

睿米技术 REALMETER

技术计算书 · RM-CAL-2026-0731

R134a 冷媒年泄漏量 ↔ 氮氢混合气检漏漏率 等效换算计算书

5% H_2 /95% N_2 示踪气 · 气相/液相双模式理论推导 (等压 10 bar(g))

$$7.6 \times 10^{-6} \longrightarrow 5.22 \times 10^{-6} / 1.75 \times 10^{-6} \longrightarrow \text{限值} \approx 1.8 \times 10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{L/s}$$

行业惯用值 → 两步法严格值 → min 规则保证性限值

上海睿米仪器仪表有限公司 · 谢放平 · 2026-07-31 · V1.0

目 录

1 任务书与边界条件	3
2 物性参数与数据来源	4
3 理论模型	5
4 计算过程	7
5 结果汇总与讨论	10
6 检漏系统设计建议	11
7 不确定度分析	12
8 结论：行业惯用值的理论定位与可用性边界	12
附录 A 符号表	14
附录 B 参考文献	14

项目	内容
文档编号	RM-CAL-2026-0731
版本	V1.0
日期	2026-07-31
编制单位	上海睿米仪器仪表有限公司
作者	谢放平
用途	为 R134a 冷媒系统氮氢混合气检漏（等压 10 bar(g)）的限值设定与仪器配置提供理论依据

1 任务书与边界条件

任务：将 R134a 冷媒年泄漏量 **1 g/年 @ 10 bar(g)** 换算为氮氢混合气（5% H₂ + 95% N₂，不可燃安全浓度）检漏对应的漏率（mbar·L/s），**示踪气充压与冷媒工况同压（10 bar(g)）**，气相/液相两种泄漏模式分别计算。

编号	边界条件	取值
BC-1	压力基准	表压（gauge）；示踪气与冷媒同压 10 bar(g)
BC-2	检漏方法	氮氢吸枪法（外部大气， $p_2 = 1\text{ atm}$ ）为主；累积法/真空法差异另行说明
BC-3	示踪气	5% H ₂ + 95% N ₂ 混合气（H ₂ 浓度低于 5.7% 爆炸下限，安全）
BC-4	泄漏点介质相态	气相、液相两种模式分别计算，限值取 min 规则
BC-5	温度	23 °C（296.15 K）

2 物性参数与数据来源

符号	参数	取值 (23 °C)	数据来源
M_134a	R134a 分子量	102.03 g/mol	SDS/REFPROP ^[1]
η_v	R134a 气相动力粘度	12.0 $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$	25 °C 饱和气相实测 12.1~12.2 $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ (REFPROP 体系) ^[2] ^[3] , 另见 190~25 °C 区间文献值 11.77~12.2 $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ ^[4] ; 取 12.0 $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$
η_l	R134a 饱和液相动力粘度	195 $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$	25 °C 时 0.195 mPa·s (REFPROP 体系) ^[3] ; 文献表 190.46 $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ ^[4] ; 取 195 $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$
ρ_l	R134a 饱和液相密度	1207 kg/m ³	25 °C 时 1207 kg/m ³ (REFPROP 体系) ^[3]
p_sat	R134a 23 °C 饱和压力	≈ 6.3 bar(abs)	25 °C 时 6.654 bar(abs) ^[3] ; 按 Clausius-Clapeyron 关系回推 23 °C ≈ 6.3 bar(abs)
η_{N2}	氮气动力粘度	17.6 $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$	20 °C 实测 1.76×10^{-5} Pa·s ^[5] ; 与 Sutherland 公式 20 → 23 °C 修正 (+0.5%) 后可忽略
η_{H2}	氢气动力粘度	8.9 $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$	20 °C 实测 0.89×10^{-5} Pa·s ^[5]
M_N2 / M_H2	氮/氢分子量	28.014 / 2.016 g/mol	标准原子量 (Wilke 公式输入)
R	摩尔气体常数	8.314 J/(mol·K)	CODATA
T	计算温度	296.15 K	BC-5 (23 °C)
η_{mix}	5%H ₂ /95%N ₂ 混合气粘度	17.59 $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$	本文按 Wilke 混合规则计算 (§3.2 展开)

取值原则说明： 1. 23 °C 与 25 °C 相差 2 K，R134a 气相粘度温度系数约 +0.03 $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{K}$ ，液相粘度约 -2%/K，均落在引用数据的文献区间内；本文直接取文献区间内的代表值，其偏差已计入 §7 不确定度 ($\pm 3\sim 5\%$)，不再做逐度插值，避免伪精度。 2. N₂/H₂ 粘度 20 °C 与 23 °C 之差 <1%，小于 Wilke 规则本身的不确定度 ($\pm 2\%$)，直接沿用。 3. **可靠性分级：** REFPROP 对 R134a 粘度的不确定度为液相 3%、蒸气相 3~5% ^[6]；N₂/H₂ 粘度为经典实测值 (不确定度 <1%)；混合气粘度采用 Wilke 半经验混合规则 (烃/氢混合体系实测验证良好 ^[7])。

3 理论模型

3.1 流态判据（与 R1234yf 计算书相同，从略）

漏道等效直径约 1~2 μm，10 bar 下 $Kn \approx 0.005 \ll 0.01$ ，漏道内为连续介质粘性流（层流），采用可压缩层流公式；误用分子流公式将偏大约 10 倍。

3.2 示踪气粘度：Wilke 混合规则（展开计算）

$$\eta_{mix} = \sum_i \frac{x_i \eta_i}{\sum_j x_j \phi_{ij}}, \quad \phi_{ij} = \frac{\left[1 + (\eta_i/\eta_j)^{1/2} (M_j/M_i)^{1/4}\right]^2}{\sqrt{8(1 + M_i/M_j)}}$$

输入： $x_{H_2} = 0.05$ 、 $x_{N_2} = 0.95$ 、 $\eta_{H_2} = 8.9 \mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ 、 $\eta_{N_2} = 17.6 \mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ 、 $M_{H_2} = 2.016$ 、 $M_{N_2} = 28.014 \text{ g/mol}$ 。

第 1 步：组合参数 ϕ_{ij} （ $\phi_{ii} \equiv 1$ ）：

$$\phi_{H_2, N_2} = \frac{\left[1 + (8.9/17.6)^{1/2} (28.014/2.016)^{1/4}\right]^2}{\sqrt{8(1 + 2.016/28.014)}} = \frac{[1 + 0.7110 \times 1.9318]^2}{\sqrt{8.576}} = \frac{5.633}{2.928} = 1.9229$$

$$\phi_{N_2, H_2} = \frac{\left[1 + (17.6/8.9)^{1/2} (2.016/28.014)^{1/4}\right]^2}{\sqrt{8(1 + 28.014/2.016)}} = \frac{[1 + 1.4063 \times 0.5177]^2}{\sqrt{119.17}} = \frac{2.987}{10.917} = 0.2736$$

第 2 步：分母项：

$$\sum_j x_j \phi_{H_2, j} = 0.05 \times 1 + 0.95 \times 1.9229 = 1.8768$$

$$\sum_j x_j \phi_{N_2, j} = 0.05 \times 0.2736 + 0.95 \times 1 = 0.9637$$

第 3 步：加权求和：

$$\eta_{mix} = \frac{0.05 \times 8.9}{1.8768} + \frac{0.95 \times 17.6}{0.9637} = 0.2371 + 17.3501 = 17.587 \mu\text{Pa}\cdot\text{s} \approx 17.59 \mu\text{Pa}\cdot\text{s}$$

（氢气粘度虽只有氮气的一半，但分子量低 14 倍，Wilke 权重 $\phi_{N_2, H_2}=0.274$ 大幅抑制其贡献——这就是"5% 氢几乎不改粘度"的定量原因。）

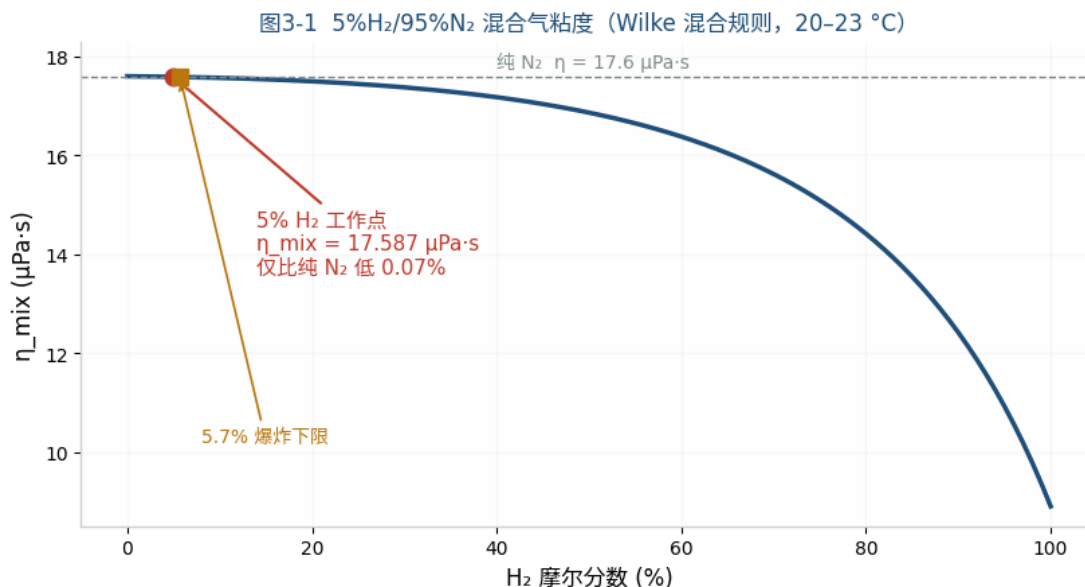


图 3-1 混合气粘度随 H_2 摩尔分数的 Wilke 计算曲线。工作点 (5%) 与爆炸下限 (5.7%) 几乎贴在一起且紧邻纯 N_2 端，全程只有 H_2 含量接近 100% 时粘度才显著下降——5% 掺氢对流动特性的影响 (-0.07%) 远小于粘度数据本身的不确定度 ($\pm 2\sim 5\%$)。

关键物理结论：5% 氢气几乎不改变混合气粘度（仅比纯 N_2 低 0.1%）——**氮氢混合气的流动特性 ≈ 纯氮气**。氢气只承担“示踪标记”角色，本文全部结果以**混合气总漏率**表达。需提醒：氢传感器仅对其中 H_2 组分响应，仪器选型时须按厂家给出的混合气条件实际灵敏度核对。

3.3 气相泄漏模式（等压、外部大气）

可压缩层流 $Q = \frac{\pi r^4}{16\eta L}(p_1^2 - p_2^2)$ ，同一漏道消去几何因子。因示踪气与冷媒**同压**、且两侧外部均为大气，压差平方项完全相等、约掉：

$$Q_{N_2/H_2} = Q_{134a} \times \frac{\eta_v}{\eta_{mix}} = \frac{\dot{m} RT}{M_{134a}} \times \frac{\eta_v}{\eta_{mix}}$$

这是等压换算的极简形式：**气相模式下，示踪气漏率 = 冷媒漏率 × 粘度比，与压力无关。**

3.4 液相泄漏模式（等压、外部大气）

不可压缩 Hagen-Poiseuille 与可压缩层流消元：

$$Q_{N_2/H_2} = \dot{m} \times \frac{\eta_l}{2\rho_l \eta_{mix}} \times \frac{p_1^2 - p_2^2}{\Delta p}$$

闪蒸使液相实际流量低于不可压缩模型，本式为偏保守上限。

3.5 限值设定总规则（min 规则）

泄漏点相态不可预知，限值须对任意相区保证达标：

$$Q_{limit} = \min(Q_{gas}, Q_{liquid})$$

4 计算过程

4.1 第一步：冷媒自身 pV 漏率（= 行业惯用值）

第 1 步：年泄漏量 → 质量流率。 1 年 = $365.25 \times 86400 = 3.15576 \times 10^7$ s：

$$\dot{m} = \frac{1 \times 10^{-3} \text{ kg}}{3.15576 \times 10^7 \text{ s}} = 3.1688 \times 10^{-11} \text{ kg/s}$$

第 2 步：质量流率 → 摩尔流率 ($M_{134a} = 0.10203 \text{ kg/mol}$)：

$$\dot{n} = \frac{3.1688 \times 10^{-11}}{0.10203} = 3.1058 \times 10^{-10} \text{ mol/s}$$

第 3 步：理想气体状态方程 → pV 流率（出口侧为大气，Q 按出口压力下的体积流定义）：

$$Q_{134a} = \dot{n}RT = 3.1058 \times 10^{-10} \times 8.314 \times 296.15 = 7.647 \times 10^{-7} \text{ Pa m}^3/\text{s}$$

第 4 步：单位换算。 1 mbar = 100 Pa，1 L = 10^{-3} m^3 ，故 1 mbar·L/s = $100 \times 10^{-3} = 0.1 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ，即：

$$Q_{134a} = 7.647 \times 10^{-7} \text{ Pa m}^3/\text{s} \times 10 = 7.65 \times 10^{-6} \text{ mbar L/s}$$

量纲自检： $[\dot{n}RT/M] = (\text{kg/s}) \times (\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})) \times \text{K}/(\text{kg/mol}) = \text{J/s} \cdot \text{m}^0 \times (\text{m}^3/\text{m}^3) \rightarrow \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s} \checkmark$ ($\text{J} = \text{Pa} \cdot \text{m}^3$)。

与行业惯用口径核对： INFICON 汽车行业检漏电子书明确给出 "1 g/a = $7.6 \cdot 10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{l/s}$ (only for R134a)"^[9]，与本结果一致。此即业内普遍引用的"R134a 1 g/年 $\approx 7.7 \times 10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{L/s}$ "的来源——它是冷媒介质自身的 pV 漏率，尚未做示踪气介质换算（第二步），不能直接作为氮氢检漏仪的读数或限值。

4.2 第二步·气相模式（吸枪法，等压 10 bar(g)）

粘度比（无量纲换算因子）：

$$\frac{\eta_v}{\eta_{mix}} = \frac{12.0}{17.587} = 0.6823$$

$$Q_{N_2/H_2} = 7.647 \times 10^{-6} \times 0.6823 = 5.22 \times 10^{-6} \text{ mbar L/s} \quad (5.2 \times 10^{-7} \text{ Pa m}^3/\text{s})$$

物理含义复核：R134a 分子比 N_2 重且极性更强、 $\eta_v=12.0 < \eta_{mix}=17.6$ ，同一漏道中 R134a“流得更顺”，故等质量泄漏对应的氮氢混合气 pV 漏率只有冷媒自身 pV 漏率的 68%——方向合理 ✓。

4.3 第二步·液相模式（吸枪法，等压 10 bar(g)）

压力项取绝压（理想气体定律与层流公式均要求绝压）： $p_1 = 10 + 1.01325 = 11.01325 \text{ bar(a)}$ ， $p_2 = 1.01325 \text{ bar(a)}$ ， $\Delta p = p_1 - p_2 = 10 \text{ bar}$ （表压即压差）。

第 1 步：介质/几何组合因子：

$$\frac{\eta_l}{2\rho_l\eta_{mix}} = \frac{195 \times 10^{-6}}{2 \times 1207 \times 17.587 \times 10^{-6}} = 4.593 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$$

第 2 步：压差平方比（附带恒等式自检： $(p_1^2-p_2^2)/(p_1-p_2) \equiv p_1+p_2$ ）：

$$\frac{p_1^2 - p_2^2}{\Delta p} = p_1 + p_2 = 11.01325 + 1.01325 = 12.0265 \text{ bar} = 1.20265 \times 10^6 \text{ Pa}$$

数值展开核对： $(11.01325^2 - 1.01325^2)/10 = (121.292 - 1.027)/10 = 12.0265 \checkmark$ （与 p_1+p_2 恒等式一致）。

第 3 步：合成：

$$Q_{N_2/H_2} = 3.1688 \times 10^{-11} \times 4.593 \times 10^{-3} \times 1.20265 \times 10^6 = 1.750 \times 10^{-7} \text{ Pa m}^3/\text{s} = \mathbf{1.75 \times 10^{-6} \text{ mbar}\cdot\text{L/s}}$$

反向校核：由 $Q=1.75 \times 10^{-6} \text{ mbar}\cdot\text{L/s}$ 反推 $\dot{m} = Q/(4.593 \times 10^{-3} \times 1.20265 \times 10^6) \times 0.1 = 3.17 \times 10^{-11} \text{ kg/s} = 1.00 \text{ g/年} \checkmark$ （闭合）。

4.4 若采用真空法/累积法（外部真空）

压差平方项不再约掉，需乘以：

$$\frac{p_1^2}{p_1^2 - p_2^2} = \frac{11.01325^2}{11.01325^2 - 1.01325^2} = \frac{121.292}{120.265} = 1.00854$$

即气相 $5.22 \times 1.0085 = 5.26 \times 10^{-6}$ 、液相 $1.75 \times 1.0085 = 1.765 \times 10^{-6} \text{ mbar}\cdot\text{L/s}$ ，差异 <1%，工程可忽略。

4.5 压力依赖性与交汇压力

将 §4.2/§4.3 的换算推广到任意充注压力 p_g （表压）：气相模式压差平方项约掉、等效漏率与压力无关；液相模式压差平方比 $\equiv p_1+p_2 = (p_g+2.0265) \text{ bar}$ ，随压力线性上升。令两式相等得交汇压力：

令两式相等 ($\dot{m}$ 与 η_{mix} 两边约去): $\frac{\eta_l}{2\rho_l}(p_1 + p_2) = \frac{RT\eta_v}{M}$, 解得:

$$p_1 + p_2 = \frac{2\rho_l \eta_v RT}{\eta_l M} = \frac{2 \times 1207 \times 12.0 \times 10^{-6} \times 8.314 \times 296.15}{195 \times 10^{-6} \times 0.10203} = 3.585 \times 10^6 \text{ Pa} = 35.85 \text{ bar}$$

$$p_{g,\text{cross}} = 35.85 - 2.0265 = \mathbf{33.8 \text{ bar(g)}}$$

(解析解与图 4-1 数值扫描结果一致)

(量纲自检: $[\rho\eta RT/(\eta M)] = (\text{kg/m}^3)(\text{Pa}\cdot\text{s})(\text{J/mol})/(\text{Pa}\cdot\text{s})(\text{kg/mol}) = (\text{kg/m}^3)(\text{J/kg}) = \text{J/m}^3 = \text{Pa} \checkmark$)

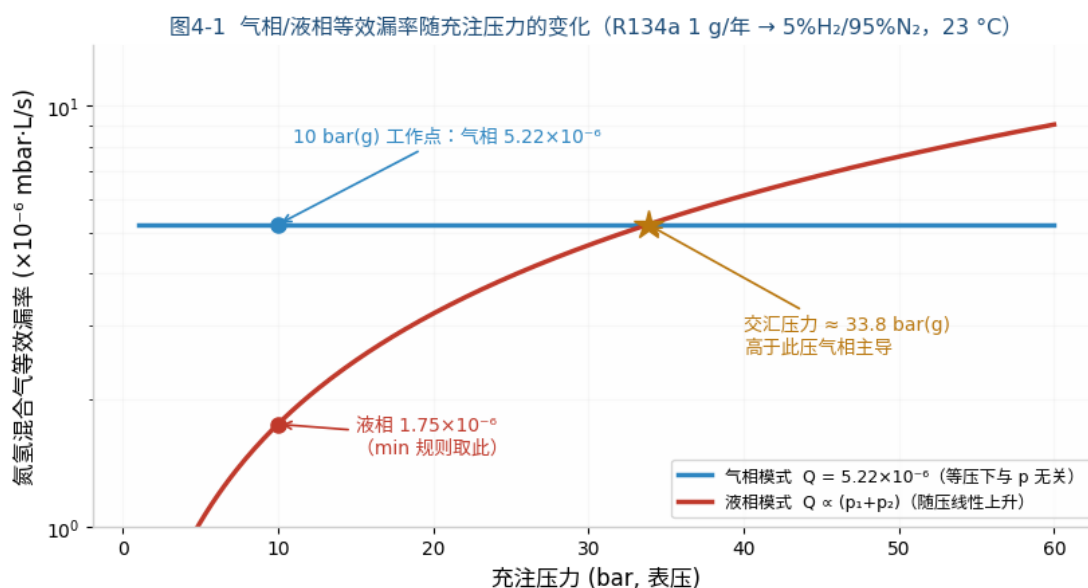


图 4-1 气相/液相等效漏率随充注压力的变化。10 bar(g) 工作点远低于交汇压力 33.8 bar(g)，液相值 (1.75×10^{-6}) 小于气相值 (5.22×10^{-6})，故 min 规则取液相——“低压冷媒工况液相主导”的普遍规律。若检漏充压高于 33.8 bar(g)，主导模式反转为气相，限值应改取气相换算值。

5 结果汇总与讨论

层级	混合气总漏率（吸枪法，10 bar(g)）	说明
第一步：R134a 自身 pV 漏率（行业惯用值 ^[9] ）	$7.6 \times 10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{L/s}$	仅质量 → pV 换算，未做介质修正，不能直接作氮氢检限值
第二步·气相泄漏	$5.2 \times 10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{L/s}$	= 冷媒漏率 × 粘度比 0.682
液相泄漏	$1.75 \times 10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{L/s}$	偏保守上限
保证性限值（min 规则）	$\approx 1.8 \times 10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{L/s}$	误废带宽 2.98×

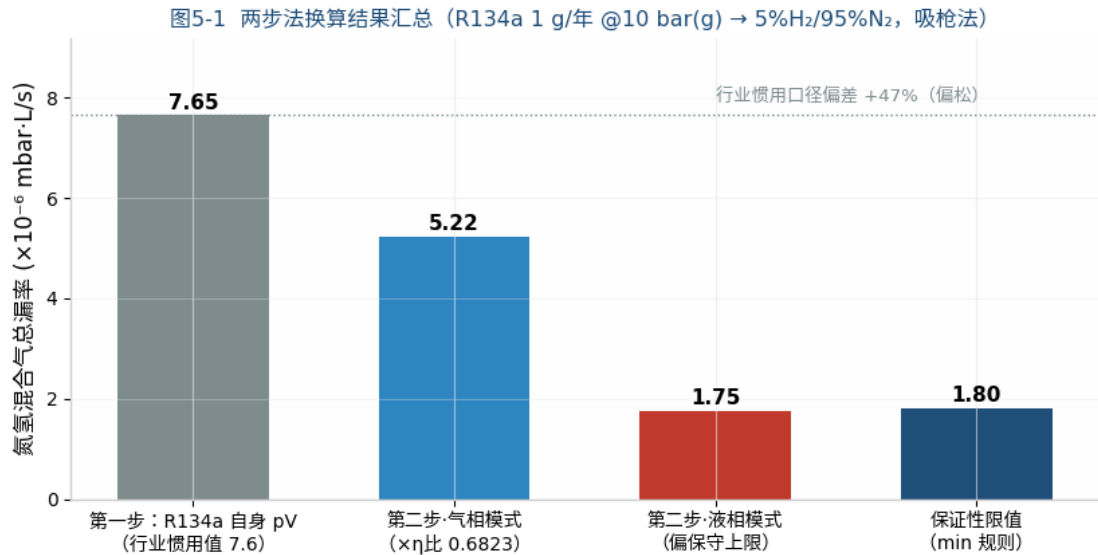


图 5-1 两步法结果汇总。灰柱为行业惯用口径（仅第一步，未做介质修正）；蓝/红柱为严格值；深蓝柱为保证性限值。惯用口径相对气相严格值偏差 +47%（偏松方向）。

讨论：

- 行业惯用值的偏差：**直接用 7.6×10^{-6} 当氮氢检漏限值，相当于默认 $\eta_{\text{R134a}} = \eta_{\text{氮氢混合气}}$ ，偏差 +47%，会把气相漏 1.47 g/年的工件判合格——方向偏松、非保守，仅适合快速估算与沟通口径。
- 液相主导限值：**气/液换算值比 2.98×，与 R1234yf @10 bar 工况（2.9×）几乎相同——10 bar 远低于交汇压力，液相主导是低压冷媒工况的普遍规律。
- 与氮检的定量对比：**同一指标下 R1234yf 氮检气相换算值为 4.0×10^{-6} （ η 比 11.46/19.6 = 0.585），R134a 氮氢检为 5.2×10^{-6} （ η 比 12.0/17.59 = 0.682）。两者同量级，但氮氢法的**传感器端信号被 5% 稀释**，等效检测灵敏度要求比氮法严苛约 20 倍。

4. **仪器灵敏度校核**：按"仪器分辨能力 $\leq$ 限值 1/10"的工程惯例，检漏系统需稳定分辨 1.8×10^{-7} mbar·L/s 的混合气总漏率。吸枪法存在吸枪流量对泄漏气的稀释（通常损失 1~2 个量级），且氢传感器仅对混合气中 5% 的 H_2 组分响应，选型时必须按厂家混合气工况灵敏度指标严格核对，必要时改用累积法补偿。

6 检漏系统设计建议

项目	取值
保证性拒收限值（混合气总量）	1.8×10^{-6} mbar·L/s
（备选）已知气相区限值	5.2×10^{-6} mbar·L/s
系统最小可检漏率（限值 1/10）	1.8×10^{-7} mbar·L/s（混合气总漏率）
充注示踪气	5% H_2 + 95% N_2 ，10 bar(g)
校准用标准漏孔	建议配置 5% H_2 /95% N_2 介质标准漏孔 1.8×10^{-6} mbar·L/s 量级（23 °C 标定），或以 He 标准漏孔换算（ $\times \eta_{He}/\eta_{mix} = 1.11$ ）

补充建议：

- 方法选择**：本指标下吸枪法信噪比较弱（吸枪稀释 + 氢传感器仅响应 H_2 组分），推荐**累积法**（密闭罩累积+氢传感器读浓度增长），可提升 1~2 个量级信噪比；
- 误废带管理**：同 R1234yf 计算书第 6 章三条出路（min 规则默认 / 相态界定 / 分区测试），误废带 2.98×；
- 温度修正**：23 °C 基准， ± 10 °C 温漂对粘度比影响 <2%；
- 与 R134a 饱和压力核对**：23 °C 饱和压力 6.3 bar(abs)，10 bar(g) 下过冷度约 4.7 bar，液相模型成立。

7 不确定度分析

来源	量级	影响
η_v (R134a 气相)	$\pm 3\sim 5\%$ (REFPROP 声明) [6]	气相 $\pm 5\%$
η_l, ρ_l (液相)	$\pm 3\%$ (REFPROP 液相粘度)	液相 $\pm 4\%$
η_{mix} (Wilke 规则)	$\pm 2\%$	全模式 $\pm 2\%$
温度 ($23\pm 5\text{ }^\circ\text{C}$)	$< 2\%$	可忽略
闪蒸效应 (液相)	单向偏保守	液相为上限
相态不确定性 (限值方向)	系统性, $2.98\times$	主导因素, min 规则覆盖

综合扩展不确定度 ($k=2$): 气相约 $\pm 6\%$, 液相约 $\pm 8\%$ 。建议限值保留 $\geq 20\%$ 工程裕量。

8 结论：行业惯用值的理论定位与可用性边界

8.1 数值谱系 (本文全部结果的逻辑关系)

层级	数值 ($\text{mbar}\cdot\text{L/s}$)	物理含义
① 行业惯用值 (INFICON 口径 [9])	7.6×10^{-6} ($=7.6\times 10^{-7}\text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$)	R134a 自身的 pV 漏率: 只完成"质量 $\rightarrow$ pV"第一步换算
② 严格值·气相模式	5.22×10^{-6}	① $\times$ 粘度比 0.6823 (第二步介质换算)
③ 严格值·液相模式	1.75×10^{-6}	偏保守上限
④ 保证性限值 (min 规则)	$\approx 1.8\times 10^{-6}$	相态不可预知时的设计限值

8.2 INFICON 口径错在哪里

"R134a 1 g/年 = 氮氢检漏 $7.6\times 10^{-6}\text{ mbar}\cdot\text{L/s}$ "这一流传最广的行业口径, 严格意义上并不正确: 它只完成了一半换算——把冷媒年泄漏量换算成冷媒自身的 pV 漏率 (第一步) 之后, 直接把它当成了氮氢混合气的检漏漏率, 省略了第二步介质换算。其隐含假设是 $\eta_{\text{R134a}} = \eta_{\text{氮氢混合气}}$, 而实际上 $12.0 \neq 17.6\text{ }\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$, 两者相差 47%。把 7.6×10^{-6} 直接用作氮氢检漏限值, 会把气相泄漏达 1.47 g/年的工件判为合格——偏差方向偏松, 不是保守方向。

8.3 为什么这个"错误的值"用了几十年也没出问题

这不是因为换算碰巧正确，而是**规格裕量结构把换算误差完全吸收了**，三层缓冲层层兜底：

1. **第一层：规格本身立得极高。** 1 g/年 是行业惯用规格，而冷媒系统的功能失效阈值（冷量明显衰减所需的累计泄漏量）在 ~150 g/年 量级，规格相对功能阈值有约 **两个数量级**的裕量。限值偏差 +47%，相对两个数量级的裕量只是零头。
2. **第二层：生产漏率分布是双峰的。** 正常工件的漏率分布在 $\sim 10^{-10}$ mbar·L/s 量级，缺陷工件在 $\sim 10^{-2}$ mbar·L/s 量级，中间隔着约 8 个数量级的"无人区"。限值放在 1.8×10^{-6} 还是 7.6×10^{-6} ，都落在这片空档里——**对任何实际工件的判定结果完全相同。**
3. **第三层：即使漏判，后果也无害。** 按 7.6×10^{-6} 放行的最不利边界工件，年泄漏 1.47 g，仍比功能失效阈值低两个数量级，质保期内无任何实际影响。

换言之：**惯用值是一个"错误但无害"的数字**——它恰好落在裕量结构的空档中央，用错了一半理论，却被过剩的规格裕量保护得严严实实。

8.4 什么时候必须改用严格值

裕量不是无限厚的，以下场景缓冲变薄，惯用口径的 +47% 偏差就可能产生实际后果，应改用本文严格值（②③④）：

- **认证、溯源、客户审核场合：**限值必须经得起理论复核，第一步口径无法自圆其说；
- **指标收紧或新冷媒切换：**如 R1234yf 等低充注量系统、A2L 微可燃冷媒（车厢浓度限值成为真正底线），规格与功能阈值之间的裕量从两个数量级压缩到一个数量级以内，限值设定的 $\pm 50\%$ 已不可忽略；
- **液相主导工况的限值设定：**10 bar(g) 下液相严格值 (1.75×10^{-6}) 比惯用值严 4.3 倍，相态不可预知时按 min 规则取值，否则对液相泄漏工件反而是"偏松 4.3 倍"的漏判风险。

8.5 一句话结论

7.6×10^{-7} Pa·m³/s 是沟通口径， 1.8×10^{-6} mbar·L/s（min 规则）是设计限值：前者来自只做了一半的换算、靠规格裕量兜底而长期无害；后者才是经过完整两步换算与相态分析的严格值。日常交流可沿用前者，检漏系统设计与审核文件应采用后者。

附录 A 符号表

符号	含义	单位
Q	漏率 (pV 流率)	$\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 或 $\text{mbar}\cdot\text{L}/\text{s}$
$\dot{m}, \dot{n}$	质量/摩尔流率	$\text{kg}/\text{s}, \text{mol}/\text{s}$
$\eta_v, \eta_l, \eta_{\text{mix}}$	气相/液相/混合气粘度	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
ρ_l	液相密度	kg/m^3
x_i, M_i	摩尔分数/分子量	—, g/mol
$p_1, p_2, \Delta p$	入口/出口绝压/压差	Pa

附录 B 参考文献

1. National Refrigerants, Inc. Safety Data Sheet R-134a: Molecular Weight 102. <https://refrigerants.com/wp-content/uploads/2019/12/SDS-R134a.pdf> 2. Viscosity of R134a in the Vapor Phase, Near Saturation (298.06 K: $12.2 \mu\text{Pa}\cdot\text{s}$; 303.32 K: $12.4 \mu\text{Pa}\cdot\text{s}$) . <https://core.ac.uk/download/pdf/61420255.pdf> 3. RSL/REFPROP v10 数据表: R134a Vapour Viscosity (25°C & 1 bara) 0.0121 cP ; Liquid Viscosity (25°C) 0.1949 cP ; Liquid Density (25°C) $1207 \text{ kg}/\text{m}^3$; Vapour Pressure (25°C) 6.654 bara. <https://refsols.com/RS-20.html> 4. UPC 文献数据表: R134a Liquid Viscosity $190.46 \mu\text{Pa}\cdot\text{s}$, Vapor $11.77 \mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ (约 25 °C) . <https://upcommons.upc.edu/bitstreams/6f05d6e9-1996-4f46-8ebf-95e776fc4bd2/download> 5. Effect of the Physical Properties of Testing Gases on the Leak Test Results of Polyethylene Pipe Assemblies. *Applied Sciences*, 2026, 16(14): 7219. (Table 1: N_2 $1.76\times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, H_2 $0.89\times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ @20 °C) <https://www.mdpi.com/2076-3417/16/14/7219> 6. Etude des propriétés thermodynamiques des nouveaux fluides frigorigènes. Ph.D. Thesis, 2016. (REFPROP 9.0 声明: R134a 粘度不确定度液相 3%、蒸气相 3~5%) https://pastel.hal.science/tel-01804996/file/2016PSLEM089_archivage.pdf 7. Viscosity of Hydrogen-Enriched Natural Gas Blends ($x_{\text{H}_2} = 0, 5, 20, 50, \text{ and } 80\%$) from 223 to 323 K and up to 30 MPa. *J. Chem. Eng. Data*, 2025. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jced.5c00401> 9. INFICON. Leak Testing in the Automotive Industry (电子书) : "1 g/a = $7.6\cdot 10^{-6} \text{ mbar}\cdot\text{l}/\text{s}$ (only for R134a)". https://www.inficon.com/media/7992/download/-Portals-0-PDF-ebooks-INFICON_E-Book_LeakTestingInTheAutomotiveIndustry_mika00en-b_1604.pdf 10. Pfeiffer Vacuum. Mass Loss Rates and Volume Leak Rates in Laminar or Molecular Flow Regime (两步换算法: 质量流量 → 介质 pV 漏率 → 按流态做介质换算; 流态未知时取不利情况) . <https://www.pfeiffer-vacuum.com/mx/en/knowledge/leak-detection/calculations/mass-loss-rates-and-volume-leakage-rates-in-laminar-or-molecular-flow-regime.html> 8. RM-CAL-2026-0730 《R1234yf 冷媒年泄漏量 ↔ 氮漏率等效

换算计算书》。上海睿米仪器仪表有限公司，2026-07-30。（流态判据、min 规则、交汇压力框架同源）