

4 泄漏量计算

4.1 液体泄露

- 根据伯努利方程可以建立液体经小孔泄漏的速度计算公式：

$$Q = C_d A \rho \sqrt{\frac{2(P - P_0)}{\rho} + 2gh}$$

- Q ：液体泄漏流量， kg/s 。
- C_d ：排放系数，通常取0.6~0.64。
- 一般取值法：
 - 薄壁（壁厚 \leq 孔半径）小孔泄漏，其值约为0.62。
 - 厚壁（孔半径 $<$ 壁厚8倍孔半径）小孔或通过一短管泄漏，其值约为0.81。
 - 通过修圆小孔排放，则排放系数为1.0。
 - 保守估计，取1.0。
 - 根据泄漏口形状取值：

雷诺数Re	圆形/多边形	三角形	长条形
> 100	0.65	0.60	0.55
≤ 100	0.50	0.45	0.40

- Re ：雷诺数， $Re = L\nu\rho/\mu$ 。
 - L ：流场的几何特征尺寸，如管道的直径。
 - ν ：流体的流动速度。
 - ρ ：流体的密度。
 - μ ：流体的粘度。
- 对于圆管内的流动，当 $Re < 2300$ 时，流动总是层流； $Re > 4000$ 时，流动一般为湍流；其间为过渡区，流动可能是层流，也可能是湍流，取决于外界条件。
- 对于平行流体流过光滑平板的情况，边界层由层流转变为湍流的临界雷诺数约在 $10^5 \sim 3 \times 10^6$ 之间。
- A ：泄漏口面积， m^2 。
- ρ ：泄漏液体密度， kg/m^3 。
- P ：容器内介质压力， Pa 。
- P_0 ：环境压力， Pa 。
- g ：重力加速度， $9.8m/s^2$ 。
- h ：泄漏口上液位高度， m 。

4.2 过热液体泄漏

- 过热液体是指液体的温度超过其沸点而没有沸腾的情况。如果液体的沸点低于周围环境温度，泄漏后一部分液体将立即闪蒸为蒸气。假设闪蒸过程绝热，则很容易确定闪蒸部分的比例，即闪蒸液体分数为：

$$F_V = \frac{C_p(T - T_b)}{H_V}$$

- F_V : 闪蒸液体分数, 直接蒸发的液体与原液体的比例。
- C_p : 液体恒压热容, $J/(kg \cdot K)$ 。
- T : 液体温度, K 。
- T_b : 液体常压沸点, K 。
- H_V : 常压沸点下的汽化热, J/kg 。

4.3 气体泄漏

- 气体符合理想气体状态方程, 则根据柏努利方程可推导出如下的气体泄漏公式:

$$Q = C_d P A \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{M}{RT} \left[\left(\frac{P_0^{\frac{2}{\gamma}}}{p} - \frac{P_0^{\frac{\gamma+1}{\gamma}}}{p} \right) \right]}$$

- C_d : 气体泄漏系数, 当裂口形状为圆形时取1.00, 三角形时取0.95, 长方形时取0.90。
- γ : 绝热指数, 是等压热容与等容热容的比值。
- M : 气体的分子量, kg/mol 。
- R : 气体常数, $8.314 J/(mol \cdot K)$ 。
- T : 容器内气体温度, K 。
- 临界压力:

$$P_c = P_0 \left(\frac{\gamma+1}{2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

- 声速流 (压力高于临界压力):

$$Q = C_d P A \sqrt{\frac{\gamma M}{RT} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}$$

- 亚声速流 (压力低于临界压力): 用原公式计算。
- 许多气体的绝热指数在1.1到1.4之间, 则相应的临界压力只有约1.7到1.9个大气压, 因此多数事故的气体泄漏是声速流。
- 泄漏流量随容器中介质压力的增加而增加。
- 几种气体的绝热指数和临界压力 (atm):

物质	丁烷	丙烷	二氧化硫	甲烷	氨	氯	一氧化碳	氢
γ	1.10	1.13	1.29	1.31	1.31	1.36	1.40	1.41
P_c	1.71	1.73	1.83	1.84	1.84	1.87	1.90	1.90

4.4 两相泄漏

- 在过热液体发生泄漏的场合, 有时会出现液、气两相流动。如果容器中的过热液体泄漏前通过较长的管道 ($L/D > 12$) 就会产生两相泄漏。
- 一种简化计算是, 假设系统中出口临界压力和上游压力比为0.55, 则:

$$P_c = 0.55P$$

- 泄漏两相中蒸发液体分数 F_v :

$$F_v = \frac{C_p(T - T_c)}{H_v}$$

- 两相流中气相和液相混合物的平均密度：

$$\rho = \frac{1}{\frac{F_v}{\rho_g} + \frac{1-F_v}{\rho_l}}$$

- 两相流排放泄漏流量为：

$$Q = C_d A \sqrt{2\rho(P - P_c)}$$

- C_d ：两相流泄漏系数，一般取 $C_d = 0.8$ 。
- 闪蒸比例分数可按前述计算：
- - $F_v > 1$ ，表示液体将全部蒸发为气体，应按气体泄漏计算。
 - F_v 较小，可以简单地按液体泄漏计算。