孔及假件制作），检测可靠性反而显著提升。

关键词：氦检漏；等效孔径比较；三件制验证；降浓度迭代法；低浓度氦气；气密性检测；供应链安全；物理第一性

核心发现

- **物理第一性：**气密检测的本质是比较等效泄漏孔的大小（ $d > d_0$ 还是 $d < d_0$ ），气体只是示踪媒介——100%He、1%He、Air、 N_2 都可以，只要区分度足够
- **三件制是唯一判据：**检测可靠性的唯一判据是三件制验证通过（ $GR\&R \leq 15\%$ + 三档分离），与氦气浓度无关。纯氦本身不能保证可靠性——没有三件验证，100%He同样可能错检漏检
- **三件制是黄金标准：** Q_0 （临界阈值件）+ OK（ $(1/3 \sim 1/2)Q_0$ ）+ NG（ $(2 \sim 3)Q_0$ ）每天验证，确保系统不漏检、不错检——这不是降氦的附属品，而是气密检测本应如此的最佳实践，无论用100%He还是1%He
- **降浓度不影响精度：**有了三件制验证，降至1%He条件下的检测精度和可靠性与100%He完全相同——不会错检，不会漏检。降氦降的只是成本，不是质量
- **降浓度迭代法：**从100% He逐步降低浓度，每次三件验证，找到该工件-设备组合的**最小工作浓度（MWC）**——不是理论算出来的，是实试验证出来的
- **降本+增效双重跃迁：**氦气成本降80%-90%（年产500-600万件电池包产线年省约80万元），同时三件制每日验证使检测可靠性大幅提升——不是"取舍"，是"双赢"
- **供应链安全：**当工业氦检用量降至10%，氦气危机不复存在——从"求人买"变为"人家求你买"

重要说明

本方案基于真空法（Vacuum Method）氦检漏论证最为充分。吸枪法（Sniffer Method）同样可行，但对吸入流量恒定有额外要求。正压累积法（Accumulation Method）与真空法本质类似。压降/压差法使用空气为介质，不存在示踪气体浓度概念，本方案不适用。强制要求绝对漏率数值报告的行业（航空航天、医疗器械等）建议采用"双轨制"。

第一章 氦气供应链危机：从价格波动到结构性断供

1.1 2026年中东地缘政治冲击与卡塔尔设施损毁

2026年3月，中东地缘政治冲突急剧升级。卡塔尔拉斯拉凡工业城（Ras Laffan Industrial City）——全球第二大氦气生产基地——于3月2日及3月18-19日遭受导弹袭击，液化天然气（LNG）及氦

气提取、纯化、灌装设施严重损毁。与此同时，霍尔木兹海峡航运受阻，全球约30%的氦气海上运输通道面临中断风险。

卡塔尔在全球氦气供应格局中占据核心地位。根据美国地质调查局（USGS）2026年矿物摘要数据，卡塔尔氦气产量约占全球总供应量的30%-39%，与美国的40%-45%共同构成全球氦气供应的双支柱格局^[6]。拉斯拉凡工业城的受损意味着全球约三分之一氦气供应在可预见未来内退出市场。

卡塔尔能源公司（QatarEnergy）已公开确认，受损设施修复周期预计为3-5年^[7]。考虑到当前地缘政治局势的复杂性和后续袭击风险，实际修复周期可能进一步延长。

1.2 全球氦气供需格局与价格传导

供应链冲击迅速传导至价格端。工业级氦气（纯度99.99%）的中国到岸价格从2025年的50-70元/立方米，在2026年4月飙升至300-400元/立方米，涨幅达5-10倍。

表 1-1 2026年氦气危机关键指标

指标	危机前（2025年）	危机后（2026年4月）	变动幅度
工业级氦气价格	50-70 元/m ³	300-400 元/m ³	↑ 5-10倍
卡塔尔全球供应占比	30%-39%	接近0（设施损毁）	结构性断供
设施修复周期预估	—	3-5年	中长期影响
中国氦气对外依存度	~90%	~90%（来源受阻）	结构性脆弱暴露

1.3 中国氦气供应的结构性脆弱

中国氦气消费的对外依存度接近90%，其中约54%-66%来自卡塔尔进口^[8]。2026年危机中，这一结构性脆弱暴露无遗：即使愿意承担高价，也不一定能够获得稳定的配额供应。部分半导体制造企业已收到2-6周的库存预警，若供应持续中断，先进制程产线将面临停工风险。

国内氦气资源开发虽已起步，但产能规模远不足以支撑全国工业需求。在此背景下，"降低单位检测氦气消耗"从成本优化选项升级为产业生存选项。将检漏工艺从100%纯氦切换至1%-20%低浓度氦气混气，意味着同等氦气进口量可支撑5倍至100倍的工业检测需求——行业平均降低10倍（到10%）更是毫无问题——这是在需求侧实施的"需求压缩"战略。

第二章 物理第一性：等效孔径比较——所有气密检测的本质

2.1 从"纯氦信仰"到"被迫降氦"：三种认知姿态

《三体》中，当宇宙微波背景辐射开始"闪烁"时，汪淼感到"物理学不存在了"。那些曾经坚不可摧的定律——能量守恒、热力学定律、量子力学——似乎被随意打破。读者随着汪淼一起陷入了恐慌：如果连物理规律都不可靠了，人类还能依靠什么？

但随着故事推进，真相大白：闪烁不是超自然现象，而是三体文明用"智子"干扰人类科学实验的结果。物理学从未消失，消失的只是人类对物理规律的认知能力。

检漏行业正处于类似的认知迷雾中。当前行业中存在三种截然不同的认知姿态：

表 2-1 检漏行业三种认知姿态对比

姿态	代表群体	心理状态	核心问题
纯氦坚守派	外资大厂、军工产线、部分质控严格的头部企业	"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
被迫降氦派	已采用80%He、60%He甚至更低浓度的成本敏感型厂家	"没办法，成本压力太大了，精度只能将就"	信仰仍是纯氦，只是钱包不允许
三件制验证派	理解本方案本质的先行企业	"三件制验证通过 = 系统可靠，与浓度无关"	认知正确，需要推广

最需要关注的是**第二类——被迫降氦派**。这些厂家由于成本压力，已经将氦气浓度从100%降到了80%、60%甚至更低。但他们做了一件"身体诚实"但"信仰没跟上"的事：**浓度降了，脑子里还认为纯氦更可靠**。他们心里是不踏实的，觉得这是"权宜之计"，一旦氦气价格回落就会回到纯氦。

这就是"降浓度但不降信仰"——骨子里还是纯氦信仰。他们的不安感来自"没有验证"，不是来自"浓度降了"。

数十年来，三条"铁律"被行业默认为不可动摇：

1. **仪器读数 = 物理真实**——检漏仪显示的 2.3×10^{-5} mbar·L/s被视为工件的固有属性
2. **纯氦 = 唯一可靠条件**——任何浓度降低必然导致精度下降

3. 绝对精度 = 核心价值——系统的优劣取决于能测到多小的数字

这三条"铁律"如同汪淼眼中的"宇宙闪烁"般不可动摇。2026年氦气价格暴涨5-10倍，许多从业者感到"检漏技术不存在了"——没有纯氦，检测如何继续？

但真相同样简单：所谓的"纯氦不可替代"并非物理定律，而是数十年廉价氦气供应条件下形成的行业惯例和路径依赖。一旦理解了气密检测的物理第一性，所有"神秘铁律"就变成了工程常识。更关键的是——**纯氦本身并不能保证检测可靠性。**

2.2 物理真实：唯一不变的等效泄漏孔径

物理第一性——等效泄漏孔径

物理真实只有一个：工件上的等效泄漏孔径（ d_0 ）。它不随测试条件改变而变化。无论充注100%氦气还是1%氦气，物理孔径连一微米都没有改变。

气体（100%He、1%He、Air、N₂）都只是示踪媒介。读值（mbar·L/s）只是手段产生的响应数字，不是目的本身。目的是比较孔的大小。

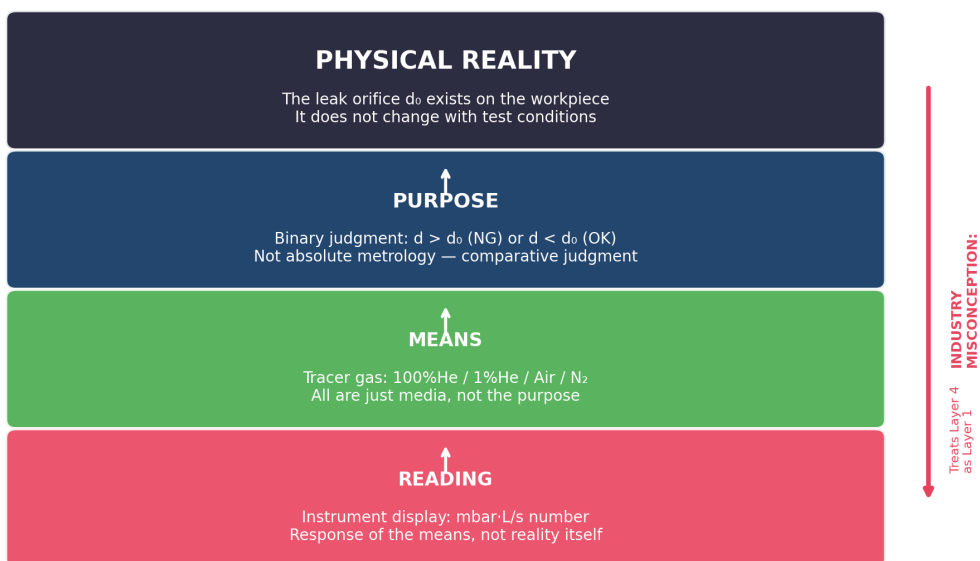
漏率Q在物理上是气体种类、压力差、温度、流态（分子流/黏滞流/过渡流）的函数，而非泄漏通道的固有属性。根据气体动力学理论：

$$Q = C \cdot \Delta P \cdot f(T, M, \gamma, Kn) \quad (2-1)$$

其中C为流导（与孔径几何形状相关）， ΔP 为压力差，T为温度，M为气体摩尔质量， γ 为比热比，Kn为克努森数。对于同一工件，当测试气体从100%氦气切换为1%氦气/氮气混气时，唯一改变的是气体混合物的平均摩尔质量和有效分压——**泄漏孔径本身纹丝不动。**

2.3 四层框架：从物理真实到仪器读数

为了帮助理解气密检测中各层次的关系，我们提出以下四层框架：



"Physics not only exists — it is beautiful" — Liu Cixin, *Three-Body Problem*

图 2-1 气密检测的四层认知框架——行业误区是把第四层（读值）当成第一层（物理真实）

表 2-2 气密检测四层框架

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	判断 $d > d_0$ (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

行业的核心误区在于把第四层（读值）当成了第一层（物理真实），把第三层中的某个选项（100%He）当成了唯一选项。一旦从四层框架的高度审视问题，"纯氦不可替代"的神话就不攻自破。

2.4 产线检漏的二元判定本质

产线氦检的终极输出只有一个：Pass 或 Fail。只要系统能稳定回答两个问题，其任务即已完成：

- 这个工件的泄漏通道 $\leq d_0$ 吗？（OK）

- 这个工件的泄漏通道 $> d_0$ 吗？（NG）

这一“二元判定”的本质决定了：产线检漏的核心需求是**判定一致性**（consistency of judgment），而非**绝对精度**（absolute accuracy）。当认知框架从“测量绝对漏率”切换为“比较泄漏通道大小”时，纯氮条件的必要性论证便失去了物理基础。

2.5 空气检漏仪早已证明：非氮气也能可靠比较孔径

一个关键但长期被忽视的事实是：**空气检漏仪（Air Leak Tester）和 N_2 检漏仪在工业中已广泛使用**——它们根本不用氮气，同样能可靠地判定Pass/Fail。

空气检漏仪使用压缩空气（~78% N_2 , 21% O_2 , 0.9% Ar, ~5 ppm He）作为测试介质，通过压力衰减或质量流量计测量泄漏，输出Pa·L/s或sccm——**没有氮气，没有质谱仪，也能可靠工作。**

这说明什么？说明**整个行业实际上已经接受了“非氮气也可以比较孔径”的事实**，只是没有把这个认知**显式化**到氮检漏场景中。从空气检漏 → 低浓度氮检漏 → 纯氮检漏，是一个连续光谱，不是黑白分明的界限。

*“如果气密检测的本质是仪器读数绝对准确，那么空气检漏仪不可能工作。但空气检漏仪已经在工作——这说明气密检测的本质不是绝对准确，而是**区分度足够**。”*

2.6 纯氮信仰的认知误区：浓度焦虑不是可靠性焦虑

本小节是全白皮书最重要的认知升级之一。我们需要彻底拆解一个根深蒂固的行业误区：

核心论断

纯氮本身不能保证检测可靠性。低浓度也不自动意味着不可靠。检测可靠性的唯一判据是三件制验证通过（GR&R $\leq$ 15% + 三档分离），与氮气浓度无关。

纯氮条件下，以下问题一个都不会自动消失

传统认知认为：氮气纯度越高 → 信号越强 → SNR越高 → 检测越可靠。但这个推理链条在“SNR → 可靠性”这一步就断了。

在100%纯氮条件下，以下问题完全可能存在：

表 2-3 纯氦条件下仍可能导致检测不可靠的因素

问题来源	具体表现	对检测可靠性的影响
仪器漂移	质谱灯丝老化导致灵敏度逐日下降；电子学零点漂移；真空泵性能衰减	昨天的校准 $\neq$ 今天的响应，阈值可能已不匹配实际灵敏度
环境氦污染	纯氦检测时大漏工件使环境本底从2 ppm飙升至50+ ppm，持续数小时	后续工件测的是"信号+50ppm噪声"，可能将OK件误判为NG件
校准状态未知	标准漏孔买了半年未检；温度变化使漏孔漂移；密封面微漏	Q_0 本身在漂移，所有基于此的判定都在"盲飞"
操作变量	夹具密封状态不一致；操作人员手法差异；前序工件的氦残留	即使100%He，操作变量也能让同一件的读数波动 $\pm 30\%$

这意味着：**纯氦 + 无日常三件验证 = 可靠性 unknown**。系统可能今天好、明天坏，但你永远不知道——因为你从不验证。

被迫降氦的80%/60%厂家：你们的焦虑根源不是浓度

对于那些已经降到80%He、60%He的厂家，我们想说的是：

致被迫降氦派

你的不安不是来自浓度从100%降到了80%，而是来自你根本不知道系统现在是否可靠。如果你今天开始三件制验证，你很可能发现在80%He条件下系统完全稳定——或者你会发现系统早在100%He的时候就已经不稳了。

浓度不是问题的根源，缺乏日常验证才是。

这就是认知框架的转换：**从"浓度焦虑"转向"验证焦虑"**。浓度焦虑是无解的（氦气价格不由你控制），验证焦虑是有解的（三件制，每天几分钟）。

两种产线的对比：谁真正可靠？

表 2-4 两种产线的可靠性对比

产线类型	氦气浓度	三件验证	真实可靠性
A产线：从不验证	100% He	无	未知 ——可能好，可能坏，无法判断

产线类型	氦气浓度	三件验证	真实可靠性
B产线：三件制验证	80% He	每班次	确认可靠 ——GR&R≤15%，三档分离
C产线：三件制验证	1% He	每班次	确认可靠 ——与B产线等效

这个对比揭示了一个反直觉的事实：**B产线（80%He + 三件验证）比A产线（100%He + 无验证）更可靠。** 因为B产线每天确认系统在控，A产线只是"假装"系统在控。

这才是本方案的真正颠覆性所在——不是说"低浓度也能凑合用"，而是说：**无论你现在用100%、80%、60%还是准备降到更低，第一件该做的事是建立三件制日常验证体系。有了它，你才能真正知道系统是否可靠。**

第三章 等效孔径相对比较法：三件制与降浓度迭代

本章是全白皮书的技术核心。在确立"比较等效孔径"为第一性之后，我们需要回答一个工程问题：如何在实际产线上可靠地实现这一比较？答案是三件制（ $Q_0+OK+NG$ ）验证体系与降浓度迭代法。

但需要再次强调：**三件制不是降氮的附属品**。即使您完全不打算降氮，三件制仍然是保证检测可靠性的最佳实践。降氮只是三件制的自然延伸——既然每天都要验证，为什么不顺便找到最低可行浓度呢？

3.1 "盲信仪器"与"被迫降氮"：产线检漏的两种危险模式

当前大多数工厂的氮检流程是这样的：

开机 → 仪器自动归零 → 放工件 → 读数 < 阈值? → Pass/Fail

这个流程存在根本性缺陷：

表 3-1 传统纯氮检测的"盲信仪器"模式问题分析

问题	具体表现	后果
仪器"归零"归零的是什 么？	真空本底，不是系统灵敏度	灯丝老化、电子学漂移未被检测
阈值从哪里来的？	出厂默认值或工程师经验值	可能与当前系统状态不匹配
仪器今天准不准？	没有验证手段	系统性漂移导致批量误判
NG件能不能被检出？	从未测试已知NG件	漏检风险无法量化
OK件会不会被误判？	从未测试已知OK件	错检风险无法量化

这就好比一个秤，每天称之前不拿标准砝码试一下，直接开始称。昨天准，今天准不准？不知道。更可怕的是——你甚至不确定昨天准不准。

模式二："被迫降氮"——身体诚实，信仰没跟上

第二类危险模式是被迫降氦派。迫于成本压力，这些厂家已经将氦气浓度降到了80%、60%甚至更低。但他们的心理状态是这样的：

"我知道80%He肯定不如100%He准，但成本实在扛不住了。先凑合用着，等氦气价格回落就回到纯氦。"

这种心态的本质是：**降了浓度，但没降信仰**。骨子里仍然认为纯氦更可靠，只是"被迫将就"。

但问题是——如果80%He真的"不如"100%He，你怎么知道差多少？差10%？差50%？还是说其实没差？你无从得知，因为：

- 你**没有**在80%He条件下做过三件验证——不知道系统是否稳定
- 你**没有**在80%He条件下测过已知NG件——不知道漏检率
- 你**没有**在80%He条件下测过已知OK件——不知道错检率
- 你甚至**没有**在100%He条件下做过三件验证——你根本不知道"纯氦基准"是什么样的

所以你的"80%He肯定不如100%He"只是一个**未经检验的假设**——它和"纯氦信仰"一样，来自路径依赖，不是来自实测验证。

关键认知转换

从"浓度决定可靠性"到"验证决定可靠性"：

"80%He不如100%He可靠"——这是一个错误的认知框架。正确的框架是："80%He + 三件验证 = 可靠性确认" vs "100%He + 无验证 = 可靠性未知"。

浓度不是决定因素，验证才是。

3.2 三件制 (Q_0 +OK+NG)：气密检测的黄金标准

三件制不是降氦的附属品，而是**气密检测本应如此的最佳实践**。无论使用100%He还是1%He，无论是否降氦，三件制都是保证检测可靠性的正确方式。

Traditional: "Trust the Instrument"

Three-Piece: "Verify First, Then Test"

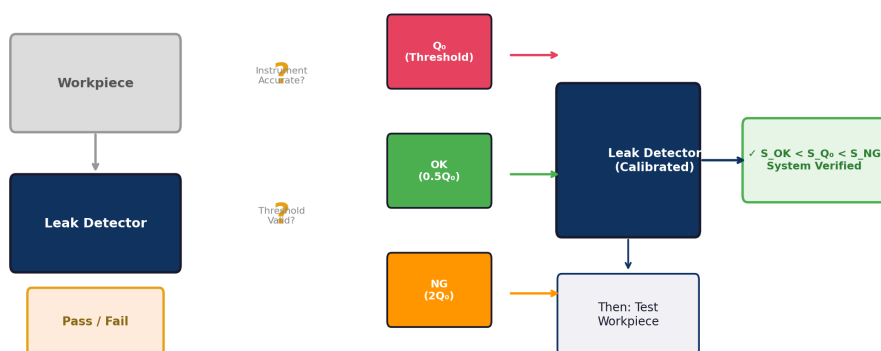


图 3-1 传统"盲信仪器"模式 vs 三件制"先验证再检测"模式

三件制定义

- Q_0 (临界阈值件)：漏率等于合格阈值的标准漏孔，锚定Pass/Fail边界
- OK件 ($(1/3 \sim 1/2)Q_0$)：漏率为 Q_0 的1/3至1/2的已知合格工件（俗称"假件"），验证"不误判"
- NG件 ($(2 \sim 3)Q_0$)：漏率为 Q_0 的2至3倍的已知不合格工件（俗称"假件"），验证"不漏检"

三件制是气密检测的"日常校秤"：

表 3-2 三件制类比：日常校秤

三件制	作用	类比：秤的校准
Q_0	确认仪器对"刚好不合格"的响应	1kg标准砝码——秤显示1kg吗？
OK件	确认"合格件不会被误判为不合格"	0.5kg砝码——秤不会显示1.2kg吧？
NG件	确认"不合格件一定能被检出"	2kg砝码——秤不会显示0.8kg吧？

每天/每班次开始时，三件都过一遍——这才是气密检测的正确打开方式。无论用100%He还是1%He，三件制都应成为标准流程。

3.3 三件制的可行性与核心条件

三件制验证通过、系统可用的核心条件：

三件制系统可用判定条件（同时满足）

条件1 系统稳定性：系统GR&R $\leq 15\%$ （测量系统分析通行标准，确保同一件多次测量波动可控）

条件 2 三 档 分 离： $S_{OK} < S_{Q_0} < S_{NG}$
（OK、Q₀、NG三件读数形成清晰三档，无重叠区域）

这两条同时满足时，系统即可正常工作——**不管用的是100%He还是1%He还是Air，只要满足这两条**。这就是"区分度足够即可行"的工程化表达。

其中，**区分比**（ S_{NG}/S_{OK} 实测读数比）是两条条件的自然结果而非独立约束。在OK=(1/3~1/2)Q₀、NG=(2~3)Q₀的常规选择下，即使SNR低至3，区分比通常也在2~5之间，远高于统计安全下限。GR&R $\leq 15\%$ 保证每档内部波动（ $\pm 15\%$ ）远小于档间间隔，三档之间不存在"灰色地带"。

为什么SNR $\geq 3\sim 5$ 即可？——从"计量"到"比较"的范式转换

传统"绝对计量"范式要求SNR ≥ 10 （需要精确知道漏率值）。但在"比较大小"范式下，SNR $\geq 3\sim 5$ 即可，前提：**系统GR&R $\leq 15\%$** 。

以SNR=3为例（噪音本底=1）：

- Q₀读数 = 1（噪音）+ 3（信号）= 4
- OK件（0.5Q₀）= 1 + 1.5 = 2.5
- NG件（2Q₀）= 1 + 6 = 7
- NG/OK = 7/2.5 = 2.8——三档清晰分离！

只要GR&R $\leq 15\%$ ，同一件多次测量波动不超过读数的15%，三档之间不存在"灰色地带"。这是范式转换带来的红利：从"精确测量"到"足够区分"，门槛大幅降低。

以电池壳体案例为例（Q₀ = 5×10^{-5} mbar·L/s @ 2bar He入真空，OK=0.5Q₀、NG=2Q₀仅为示意，实际可在(1/3~1/2)Q₀和(2~3)Q₀范围内选择）：

表 3-3 三件制验证示例

工件	漏率	100% He读数	1% He读数（估算）
OK件	2.5×10^{-5} (0.5Q ₀)	~50 a.u.	~0.5 a.u.
Q ₀	5×10^{-5}	~100 a.u.	~1.0 a.u.

工件	漏率	100% He读数	1% He读数（估算）
NG件	10×10^{-5} ($2Q_0$)	~200 a.u.	~2.0 a.u.
区分比	—	4.0	4.0

注意：1% He时的读数仅为估算（实际可能因流态非线性而偏离），但区分比保持不变——这正是三件制的核心优势：不依赖理论计算，只依赖实测验证。

3.4 降浓度迭代法：寻找最小工作浓度（MWC）

降浓度迭代法是找到特定工件-设备组合最小工作浓度（Minimum Working Concentration, MWC）的系统方法。MWC不是理论算出来的，是实测三件验证出来的。

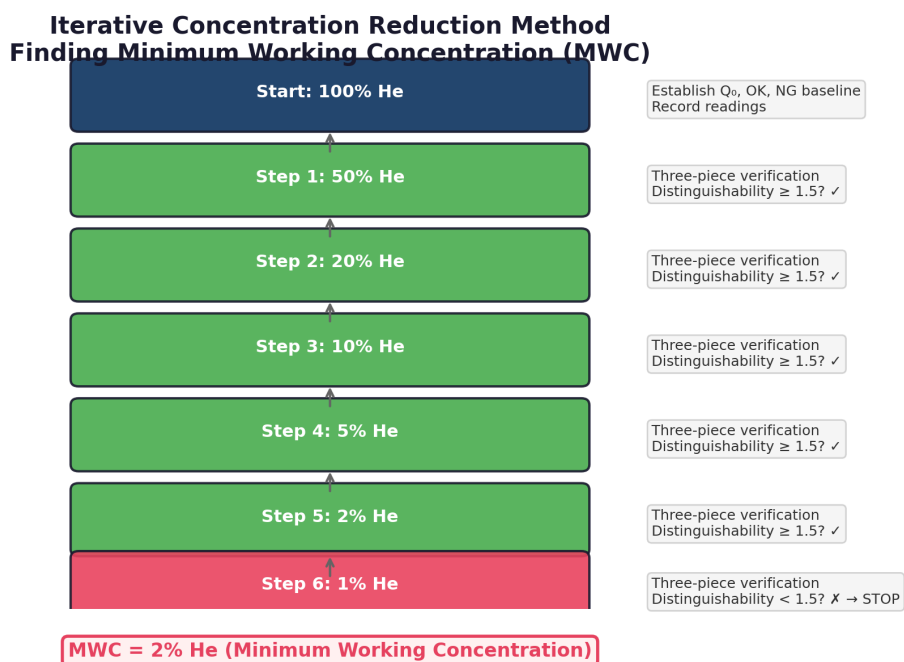


图 3-2 降浓度迭代法：从100% He逐步降低，每件浓度三件验证，找到MWC

降浓度迭代法操作流程

- Step 0:** 100% He条件下建立三件基准 (Q_0 , OK, NG读数), 记录区分比
- Step 1:** 降至50% He, 三件重测, 确认三档清晰分离? 是 → 继续降; 否 → 退回上一级
- Step 2:** 降至20% He, 三件重测
- Step 3:** 降至10% He, 三件重测
- Step 4:** 降至5% He, 三件重测
- Step 5:** 降至2% He, 三件重测
- Step 6:** 降至1% He, 三件重测——三档重叠无法区分? 停止, MWC=上一档

每个工件、每个设备都可以找到自己的**最优浓度**——不是理论算出来的, 是实测三件验证出来的。这就是从"拍脑袋选1%"到"科学找最优"的方法论升级。

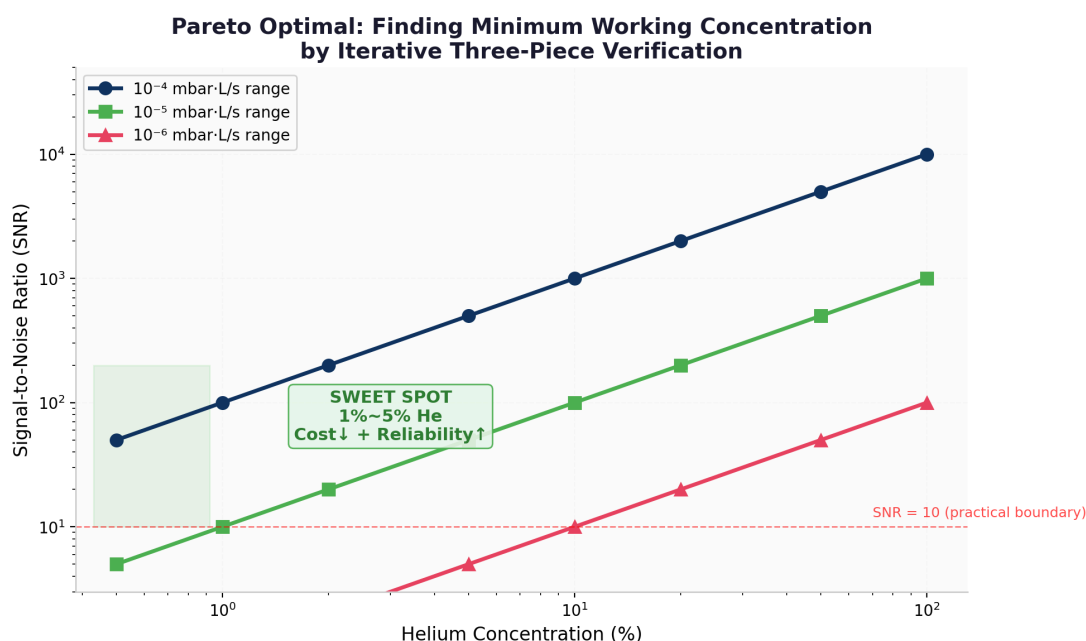


图 3-3 帕累托最优区域——1%-5% He通常是"甜点区" (成本↓+可靠性↑)

3.5 关于"同源消元"的修正说明

在本白皮书的v1-v3版本中, 我们使用了"同源消元相对判定法"的表述, 核心方程为 $S/S_{Q_0} = Q/Q_0$, 声称浓度项和系统系数在比值中"完全消去"。

经过深入工程实践和讨论, 我们认识到这一表述存在**理想化过度**的问题:

- **流态非线性**：当工件漏孔处于过渡流区域（ $Kn \sim 1$ ）时，降低He浓度改变混合气体平均摩尔质量（从4变为~28），流导不再严格遵循 $\sqrt{M}$ 关系，信号下降可能偏离浓度比例
- **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，v4版本做出以下修正：

v4版本核心修正

从"数学消元"转向"工程比较"：不再追求证明浓度项严格消去，而是承认实际系统可能存在非线性偏离。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，而是通过降浓度迭代法实测找到每个场景的最优浓度。

这一修正使方案从"理论优雅"走向"工程稳健"——不是削弱了方案的可靠性，而是**增强了方案的诚实性和可操作性**。

3.6 为什么三件制在纯氦条件下同样是最佳方案

本节是全白皮书认知框架的最后一击。我们要回答一个关键问题：

核心问题

如果我不打算降氦，我还有必要引入三件制吗？

答案是：不仅有必要，而且三件制在纯氦条件下同样是确保检测可靠性的最佳方案。

纯氦不能自动解决以下问题

许多从业者认为："我用100%He，信号最强，环境干扰最小，所以不需要三件制。"这是一个危险的错觉。

表 3-4 纯氦条件下仍需三件制验证的原因

问题	纯氦条件下是否自动解决	三件制如何解决问题
----	-------------	-----------

问题	纯氮条件下是否自动解决	三件制如何解决问题
仪器灵敏度漂移	否——灯丝老化、电子学温漂与氦气浓度无关	Q ₀ 件读数漂移 > 15% → 立即报警，停机检修
大漏后环境本底飙升	否——纯氮条件下大漏排放的氮更多，污染更严重	三件制验证时发现本底异常 → 延长清扫时间
标准漏孔自身漂移	否——渗氮漏孔年衰减1%-5%，与浓度无关	Q ₀ 读数趋势监控 → 提前发现漏孔老化
操作变量（夹具、手法）	否——人为因素与氦气浓度无关	OK/NG件验证 → 确认操作一致性
真空系统微漏	否——接头微渗在纯氮下信号更大	OK件读数异常偏高 → 提示系统密封问题

以上所有问题在纯氮条件下一个都不会自动消失。100%He只解决了"信号强度"这一个维度，而检测可靠性是一个涉及仪器、环境、操作、标准的系统工程。

正确的认知框架：三件制不是降氮的附属品

许多厂家把本方案理解为"降氮方案"——认为三件制是为了降氮服务的。这是因果倒置。

正确的逻辑是：

正确的认知框架

三件制是气密检测的最佳实践——无论用100%He还是1%He，都应该每天验证。三件制确保系统不漏检、不错检。

降氮是三件制的延伸应用——既然每天都要做三件验证，为什么不顺便找到最低可行浓度，实现降本增效？

降氮降的只是成本，不是质量。 有了三件制验证，1%He条件下的检测精度和可靠性与100%He完全相同——不会错检，不会漏检。

这个认知框架的转换至关重要：

表 3-5 认知框架对比

维度	错误框架	正确框架
核心目标	"降低氦气成本"	"确保检测可靠性"——降本 is 副产品

维度	错误框架	正确框架
三件定位	"降氮的附属工具"	"气密检测的黄金标准"——任何浓度都适用
浓度决策	"能降到多低？"	"MWC在哪里？"——实测迭代找最优
质量认知	"降氮必然牺牲精度"	"三件制验证通过 = 精度不受影响"

一个思想实验

假设有两条产线，都使用100%He：

- **产线A**：从不做三件制验证，开机→归零→直接检测
- **产线B**：每天做三件制验证，确认三档分离后才开工

三个月后，产线A出现了批量漏检——原来灯丝老化导致灵敏度下降了30%，但没有人发现，因为从来没有用 Q_0 验证过。产线B在第三天就发现 Q_0 读数下降了18%，立即更换灯丝，全程无漏检。

问题出在氦气浓度吗？不是。两条产线都用100%He。问题出在没有三件制验证。

这个思想实验说明：**三件制在纯氮条件下同样能防止批量质量事故。它是气密检测的"安全带"——不是只有开快车手才需要，任何速度下都需要。**

第四章 RMI-MTC™单通道毛细管标准漏孔：关键技术支撑

4.1 传统标准漏孔的技术瓶颈

三件制比较法的工程可行性，建立在标准漏孔 Q_0 具备足够精度和稳定性的基础之上。传统标准漏孔存在两类主要方案，各自面临显著瓶颈：

渗氦型漏孔（Helium Permeation Leak）：温度系数高达 $4\%/^{\circ}\text{C}$ ——环境温度每变化 1°C ，漏率变化 4% 。在工业现场 $15\text{-}35^{\circ}\text{C}$ 的温度波动范围内，漏率变化可达 80% 。此外，渗氦元件易碎、存在 $1\%\text{-}5\%/年$ 的长期衰减。

机械毛细管漏孔（Capillary Leak）：孔径极小（微米量级），在工业环境中极易被颗粒物堵塞，导致漏率漂移甚至完全失效。

4.2 RMI-MTC™单通道毛细管与RMI-CAL算法

RMI-MTC™（Micro-Channel Technology）标准漏孔采用**单通道毛细管结构**，核心创新在于**RMI-CAL算法**——该算法同时约束测试压力和漏率两个要素，自动计算匹配目标工件等效孔径所需的毛细管长度与孔径参数。

RMI-MTC™单通道毛细管标准漏孔的核心设计特点：

- **单通道分子流设计**：毛细管尺寸确保分子流状态（ $Kn > 1$ ），消除流态变化影响
- **RMI-CAL算法精确匹配**：同时约束测试压力和漏率，模拟工件等效孔径
- **精密加工稳定性**：高稳定性基材与精密加工工艺，温度系数低至 $0.1\%/^{\circ}\text{C}$
- **加工精度控制**：公差精度控制在 $\pm 10\%$ 以内

4.3 性能指标与计量溯源

表 4-1 三类标准漏孔性能对比

性能指标	RMI-MTC™单通道毛细管	渗氦型漏孔	机械毛细管
公差精度	$\pm 10\%$ 以内	$\pm 15\%\sim\pm 25\%$	$\pm 20\%$ 以上

性能指标	RMI-MTC™单通道毛细管	渗氮型漏孔	机械毛细管
温度系数	0.1%/°C	~4%/°C	~1%/°C
耐压能力	0~40 MPa	通常<1 MPa	<5 MPa
年衰减率	<0.1%	1%~5%	易堵塞突变
核心创新	RMI-CAL双要素精确匹配	—	—

> **计量溯源说明：** 上述性能指标基于厂商内部计量体系验证。建议用户在采购时要求供应商提供至国家计量基准的溯源证书，并在产线验证阶段使用交叉比对法进行独立确认。

第五章 低浓度氮气的主动降噪效应

5.1 环境氮污染的成因与量化

传统纯氮检漏中，环境氮污染是一个长期被忽视但严重影响现场稳定性的问题。纯氮检测条件下，以下环节向车间环境持续释放氮气：

- 检测完成后工件的排气过程（约占排放总量60%-70%）
- 真空接头、密封面的微漏（约占10%-15%）
- 工件表面的氮气解吸（约占10%-20%）
- 标准漏孔标定时的氮气排放（约占5%-10%）

这些释放源可使车间局部氮本底浓度从自然界的5 ppm飙升至数百甚至数千ppm。改用1%氮气混气后，每次检测向环境排放的氮绝对量减少100倍，车间氮排放总量锐减99%，环境本底回归自然水平。

5.2 大漏记忆效应的消除

真空氮检中，大漏工件进入检测腔体时，大量氮气冲入质谱室，使离子源和分析器产生"记忆效应"——氮分子在金属表面吸附后缓慢释放，导致后续若干次检测基线持续偏高。传统方案需要数分钟至十几分钟的清扫等待时间。

1%混气方案下，即使出现大漏工件，冲入质谱室的氮绝对量比纯氮条件减少两个数量级。仪器本底在数秒内恢复至正常水平，无需停机等待。

5.3 基线稳定性改善与误报率降低

表 5-1 低浓度方案"主动降噪"效应汇总

噪声源	纯氮条件下的影响	1%混气条件下的改善
环境氮污染	车间本底远高于5 ppm，环境噪声成为有效检测floor	排放减少99%，基线回归自然水平
大漏记忆效应	数分钟至十几分钟清扫等待	数秒恢复，不停机
接头微渗	纯氮下微渗信号显著，可能干扰判定	微渗信号大幅衰减，可忽略

噪声源	纯氮条件下的影响	1%混气条件下的改善
表面解吸	工件表面氮解吸干扰判定	解吸总量减少99%
综合误报率	基线漂移导致误判	误报率显著降低

低浓度方案的"主动降噪"效应可定性理解：在 $SNR = S_{\text{signal}} / S_{\text{noise}}$ 中，虽然信号分子按比例下降（例如从100%降到1%，信号降100倍），但噪声分母（环境氮干扰）下降更大幅度（环境排放减少99%）。在受环境氮污染严重的现场，实际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。

第六章 分级降氦方案：三件实测为最终依据

不同漏率量级对应不同的工程边界条件，需要差异化的氦气浓度策略。但本版本的核心原则不变：**最终可行性以三件实测验证为唯一依据，任何理论分析仅为参考。**

关于“本底噪声”的专业说明

氦质谱检漏仪的最小可检漏率（MDL）与积分时间（dwell time）密切相关， $MDL \propto 1/\sqrt{t_{int}}$ 。工业产线节拍差异巨大——从电池包超高速产线的3-5秒/件，到一般工业件的数十秒甚至上百秒/件——积分时间不同，MDL相差可达数倍。

但关键点在于：**即使最快的产线（3-5秒/件），工业氦检的余量仍然很大。**当前使用高浓度氦（80%-100%）的产线，仪器本底噪声达到 10^{-7} mbar·L/s量级完全正常工作；降氦后，由于环境氦污染减少99%，本底还会进一步降低。常规节拍（几十秒/件）更是毫无问题。

因此，本白皮书的结论是明确的：**整个工业氦检行业，氦气使用量降到原来的1%-20%完全没问题，平均降低10倍（到10%）更是毫无问题。**具体MWC通过降浓度迭代法在目标节拍条件下实测确定。

6.1 10^{-4} mbar·L/s量级：余量极大区间

典型应用：汽车空调管路、普通制冷件、一般工业密封件

此量级漏率较高，即使降至1%He，信号仍有充足余量。无论是常规节拍（几十秒/件）还是高速产线，三件制验证通常能在1%-3%He浓度范围内顺利通过。

精度与可靠性保证：此量级余量极大，三件制验证通过时，OK件、Q₀件、NG件读数清晰分离（GR&R≤15%），系统判定“Pass”的工件不会错检为“Fail”，判定“Fail”的工件不会漏检为“Pass”。**检测精度与可靠性同100%He条件下完全一致。**

参考起始浓度（迭代起点）：1%-3%。最终浓度以目标节拍条件下的三件实测验证为准。

6.2 10^{-5} mbar·L/s量级：核心应用区间

典型应用：电池包壳体、制冷压缩机、中等密封要求的工业件

这是新能源汽车和制冷行业最主流的合格线，也是本白皮书的**核心应用场景**。

关于节拍的说明：电池包产线速度差异很大——从超高速产线（20-30 ppm，即每分钟20-30件，单件检测时间3-5秒）到常规节拍（几十秒/件）。需要明确的是：**即使最快的产线（3-5秒/件），余量仍然很大。**当前行业使用高浓度氦（80%-100%）的产线，仪器本底噪声达到 10^{-7} mbar·L/s量级完全正常工作；降氦后环境氦污染减少99%，本底还会进一步降低。常规节拍（几十秒/件）更是毫无问题。

精度与可靠性保证：此量级是方案最具经济价值的"甜点区"。三件制验证通过时（GR&R≤15% + 三档分离），系统对OK件和NG件的判定准确率与100%He条件下完全相同。**降氦降的只是成本，不是质量。**年产500-600万件的电池包产线，年氦气成本约90万元，降至10%后仅需约9万元，年省约80万元。漏检率和错检率不变。

参考起始浓度（迭代起点）：1%-5%。最终浓度以目标节拍条件下的三件实测验证为准。

6.3 10^{-6} mbar·L/s量级：需要适当浓度的区间

典型应用：高密封继电器、部分医疗器械、航空航天关键密封件

此量级漏率较低，需要适当提高氦气浓度以确保三件制验证通过。建议从10%-20%He开始迭代，逐步降低。降浓度迭代过程中必须在**目标节拍条件**下进行三件验证——产线节拍多快，验证就用多快的积分时间。

精度与可靠性保证：核心逻辑不变——三件制验证通过即意味着系统可靠。即使使用10%-20%He（仍比100%He降低80%-90%成本），只要三档分离、GR&R≤15%，**检测精度和可靠性就与100%He完全相同，不会错检，不会漏检。**

参考起始浓度（迭代起点）：10%-20%。逐步降低，当三档重叠或GR&R>15%时停止，MWC=上一档浓度。

6.4 流态非线性的诚实讨论

本白皮书坚持技术诚实原则，对流态问题做充分披露。但诚实的前提是**框架正确**——同一个物理现象，在"绝对漏率测量"框架和"等效孔径相对比较法"框架下的意义完全不同。

在绝对漏率测量框架下，流态非线性确实是一个严重问题。当He浓度从100%降到1%，混合气体平均摩尔质量从4变为约28，流导与 $\sqrt{M}$ 的关系在过渡流区域不再严格成立，绝对漏率数值的换算需要复杂的流态修正。

但在等效孔径相对比较法框架下，这不是问题。

原因非常简单： Q_0 、OK、NG三件在同一浓度、同一设备、同一时刻测量。流态变化对三件的影响是**同向同比例**的——如果信号整体压缩到原来的1/80而不是1/100，三件的信号同步压缩，三档之间的**相对区分度不变**。

类比：秤的灵敏度变了，但不影响“谁比谁重”

假设一个秤昨天1kg显示1000g，今天因为温度变化显示800g——灵敏度变了。但如果你拿一个标准砝码（ Q_0 ）、一个轻物体（OK）、一个重物体（NG）同时去称，三者的读数关系依然是 $NG > Q_0 > OK$ 。你不需要知道秤的绝对灵敏度，只需要知道三者能分开。

流态变化相当于“秤的灵敏度变了”——三件信号整体缩放，但**谁比谁大**这个结果不变。只要三档还能分开，检测就是可靠的。

唯一需要关注的判据：三档是否分离。

降浓度后三件验证通过 → $GR\&R \leq 15\%$ + 三档清晰分离 → 系统可用，与流态无关。

降浓度后三件验证不通过 → OK与 Q_0 重叠 → 不是“流态问题”，而是“该浓度下区分度不足” → 退回上一档浓度即可。这是工程判断，不需要流态分析。

6.4节核心结论

不需要判断工件处于什么流态。不需要知道信号是否严格按浓度比例衰减。不需要做流态修正计算。

只需要做一件事：三件验证。三档分离 → 继续；三档重叠 → 退回上一档。

6.5 客户常见顾虑：混气均匀性与混气精度

在推广降氦方案的过程中，客户最常提出的两个顾虑是：(1)气瓶内的混合气体是否均匀？特别是1%He+99% N_2 这样的低浓度混合气；(2)混气精度标称1%，实际是否准确？这两个问题本质上都是“绝对精度焦虑”——客户仍用绝对测量的思维框架思考相对比较法的场景。本节逐一回应。

顾虑一：气瓶内混合气体是否均匀？

答案：必然均匀。这是统计物理的必然结果，不是操作建议。

气体分子在常温常压（20MPa钢瓶内）下处于热平衡态，每秒碰撞数十亿次。He（分子量4）和 N_2 （分子量28）虽然质量差异显著，但在同一温度下服从相同的麦克斯韦-玻尔兹曼动能分布。每一次碰撞都使分子运动方向重新随机化，系统通过扩散和对流自发趋向热力学平衡态。

以50L钢瓶（初始0.2MPa He，充N₂至20MPa，He摩尔分数约1%）为例，密度差驱动的自然对流Rayleigh数达10¹⁴量级，远超对流临界值（Ra~1700）。充装过程的高压射流湍流、充装后的自然对流翻滚、以及分子扩散的微观均匀化——三种机制协同作用，**静置数小时后即可达到分子级均匀分布**。工程上保守建议静置24小时。

关键：无需翻转、振荡或任何操作

混合气体在封闭容器内趋向均匀分布，是热力学第二定律的必然结果——系统熵增趋向最大。翻转只是将"数小时"压缩到"数分钟"的加速手段，不是物理必需。客户只需将混气罐静置，零操作负担。

顾虑二：混气精度1%是否准确？

答案：精确到1%压根没有关系。我们要的是区分度，不是浓度标签。

降浓度迭代法寻找的是**最小工作浓度（MWC）**——在该工件-设备-产线组合下，三件验证刚好通过的最优浓度。MWC不是"算出来的"，是三件实测迭代找到的。

混气罐标称"1%He"，实际可能是0.9%或1.1%——完全不影响。三件制验证不问"浓度标签是多少"，只问"**在当前实际浓度下，三档是否分离？**"

类比：调收音机的音量旋钮

你不关心旋钮刻度精确到几度，只关心在哪个位置声音最清晰。你找到那个位置，标记下来，以后每次用这个位置就行。MWC就是你的"最清晰位置"——是实测验证的结果，不是理论计算的结果。

具体操作上：混气罐标称浓度作为起点参考，三件实测验证决定是否继续降低。系统性地通过降浓度迭代法找到MWC后，将该浓度作为产线标准配比固定下来。后续只需确保供应商批次一致性（±10%即可），不需要每批精确到1%。

6.5节核心结论

混气均匀性：静置即可，分子热运动自然达到均匀，零操作。

混气精度：不需要精确到1%，三件验证通过即可，MWC是实测出来的。

两个顾虑都是"绝对精度焦虑"的表现——降氮方案的核心是相对比较法，不是绝对测量法。

第七章 工程实施路径

7.1 Phase 1：三件基准建立（1-2周）

目标：在纯氦（100%）条件下建立 Q_0 +OK+NG三件基准读数，确认系统在标准条件下的可靠性。

表 7-1 Phase 1 验证项目与通过标准

验证项目	操作方法	通过标准
Q_0 件标定	连接 Q_0 标准漏孔，记录信号 S_{Q_0}	信号稳定，无异常波动
NG件检出验证	测试漏率 $(2\sim3)Q_0$ 的NG件，记录 S_{NG}	$S_{NG} > S_{Q_0}$ ，NG件能被可靠检出
OK件通过验证	测试漏率 $(1/3\sim1/2)Q_0$ 的OK件，记录 S_{OK}	$S_{OK} < S_{Q_0}$ ，OK件不会被误判
重复性测试	连续20次三件循环测试	系统GR&R $\leq 15\%$
记录基准	记录100% He条件下的三件读数作为后续比较基准	数据完整可追溯

7.2 Phase 2：降浓度迭代验证（2-4周）

目标：通过降浓度迭代法找到该工件-设备组合的MWC（最小工作浓度）。

- 从100% He开始，按50%→20%→10%→5%→2%→1%逐步降低浓度
- 每次降低浓度后，完整执行三件验证（ $Q_0 \rightarrow OK \rightarrow NG$ ）
- 记录三件读数，确认 $S_{OK} < S_{Q_0} < S_{NG}$
- 当三档重叠或GR&R $> 15\%$ 时停止，MWC=上一档浓度
- 建议同步记录温度、湿度等环境参数

7.3 Phase 3：产线部署与持续监控

目标：全产线推广并建立长期监控机制。

- 基于Phase 2确定的MWC部署产线
- 每班次开始时的标准流程：三件验证 → 通过 → 开始检测工件

- 每班次结束时的复检：再次三件验证，确认漂移 $<\pm 15\%$
- 建立SPC图表，持续监控三件读数趋势
- 设立定期评审机制（每周），分析三件数据并优化

7.4 吸枪法与正压累积法的实施要点

本方案基于真空法论证最为充分，但吸枪法和正压累积法同样可行，各有要点：

吸枪法（Sniffer Method）实施要点

核心约束：吸入流量必须恒定。吸枪法从大气中吸入气体，探头吸入的流量必须恒定——流量波动会导致即使工件漏率不变，读数也会变化。

额外要求：需要质量流量控制（MFC）或恒流泵保证吸入速率恒定。

与真空法的区别：降He不降低噪音（大气He本底固定为 ~ 5 ppm），所以SNR严格下降而非改善。可行但门槛更高，MWC通常高于真空法。

正压累积法（Accumulation Method）实施要点

本质：工件充入He（或混气）后置于封闭累积腔中，累积一段时间后测量腔中He浓度增长。

与真空法的相似性：累积腔是封闭系统，降He后环境He本底也会降低——**降He有双重收益**（信号 $\downarrow$ +噪音 $\downarrow\downarrow$ ），与真空法本质类似。

适用场景：电池包等行业常用此方法，三件制同样适用。

第八章 经济分析

以电池包氦检产线为例（年产500-600万件），基于行业实际运行数据：

表 8-1 电池包氦检产线（年产500-600万件）成本对比

成本项目	纯氦法（100%He）	低浓度氦法（10% + 三件制）	说明
氦气消耗量	~300瓶/年	~30瓶/年	50L×20MPa规格，1.7-2万件/瓶
氦气采购成本	~90万元/年	~9万元/年	3000元/瓶
三件制验证投入	无	1-3万元（一次性）	Q ₀ 标准漏孔 + OK/NG假件制作
混气设备	—	混气罐及配套（折旧分摊）	成本远低于回收系统
年氦气成本节省	—	~80万元/年	降幅约90%

更重要的是隐性收益：

表 8-2 隐性收益与风险评估

收益/风险项	描述	量化估计
检测可靠性提升	三件制每日验证，杜绝系统性漂移导致的批量误判	误报率降低50%以上
产线停机减少	大漏后清零时间从数分钟缩短至数秒	有效节拍提升3%~8%
供应链风险对冲	低消耗=高保障弹性	避免断供停产损失
数据可追溯性	每班次有三件校准记录，质量审计有依据	满足IATF 16949等体系要求
预混气供应风险	需确认混气供应商稳定性	建议选择2家以上供应商

双重跃迁：不是"取舍"，是"双赢"

降氮使三件制的使用成为可能（氮气成本不再是障碍）

三件制使降氮的可靠性得到保障（每天验证系统正常）

两者结合 → 成本大幅降低 + 可靠性大幅提升

这是"双赢"不是"取舍"——不是"省钱但降低质量"，而是"省钱同时提升质量"。

第九章 战略意义：降本增效与供应链安全

9.1 降本+增效：双重跃迁

本方案的核心战略价值在于实现了"降本"与"增效"的双重跃迁：

- **降本**：氦气成本降80%-90%，电池包产线年省约80万元
- **增效**：三件制每日验证使检测可靠性大幅提升——不漏检、不错检、数据可追溯

这两件事不是简单的"1+1=2"，而是**相互增强**：降氦使三件制的使用成为可能（氦气成本不再是障碍），三件制使降氦的可靠性得到保障（每天验证系统正常）。

9.2 供应链安全：从"求人买"到"人家求你买"

整个工业氦检行业，氦气使用量降到原来的1%-20%完全没问题，平均降低10倍（到10%）更是毫无问题。这是基于以下事实的判断：

- **超高速产线（3-5秒/件，电池包20-30ppm）**：余量仍然很大，降氦后本底还会进一步降低
- **常规产线（几十秒/件）**：更是毫无问题，1%-5%He通常足够
- **精密产线（ 10^{-6} 量级）**：10%-20%He即可，仍比纯氦降低80%-90%

当工业氦检的氦气使用量降到原来的10%，氦气危机不复存在。这不是"减少需求"，而是"重构需求弹性"：

- 同等进口量可以支撑10倍以上的工业检测需求（若平均降至10%）
- 国产氦气的有限产能突然变得"够用"
- 战略储备氦气的工业保障周期大幅延长
- 中国在氦气谈判中的议价能力显著增强

这相当于在氦气供应链上实施了一次"需求侧革命"——不是增加供给，而是把需求压缩到可控范围。

9.3 从"追赶"到"定义标准"

当降氦方案在中国工业大规模部署后，中国将成为**低浓度氦气检漏标准的定义者**。其他国家想解决氦气依赖问题时，会参考中国的技术规范和最佳实践。

这就从"卖产品"升级到了"定义游戏规则"——卖产品赚几千块，定义标准影响整个行业。在国产工业从"追赶"转向"领跑"的关键阶段，"定义新标准"可能比"优化旧指标"更具战略价值。

第十章 适用条件、风险边界与诚实披露

本白皮书坚持技术诚实原则。以下对方案的适用边界和潜在风险进行充分披露。

10.1 检测方法的适用性

表 10-1 各检测方法的适用性评估

方法	适用性	核心要求	备注
真空法	最充分论证	腔体密封、抽速足够	降He有双重收益
正压累积法	充分论证	累积腔封闭、时间控制	与真空法本质类似
吸枪法	可行但门槛更高	吸入流量必须恒定（MFC/恒流泵）	降He不降低噪音
压降/压差法	不适用	使用空气为介质	不存在示踪浓度概念

10.2 温度影响

RMI-MTC™单通道毛细管标准漏孔温度系数0.1%/°C，一般工业环境（±2°C）下漏率变化±0.2%，可忽略。但工件本身的漏率可能受温度影响（聚合物密封件热胀冷缩等），建议在温度波动>10°C的环境中进行温度敏感性测试。

10.3 行业标准协调

某些行业（航空航天GJB、医疗器械ISO 13482）强制要求绝对漏率数值报告。建议采用"双轨制"：日常产线检测使用低浓度三件制，型式试验或客户验收时保留纯氦法能力出具报告。

10.4 浓度波动控制

"同源"假设要求混气罐内氦气分压稳定。建议措施：混气罐容积按>200倍单次消耗量设计；安装在线浓度监测；多工位产线考虑分区供气；选择2家以上混气供应商。

总结性风险披露

本方案在 10^{-4} ~ 10^{-5} mbar·L/s量级（真空法/正压累积法）技术上成熟可靠，在 10^{-6} 量级经谨慎验证后具备可行性。 10^{-7} 及以下量级不在本白皮书主张范围内。方案的可靠性依赖于RMI-MTC™单通道毛细管标准漏孔的性能指标（公差±10%以内、温度系数0.1%/°C）。任何检测方法的变更都需要经过充分的三件制验证和长期产线数据积累。

结语：物理学不仅存在，而且美妙

刘慈欣在《三体》的结尾写道："物理学不仅存在，而且美妙。"

当汪淼透过3K眼镜看到宇宙微波背景辐射的规律闪烁时，他理解了：那些看似打破物理规律的现象，背后恰恰是更深层的物理规律在运作。神秘不是因为规律不存在，而是因为我们的认知还没有到达。

检漏行业正在经历同样的认知跃迁。

数十年来，"纯氦不可替代"如同"宇宙闪烁"般不可动摇。2026年的氦气危机让许多人感到"检漏技术不存在了"——没有纯氦，质量如何保证？

但当我们回归物理第一性——**气密检测的本质是比较等效泄漏孔的大小**——一切就变得清晰了：

- 气体（100%He、1%He、Air、N₂）只是示踪媒介，不是目的
- 读值（mbar·L/s）只是手段产生的响应数字，不是物理真实
- 唯一不变的是工件上的等效泄漏孔径 d_0
- 只要区分度足够，任何气体浓度都可以工作

更重要的是，我们终于理解了什么才是"可靠"的真正含义：

本白皮书最重要的认知遗产

纯氦本身不能保证检测可靠性。三件制验证才是。

一个没有三件验证的纯氦产线，可能在"盲飞"——仪器漂移、环境污染、标准漏孔老化，所有这些都会导致批量漏检或错检，而操作人员一无所知。

一个每天做三件验证的1%He产线，检测精度和可靠性与纯氦完全相同——不会错检，不会漏检。因为三件验证每天都在确认：系统在控。

三件制不是降氦的附属品。它是气密检测的黄金标准——无论用100%He还是1%He。

三件制（ $Q_0 + OK + NG$ ）让我们每天"校秤"，确保系统可靠。降浓度迭代法让我们科学找到最优浓度，而不是拍脑袋。两者结合，实现了**降本+增效的双重跃迁**——氦气成本降80%-90%（电池包产线年省约80万元），检测可靠性反而大幅提升。

这不仅是对被迫降氮的80%/60%厂家的回应——告诉他们“你们的焦虑不是来自浓度，而是来自缺乏验证”——更是对全行业的提醒：**纯氮信仰该放下了，三件制验证该拿起来了。**

当工业氮检的氮气使用量降到原来的10%，氮气危机不复存在。这不仅是技术的胜利，更是**物理第一性的胜利**——回归本质，神秘就变成了常识。

物理学不仅存在，而且美妙。

参考文献

- [] ISO 20485:2017, *Non-destructive testing — Calibration of leak artifacts of known leak rate*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [] ASTM E498/E498M-21, *Standard Test Methods for Leaks Using the Mass Spectrometer Leak Detector in the Inside-out Testing Mode*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [] MIL-STD-883K, *Test Methods and Procedures for Microelectronics*. Method 1014.14, Seal. US Department of Defense.
- [] O'Hanlon, J. F. (2003). *A User's Guide to Vacuum Technology* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- [] Roth, A. (1990). *Vacuum Sealing Techniques*. Springer.
- [] USGS Mineral Commodity Summaries 2026, *Helium*. U.S. Geological Survey, Reston, VA.
- [] Qatar Energy, *Statement on Ras Laffan Industrial City Facilities Repair Timeline*, March 2026.
- [] 中国海关总署, 2025年氦气进口统计数据.
- [] Setina, J. (1999). New practical reference leak with a glass permeation element. *Vacuum*, 53(1-2), 137-141.
- [] Lafferty, J. M. (1972). Review of physical principles underlying the atomistic generation of calibration leaks. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 9(4), 1222-1226.
- [] 刘慈欣 (2008). 三体. 重庆出版社.