

有源标准漏孔年衰减率 计算模型、核验方法与设计准则

——带气室标准漏孔的衰减物理、行业乱象辨析与采购核验指南

编写单位 睿米 (RealMeter Instruments)

发布时间 2026 年 9 月

适用范围 有源 (带气室) 压缩气体标准漏孔

目 录

前言	3
1 范围	3
2 规范性引用文件	3
3 术语和定义	4
4 气室衰减的物理模型	5
5 典型规格的矛盾性分析（算例）	7
6 行业乱象分析	9
7 设计准则	12
8 采购方核验方法	13
9 规格自治性示例	14
10 结论	15
附录 A（规范性附录）公式汇总与反解	16
附录 B（资料性附录）年衰减率速查表	16
参考文献	17
利益声明	17

前言

年衰减率是有源（带气室）标准漏孔的核心指标之一：它决定漏率值在两次校准之间的有效漂移，直接关联检漏系统校准结果的可信区间。与漏率、公差、不确定度不同，年衰减率无法由校准机构在交付前实测给出——它由气室容积、充气压力、漏率与使用工况按气体守恒关系唯一确定，是一项“由设计参数保证”的指标。

当前行业中，年衰减率的标注存在较普遍的失实现象：部分厂家的产品目录对跨越数个量级的漏孔统一标注同一年衰减率（常见 3% 或 5%），规格书中不同时给出气室容积、充气压力与使用工况，使该指标无法核验。本白皮书的目的在于：

- 1) 给出有源标准漏孔年衰减率的严格计算模型，使任何具备中学代数基础的读者均可独立复算；
- 2) 给出判定规格书自治性的核验方法（单支漏孔约 30 秒可完成）；
- 3) 给出设计侧使年衰减率达标的三条技术路线及相应的规格书声明格式。

本白皮书全部计算过程公开，不依赖任何厂家的声明参数。

1 范围

本白皮书适用于有源（带气室）压缩气体标准漏孔，即出厂时将一定量示踪气体封存在自带气室内、依靠气室压力驱动的标准漏孔。

本白皮书不适用于：无气室的渗透型（如石英渗氦）漏孔；外接气源、自身不储存示踪气体的无源漏孔。

本白皮书涉及的算例以氦气为示踪气体，模型与结论对氢气、氙气等其他示踪气体同样适用（仅需按气体种类确定漏孔元件的流态归属）。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的：

- JJF 1833-2020 真空氦漏孔校准规范
- JJF 1001-2011 通用计量术语及定义
- GB/T 3163-2007 真空技术 术语

3 术语和定义

3.1 标准漏孔 calibrated leak

在规定条件下提供已知、稳定漏率的器件，用于检漏仪及检漏系统的校准与期间核查。

【条文说明】本白皮书所称标准漏孔，其漏率值应有明确的规定条件，至少包括气体种类、入口压力、出口压力（真空或大气）与温度。

3.2 有源（带气室）标准漏孔

自带密封气室、以气室内储存的示踪气体为工质的标准漏孔。

【条文说明】“有源”指漏孔自身携带气源。气室是衰减问题的来源：气体用一点少一点，气室压力随之下降，漏率随之下降。

3.3 漏率 leak rate

在规定条件下，单位时间内通过漏孔元件的气体量，单位为 $\text{mbar}\cdot\text{L/s}$ 或 $\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ （ $1 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s} = 10 \text{ mbar}\cdot\text{L/s}$ ）。

3.4 气室储量 reservoir capacity

气室容积 V 与充气绝压 P 的乘积，量纲为压力 $\times$ 体积，常用 $\text{mbar}\cdot\text{L}$ 或 $\text{bar}\cdot\text{L}$ 表示（ $1 \text{ bar}\cdot\text{L} = 1000 \text{ mbar}\cdot\text{L}$ ）。

【条文说明】气室储量正比于气室内封存的示踪气体总量，是漏孔的“可用气体总量”。计算时压力必须使用绝压；规格书通常给出表压，绝压 = 表压 + 1 atm。

3.5 年衰减率 annual decay rate

漏率在一年时间内下降的相对百分比。

【条文说明】年衰减率不是独立的制造质量指标，而是气室储量、漏率与使用工况的导出量（见第4章）。它与漏率随温度的可逆变化（温度系数）是两个不同概念，不应混同。

3.6 分子流与粘滞流 molecular flow / viscous flow

气体通过漏孔元件的两种极限流态。分子流（及渗透型运输）下漏率与入口压力成正比， $Q \propto P$ ；粘滞流（毛细管连续流）下漏率与进、出口压力平方差成正比，出口为真空时 $Q \propto P^2$ 。

【条文说明】 10^{-5} mbar·L/s 量级及以上的带气室漏孔，元件多为毛细管型，流态接近粘滞流；渗透型与微细通道在低压力下可接近分子流。实际元件常处于过渡流态，漏率中同时含正比于 P 与正比于 P^2 的成分，其衰减介于两种模型计算值之间（见第 9 章实物算例）。本白皮书按两种模型分别计算并从严取值（见 4.3）。

3.7 阀门呆体积 valve dead volume

阀门关闭件与漏孔元件之间封存的容积。

【条文说明】每次开关阀门，呆体积内的高压气体均被消耗（开启瞬间被真空抽走，或在非校准时段经漏孔元件泄出）。常规针阀、截止阀的呆体积约为 0.1~1 cc；专为大漏率漏孔设计的零体积阀可小于 0.1 μ L。呆体积损耗是大漏率档漏孔不可忽略的第二损耗源（见 6.4）。

3.8 使用工况 usage profile

漏孔处于导通状态的时间统计，通常以“年使用次数 $\times$ 单次平均时长”表示。

【条文说明】对配置截止阀门的产品，年衰减率只在阀门导通（含呆体积泄放）的时间内累积。不带使用工况的衰减声明，对带阀产品没有意义。

4 气室衰减的物理模型

4.1 守恒方程

设气室容积为 V (L)，气室绝压为 P (mbar)，漏孔漏率为 $Q(P)$ (mbar·L/s)。气室内气体量的变化满足：

$$V \frac{dP}{dt} = -Q(P) \quad (4-1)$$

定义无量纲衰减参数 λ ，其物理意义为“一年（或一个统计工况周期）的漏气量与气室储量之比”：

$$\lambda = \frac{Q_0 \cdot t}{P_0 \cdot V} \quad (4-2)$$

式中 Q_0 为初始漏率， P_0 为初始绝压， t 为统计时长。全年持续导通时 $t = 3.156 \times 10^7$ s；带阀产品时 t 为年累计导通时间。

有源标准漏孔的结构与损耗路径如图 1 所示。

有源（带气室）标准漏孔的结构与损耗路径

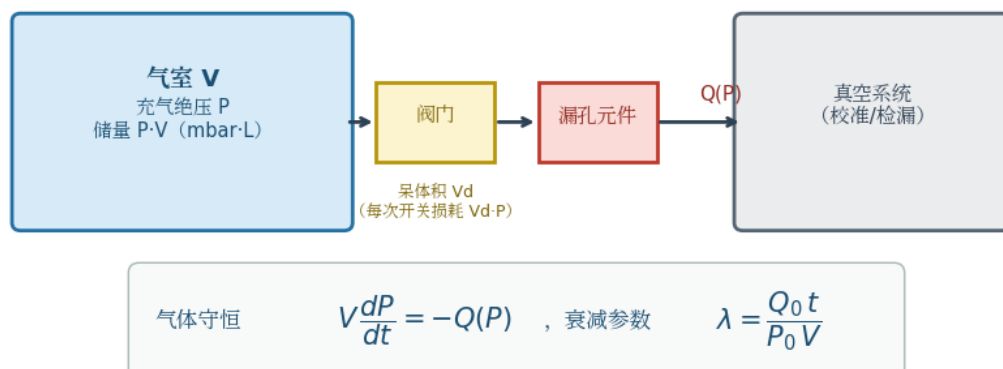


图1 有源（带气室）标准漏孔的结构与损耗路径

4.2 两种流态下的衰减函数

分子流 / 渗透型（模型一）： $Q \propto P$ ，压力与漏率按指数规律衰减， $P(t) = P_0 e^{-\lambda t}$ ，年衰减率

$$\delta_1 = 1 - e^{-\lambda} \quad (4-3)$$

粘滞流 / 毛细管型（模型二）： $Q \propto P^2$ ，压力按双曲规律衰减， $P(t) = P_0 / (1 + \lambda t)$ ；漏率正比于压力平方，衰减快于压力本身，年衰减率

$$\delta_2 = 1 - (1 + \lambda)^{-2} \quad (4-4)$$

4.3 从严取值原则

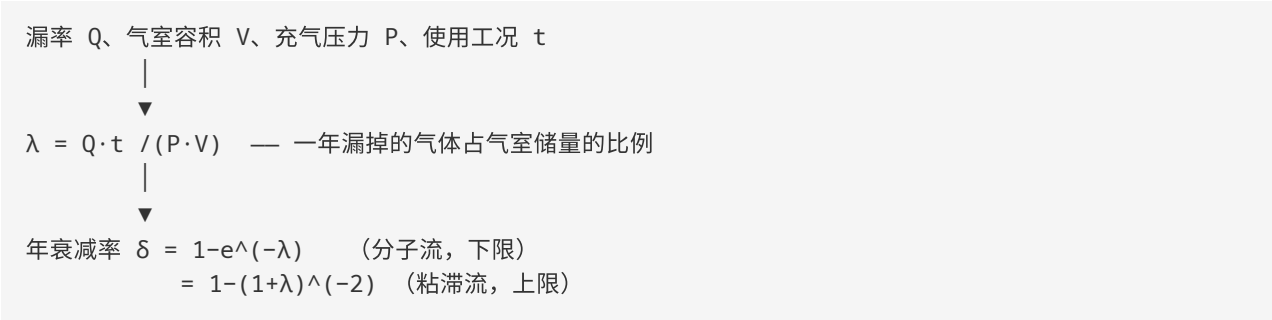
判定一项衰减承诺在物理上是否可能成立，取两种模型计算结果的较小值作为该结构参数下的**物理最小衰减**：

$$\delta_{\min} = \min(\delta_1, \delta_2) \quad (4-5)$$

若 $\delta_{\min}$ 已大于承诺值，则承诺不成立。当 $\lambda < 1$ 时（工程上绝大多数情况）模型一给出下限；小 λ 时有简便近似 $\delta_1 \approx \lambda$ 、 $\delta_2 \approx 2\lambda$ 。

4.4 参数锁定关系

由 4.1~4.3，漏率 Q 、气室参数 $P \cdot V$ 、使用工况 t 与年衰减率 δ 被同一条守恒方程锁定：任意三者确定后，第四个量没有自由度。规格书中“漏率”与“年衰减率”不是两个可以分别填写的栏目；在气室参数相同的产品系列中， δ 与 Q 严格成正比。



5 典型规格的矛盾性分析（算例）

5.1 规格描述（脱敏）

某采购规格同一张表中相邻两行：

- 规格行 A：瓶容积 200 mL；充 99.999% 氦气；瓶内压力 2.5~3 MPa（表压）；漏率 5×10^{-5} mbar·L/s；年衰减率不高于 5%；出口 KF16，附带开关针阀；附第三方检测证书。
- 规格行 B：气室参数相同；漏率 9.2×10^{-8} mbar·L/s；年衰减率不高于 5%。

5.2 规格行 A 核验

取充压上限 3 MPa 表压，绝压约 31 bar，气室储量 $P_0V = 31000 \times 0.2 = 6200$ mbar·L。年漏气量（按初始漏率） $Q_0t = 5 \times 10^{-5} \times 3.156 \times 10^7 = 1578$ mbar·L，故

$$\lambda = \frac{1578}{6200} = 0.254$$

(5-1)

即一年漏掉的气体量达气室储量的四分之一。两种模型的年衰减率：

表 1 规格行 A 的年衰减率计算结果（ 5×10^{-5} mbar·L/s，200 mL）

充气压力（表压）	λ	模型一（分子流）	模型二（粘滞流）
3.0 MPa	0.254	22.5%	36.4%
2.5 MPa	0.303	26.2%	41.1%

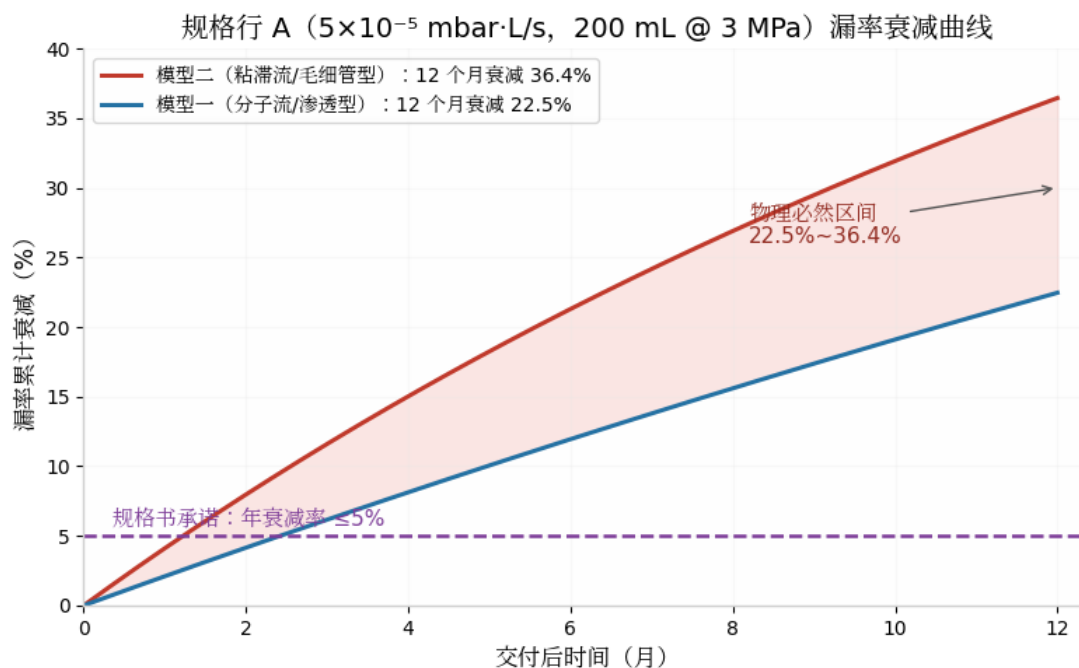


图2 规格行 A 漏率衰减曲线：阴影为两模型之间的物理必然区间，与承诺值 $\leq 5\%$ （虚线）的差距随时间单调扩大

判定：物理最小衰减 $\delta_{\min} = 22.5\%$ ，为承诺值 5% 的 4 倍以上；该量级漏孔的元件绝大多数为毛细管型，实际衰减更接近 36%~41% 区间。规格行 A 自相矛盾。换算为使用影响：交付后头几个月，漏率每月漂移约 2%~5%。

反解设计约束：要满足 $\delta \leq 5\%$ （从严口径 $\lambda \leq 2.6\%$ ），该 200 mL / 3 MPa 气室允许的最大漏率为 5.1×10^{-6} mbar·L/s——规格值 5×10^{-5} 超出约 10 倍。即：若该气室年衰减确为 $\leq 5\%$ ，则漏率必不是 5×10^{-5} ；若漏率确为 5×10^{-5} ，则衰减必不是 5%。

5.3 规格行 B 核验

年漏气量 $9.2 \times 10^{-8} \times 3.156 \times 10^7 = 2.9$ mbar·L， $\lambda \approx 0.05\%$ ，两种模型的年衰减率均在 0.05%~0.11%。规格行 B 自治，且远优于承诺值。

5.4 算例结论

同一气室、同一“ $\leq 5\%$ ”承诺，对 9.2×10^{-8} 档成立、对 5×10^{-5} 档不成立。这说明“5%”并非按该型号气室参数计算得出，而是从小漏率档的通行经验平移而来——年衰减率未被计算，是此类规格失实的直接原因。

6 行业乱象分析

6.1 乱象一：跨量级统一标注年衰减率

现象：部分厂家的产品目录对覆盖 $10^{-3}\sim 10^{-12}$ mbar·L/s（跨 9 个量级）的全系漏孔统一标注同一年衰减率，常见数值为 3% 或 5%。

两个数字的出处："3%"出自 JJF 1833-2020 条款 6.2.1^[1]——该条款要求**计量标准装置所用标准漏孔**的年稳定性不大于 3%，这是对建标场景的门槛要求，依靠选型设计与每年复校共同保证，并非任何单支产品的天然属性；"5%"出自教科书与百科类资料中"分子流条件下年变化率小于 5%"的一般性描述^[4]，该描述以分子流为限定条件且未指明任何气室参数，不构成具体产品的指标。

物理判据：由 4.4，气室参数相近的产品系列中 δ 与 Q 成正比。跨量级统一标注成立，当且仅当各型号气室储量 $P\cdot V$ 与漏率 Q 严格同比缩放；而实际产品的气室容积集中于 50~1000 mL 数档、充气压力集中于 1~10 MPa，不满足该条件。以典型气室 $P\cdot V=6.2$ bar·L（200 mL @ 3 MPa 表压）为例，各漏率档的物理衰减区间如下：

表 2 统一标注的反证：同一气室（ $P\cdot V=6.2$ bar·L）各漏率档的物理年衰减

漏率 Q (mbar·L/s)	物理最小衰减 $\delta_{\min}$	物理最大衰减 $\delta_{\max}$	统一标注 5% 是否可能成立
1×10^{-8}	0.005%	0.010%	成立（裕量 3 个量级）
1×10^{-6}	0.51%	1.01%	成立
1×10^{-5}	4.96%	9.45%	贴线~不成立
5×10^{-5}	22.5%	36.4%	不成立（超 4~7 倍）
1×10^{-4}	39.9%	56.1%	不成立（超 8~11 倍）

统一标注 3% 时，该气室允许的最大漏率仅 3.0×10^{-6} mbar·L/s；统一标注 5% 时为 5.1×10^{-6} mbar·L/s。凡目录中漏率大于此阈值而衰减标注不变者，其标注均未经计算。图 3 给出直观判读。

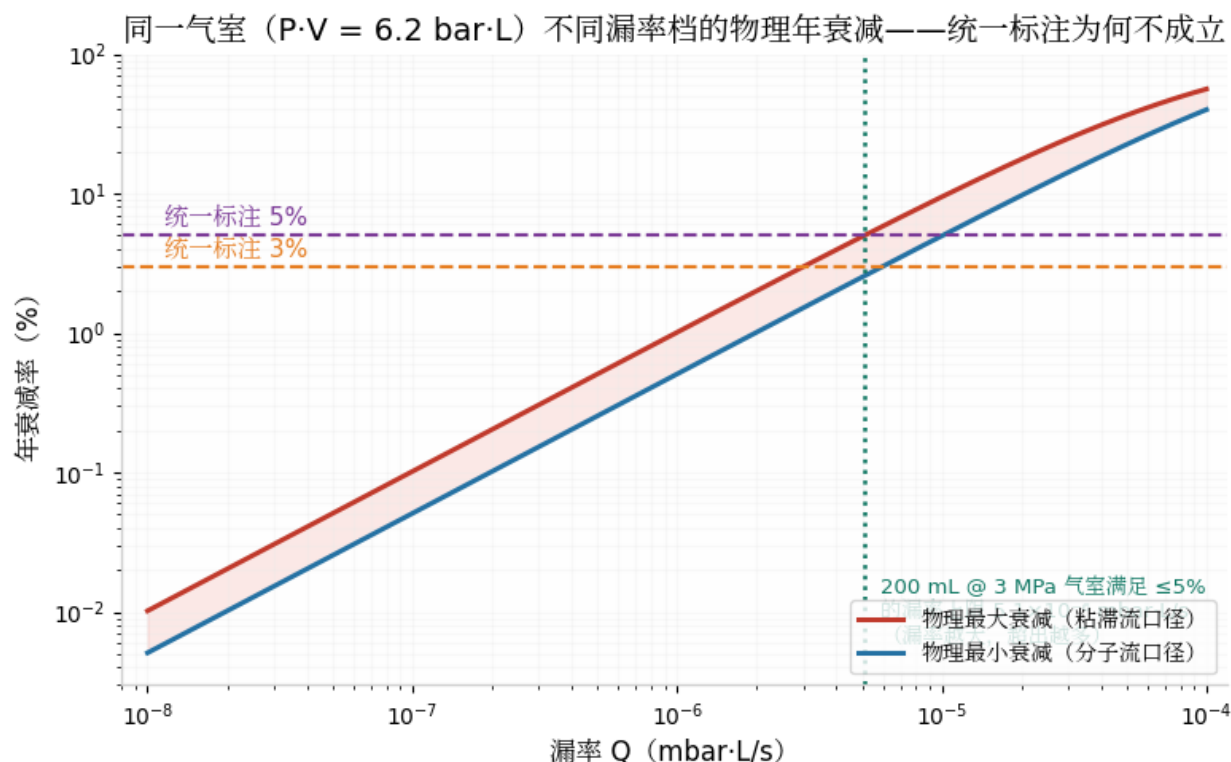


图3 同一气室 ($P \cdot V = 6.2 \text{ bar} \cdot \text{L}$) 各漏率档的物理年衰减区间：漏率越过 $5.1 \times 10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{L/s}$ (点线) 后，“统一标注 5%”在物理上不再可能成立

【条文说明】若厂家能出示逐型号的气室设计计算书或长期稳定性实测数据，统一标注亦可能成立（例如各型号气室按漏率同比配置）；问题的要害在于规格书中未给出任何支持性参数，客户无从核对。

6.2 乱象二：衰减率与气室参数脱钩

现象：规格书只写漏率与衰减率两个数，不给气室容积、充气压力与使用工况。

物理判据：由 4.4，缺任一参数，衰减率无法核验。三个参数缺位本身，即表明该衰减率不可能是计算或实测得出的——否则参数必然齐备。

6.3 乱象三：以校准证书替代衰减指标

现象：规格表将“附第三方检测证书（第三方具有检测资质）”与“年衰减率不高于 X%”并列，以证书为衰减指标背书。

物理判据：校准证书给出的是交付时刻的漏率值、公差、不确定度与溯源信息；没有任何机构会在交付前实测一年再发证。年衰减率由气室参数按守恒方程唯一决定，是“设计算出来、结构保证”的指标，不是“检测检出来”的指标。证书有效性与衰减标注失实可以同时存在，二者不能互相覆盖。

6.4 乱象四：阀门呆体体积损耗未计入

物理判据：常规针阀、截止阀呆体约 0.1~1 cc，以 3 MPa 表压计，每次开关损耗 3~31 mbar·L；而漏孔本体工作 10 min 仅耗气 0.03 mbar·L（以 5×10^{-5} 档计），单次开关损耗为其 100~1000 倍。按每个工作日开关一次（250 次/年）估算，呆体年损耗可达气室储量的 12%~125%。关闭阀门能将自然衰减压至近零，但呆体损耗可能取而代之成为主要损耗源；不计入该项的衰减声明不完整。

6.5 乱象五：无使用工况的衰减声明

现象：带阀产品标注“年衰减率不高于 X%”，但不注明年使用次数与单次时长。

物理判据：对带阀产品，衰减只在导通时间（含呆体泄放）内累积，同一支漏孔在“每天 5 min”与“每天 10 min”两种工况下年衰减相差一倍。不带工况的衰减声明不可核验，也不可比较。

6.6 乱象六：参数齐全而数值互斥（实物标签算例）

现象：某电商平台在售的一款带气室标准漏孔（型号与编号已脱敏），瓶体标注容积 1000 mL、额定压力 20 MPa；实物标签标注漏率 3.3×10^{-6} Pa·m³/s（即 3.3×10^{-5} mbar·L/s，公差 $\pm 15\%$ ）、冲氮压力 1.5 MPa、年衰减率 <3%、测试温度 23 °C、温度系数 <0.5%/°C，并给出校准日期与出厂编号。与 6.2 的参数缺失相反，本例标签参数齐全（图 4）。



图 4 某电商平台在售标准漏孔的实物标签（型号、编号、条码、二维码及瓶体序列号已像素化脱敏）：漏率 3.3×10^{-6} Pa·m³/s（ $\pm 15\%$ ）、冲氮压力 1.5 MPa、年衰减率 <3% 同时印在一张标签上；瓶体刻字可见容积 1000 mL、额定压力 20 MPa

物理判据：气室储量 $P \cdot V = (1.5 \text{ MPa 表压} + 1 \text{ atm}) \times 1 \text{ L} \approx 1.6 \times 10^4 \text{ mbar} \cdot \text{L}$ （16 bar·L）；年漏气量 = $3.3 \times 10^{-5} \times 3.156 \times 10^7 \approx 1.0 \times 10^3 \text{ mbar} \cdot \text{L}$ ； $\lambda \approx 0.065$ ，物理最小衰减 $\delta_{\min} = 6.3\%$ （模型二为 11.8%）。标签所印 "<3%" 被其自身标注参数的物理最小值超过 1 倍以上——四个数两两可核，合在一起互斥。

要点分析：参数齐全而彼此矛盾，说明标注环节缺少最基本的自治性核对。值得注意的是，瓶体额定压力 20 MPa，若实际充压达到 3.3 MPa（模型一口径）至 6.7 MPa（从严口径）以上，"<3%" 本可成立；亦不能排除 "1.5 MPa" 系 "15 MPa" 的标注笔误（若实充 15 MPa，年衰减约 0.7%~1.4%，满足 <3%）。但采购方无法从标签分辨充压不足与标注错误——当一件实物的四个标注数互斥时，客户无法判断其中哪一个数是真的。这正是把核验公式（8.2）纳入验收流程的现实意义。

7 设计准则

7.1 设计不等式

给定目标年衰减率 δ ，从严（粘滞流口径）允许的最大无量纲参数为

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{\sqrt{1-\delta}} - 1 \approx \frac{\delta}{2} \tag{7-1}$$

气室设计应满足

$$P \cdot V \geq \frac{Q \cdot t}{\lambda_{\max}} \tag{7-2}$$

$\delta=5\%$ 、 2% 、 1% 对应的 $\lambda_{\max}$ 分别为 2.6%、1.0%、0.5%。

7.2 气室储量速查表（全年持续导通，t 取一年）

表 3 不同漏率档达标所需的气室储量 $P \cdot V$ （从严口径）

漏率 Q (mbar·L/s)	$\leq 5\%$ /年需 $P \cdot V$	$\leq 2\%$ /年需 $P \cdot V$	$\leq 1\%$ /年需 $P \cdot V$
1×10^{-6}	1.2 bar·L	3.1 bar·L	6.3 bar·L
1×10^{-5}	12 bar·L	31 bar·L	63 bar·L
5×10^{-5}	61 bar·L	155 bar·L	313 bar·L
1×10^{-4}	122 bar·L	311 bar·L	626 bar·L
1×10^{-3}	1215 bar·L	3108 bar·L	6264 bar·L

7.3 三条技术路线

大漏率档（ $\geq 1 \times 10^{-5}$ mbar·L/s）要使年衰减率进入可承诺区间，工程上只有三条正路：

1) **提高气室储量 $P \cdot V$** ——大容积或高充气压力。以 5×10^{-5} 档、 $\delta \leq 5\%$ /年为例，需 $P \cdot V \geq 61$ bar·L，即 1 L 气室充 6 MPa，或 2 L 充 3 MPa，或 200 mL 气室充至约 30 MPa。充气压力是实现难度最高、也最有效的参数。

2) **零体积阀 + 按使用工况声明衰减**——将自然衰减压至近零，衰减只在使用时间内累积，规格书注明“年使用 N 次 $\times t$ min”条件下的使用衰减；前提是将阀门呆体积做到 $0.1\ \mu\text{L}$ 量级，使单次开关损耗可忽略（见 3.7）。

3) **可反复充气 + 明确复校周期**——承认衰减、给出补气与复校节奏，保证用户手中的漏率值持续有效。JJF 1833-2020 建议标准漏孔复校周期为 1 年^[1]。

7.4 衰减声明的规范格式

一条可核验的衰减声明应同时包含六项：漏率 Q （含公差）、气室容积 V 、充气压力 P 、阀门类型与呆体积（如有）、使用工况（年使用次数 $\times$ 单次时长）、年衰减率 δ （区分自然衰减与使用衰减）。示例（符合性格式）：

漏率 $4\sim6\times10^{-5}\ \text{mbar}\cdot\text{L/s}$ （公差 $\pm10\%$ ）；气室 $160\ \text{mL}$ ，可反复充气；充气压力 $>5\ \text{MPa}$ ；配零体积手动阀（呆体积 $<0.1\ \mu\text{L}$ ）；年衰减约 1.3% （年使用 500 次，平均 $30\ \text{min/次}$ ）。

8 采购方核验方法

8.1 参数齐全性检查

要求规格书提供 7.4 所列六项。缺任何一项，衰减承诺无法核验，应要求补充；无法补充的，该承诺不应作为验收依据。

8.2 30 秒核验公式

计算

$$\lambda = \frac{Q \cdot t}{P \cdot V} \quad (t = 3.156 \times 10^7\ \text{s/年}) \quad (8-1)$$

物理最小衰减 $\delta_{\min} = 1 - e^{-\lambda}$ （ $\lambda < 1$ 时可直接取 $\delta_{\min} \approx \lambda$ ）。若 $\delta_{\min}$ 大于承诺值，规格自相矛盾，应要求厂家出示该型号的气室设计计算书或长期稳定性实测数据。

8.3 大漏率档的重点核查

漏率 $\geq 1 \times 10^{-5}\ \text{mbar}\cdot\text{L/s}$ 的产品，对照 7.2 速查表核查 $P \cdot V$ 是否达标；不达标的，应属于零体积阀方案（呆体积 $\leq 0.1\ \mu\text{L}$ 量级、带工况声明）或可反复充气方案（带补气与复校安排），否则承诺不可信。

8.4 证书的核查要点

第三方校准证书核查三点：校准值与公差、不确定度与溯源资质（如 CNAS 认可或国家计量机构溯源）、校准日期。证书不覆盖年衰减率；衰减率的核查只能依据 8.2 的计算或厂家提供的设计/实测证据。

8.5 复校节奏

漏率 $\leq 1 \times 10^{-6}$ 档：复校周期 1~2 年；漏率 $\geq 1 \times 10^{-5}$ 档：建议每年复校，或按使用次数管理。气室储量小、年衰减大的结构，不建议作为长期工作标准使用。

9 规格自治性示例

以下选取睿米（RealMeter Instruments）官网公开规格与实物标签共六组，按本白皮书第 4 章模型独立复算（复算口径：模型一 / 模型二）：

表 4 睿米公开规格的自治性复算（出处见参考文献 [5]~[9]）

规格	漏率 (mbar·L/s)	气室 / 充压	公开声明衰减	本白皮书复算
TLS-12/13P 有源 He 漏孔 [5]	$7 \sim 9 \times 10^{-12}$	110 mL / 0.2 MPa	~0.1%/年	≈0.0001%
RM51L-710XX 检漏仪内置漏孔 [6]	$1 \sim 3.9 \times 10^{-7}$	30 mL / 1.6 MPa	~1.5~2.5%/年	0.6~2.4% / 1.2~4.7%
TLS(Ar)-5/6P 有源 Ar 漏孔 [7]	$4 \sim 6 \times 10^{-5}$	160 mL / >5 MPa, 500×30 min/年	~1.3%/年	0.55% / 1.09%
TLS-2/3P + RMI-PSOZV 零体积气动阀 [8]	5.28×10^{-3}	1000 mL / 100 bar, 365×2×5 min/年	<2.5%/年（自然衰减 <0.1%）	1.1% / 2.3%
同上，365×2×10 min/年	5.28×10^{-3}	同上	<5.0%/年	2.3% / 4.4%
TLS-5P 有源 He 漏孔（实物标签，图 5）	1.10×10^{-5} Pa·m³/s (= 1.10×10^{-4})	1000 mL / 100 bar	6.6%/年（实物标签标注）	3.4% / 6.5%

其中 TLS-5P 一组为实物标签算例（图 5）：标签标注漏率 1.10×10^{-5} Pa·m³/s（公差 ±3.8%）、充气压力 100 bar、年衰减率 6.6%、温度系数 0.1%/°C、校准日期 2026/06/24，并给出序列号与 CNAS 证书编号（CL00092637628_E），且明确提示“不使用时请关闭阀门”。该型号气室容积 1000 mL，正向复算 $\lambda=3.44\%$ ，模型一衰减 3.4%、模型二（粘滞流口径）衰减 6.5%——标签标注值 6.6% 取自两模型中的从严上限。进一步地，RMI-MTC™ 微通道元件实际处于过渡流态、漏率中含分子流成分，真实年衰减介

于 3.4%~6.5% 之间（以分子流成分占初漏率一半计，约 5.0%），低于标注值——该标签不仅按从严口径标注，而且留有裕量。该标签值得注意的有三点：其一，年衰减率按气室参数如实计算并印出——即便这个数是 6.6%，高于行业惯用的 3%/5% 宣传口径——标注值可由标注参数复算得出，这正是“可核验”的含义；其二，与 6.6 节实物算例对照，同为大漏率档产品，一支按从严口径如实标注 6.6%，一支在互斥参数旁标注 <3%，差别只在标注环节是否经过计算；其三，按 7.4 的六参数格式衡量，该标签未印刷气室容积（实际为 1000 mL），建议后续标签版本增印——本白皮书的核验标准对编写单位自家产品同样适用。



图 5 睿米（RealMeter Instruments）TLS-5P 有源氦气标准漏孔实物标签：年衰减率 6.6%/年为按气室参数（1000 mL @ 100 bar）取两模型从严上限的标注值；元件处于过渡流态、含分子流成分，实际衰减介于 3.4%~6.5% 之间，低于标注值

六组声明值均落在两模型复算区间内，其中 TLS-5P 按从严上限标注且留有裕量，规格自洽。另以 JJF 1833-2020 建标场景为例：规范要求标准装置用漏孔年稳定性不大于 3%（条款 6.2.1）^[1]，文献 [9] 报告的 6 支漏孔组（覆盖 10^{-5} ~ 10^{-10} Pa·m³/s 六个数量级）实测年衰减 <0.1%~1.0%，优于规范要求一个量级以上^[9]——3% 的规范门槛是通过设计与复校达成的结果，而不是可以脱离气室参数统一标注的常数。

10 结论

- 1) 有源标准漏孔的年衰减率由气室储量、漏率与使用工况按气体守恒方程唯一确定，可由任何人独立复算核验；它不是可脱离气室参数单独标注的栏目。
- 2) 对 200 mL / 2.5~3 MPa 气室配 5×10^{-5} mbar·L/s 漏率的典型规格，物理最小年衰减为 22.5%，实际（毛细管流态）为 36%~41%，"年衰减率不高于 5%"在物理上不成立。
- 3) 行业中跨量级统一标注 3% 或 5% 的做法，分别源于对 JJF 1833-2020 条款 6.2.1 与教科书一般性描

述的误用；统一标注在数学上等价于声明全系列气室储量与漏率严格同比缩放，公开规格不支持这一点。实物标签算例（6.6）进一步显示，即使气室参数印刷齐全，标注值之间仍可能互斥，标注环节的自洽性核对在部分厂家尚未建立。

4) 大漏率档的衰减治理只有三条正路：提高气室储量（高压化或大容积）、零体积阀加工况化声明、可反复充气加明确复校周期。三条路都要求规格书给出完整的气室与工况参数。

5) 采购方可在 30 秒内完成规格自洽性核验（8.2）；核验不通过的，应要求厂家出示设计计算书或长期实测数据。

附录 A（规范性附录）公式汇总与反解

守恒方程：

$$V \frac{dP}{dt} = -Q(P) \quad (\text{A-1})$$

无量纲衰减参数：

$$\lambda = \frac{Q_0 t}{P_0 V} \quad (\text{A-2})$$

年衰减率：

- 模型一（分子流 / 渗透型， $Q \propto P$ ）： $\delta_1 = 1 - e^{-\lambda}$
- 模型二（粘滞流 / 毛细管型， $Q \propto P^2$ ）： $\delta_2 = 1 - (1 + \lambda)^{-2}$
- 从严判定值： $\delta_{\min} = \min(\delta_1, \delta_2)$ ； $\lambda < 1$ 时 $\delta_{\min} = \delta_1$
- 小 λ 近似： $\delta_1 \approx \lambda$ ， $\delta_2 \approx 2\lambda$

设计反解：

$$P \cdot V \geq \frac{Q t}{\lambda_{\max}}, \quad \lambda_{\max} = \frac{1}{\sqrt{1 - \delta}} - 1 \quad (\text{A-3})$$

表 A.1 目标年衰减率对应的 $\lambda_{\max}$ （从严口径）

目标 δ	5%	2%	1%
$\lambda_{\max}$	2.60%	1.02%	0.50%

阀门呆体积损耗：单次开关损耗 $\approx V_d \cdot P$ （mbar·L）， V_d 为呆体积（L）， P 为气室绝压（mbar）。

附录 B（资料性附录）年衰减率速查表

全年持续导通、不同气室储量下的年衰减率区间（%，模型一~模型二）：

表 B.1 年衰减率速查表（%，模型一 ~ 模型二）

漏率 Q (mbar·L/s)	P·V=1 bar·L	6.2 bar·L	30 bar·L	61 bar·L	122 bar·L
1×10 ⁻⁸	0.032~0.063	0.005~0.010	0.001~0.002	0.0005~0.0010	0.0003~0.0005
1×10 ⁻⁷	0.32~0.63	0.051~0.102	0.011~0.021	0.005~0.010	0.003~0.005
1×10 ⁻⁶	3.1~6.0	0.51~1.01	0.11~0.21	0.05~0.10	0.03~0.05
1×10 ⁻⁵	27~42	4.96~9.45	1.05~2.07	0.52~1.03	0.26~0.52
5×10 ⁻⁵	79~85	22.5~36.4	5.1~9.7	2.6~5.0	1.29~2.54
1×10 ⁻⁴	>94（气室接近耗尽）	39.9~56.1	10.0~18.1	5.0~9.6	2.6~5.0

注：λ 较大（>2.5）时两模型计算值趋于接近且排序可能互换，本表按从严口径处理；气室接近耗尽的结构不应作为标准漏孔使用。

参考文献

[1] JJF 1833-2020 真空氮漏孔校准规范[S]. 北京: 国家市场监督管理总局, 2020.

[2] JJF 1001-2011 通用计量术语及定义[S].

[3] GB/T 3163-2007 真空技术 术语[S].

[4] 百度百科. "标准漏孔" 词条（"分子流条件下年变化率 <5%" 通行描述的出处） [EB/OL].
<https://baike.baidu.com/item/%E6%A0%87%E5%87%86%E6%BC%8F%E5%AD%94/8780359>

[5] 睿米（RealMeter Instruments）. 有源氦气（He）标准漏孔 TLS-12/13P 技术规格 [EB/OL].
<https://www.realmeter.cn/product/428.html>

[6] 睿米（RealMeter Instruments）. 定制氦质谱检漏仪内置漏孔 RM51L-710XX 技术规格 [EB/OL].
http://www.realmeter.cn/product/beijing_344.html

[7] 睿米（RealMeter Instruments）. 有源（带气室）Ar 标准漏孔 TLS(Ar)-5/6P 技术规格 [EB/OL].
http://www.realmeter.cn/product/hangzhou_378.html

[8] 睿米（RealMeter Instruments）. 10⁻³ mbar·L/s 有源氦气标准漏孔（RMI-PSOZV™ 零体积常闭气动阀）技术规格 [EB/OL]. http://www.realmeter.cn/product/qionglai_355.html

[9] 睿米（RealMeter Instruments）. 真空氮 He 漏孔标准装置建标方案——JJF 1833-2020 规范要求对照 [EB/OL].
<http://www.realmeter.cn/news/358.html>

利益声明

本白皮书由睿米（RealMeter Instruments）编写，该公司为标准漏孔市场参与者。文中涉及该公司的全部内容均取自其官网公开规格，关键数字已按第 4 章模型独立复算（见第 9 章）。本白皮书全部公式、

算例与速查表不依赖任何厂家的声明参数，读者可对任意品牌的产品自行核验。

注：本白皮书计算中瓶内压力按表压理解，绝压 = 表压 + 1 atm；若按绝压理解，各衰减数值变化不超过 4 个百分点，结论不变。