

技术换算报告

R134a 冷媒泄漏率（1 g/年） 对应氦检漏率换算报告

氦质谱检漏（10 bar 表压充氦、外抽真空）验收值换算
—— 基于理想气体状态方程与气体流动理论

核心结论 · KEY RESULT

$$Q_{\text{He}} \approx 5.3 \times 10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{L/s} = 5.3 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$$

每 1 g/年 R134a 泄漏量 $\approx 5.3 \times 10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{L/s}$ 氦漏率（粘滞流换算，可线性外推）

编制单位 上海睿米仪器仪表有限公司

撰写人 谢放平

报告日期 2026 年 8 月 11 日

文档类别 技术报告 · 检漏工艺换算

目 录

1	结论（摘要）	3
2	已知条件与假设	3
3	换算方法	4
4	详细计算	5
4.1	R134a 质量泄漏率 → pV 漏率（第一步）	5
4.2	粘滞流换算为氦漏率（推荐结果）	6
4.3	分子流换算（参考值，本工况不推荐）	7
5	流态分析、结论依据与保守性说明	7
6	单位换算速查表	8
7	使用建议	8
8	计算依据与物性数据	9

1 结论（摘要）

在 R134a 工作压力 10 bar 表压（≈11 bar 绝对压力）、泄漏至大气（≈1 bar 绝对），泄漏率限值 1 g/年的条件下，按粘滞流换算方法，对应的氦检漏率（10 bar 表压充氦、外部抽真空）约为：

$$Q_{\text{He}} \approx 5.3 \times 10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{L/s} = 5.3 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s} \quad (\approx 5.2 \times 10^{-6} \text{ atm} \cdot \text{cm}^3/\text{s})$$

换算关系可按质量泄漏率线性外推：每 1 g/年 R134a 泄漏量对应约 $5.3 \times 10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{L/s}$ 氦漏率。例如：

表 1-1 R134a 泄漏率限值与对应氦漏率报警/验收值

R134a 泄漏率限值	对应氦漏率报警/验收值（10 bar 表压 → 真空）
0.5 g/年	$\approx 2.7 \times 10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{L/s}$ ($2.7 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$)
1 g/年	$\approx 5.3 \times 10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{L/s}$ ($5.3 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$)
2 g/年	$\approx 1.06 \times 10^{-5} \text{ mbar} \cdot \text{L/s}$ ($1.06 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$)
5 g/年	$\approx 2.65 \times 10^{-5} \text{ mbar} \cdot \text{L/s}$ ($2.65 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$)
10 g/年	$\approx 5.30 \times 10^{-5} \text{ mbar} \cdot \text{L/s}$ ($5.30 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$)

几点重要说明：

- 若按“分子流”假设换算，结果约为 $4.2 \times 10^{-5} \text{ mbar} \cdot \text{L/s}$ ，约为粘滞流结果的 8 倍。在 10 bar 表压、 $10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{L/s}$ 量级漏率下，实际流动以粘滞/层流为主；且采用粘滞流换算设定的验收值更保守（见第 5 节）。故本报告推荐采用粘滞流换算结果 $5.3 \times 10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{L/s}$ 。
- 若客户要求明确采用分子流换算（如低压小漏率场合），则取 $4.2 \times 10^{-5} \text{ mbar} \cdot \text{L/s}$ ；两种假设需在技术协议中写明，避免争议。

2 已知条件与假设

表 2-1 已知条件与假设一览

项目	取值	说明
----	----	----

介质	R134a (CH ₂ FCF ₃ , 1,1,1,2-四氟乙烷)	摩尔质量 102.03 g/mol
示踪气体	氦气 (He)	摩尔质量 4.0026 g/mol
R134a 工作压力	10 bar 表压 ≈ 11 bar 绝对压力	泄漏至大气 ≈ 1.013 bar 绝对压力
氦检条件	10 bar 表压 ≈ 11 bar 绝对压力	被检件外抽真空 (≈ 0 bar)
R134a 泄漏率限值	1 g/年	1 年按 365 d × 24 h × 3600 s = 31,536,000 s
换算温度	20 °C (293 K)	常温参考; 25 °C 时结果高约 1.7%, 工程上可忽略
气体粘度	$\eta_{\text{R134a}} = 13.6 \text{ }\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$; $\eta_{\text{He}} = 19.6 \text{ }\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$	常压常温物性取值 (详见第 5 节)

3 换算方法

采用基于理想气体状态方程与气体流动理论的"两步换算 + 压力条件修正"方法:

第一步: 将 R134a 质量泄漏率换算为 pV 漏率 (标准容积漏率)

根据理想气体状态方程 (阿伏伽德罗定律):

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T \tag{3-1}$$

即:

$$Q_{\text{R134a}} = \frac{m}{M} \cdot \frac{R \cdot T}{t} \tag{3-2}$$

其中 m 为年泄漏质量, M 为摩尔质量, R = 83.14 mbar·L·mol⁻¹·K⁻¹, T 为绝对温度, t 为一年的秒数。

第二步: 气体种类转换 (同一漏孔、同一压力条件下)

- **粘滞流 (层流):** 漏率与气体动力粘度成反比

$$Q_{\text{He}} = Q_{\text{R134a}} \times \frac{\eta_{\text{R134a}}}{\eta_{\text{He}}} \quad (3-3)$$

- **分子流**：漏率与气体分子量平方根成反比

$$Q_{\text{He}} = Q_{\text{R134a}} \times \sqrt{\frac{M_{\text{R134a}}}{M_{\text{He}}}} \quad (3-4)$$

第三步：压力条件修正

- 粘滞流： $Q \propto (P_1^2 - P_2^2)$
- 分子流： $Q \propto (P_1 - P_2)$

本工况 R134a 为 11 bar 绝对 $\rightarrow$ 1.013 bar 绝对；氦检为 11 bar 绝对 $\rightarrow$ 0 bar，二者压力条件基本一致，压力修正系数接近 1。

4 详细计算

4.1 R134a 质量泄漏率 $\rightarrow$ pV 漏率（第一步）

年泄漏摩尔数：

$$n = \frac{1 \text{ g}}{102.03 \text{ g/mol}} = 9.80 \times 10^{-3} \text{ mol/年} \quad (4-1)$$

年泄漏的 pV 量：

$$p \cdot V = 9.80 \times 10^{-3} \times 83.14 \times 293 = 238.8 \text{ mbar} \cdot \text{L/年} \quad (4-2)$$

pV 漏率：

$$Q_{\text{R134a}} = \frac{238.8}{31,536,000 \text{ s}} = \mathbf{7.57 \times 10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{L/s}} \quad (4-3)$$

注：若换算温度取 25 °C（298.15 K），结果为 7.70×10^{-6} mbar·L/s，与 20 °C 结果相差约 1.7%，工程上可忽略。

4.2 粘滞流换算为氦漏率（推荐结果）

$$Q_{\text{He}} = 7.57 \times 10^{-6} \times \frac{13.6}{19.6} \times \frac{11^2 - 0^2}{11^2 - 1.013^2} \tag{4-4}$$

$$Q_{\text{He}} = 7.57 \times 10^{-6} \times 0.694 \times \frac{121}{120.0} \tag{4-5}$$

$$Q_{\text{He}} = 5.30 \times 10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{L/s}$$

换算为其他常用单位：

表 4-1 氦漏率常用单位换算

单位	数值
mbar·L/s	5.3×10^{-6}
Pa·m³/s	5.3×10^{-7}
atm·cm³/s（atm·cc/s）	$\approx 5.2 \times 10^{-6}$

注：R134a 气体粘度随温度、压力变化，物性表常见取值为 11.5~13.6 μPa·s。取 13.6 μPa·s 时结果为 5.30×10^{-6} mbar·L/s；取 11.5 μPa·s 时结果约 4.5×10^{-6} mbar·L/s。建议统一按 5×10^{-6} mbar·L/s 量级设定，并在技术协议中注明粘度取值。

4.3 分子流换算（参考值，本工况不推荐）

$$Q_{\text{He}} = 7.57 \times 10^{-6} \times \sqrt{\frac{102.03}{4.0026}} \times \frac{11 - 0}{11 - 1.013} \tag{4-6}$$

$$Q_{\text{He}} = 7.57 \times 10^{-6} \times 5.05 \times 1.10 = 4.21 \times 10^{-5} \text{ mbar} \cdot \text{L/s} \quad (4-7)$$

即分子流假设下结果为 $4.2 \times 10^{-5} \text{ mbar} \cdot \text{L/s}$ ($4.2 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$)，约为粘滞流结果的 8 倍。

5 流态分析、结论依据与保守性说明

5.1 流态判断

按气体流动理论判据：

- **分子流**：气体分子平均自由程大于泄漏孔径，通常发生在低压或极微小泄漏场合；
- **粘滞流（层流）**：气体分子平均自由程远小于泄漏孔径，通常发生在较高压力或较大泄漏场合。

本工况压力高达 10 bar 表压，泄漏量处于 $10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{L/s}$ 量级。估算表明，能产生该漏率的漏孔当量直径约为微米量级，而 10 bar 下 R134a 分子平均自由程仅约数纳米（1 bar 下约 60 nm，与压力成反比），Knudsen 数远小于 1，流动以**粘滞/层流为主**。故气体种类转换应使用**粘度比**，而非分子量平方根比。

5.2 为什么粘滞流换算是保守（安全）选择

氦气比 R134a 轻得多：

- 粘滞流假设： $Q_{\text{He}} / Q_{\text{R134a}} \approx 0.69$ （氦气漏率低于 R134a）；
- 分子流假设： $Q_{\text{He}} / Q_{\text{R134a}} \approx 5.05$ （氦气漏率约为 R134a 的 5 倍）。

若按分子流假设设定氦检报警值（ $4.2 \times 10^{-5} \text{ mbar} \cdot \text{L/s}$ ），一旦实际泄漏呈粘滞流特性，通过检漏的产品实际 R134a 泄漏量可达 1 g/年限值的约 8 倍，即存在漏判风险。反之，按粘滞流假设设定报警值（ $5.3 \times 10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{L/s}$ ），即使实际泄漏更接近分子流，通过检漏的产品 R134a 泄漏量也只会更低，验收更严格、更安全。

推荐：氦检报警/验收值取 $\approx 5 \times 10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{L/s}$ ($5 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$)

并按第 1 节表格按泄漏限值线性缩放。

6 单位换算速查表

表 6-1 漏率单位换算关系

单位	与 mbar·L/s 的关系
Pa·m³/s	1 mbar·L/s = 0.1 Pa·m³/s
Pa·L/s	1 mbar·L/s = 100 Pa·L/s
atm·cm³/s	1 mbar·L/s ≈ 0.987 atm·cm³/s

7 使用建议

- 1. 技术协议中写明流态假设：**建议明确"按粘滞流换算，1 g/年 R134a ≈ 5×10⁻⁶ mbar·L/s 氦漏率（10 bar 表压 → 真空）"，避免供、需双方理解不一致。
- 2. 检漏仪设置：**主流氦质谱检漏仪通常支持输入示踪气体与被测介质的粘度/摩尔质量参数，直接显示 R134a 等效漏率，可按此设定报警值；也可在仪器上直接按 5×10⁻⁶ mbar·L/s（氦）设置。
- 3. 压力一致性：**氦检压力应与 R134a 工作压力一致（本工况均为 10 bar 表压）。若检测压力不同，应按 $Q \propto (P_1^2 - P_2^2)$ （粘滞流）修正后再设定报警值。
- 4. 留出裕量：**5.3×10⁻⁶ mbar·L/s 为换算的"标称限值"，实际报警值建议考虑检漏仪校准不确定度、工装本底和批量波动，通常再留 1.5~2 倍裕量（即按 2.5~3.5×10⁻⁶ mbar·L/s 报警），具体以客户验收协议为准。
- 5. 校准：**氦质谱检漏仪应使用与设定值同量级的标准漏孔（如 5×10⁻⁶ mbar·L/s 附近）定期校准，确保测量有效性。

8 计算依据与物性数据

本报告全部结果由理想气体状态方程与气体流动理论直接推导计算得出，不引用任何第三方机构、行业资料或标准。

- R134a (CH₂FCF₃) 摩尔质量：102.03 g/mol
- 氦气 (He) 摩尔质量：4.0026 g/mol

- 气体常数 R: $83.14 \text{ mbar} \cdot \text{L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- R134a 气体粘度: $13.6 \text{ } \mu\text{Pa} \cdot \text{s}$ (物性表常见范围 $11.5 \sim 13.6 \text{ } \mu\text{Pa} \cdot \text{s}$)
- 氦气粘度: $19.6 \text{ } \mu\text{Pa} \cdot \text{s}$ (物性表常见范围 $19.6 \sim 19.8 \text{ } \mu\text{Pa} \cdot \text{s}$)
- 核心公式: $pV = (m/M) \cdot R \cdot T$; 粘滞流 $Q_{\text{He}} = Q_{\text{R134a}} \cdot (\eta_{\text{R134a}} / \eta_{\text{He}})$; $Q \propto (P_1^2 - P_2^2)$

编制单位: 上海睿米仪器仪表有限公司

撰写人: 谢放平

报告日期: 2026 年 8 月 11 日
