PSCI PHARMACEUTICAL SUPPLY CHAIN INITIATIVE
Building responsible supply chains



# 窒息气体危害识别及风险防控

## Asphyxiant gas hazard identification and risk control

邓胤 | 高级过程安全顾问 | DEKRA 德凯达管理咨询（上海）有限公司
Carl Deng | Senior Process Safety Consultant | DEKRA Shanghai Office

# 嘉宾介绍 Speaker Bio

- 姓名：邓胤
- 职位：高级过程安全顾问
- 公司：DEKRA 德凯达管理咨询（上海）有限公司
- 联系方式：18623558441（微信同号）

---

- 背景：超过17年的过程安全管理，过程安全工程和工业卫生管理的经验，包括EHS审核，PSM和IH体系的建立及优化，EHS要求的实施，新项目的过程安全评估及工程要求实施等。在粉尘燃爆风险防控，静电及其它点火源风险防控，工艺危害分析，小试至放大生产的EHS评估体系优化等方面具有较多的项目经验。为PSCI核心成员的工厂完成了窒息风险专项评估约4个。



# 议程 Agenda

**窒息气体的危害及典型事故**

窒息风险的场景筛查

窒息风险的评估及氧气浓度计算

安全防护措施介绍

小结及答疑



# 窒息气体的危害



# 窒息气体的典型事故

- 2025年，某制药公司发生一起较大窒息事故，造成3人死亡、3人受伤（空压机停机后，缓冲罐中的氮气倒流进入长管呼吸器的管道）
- 2025年，宁波某科技公司干燥器实验室氮气泄漏至2人死亡（氮气软管脱落泄漏，通风较差，缺少氧气浓度探测）
- 2025 年，某制药公司隔离器内发生窒息亡人事件，造成 2 人死亡（氮气在隔离器内泄漏，人员操作错误，人员意识及防控措施不足）
- 2014 年，某制药公司未生产的洁净区房间内氮气泄漏，造成1人死亡，1人受伤（氮气持续泄漏，惰化整个房间，通风关闭）
- …… 

# 惰性气体危害

- 没有对受害者的警告
- 失去意识可能会突然发生
- 这与由于二氧化碳水平逐步上升，在密闭空间中呼吸导致的氧气衰竭是完全不同的

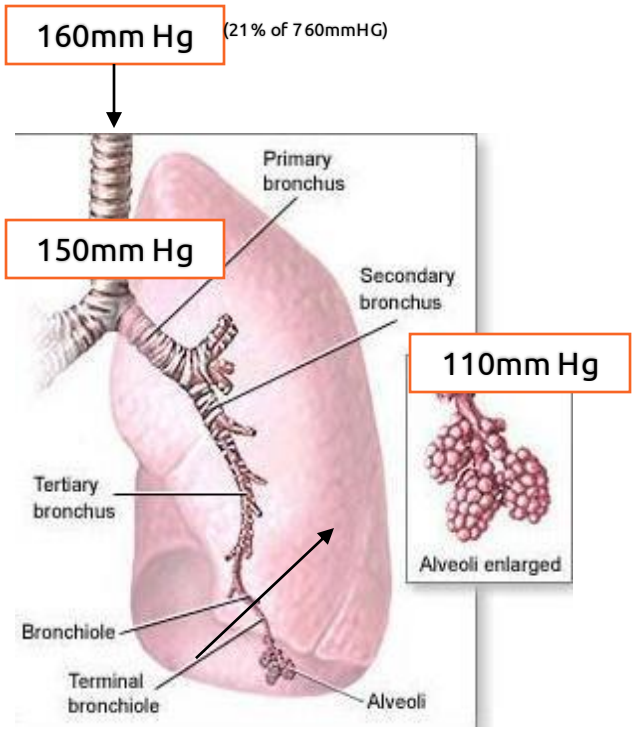


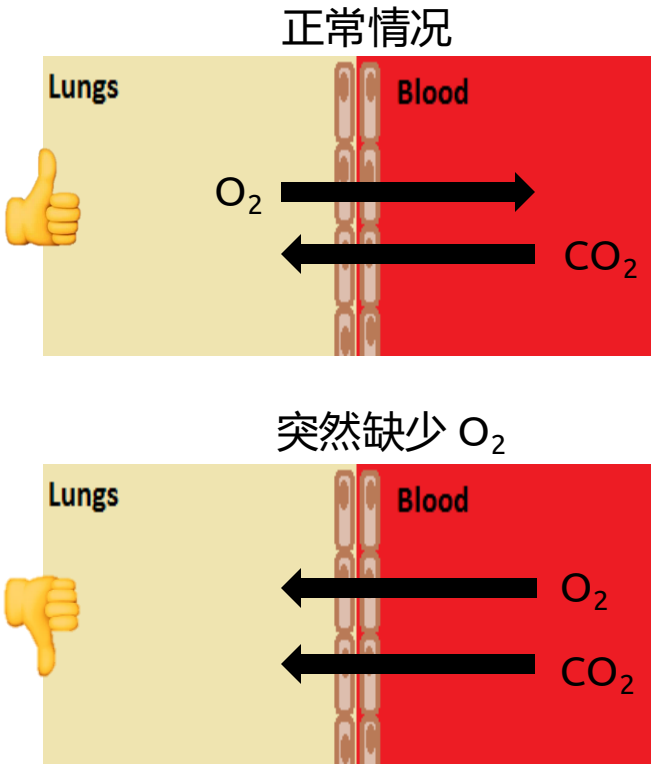
# 氧气浓度降低的影响

- 正常的大气中:
  - ~21% 氧气, 78% 氮气, 1% 其它
  - 氧气分压为 ~ 160 mmHg.
  - 当空气到达肺泡时 ppO2 = 110mmHg

- 呼吸正常的空气:
  - 如 ppO2 低于 60mmHg…
    - 血红蛋白饱和度急剧下降
    - 缺氧的影响开始显现

  - 氧气扩散度反转
    - 从肺气失去氧气
  - <60%动脉血氧饱和度
    - 严重缺氧 → 意识丧失



# 氧气浓度对受害者的影响

| 窒息阶段 | 氧气 % v/v (海平面) | 危害 / 生理效应 | 警示 |
|---|---|---|---|
| 阶段 0 | 20.9–19.5 | • 可容忍水平<br>• 正常操作应以 20.9%–20.8% 为目标 | |
| 阶段 0 | 19.5–18 | • 被认为是危险的大气<br>• OSHA / GB 及多数国家建议的工作水平 | 缺氧的判定浓度 |
| 阶段 0 | < 18 | • 被认为是危险的气氛 | |
| 阶段 1 | 16–14 | • 注意力、思维和肌肉协调能力受损 | |
| 阶段 2 | 14–12.5 | • 判断错误和肌肉协调能力差<br>• 识别能力和对疏散警报的反应能力受损 | 难以逃离 |
| 阶段 2 | 12.5–10 | • 判断力和协调能力将受到严重损害<br>• 可能无法对疏散警报做出反应<br>• 可能是永久性的心脏损伤<br>• 可能在几分钟内毫无征兆地晕倒 | |
| 阶段 3 | 10–6 | • 很有可能会致死<br>• 没有移动能力 — 不能站立、行走或爬行<br>• （这通常是唯一的警告）<br>• 没有能力识别或回应疏散警报<br>• 几分钟内失去知觉，随后死亡<br>• 可能的复苏 — 可能是永久性心脏和大脑损伤 | 极度危险 |
| 阶段 4 | < 6 | • 突然暴露 — 逃脱能力少于 10 秒<br>• 40 秒内失去知觉<br>• 几分钟后死亡<br>• 复苏可能 — 会造成永久性心脏和大脑损伤 | 极度危险 |
| 瞬间窒息 | < 2 | • 立即失去知觉，几分钟后死亡 | 致命 |

依据：OSHA / GBZ / WHO 缺氧分级标准 · 颜色仅作视觉警示，文字内容为关键判据

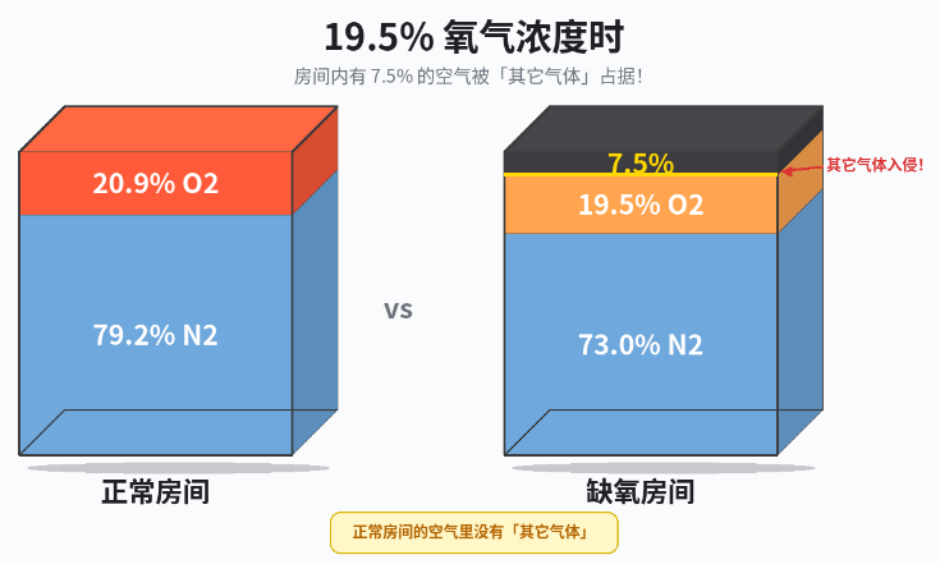
个人的健康状况会影响他们对氧气消耗的反应。

在某些健康状况下，影响可能会恶化或更早出现: 如。冠状动脉、肺或其他循环系统疾病。

# 可接受的氧气浓度标准

**19.5% $O_2$** 氧气浓度是绝大多标准定义的可接受的限制：

- GB 8958-2006 缺氧危险作业安全规程
- GB 30871-2022 危险化学品企业特殊作业安全规范 第 6 章 受限空间作业
- NIOSH IDLH Pocket Guide / EN: $O_2$ <19.5% 即认定为缺氧 IDLH（立即威胁生命和健康浓度）
- 更低的氧气浓度将降低警示、逃生及救援的可能性，并且更容易导致重伤和死亡，事故的可能性和严重性均会增加




19.5% 时, 房间中 7.5% 的空气被“其它气体”占据了!

本次分享不考虑受限空间作业的窒息风险，不考虑化学/有毒窒息的风险（如一氧化碳）

# 议程 Agenda

窒息气体的危害及典型事故

**窒息风险的场景筛查**

窒息风险的评估及氧气浓度计算

安全防护措施介绍

小结及答疑



# 窒息风险识别及防控措施调查

贵工厂主要采取以下哪种方法识别及防控窒息风险：

A：没有独立识别窒息气体风险，按照设计单位的建议进行（可能有基本的氧气探头要求）

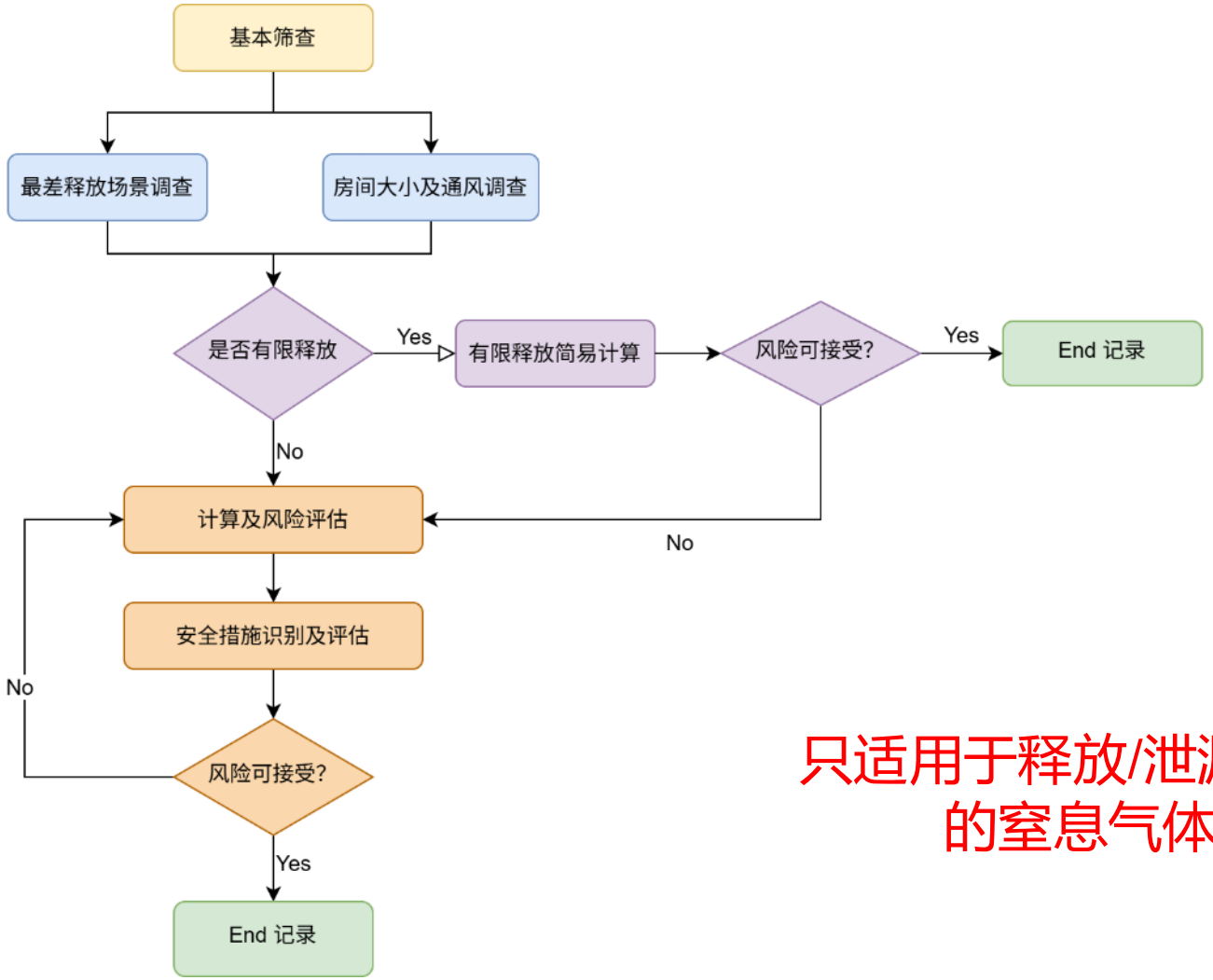
B：日常检查时会包括窒息气体风险的检查，无专项的检查项目/流程，有基本的氧气探头要求

C：有专项的检查项目或流程，无详细的计算及评估流程，有泄漏防护、通风、以及氧气探头等综合的防护要求

D：有详细的风险识别及评估流程，包括浓度计算论证，有泄漏防护、通风、以及氧气探头等综合的防护要求

**二维码（单选）**

# 窒息风险评估基本流程




只适用于释放/泄漏至房间内的窒息气体评估

# 窒息风险基本筛查

- 以下可能使用窒息气体及低温液化气体的区域/场景考虑窒息风险

| 气体/液化气体 | 化学式 | 相对密度 (空气=1) | 主要场景 |
|---|---|---|---|
| **氮气** | $N_2$ | 0.97 | 制氮装置、液氮汽化、惰化置换、氮气吹扫 |
| **氩气** | Ar | 1.38 | 焊接保护气、惰化置换、实验/分析室使用 |
| **氦气** | He | 0.14 (向上聚集) | 实验/分析室使用 |
| **二氧化碳** | $CO_2$ | 1.52 | 工艺物料、惰化置换、消防灭火、干冰、发酵工艺 |
| **制冷剂** | —— | > 1 (除氨气) | 冷冻/制热系统、冷库 |
| **气体灭火剂** | —— | > 1 | 配电室、IT机房、其他消防重点保护的区域 |

**小心：**

液化气体泄漏
　　氮气 / 氩气
　　1L 液氮 = 680L 氮气!
低温场景
储存气瓶及液化气体的区域
夹层及设备区（可能有管道）

# 筛选最差的释放场景

以房间作为目标，确定可能存在的释放场景，常见的场景为（相对危险度排序）：

- 破裂释放泄漏：杜瓦瓶破裂，管道/软管破裂或断开，超压破裂
- 直接排放：氮气等气体直排至房间内（包括PSV等紧急排放）
- 开放操作：直接吹扫惰性气体并释放房间内，使用气体测试并释放
- 触发释放：某种条件时自动触发释放，通常为灭火系统
- 管道或设备泄漏：法兰、螺纹连接、阀门、快速接口泄漏，管道穿孔

确定 1 ~ 2个最差的主导场景，用于评估计算

| Room Name / No.<br>房间名称/编号 | System<br>系统 | Fluid<br>流体 | Piping Failure - 5mm hole<br>管路失效 - 5mm孔径 | Piping Failure - 12mm hole<br>管路失效 - 12mm孔径 | Catastrophic Failure<br>严重破裂 | Isolation Failure<br>隔离失效 | Open Plant Operations<br>开放操作 | Cylinder Release<br>气瓶释放 | Triggered Discharge<br>触发释放 | Cryogenic Liquids/Solid<br>低温液体/固体 | Rationale / Remarks for Release Scenario<br>释放场景的原因/备注 | Worst Case Failure Type<br>最严重的场景 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A1 | **N2 piping leak<br>N2管道泄漏** | N2 | Y | N | Y | N | N | N | N | N | N2 release if pipe breaks<br>如果管道破裂，将释放N2 | N2 release if pipe breaks (the leaked flowrate is the same to N2 generation flowrate 0.8 m/hr)<br>如果管道破裂，将释放N2 (泄漏流量与 N2 生成流量相同 0.8 m/hr) |

注: 所有被评估并确定为不可信的场景，标记为"N"。

**Identified governing leak scenario**
**确定的主导泄漏场景**

# 房间及通风调查

- 房间体积 及 空余空间率（去除设备、固定设施后的体积，通常取 80 % ~ 95 %）
- 房间通风调查：以换气次数表示 ACH – Air Changes per Hour，优先采用实际测试ACH
- 注意新风换次次数的比率：房间的独立循环通风不能作为 ACH，如 DFB 层流罩；一个大建筑或大洁净区的空调系统的内部循环，充许作为单个房间的 ACH，但需要考虑是否存在“惰化”整个建筑的可能性

| Room Name / No.<br>房间名称/编号 | Room Volume<br>房间体积<br>($m^3$) | % Free Volume<br>空余比例 | Effective Volume<br>空余体积<br>($m^3$) | Air changes/hr<br>换气次数 | Fresh Air Make Up<br>新风率<br>% | Fresh Air changes/ hr<br>新风换气次数 | Remarks<br>注释 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A1 | 43.5 | 95% | 41.3 | 7.0 | 59% | 4.1 | General ventilation. The oxygen monitor with alarm was installed near the machine.<br>整体通风，在机器附近安装了带报警功能的氧气监测器 |

# 议程 Agenda

窒息气体的危害及典型事故

窒息风险的场景筛查

**窒息风险的评估及氧气浓度计算**

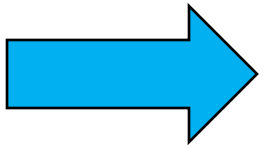
安全防护措施介绍

小结及答疑

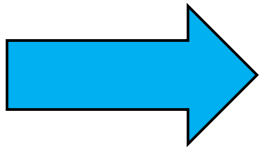


# 有限释放 vs 连续释放

- 有限释放：氮气/氩气/氦气 气瓶，小型杜瓦瓶/液化气体瓶，小型气体灭火系统的钢瓶，少量制冷剂，少量的干冰
- 连续释放：来自 液氮/液氩储罐，制氮机，园区公用氮气，释放总量较大

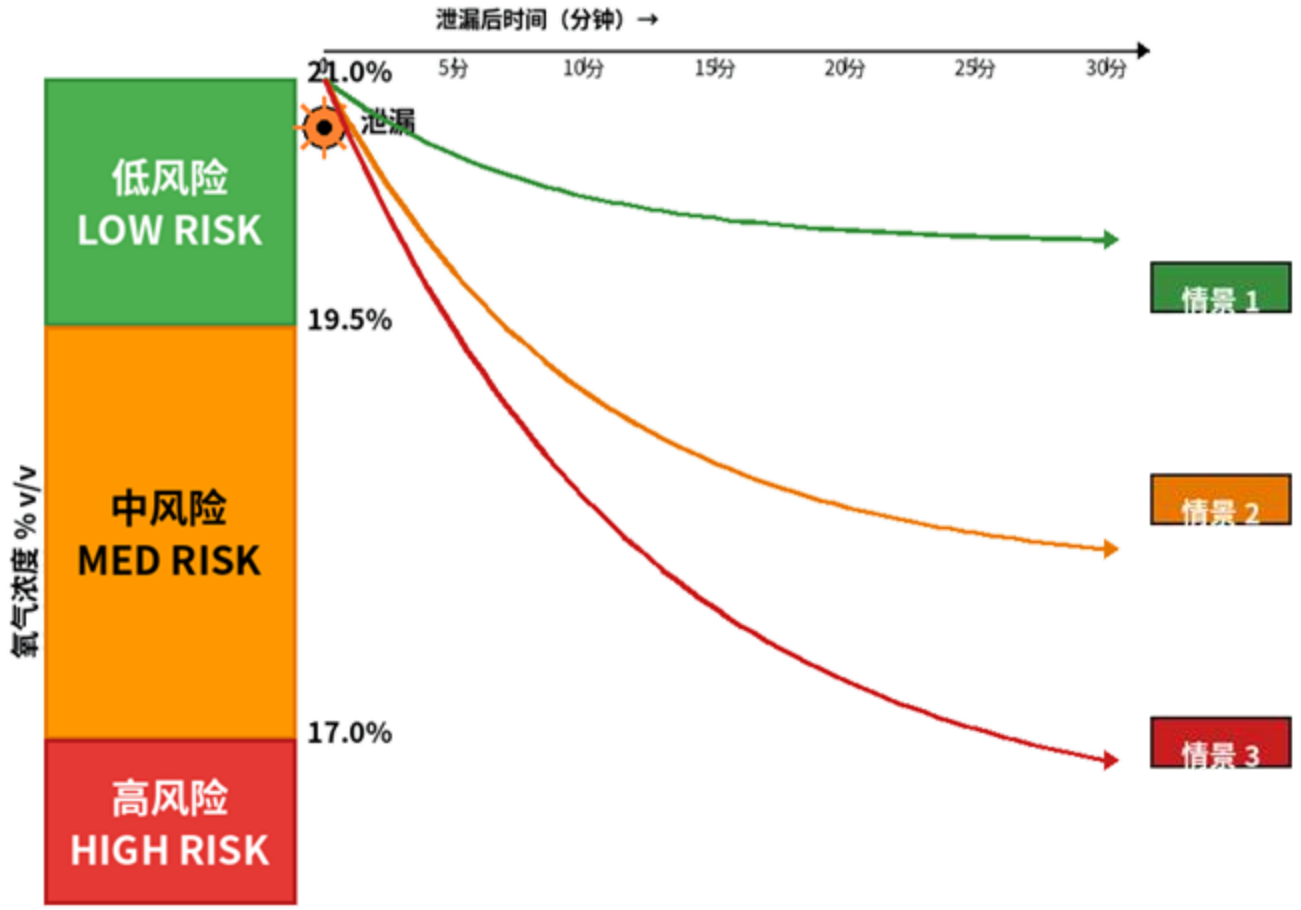


有限释放简易保守计算，结果不可接受再进行连续释放计算 或 直接采用保守安全措施



用筛查的最差场景进行连续释放计算，考虑通风 开启 及 关闭 的情况

# 氧气浓度与风险判定




**情景 1 — 低风险（最坏情况降至 19.5% v/v）**

- HVAC 视为安全关键措施（如通风纳入安全措施）
- 制定应急预案以防故障

**情景 2 — 中风险（17–19.5% v/v）**

- 通风作为安全关键管理
- 制定应急计划
- 额外配置：
  - 气体探测报警

**情景 3 — 高风险（< 17% v/v）**

- 通风作为安全关键管理
- 制定应急计划
- 额外配置：
  - 气体探测
  - 房间互锁 / 切断气源
  - 阻止进入房间

# 有限释放计算

- 有限释放：不考虑通风 ACH 继续保守计算：

**纯窒息气体进入后的剩余氧浓度（均匀混合）**

$$x_O_2 = (x_O_2^0 \times V_room) / (V_room + V_leak)$$

其中：　$x_O_2^0 = 0.209$（正常空气）

$V_room$ 为房间净体积（空余体积）

$V_leak$ 为泄漏的纯窒息气体体积

**≥ 19.5% v/v　低风险，安全措施非强制（压力很高，且房间较大，需考虑局部浓度过高）**

**< 19.5% v/v　中/高风险，采用连续释放模型计算，或直接采用保守措施：**

- 新风换气：建议至少 8 ACH（对于 4 barg 氮气 从 5mm 小孔/管道泄漏）
- 氧气浓度监测报警：设置在合适的代表位置，考虑报警时能自动关闭气体阀门 或/和开启紧急排风（≥12 ACH 或 2倍正常换气量）

# 有限释放计算

| Scenario<br>场景 | Room Name / No.<br>房间名称/编号 | Room Volume<br>房间体积 (m3) | Type of Gas<br>气体类型 | Number of leaked gas container<br>泄漏的容器数量 | Water Capacity of container<br>容器的水容积 (Litre) | Abs. Pressure inside container<br>容器内的绝压 (bara) | Volume of gas in container<br>容器内的气体体积 ($m^3$) | Room volume of oxygen<br>房间的氧气体积 ($m^3$) | Oxygen conc. in the room due to leakage<br>泄漏后的房间氧气浓度 | Remarks<br>注释 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nitrogen cylinders were placed in the room, all N2 in cylinder release should be credible worst case<br>氮气钢瓶放置在房间内，气瓶所有氮气释放应视为最坏情况 | RM3037 | 68 | Nitrogen | 1 | 40 | 121 | 4.84 | 13 | 19.5053% | Low risk<br>低风险 |

- 一瓶 40 L 的 120 barg 的满瓶氮气瓶，全部释放至外部的氮气体积约 5 $m^3$，房间的空余体积低于 68 $m^3$，如无通风，氧气浓度可低于 19.5 %
- 小心识别单个容器释放或多个容器同时释放的场景，如多个容器通过总管连接，可能同时释放至房间
- 小心液化气体，其膨胀倍数很高，液氮等于 680 barg 的氮气瓶，其他膨胀倍数：
  - 液体氦 (L-He)　　1 : 757
  - 液体氩 (L-Ar)　　1 : 847
  - 干冰 (S-$CO_2$)　　1 : 865



# 窒息气体释放计算模型

针对 液氮/液氩储罐，制氮机，园区共用氮气，不可接受的有限释放场景：

- 采用最差的释放场景计算泄漏量及氧气浓度
- 对无明显振动、腐蚀及物理应力的管道，可以采用 5 mm 小孔泄漏计算
- 上游有截流的孔、管道或阀门，可取 泄漏孔 和 截流孔 中的较小值确定泄漏孔的尺寸
- 可采用设备及工艺参数确定保守的释放量，如制氮机的最大流量，气体排放流量，灭火器喷洒流量
- 对于泄漏较大的破裂，倾倒泄漏等场景，可采用保守的数值，如液氮瓶泄漏 2 min 内全部气化
- 采用专业软件及工具辅助模拟计算，如 Phast，CCPS工具

# 释放流量计算（适用孔径泄漏）

**公式 (B.3) — 亚音速泄漏（Non-choked / subsonic release）**

$$W_g = C_d \cdot S \cdot p \cdot \sqrt{\left[ (M / (Z \cdot R \cdot T)) \cdot (2\gamma/(\gamma-1)) \cdot (1 - (p_a/p)^{((\gamma-1)/\gamma)}) \cdot (p_a/p)^{(1/\gamma)} \right]} \quad [kg/s]$$

*适用条件：$p_a / p > (2/(\gamma+1))^{(\gamma/(\gamma-1))}$ 即下游压力比高于临界值 → 泄漏口处为亚音速*

**公式 (B.4) — 音速/扼流泄漏（Choked / sonic release）**

$$W_g = C_d \cdot S \cdot p \cdot \sqrt{\left[ (\gamma \cdot M) / (Z \cdot R \cdot T) \cdot (2/(\gamma+1))^{((\gamma+1)/(\gamma-1))} \right]} \quad [kg/s]$$

*适用条件：$p_a / p \le (2/(\gamma+1))^{(\gamma/(\gamma-1))}$ 即下游压力比低于临界值 → 泄漏口处达到音速（马赫数=1）*

**公式 (B.5) — 体积流量换算 & 气体密度**

$$Q_g = W_g / \rho_g \quad [m^3/s] \quad \leftarrow \text{由质量流量换算为标准大气下的体积流量}$$

符号定义：$W_g$ [kg/s 质量流量] | $C_d$ [流量系数, 0.5–0.75] | $S$ [泄漏截面积, $m^2$] | $p$ [容器绝对压力, Pa] | $p_a$ [环境大气压力, Pa] | $\gamma$ [比热比, $N_2$=1.4] | $M$ [摩尔质量, kg/mol, $N_2$=0.028] | $Z$ [压缩因子, 理想气体=1] | $R$ [气体常数, 8.314 J/(mol·K)] | $T$ [绝对温度, K] | $\rho_g$ [气体密度, $kg/m^3$] | $Q_g$ [体积流量, $m^3/s$]

*来源：TNO Green Book Annex B*

# 氧气浓度计算

## Equation 1 — 指定时间后的氧浓度 $C_t$

$$C_t = 0.21 + [\ 0.21 \cdot n / (\ (L / Vr) + n\ ) - 0.21\ ] \times [\ 1 - e^{(-t / m)}\ ]$$

## Equation 2 — 长时间后（long periods）的稳态氧浓度 $C_\infty$

$$C_\infty = (\ Vr \times 0.21 \times n\ ) / (\ L + Vr \times n\ )$$

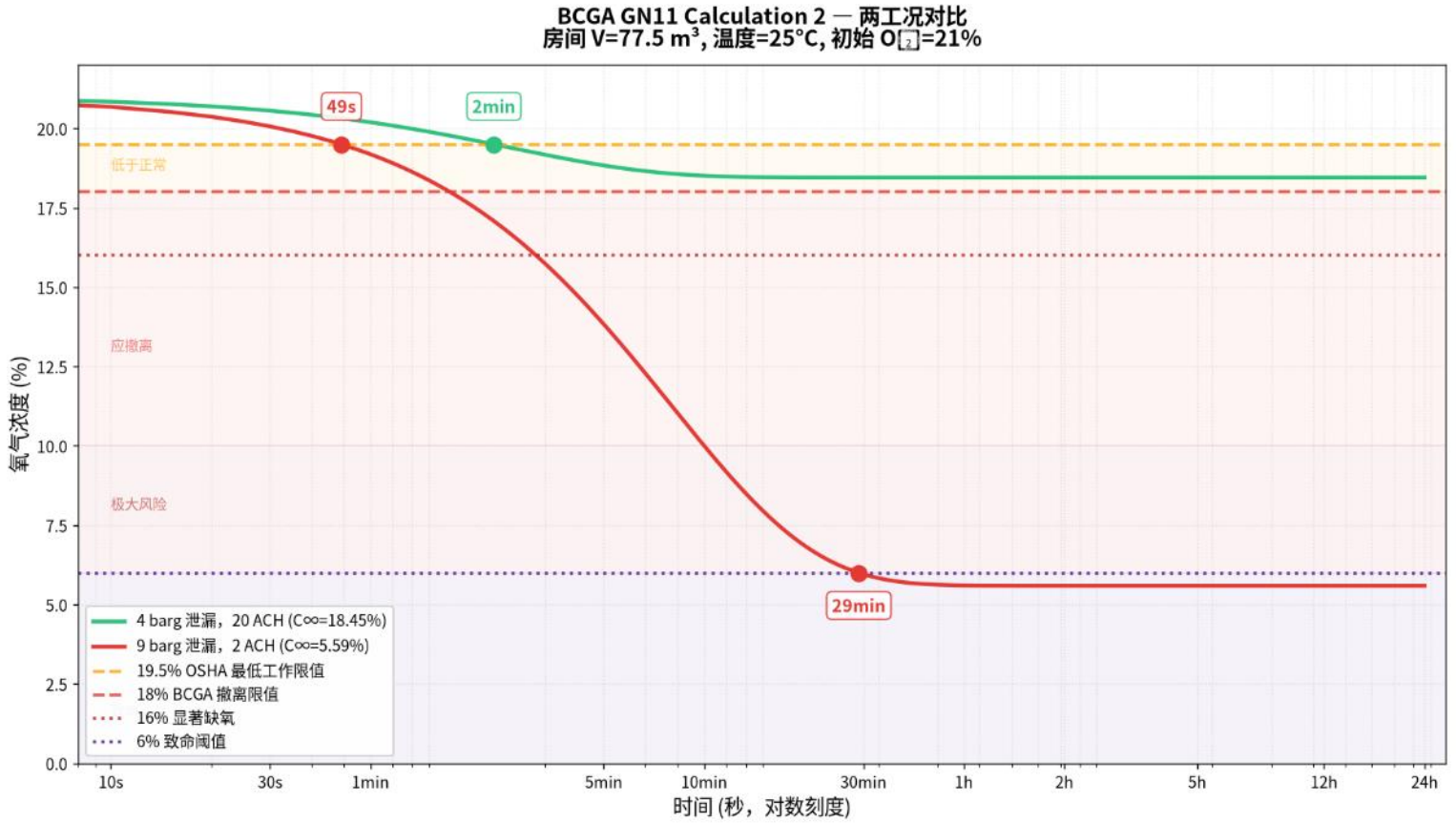
*（注：$C_\infty$ 近似值，适用于持续泄漏 + 通风的稳态工况）*

**变量定义（Where:）**

$C_t$ — 指定时间 t 后的氧浓度（体积分数，如 0.21 = 21%）
$C_\infty$ — 长时间（数日）后稳态氧浓度，即 long periods 结果
L — 气体泄漏速率，单位 $m^3/h$（标准大气下体积流量），前面公式中的Q_g
Vr — 工作场所自由空气体积，单位 $m^3$
n — 每小时换气次数，ACH（air changes per hour）
t — 时间，单位 小时（h）
e — 自然常数 ≈ 2.72
m — 时间常数，m = Vr / (L + n·Vr)，单位 小时

*BCGA GN11 Hazards of Oxygen-Deficient Atmospheres, British Compressed Gases Association*

# 泄漏流量计算案例




**低风险（最坏情况降至 19.5% v/v）**
- HVAC 视为安全关键措施（如通风纳入安全措施）
- 制定应急预案以防故障

**中风险（17–19.5% v/v）**
- 通风作为安全关键管理
- 制定应急计划
- 额外配置：
  - 气体探测报警

**高风险（< 17% v/v）**
- 通风作为安全关键管理
- 制定应急计划
- 额外配置：
  - 气体探测
  - 房间互锁 / 切断气源
  - 阻止进入房间

**77.5 m³ 房间内的 10 mm 氮气软管泄漏：4barg 压力 & 20 ACH 换气次数 vs 9barg 压力 & 2 ACH 换气次数**

# 工具及软件 (CHEF from CCPS)

1

Clear Inputs

**SOURCE MODELS INPUT INFORMATION**

*Required Inputs are Shaded "Yellow"*

STEP 1 - Select Type of Release: Hole Size

STEP 2 - Enter Required Release Information

*Input Units may be changed - Input Values in "blue" will be converted to appropriate equation units*

| Release Inputs: | Input Value | Input Units | Equation Input | Equation Units |
|---|---|---|---|---|
| Hole Size, d | 10 | mm | 0.01 | m |
| Coefficient $c_d$ (typically Square Edged Hole) | Rounded Nozzle | | 1 | dimensionless |
| Heat Input Rate, q | | | | kWatt |
| Specified Rate (at either specified Hole Size or Release Pressure) | | | | kg/sec |

| Process Inputs: | Input Value | Input Units | Equation Input | Equation Units |
|---|---|---|---|---|
| Release Temperature, T | 25 | | 25 | C |
| Release Pressure (gauge), $P_0 - P_A$ | 9 | bar | 900 | kPa gauge |
| Total Inventory (Leave Blank for 1 hour leak) | | | | kg |

STEP 3 - Enter Chemical Properties *(or Select Chemical Name from Pic List)*

Chemical Name: Nitrogen — Cas No. 7727-37-9

**ESTIMATED VAPOR RELEASE RATE**

*Hole Size (equation 12-4):*

$V = 23\ c_d\ d^2\ P_0\ \{ [ (P_A/P_0)^{1.429} - (P_A/P_0)^{1.714} ]\ Mw / T \}^{1/2}$ *based on 1.4 isentropic exponent*

$P_A / P_0 =$ 0.528 *limited to 0.528* *Note: $P_A$ = 101.3 kPa*

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| V = | 0.182 | kg/sec | - or - | 24 lb/min |
| 1 hr Release = | 655.2 | kg | - or - | 1441.4 lb |

*Specified Rate:*

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| V = | | kg/sec | - or - | lb/min |
| 1 hr Release = | | kg | - or - | lb |

*Heat Input with Vaporization (equations 12-12 to 12-15):*

$V = q / \Delta H_V = ( 0 ) / ( 50 )$

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| V = | | kg/sec | - or - | lb/min |
| 1 hr Release = | | kg | - or - | lb |

*10 Minute Release:*

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| V = | | kg/sec | - or - | lb/min |
| 1 hr Release = | | kg | - or - | lb |

*Equipment Rupture:*

2

Clear Inputs

**VAPOR DISPERSION INPUT INFORMATION**

*Required Inputs are Shaded "Yellow"*

STEP 1 - Select Location, Type of Release, Concentration and Distance of Interest

Release Location *(Assumed Outdoor if Blank)*: Indoor

Type of Release: Vapor

Use Averaging Time Correction for Flammable Release: *Blank will not correct for flammable averaging time.*

*Input Units may be changed - Input Values in "blue" will be converted to appropriate equation units*

| | Input Value | Input Units | Equation Input | Equation Units |
|---|---|---|---|---|
| Concentration of Interest | 7.5 | vol % | 75000 | ppm |
| Outdoor Downwind Distance of Interest, X | | | | m |

*Concentration of Interest for Hazard Analysis is typically 1/2 LFL, LFL, ER-2, ER-3 or $LC_{50}$*

*Distance of Interest is typically to the property limit, to an unrestricted work area, or to an occupied building*

***Note that Concentration of Interest is Needed for Estimation of Exposure Duration for Instantaneous Release***

STEP 2 - Enter Chemical Properties *(or Select Chemical Name from Pic List)*

Chemical Name: Nitrogen — Cas No. 7727-37-9

3

STEP 3 - Enter Process Information

| Process Inputs: | Input Value | Input Units | Equation Input | Equation Units |
|---|---|---|---|---|
| Airborne Rate, Q | 0.182 | | 0.182 | kg/sec |
| Airborne Temperature, T | 25 | C | 25 | C |
| Total Release Quantity, Q* (Leave Blank if Unlimited) | | | | kg |
| Liquid or Two-Phase Release Velocity* (Flashing Liquid) | | | | m/sec |
| Initial Fraction Vapor*, $f_0$ (Flashing Liquid Only) | | | | Fraction |
| Vapor Pressure at Release Temp (Subcooled Liquid Only) | | | | kPa absolute |

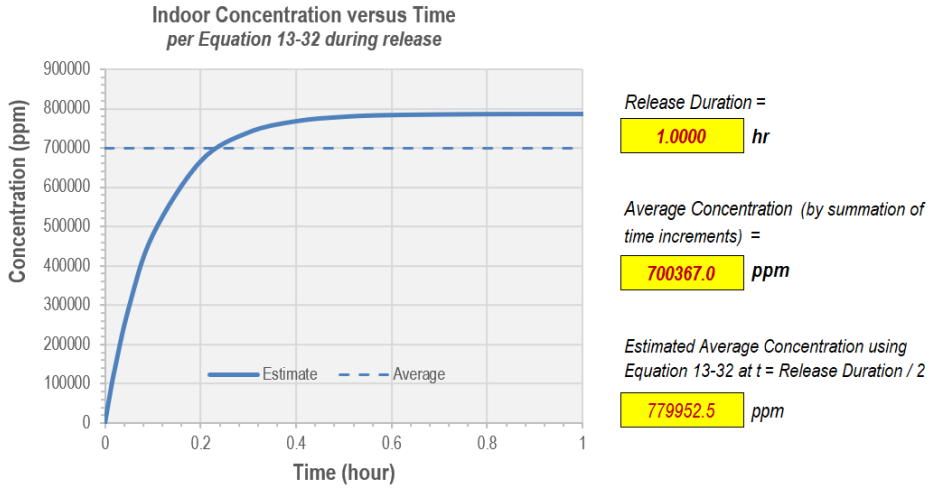
*Note that these inputs may not significantly change results

STEP 4 - Enter Equipment and Plant Layout Information

| Equipment and Plant Layout Inputs: | Input Value | Input Units | Equation Input | Equation Units |
|---|---|---|---|---|
| Diameter of Hole or Discharge Piping, $d_0$ | | | | m |
| Release Elevation, h (Blank assumed at Ground) | | | | m |
| Release Direction (Assumed Horizontal if Blank) | | | | |
| Enclosed Process Area Volume, $V_{Bldg}$ | 77.5 | | 77.5 | cu m |
| Enclosed Process Area Ventilation Rate | 2 | Air Changes/Hr (Assumed 1 if Blank) | | |

*The hole size for vapor release estimate or diameter of relief system discharge piping. If blank, no jet mixing used.*

4




*Release Duration =* 1.0000 *hr*

*Average Concentration (by summation of time increments) =* 700367.0 *ppm*

*Estimated Average Concentration using Equation 13-32 at t = Release Duration / 2* 779952.5 *ppm*

**77.5 $m^3$ 房间内的 10 mm 氮气软管泄漏：9barg 压力 & 2 ACH 换气次数**



Bing国际版搜索：chef-calculation xls，然后下载最新的excel文件

# 风险评定

情景 1

**情景 1 — 低风险（最坏情况降至 19.5% v/v）**
- HVAC 视为安全关键措施（如通风纳入安全措施）
- 制定应急预案以防故障

情景 2

**情景 2 — 中风险（17–19.5% v/v）**
- 通风作为安全关键管理
- 制定应急计划
- 额外配置：
  - 气体探测报警

情景 3

**情景 3 — 高风险（< 17% v/v）**
- 通风作为安全关键管理
- 制定应急计划
- 额外配置：
  - 气体探测
  - 房间互锁 / 切断气源
  - 阻止进入房间

直接定性风险评定

| Severity 严重性 | Likelihood 可能性 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $>10^{-1}$ (普遍，每日发生) | $10^{-1}$~$10^{-2}$ (普遍每周、每月发生) | $10^{-2}$~$10^{-3}$ (每年有多次发生的可能) | $10^{-3}$~$10^{-4}$ (可能发生) | $10^{-4}$~$10^{-5}$ (特定情况下发生) | $10^{-5}$~$10^{-6}$ (不太可能发生) | $\leq 1*10^{-6}$ (没听说过) |
| | G | F | E | D | C | B | A |
| 5 | 很高 | 很高 | 高 | 高 | 中 | 中 | 低 |
| 4 | 很高 | 高 | 中 | 中 | 中 | 低 | 低 |
| 3 | 高 | 中 | 中 | 中 | 低 | 低 | 低 |
| 2 | 中 | 中 | 中 | 低 | 低 | 低 | 低 |
| 1 | 中 | 中 | 低 | 低 | 低 | 低 | 低 |

降低风险

- 前面例子：
  - 高风险：9barg 压力 & 2 ACH 换气次数 泄漏，氧气浓度低于 6 %，后果为死亡（S4），软管泄漏可能性F
  - 中风险： 9barg 压力 & 2 ACH 换气次数 泄漏，氧气浓度 18.5 %，后果为严重或中等伤害（S3），软管泄漏可能性F

风险矩阵评定

# 议程 Agenda

窒息气体的危害及典型事故

窒息风险的场景筛查

窒息风险的评估及氧气浓度计算

**安全防护措施介绍**

小结及答疑



# 消除及减少窒息气体释放

消除及减少窒息气体释放是在设计及操作时应优先考虑的措施：

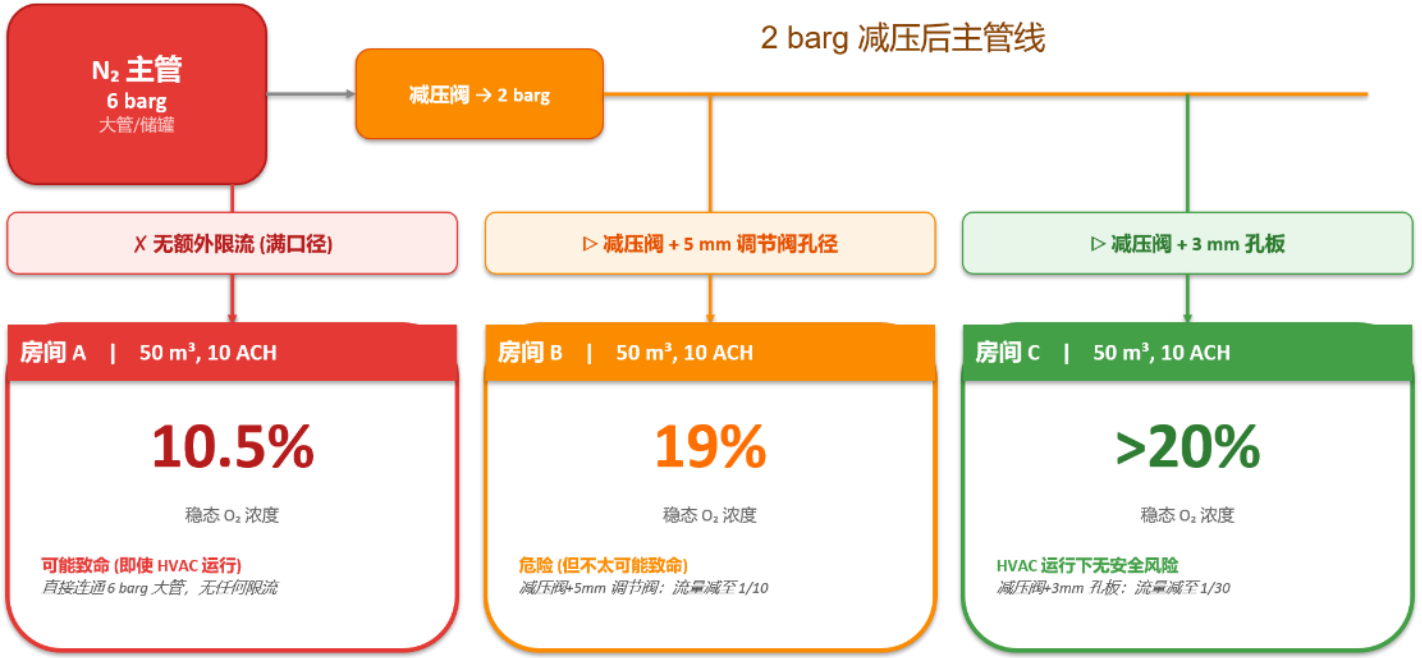
- 避免直接排放：禁止窒息气体直接排向室内，包括 PSV安全阀 的排放，人工吹扫操作；如少量的排放，应在有通风的条件下允许操作
- 布局：高压气体/液化气体的储罐、气瓶及阀组设置在室外或建筑角落的通风较大的独立房间（或半敞开的房间）
- 管道：避免气体/液化气体的管道穿越保护区域，或采用满焊的连接；管道直接从室外接入房间内，并在进入房间前减压；设置双阀；定期测漏
- 软管：小心使用软管，软管的接头应采用可靠的连接，插入式快速连接应采用自闭式接头；定期检查及更换
- 限制使用：避免将窒息气体广泛用于室内（如取代仪表空气）
- 设备区/夹层/隐蔽区域：小心这些区域内的气体设备及管道，通常通风较差，并且泄漏后难以发现





# 消除及减少窒息气体释放

- 减低管道压力：设置合理的管道压力，如 4 barg ➡ 1 barg（实验室常用压力）
- 设置限流孔/减少管径：可显著减少释放流量，低压下 10 mm ➡ 5 mm 孔，泄漏流量减少为 1 / 4
- 停产/维修管理措施：较长时间停产及维修时关闭气体总阀（通常通风会关闭）



# 通风

## 通风是防止窒息事故的非常重要的措施：

- 设计：存在窒息可能的房间，在初始设计/变更时均建议考虑机械通风
- 风量：其他条件不变的情况下，房间越小，需要稀释的ACH换气次数越大，如房间很大（> 700 $m^3$），6 ACH 的换气能满足大部分的气体释放的稀释要求
- 有效性：如通风作为重要或唯一的安全措施，应考虑其失效/未开启的可能性，考虑这些联锁/报警
  - 低风速 / 压差 ➡ 停气源阀门 & 报警；风机停机 ➡ 停气源阀门 & 报警；通风与氧气浓度探头联锁（见后续）；通风系统作为关键设施 ITPM 维护

| S. No.<br>场景编号 | Scenario<br>场景 | Atmospheric Temperature<br>环境温度 (C) | Atmospheric Pressure<br>环境压力 (Bara) | Asphyxiant Gas<br>窒息气体 | Ventilation Running Status<br>通风运行状态 | Gas Supply Pressure<br>气体供应压力 (barg) | Failure Type<br>失效类型 | Leak Path Diameter<br>泄漏管路直径 (mm) | Minimum of Upstream Regulator / Orifice Size / Pipe Size<br>上游调压阀/限流孔/管道最小尺寸 (mm) | Leakage Time (t)<br>泄漏时间 (Hours) | Oxygen Concentration after time t<br>泄漏t后的氧气浓度(%) | Time to reach 19.5 %<br>19.5% 的到达时间 (min.) | Time to reach 17%<br>17% 的到达时间 (min.) | Remarks<br>注释 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1-1 | Continuous Ar Leak (Ventilation OFF)<br>持续氩气气体泄漏（通风关闭） | 25.0 | 1.0 | Argon | OFF | 2.0 | Flexible hose break | 5 | 5.0 | 1.50 | 13.5 | 15.2 | 43.2 | VERY HIGH risk if the ventilation is off<br>通风关闭下为很高风险 |
| 1-2 | Continuous Ar Leak (Ventilation ON)<br>持续氩气气体泄漏（通风开启） | 25.0 | 1.0 | Argon | ON | 2.0 | Flexible hose break | 5 | 5.0 | 1.50 | 19.7 | Cannot reach 不能达到 | Cannot reach 不能达到 | LOW risk if general ventilation is on<br>整体通风开启下为低风险 |

# 氧气浓度探测系统

- 谨慎：避免氧气浓度探测作为唯一的安全措施，对于氧气浓度可能 < 17 % 的房间需特别小心。在氧气浓度迅速降低的区域，可能无警示及清醒的撤离时间 。实施通风仍然是重要措施
- 位置：参考 GB/T 50493-2019石油化工可燃气体和有毒气体检测报警设计标准 的有毒气体的要求设置，靠近压力较高的潜在释放源，如房间存在多点氮气释放，可在人体呼吸高度（约1.5m）安装
- 固定式探头优先，移动式只能作为管理措施
- 联锁 & 报警 设置：
  - 氧气浓度较低的区域 联锁 & 报警 ➡ 停气源阀门（阀门位于房间外） / 开启紧急排风 / 锁定进入的门（内部可打开）
  - 区域报警 vs 集中报警：氧气浓度较低区域的区域报警能直接警示附近的人员，较大的房间应在门口外设置报警警示器
- 安全关键设备：ITPM，检查、测试及维护



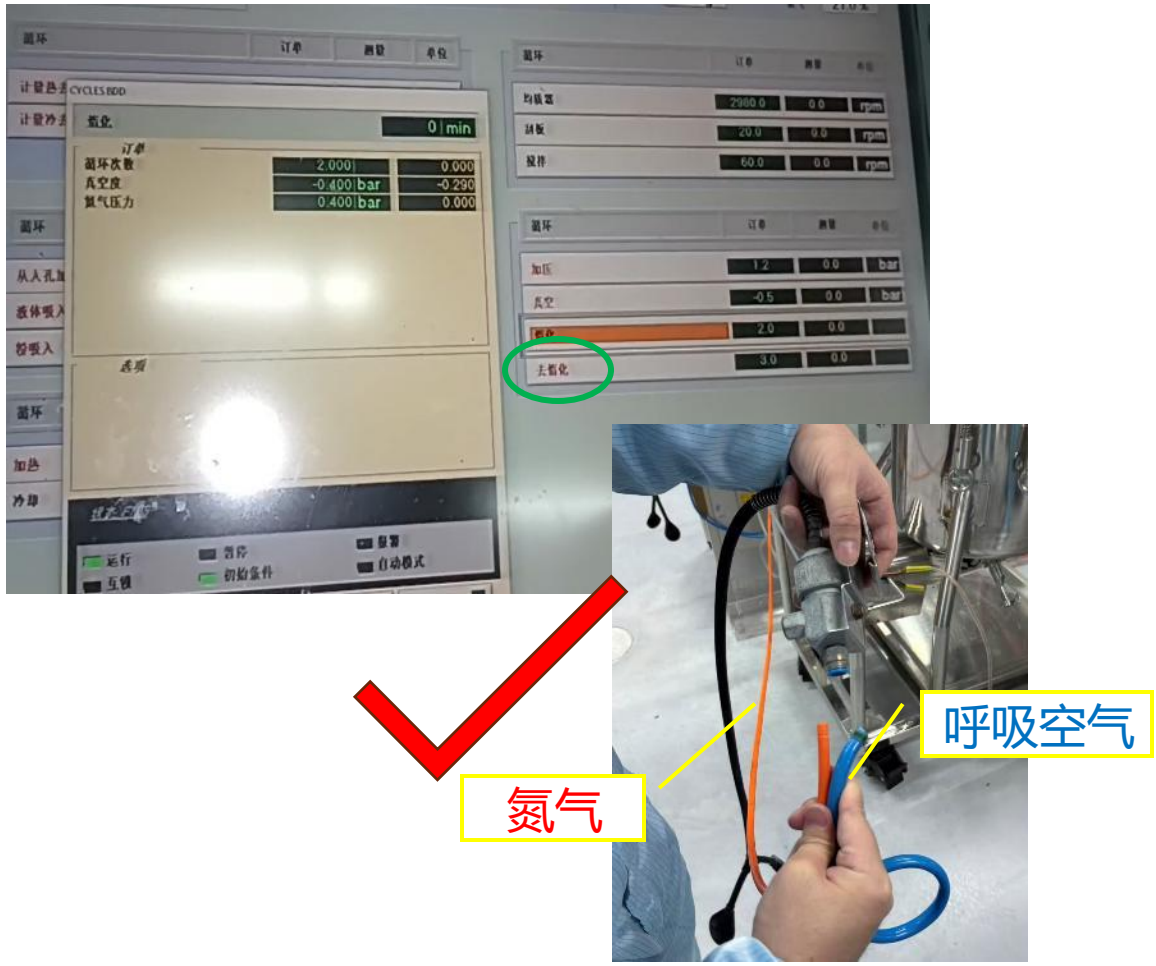




# 特殊风险

这些风险不能用前面的风险识别及评估流程，建议采用 PHA，JSA等评估方法：

- 作为常规操作，人员可能进入存在窒息风险的设备 / 容器：如隔离器，离心器。自动化装置考虑设置顺控“去惰化”及入口锁定程序，同时设置氧气浓度报警；人工操作的装置严格评估风险，人员进入前考虑用便携式探测器探测内部氧气浓度，参考受限空间的安全要求评估及管理风险
- 呼吸空气装置/系统：
  - 物理上隔离窒息气体和呼吸空气管道：采用不同接口的快速接头，管径区别，氮气软管颜色区别（红/黄警示色）
  - 设计上防止窒息气体进入呼吸空气，可能需要在 PHA 中分析并确定安全措施



# 应急救援处置注意

- 识别存在窒息风险的区域，建立处置方案，配备合适的救援人员的防护用品，只有 SCBA 自给式空气呼吸器 为直接防护的PPE
- 如有条件，首先切断释放源，如关闭自动阀门，关闭外部的手阀，停止运行的设备
- 注意仅佩戴便携式氧气浓度探测仪，进入氧气浓度极低的区域 （< 10%），您可能无任何逃生反应的可能性




实验室，小型工厂可配置小型 SCBA（3 L），呼吸时间约 15 min

救援人员的风险与窒息人员的风险相同，参考受限空间的救援人员的死亡率！

# 议程 Agenda

窒息气体的危害及典型事故

窒息风险的场景筛查

窒息风险的评估及氧气浓度计算

安全防护措施介绍

**小结及答疑**



# 易忽视的要点总结

- 极低的氧气浓度会立即导致晕厥（< 10 %），再次起来可能性极低，区别呼吸衰竭效果
- 风险筛查时小心 设备区/夹层/隐蔽 区域，小心液化气体
- 通过减低压力，减少软管，合理的气体容器及管路布局降低泄漏的可能性
- 通风！通风！通风！
- 避免 只有报警功能的氧气浓度探测器作为唯一安全措施
- 呼吸空气装置/系统的安全风险
- 救援人员的安全风险，前提是您已经清楚哪些区域会有窒息风险

# 提问环节 Q&A

