



沼气工程安全与管理

华北电力大学 杨世关

2017年7月20日



提 纲

- 一、沼气工程安全形势
- 二、沼气工程安全解析
- 三、沼气工程事故典型案例剖析
- 四、事故的特征与安全法则



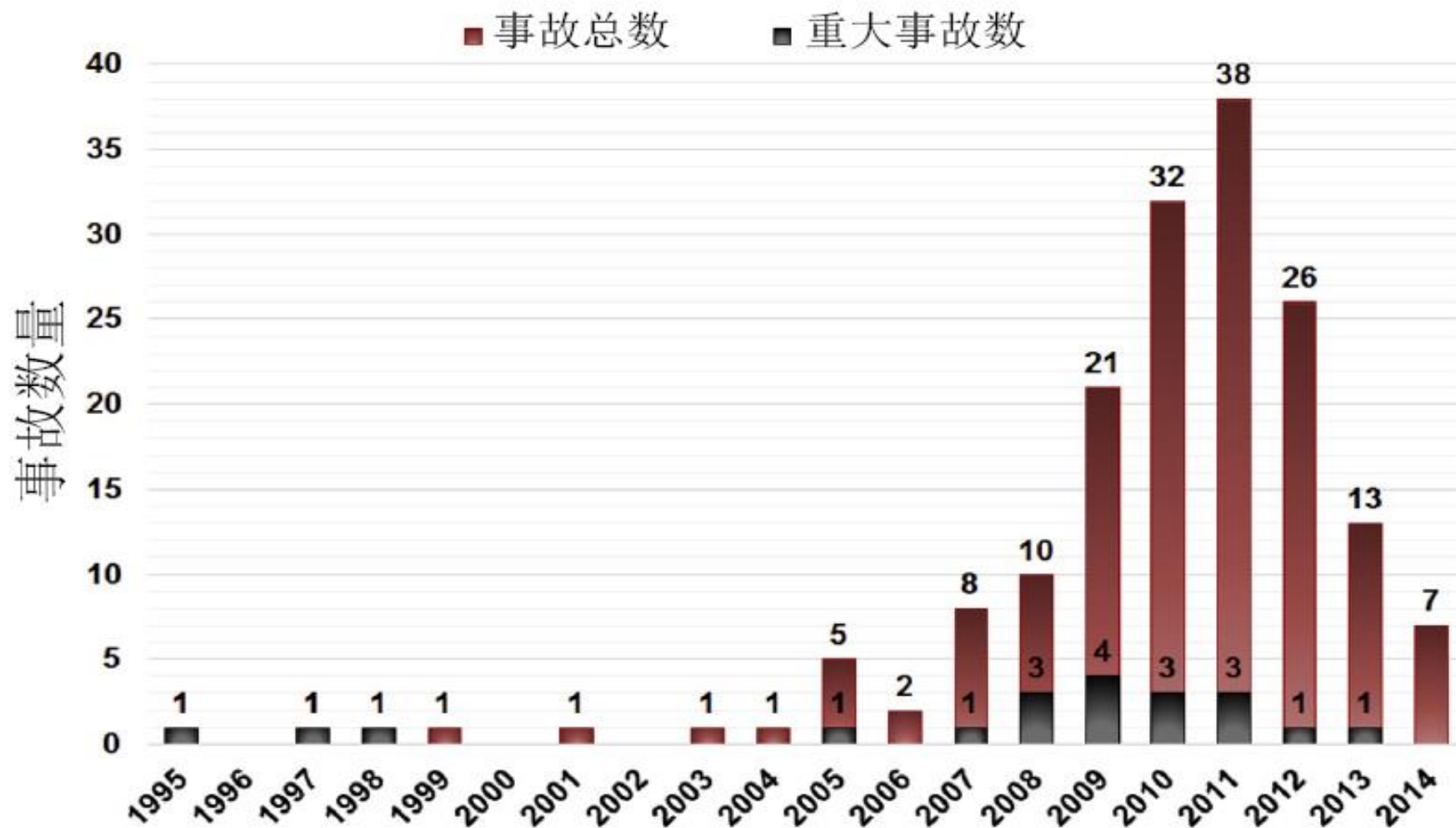
一、沼氣工程安全形勢

1.1 沼氣工程安全整體形勢

1.2 我國沼氣工程安全形勢



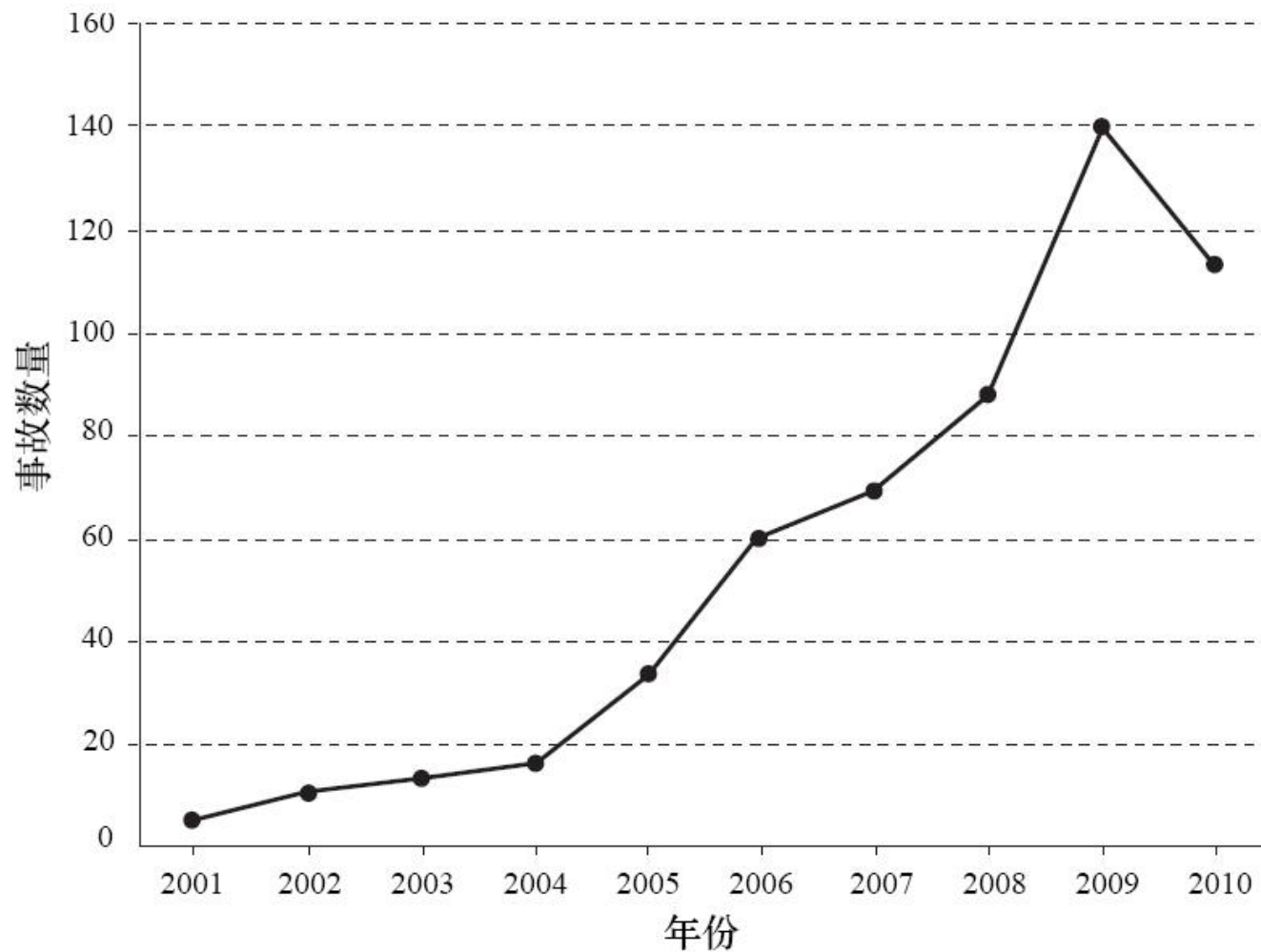
1.1 沼气工程安全整体形势



世界沼气工程事故变化趋势



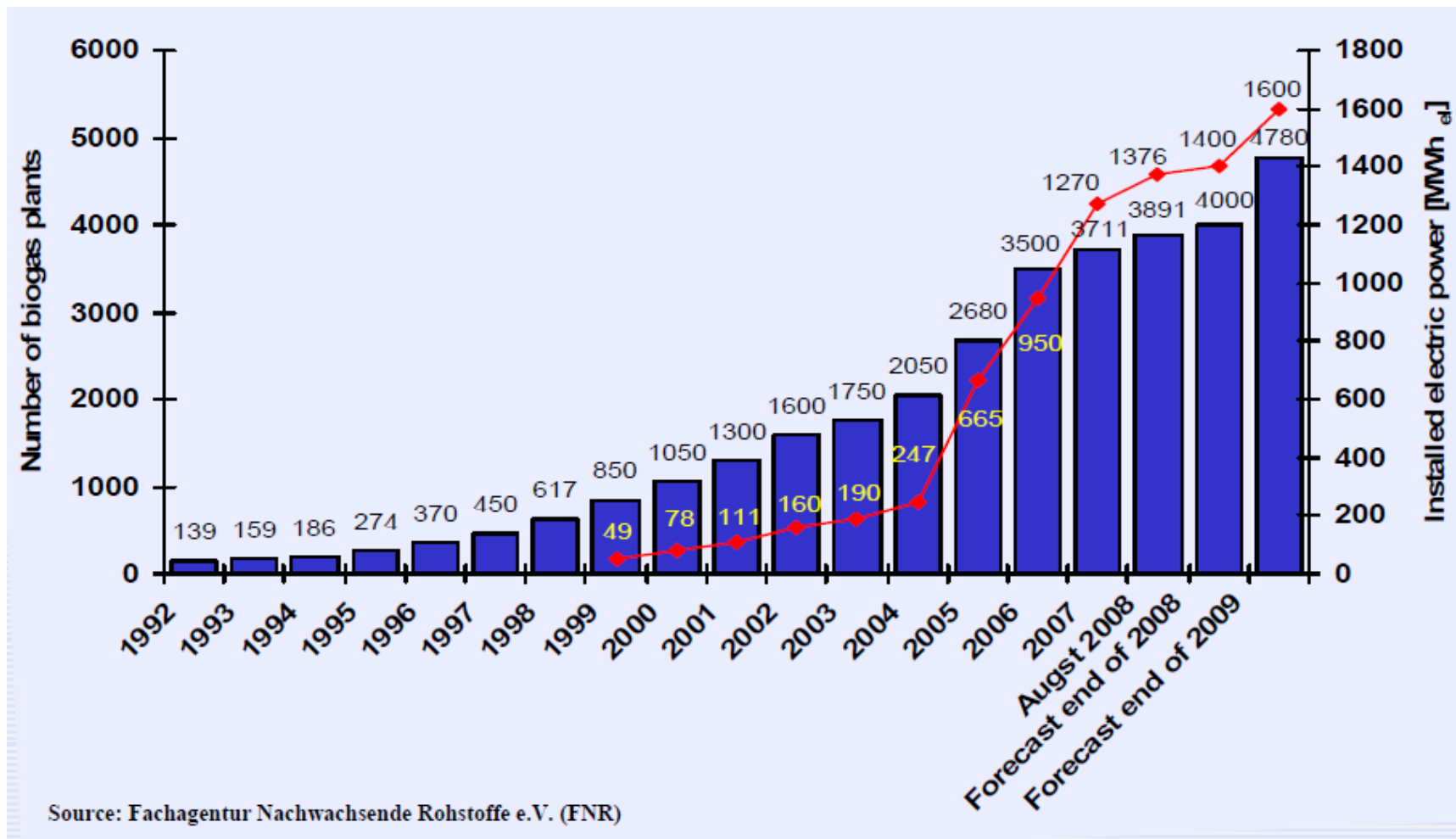
1.1 沼气工程安全整体形势



德国沼气工程事故变化趋势



1.1 沼气工程安全整体形势



德国沼气工程发展情况



1.2 我国沼气管程安全形势

- 1999年，杭州灯塔养殖场沼气管程储气罐爆炸事故，**2死1伤**
- 2001年，杭州田园养殖场沼气管程中毒事故，**2死1伤**
- 2012年，四川省德昌县麻栗乡三合村沼气管程中毒事故，**5人死亡**
- 2014年，安溪县垃圾焚烧发电厂渗滤液池爆炸，**3死2伤**
- 2015年，福建永安市大湖兴旺养殖场沼气管程中毒事故，**3人死亡**
- 2016年，杭州萧山大江东养殖场沼气管程爆炸，**2死3伤**
- 2017年，大连旅顺龙头街道盐厂新村污水池沼气管程中毒，**8死2伤**
- • • • •

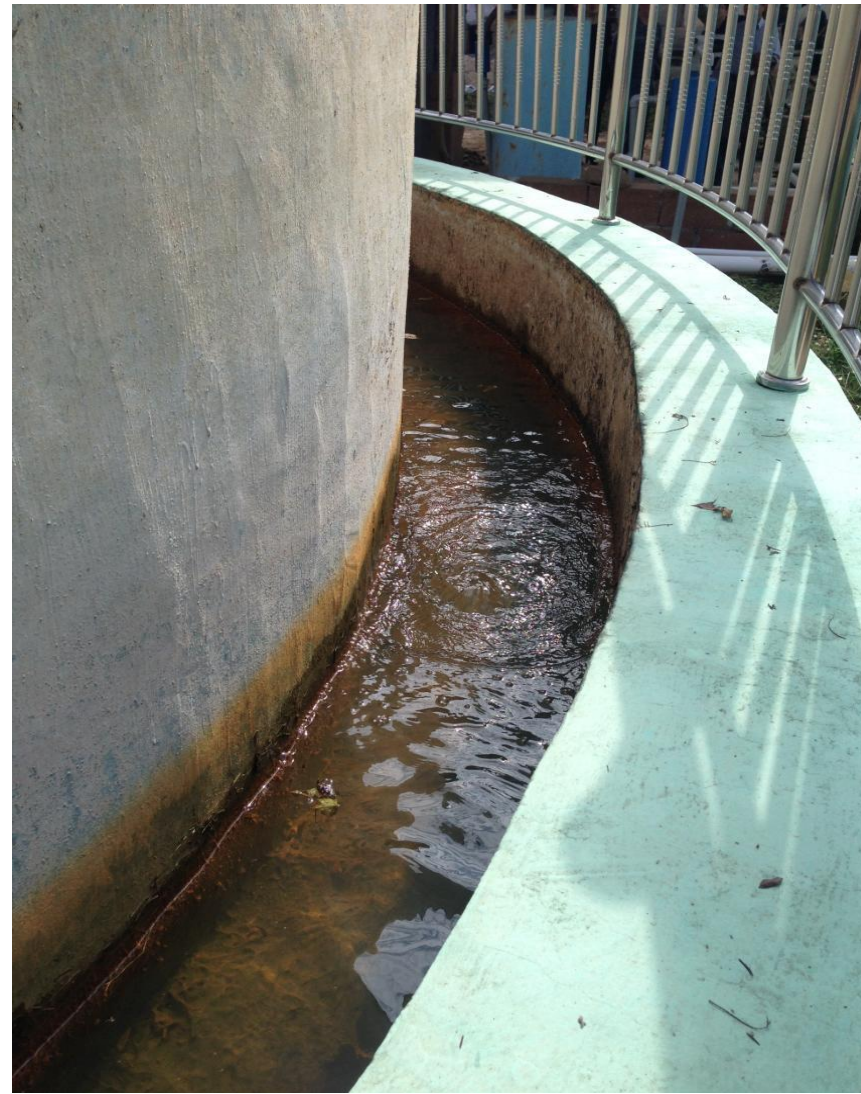
1.2 我国沼气工程安全形势



1.2 我国沼气工程安全形势



1.2 我国沼气工程安全形势



1.2 我国沼气工程安全形势





二、沼氣工程安全解析

2.1 沼氣工程安全基礎知識

2.2 沼氣工程事故類型及預防

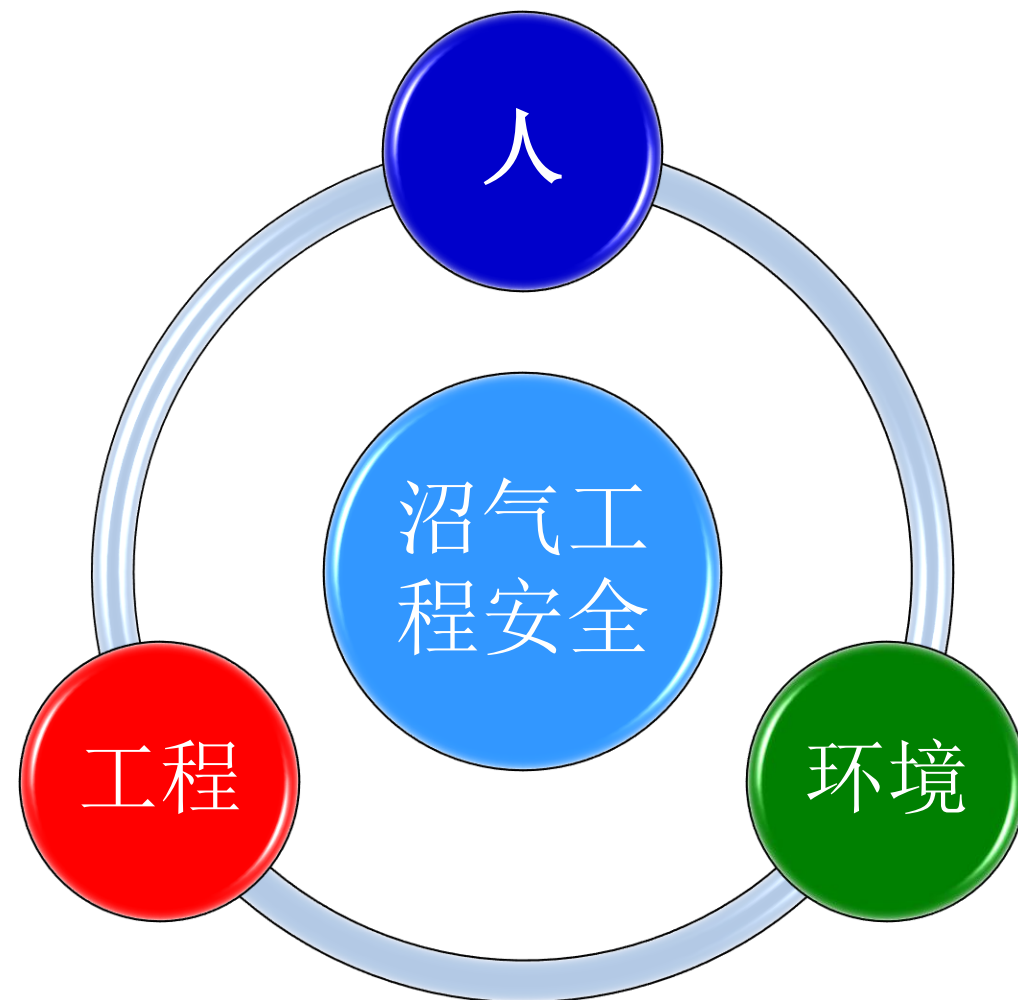
2.3 沼氣工程安全設施



2.1 沼气工程安全基础知识

2.1.1 沼气工程安全概念

指在沼气项目整个生命周期内，将项目对**人的身心**、**工程自身**及**环境**可能产生的损害控制在能接受水平以下的状态，以及实现该状态的保障条件。



2.1 沼气工程安全基础知识

2.1.2 沼气工程安全特点

- ◆ 沼气发酵是一个生物过程，产气过程无法立即停止
- ◆ 沼气工程的运行主体多元化，增加了规范化管理的难度
- ◆ 沼气工程启动和停止运行阶段是危险性最大的阶段





2.2 沼气工程事故类型及预防

2.2.1 沼气工程事故类型

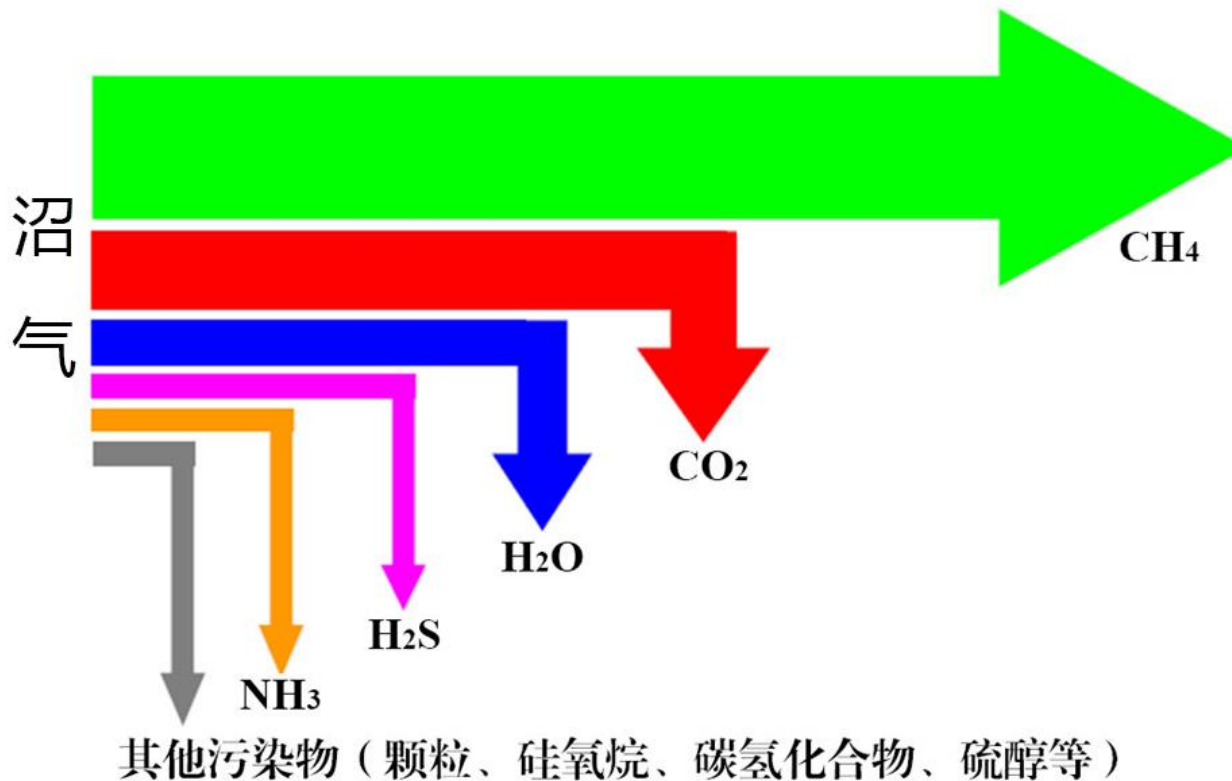
◆ 火灾

◆ 爆炸

◆ 窒息

◆ 机械伤害

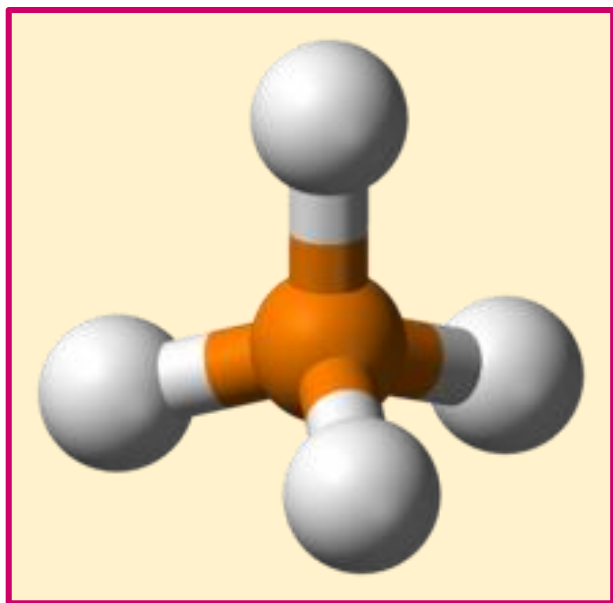
◆ 病原菌传染





2.2 沼气工程事故类型及预防

2.2.2 沼气主要成分及其危害



常温常压下为无色、无味的气体，相对密度0.55。当空气中甲烷的含量达25%~30%时，对人畜有一定的麻醉作用；可引起头痛、头晕、乏力、注意力不集中、呼吸和心跳加速。



2.2 沼气工程事故类型及预防

2.2.2 沼气主要成分及其危害



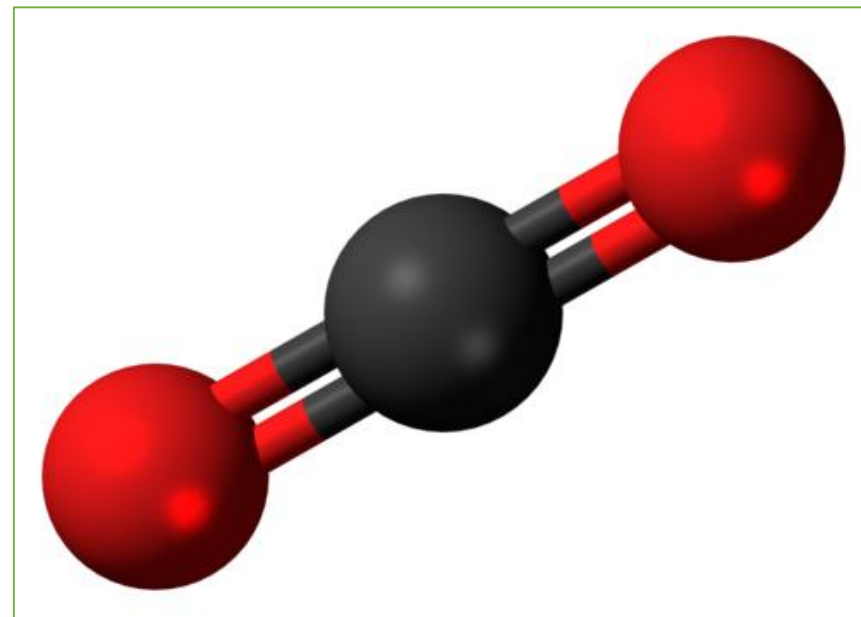
甲烷燃烧特

2.2 沼气工程事故类型及预防

2.2.2 沼气主要成分及其危害



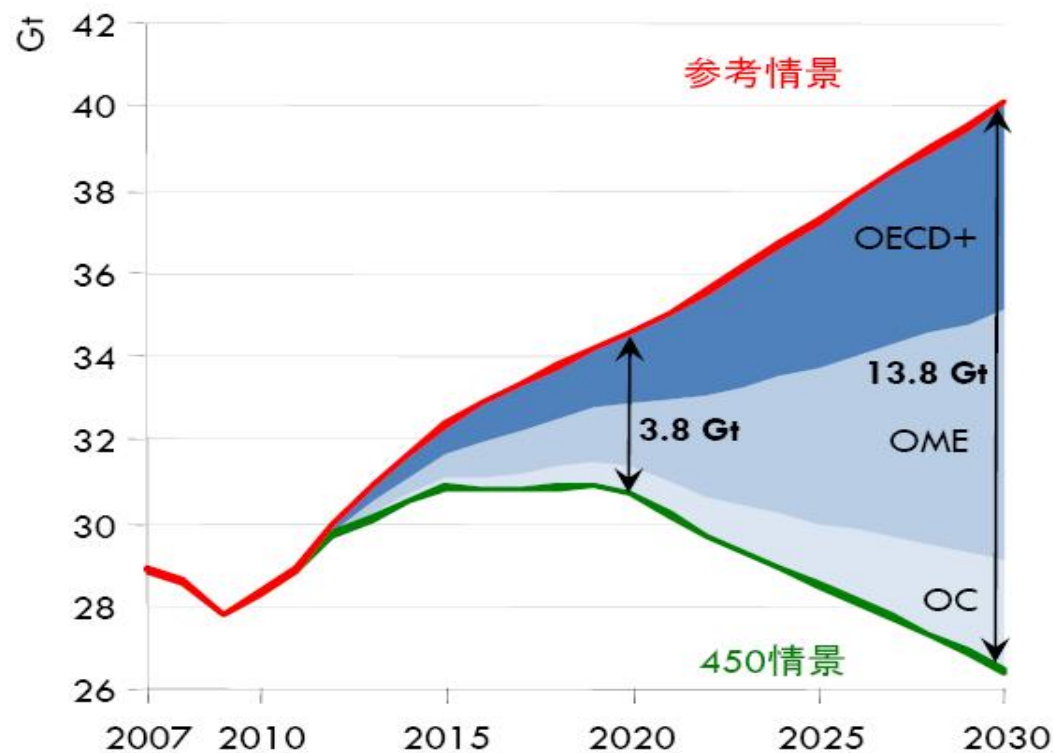
密度是空气密度的1.53倍。由于比空气密度大，容易使CO₂在低凹的地方积聚，而且不易扩散。



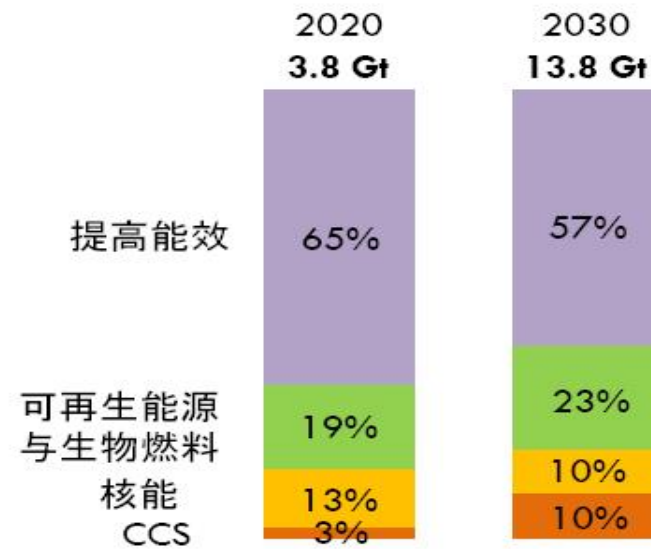
2.2 沼气工程事故类型及预防

450情景中在世界范围内减少与能源有关的CO₂的排放量

World Energy Outlook



世界范围内的减排(根据不同的技术)



2.2 沼气工程事故类型及预防



VS



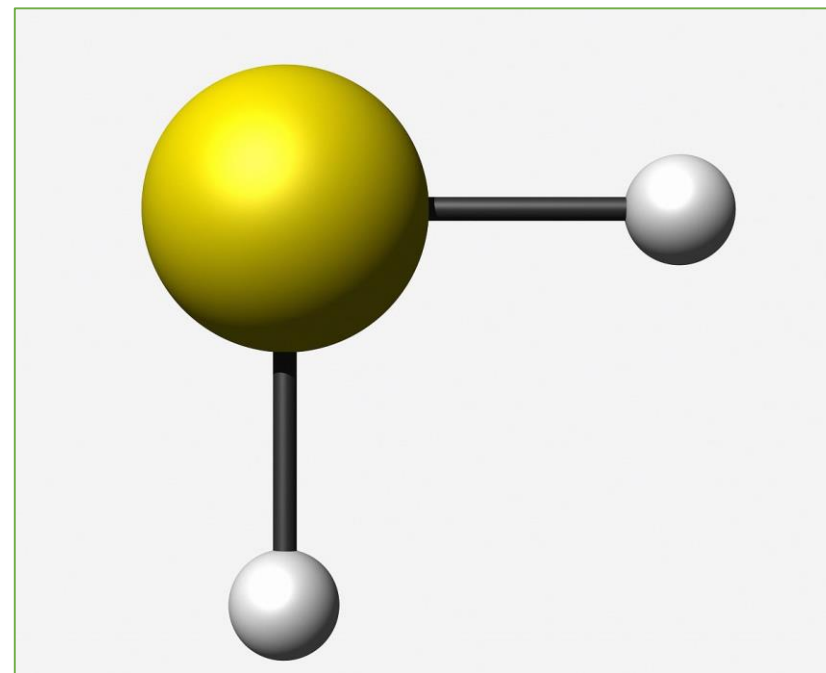


2.2 沼气工程事故类型及预防

2.2.2 沼气主要成分及其危害



硫化氢含有剧毒，无色，臭鸡蛋气味。即使很低的浓度也可以造成生命危险。当达到某一浓度时，可是使人失去嗅觉而无法察觉。





2.2 沼气工程事故类型及预防

高含硫原料:

- ◆ 屠宰废弃物
- ◆ 生物技术加工产生的生物质废弃物（菌丝体）
- ◆ 油菜籽饼
- ◆ 饲料残余物（大豆蛋白）
- ◆ 餐厨垃圾
- ◆ 蛋氨酸（饲料添加剂）
- ◆ 酵母生产废弃物

2.2 沼气工程事故类型及预防

2.2.2 沼气主要成分及其危害



无色气体。有强烈的刺激气味。
相对密度0.5971。能灼伤皮肤、
眼睛、呼吸器官的粘膜，人吸
入过多，能引起肺肿胀，以至
死亡。



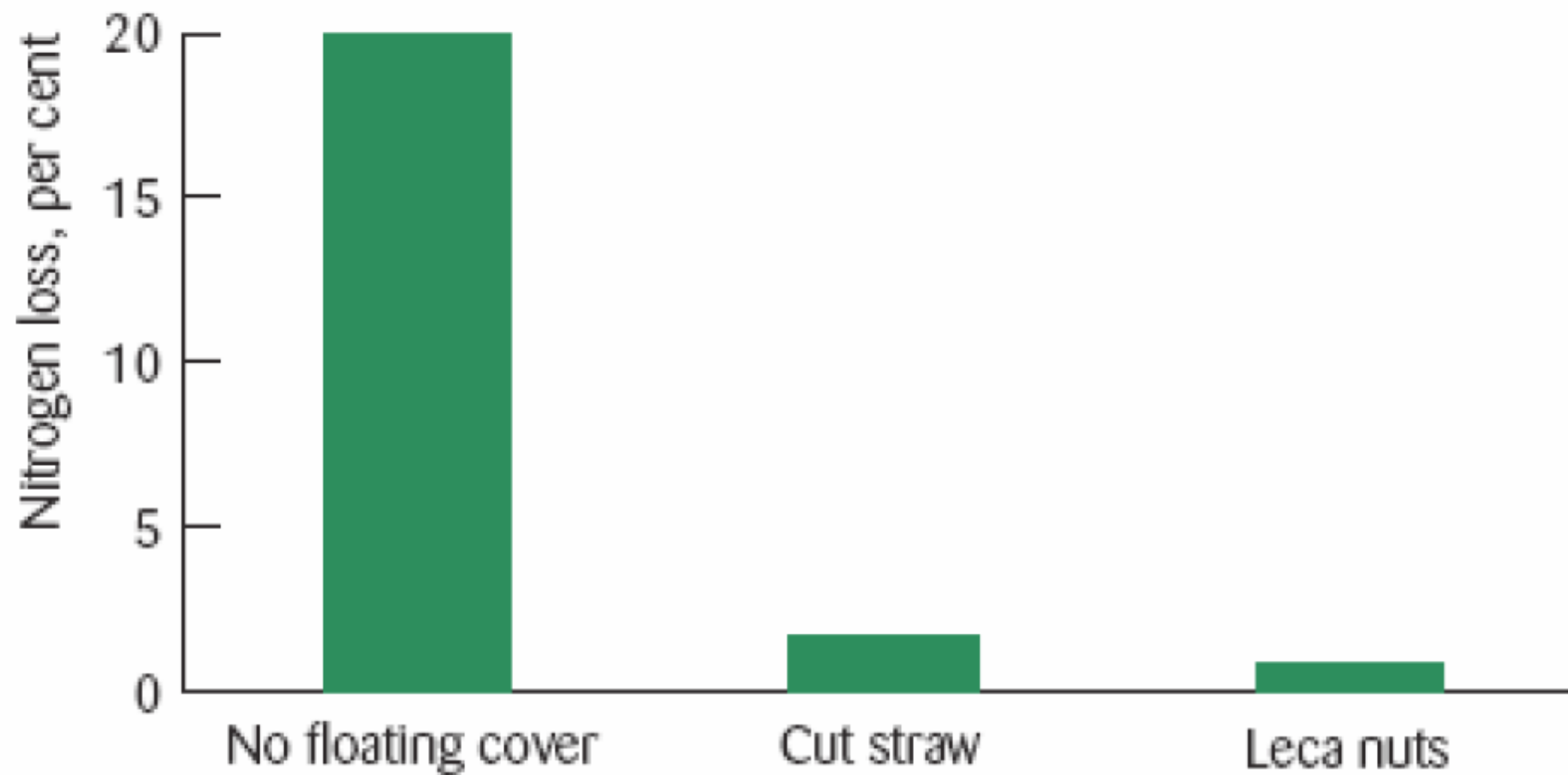
Figure 7.32 Storage tanks covered with natural floating layer (DANISH BIOGAS ASSOCIATION 2008)



Figure 7.33 Membrane covered storage tanks (DANISH BIOGAS ASSOCIATION 2008)



2.2 沼气工程事故类型及预防



结壳层对氨释放损失的影响

2.2 沼气工程事故类型及预防

2.2.2 沼气主要成分及其危害

硅氧烷

硅氧烷在洗涤剂，化妆品，药品等工业中被广泛应用。硅氧烷会随着垃圾和废水处理进入到垃圾填埋场和污泥当中。在垃圾和污泥的厌氧消化过程中，硅氧烷会**挥发**进入形成的沼气中。

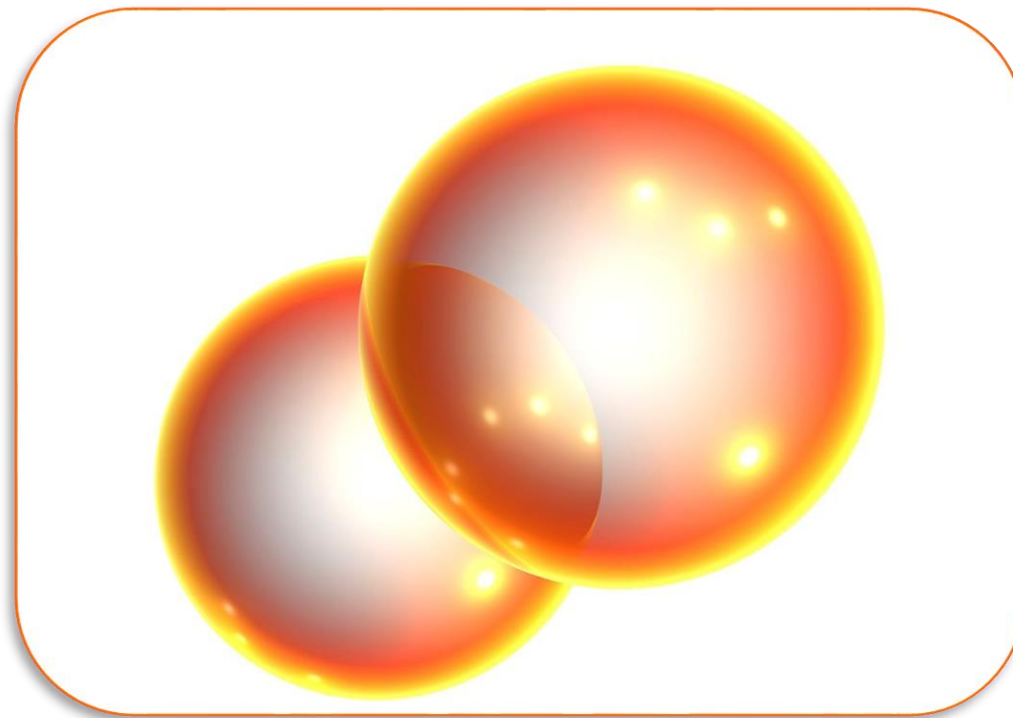
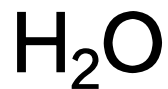
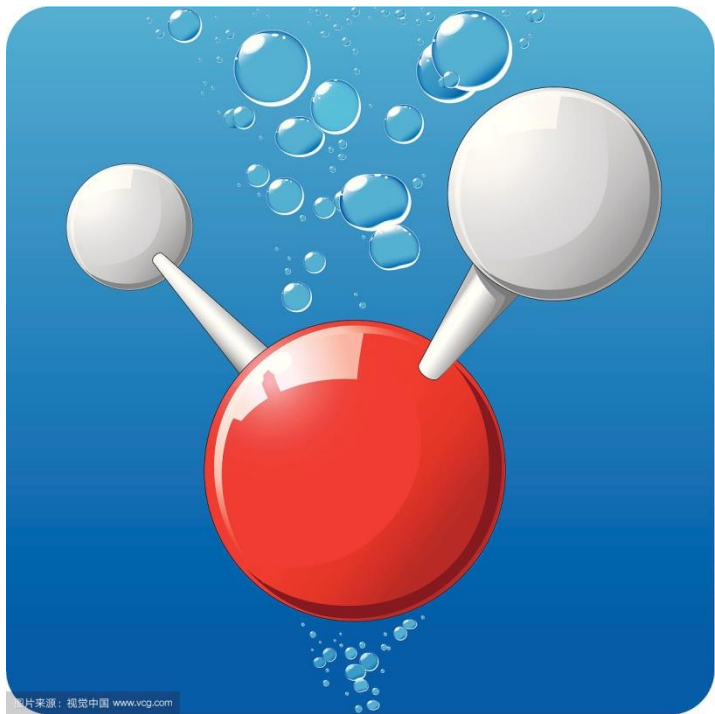


硅氧烷燃烧后形成二氧化硅



2.2 沼气工程事故类型及预防

2.2.2 沼气主要成分及其危害

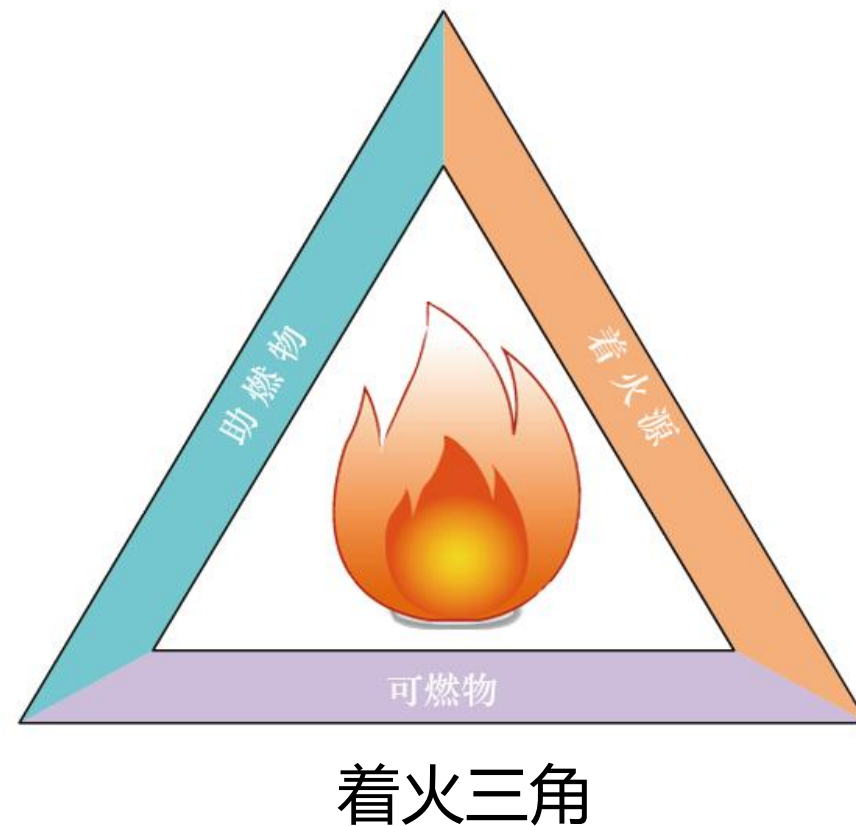


2.2 沼气工程事故类型及预防

2.2.3 防火防爆基础知识

(1) 着火三要素

- ◆可燃物（沼气）
- ◆助燃物（空气）
- ◆着火源（明火、静电及热表面等）



2.2 沼气工程事故类型及预防

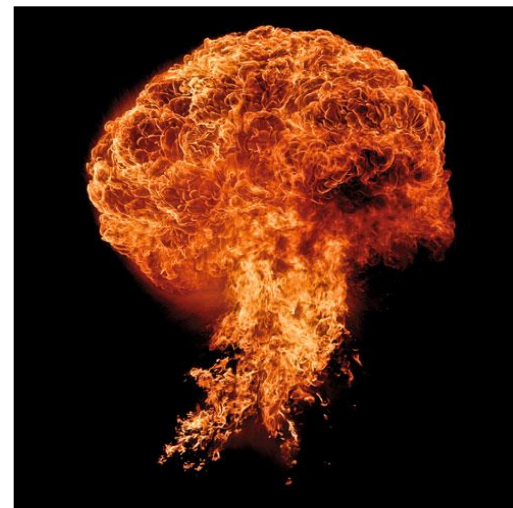
2.2.3 防火防爆基础知识

(2) 气体燃烧类型

◆ 扩散燃烧（沼气与空气 无预混）



◆ 预混燃烧（沼气与空气先混合）





2.2 沼气工程事故类型及预防

2.2.3 防火防爆基础知识

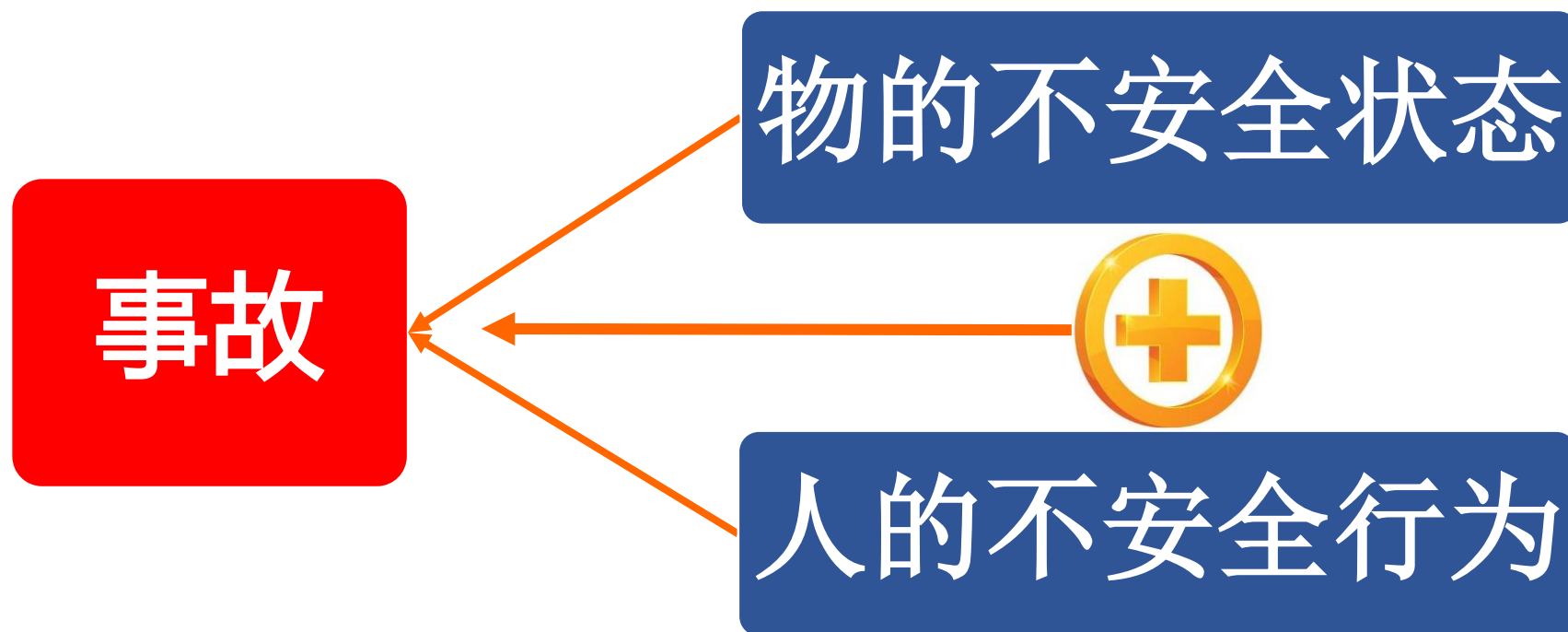
(3) 沼气爆炸界限

特性	CH ₄ (70%)/CO ₂ (30%)	CH ₄ (60%)/CO ₂ (40%)	CH ₄ (50%)/CO ₂ (50%)
密度(kg/m ³)	1.095	1.221	1.347
爆炸界限	6.3~22	7.1~24.7	8.4~28.3
理论空气量(m ³ /m ³)	6.67	5.71	4.76



2.2 沼气工程事故类型及预防

2.2.4 沼气工程事故因果分析

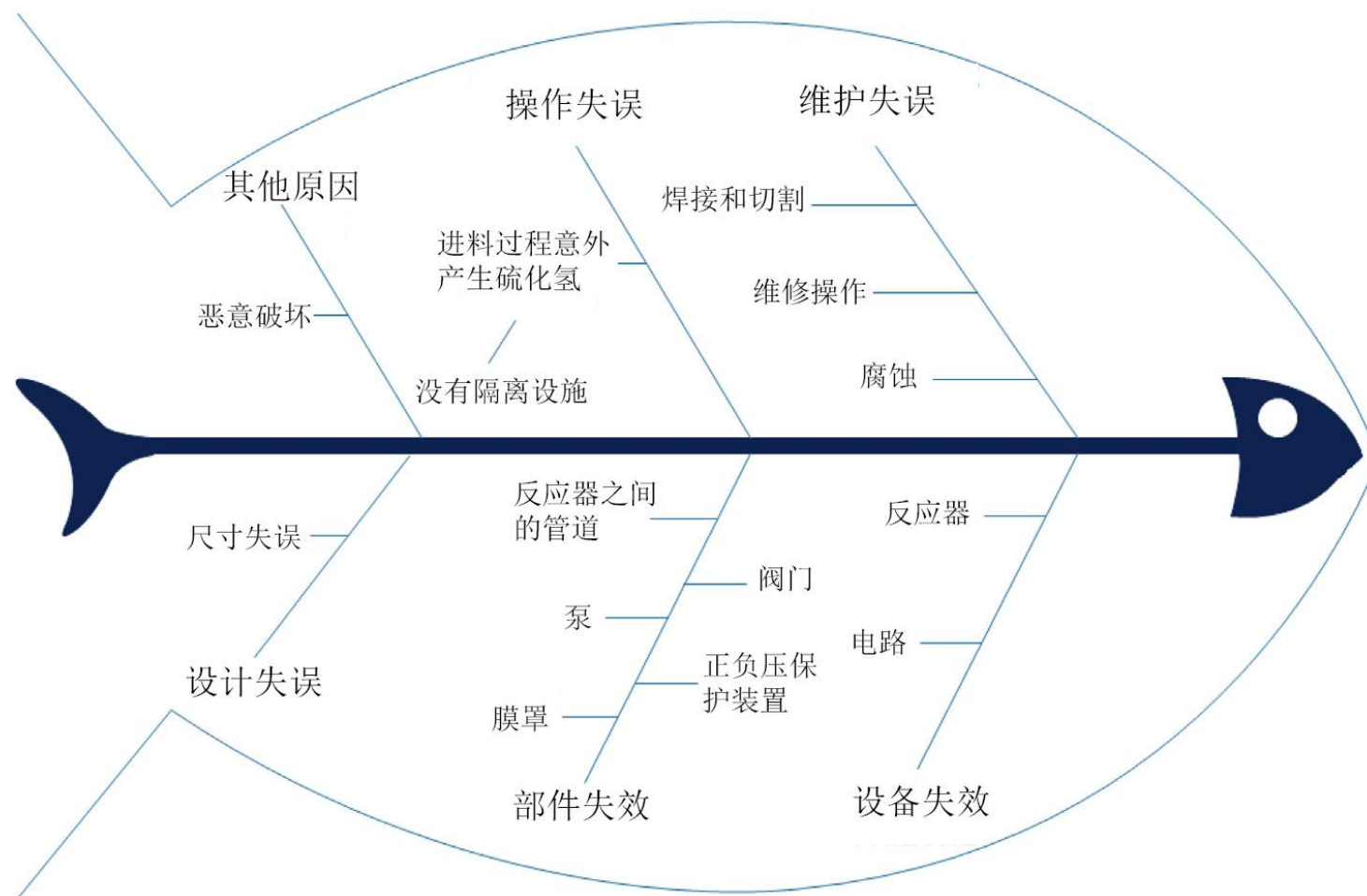




2.2 沼气工程事故类型及预防

2.2.4 沼气工程事故因果分析

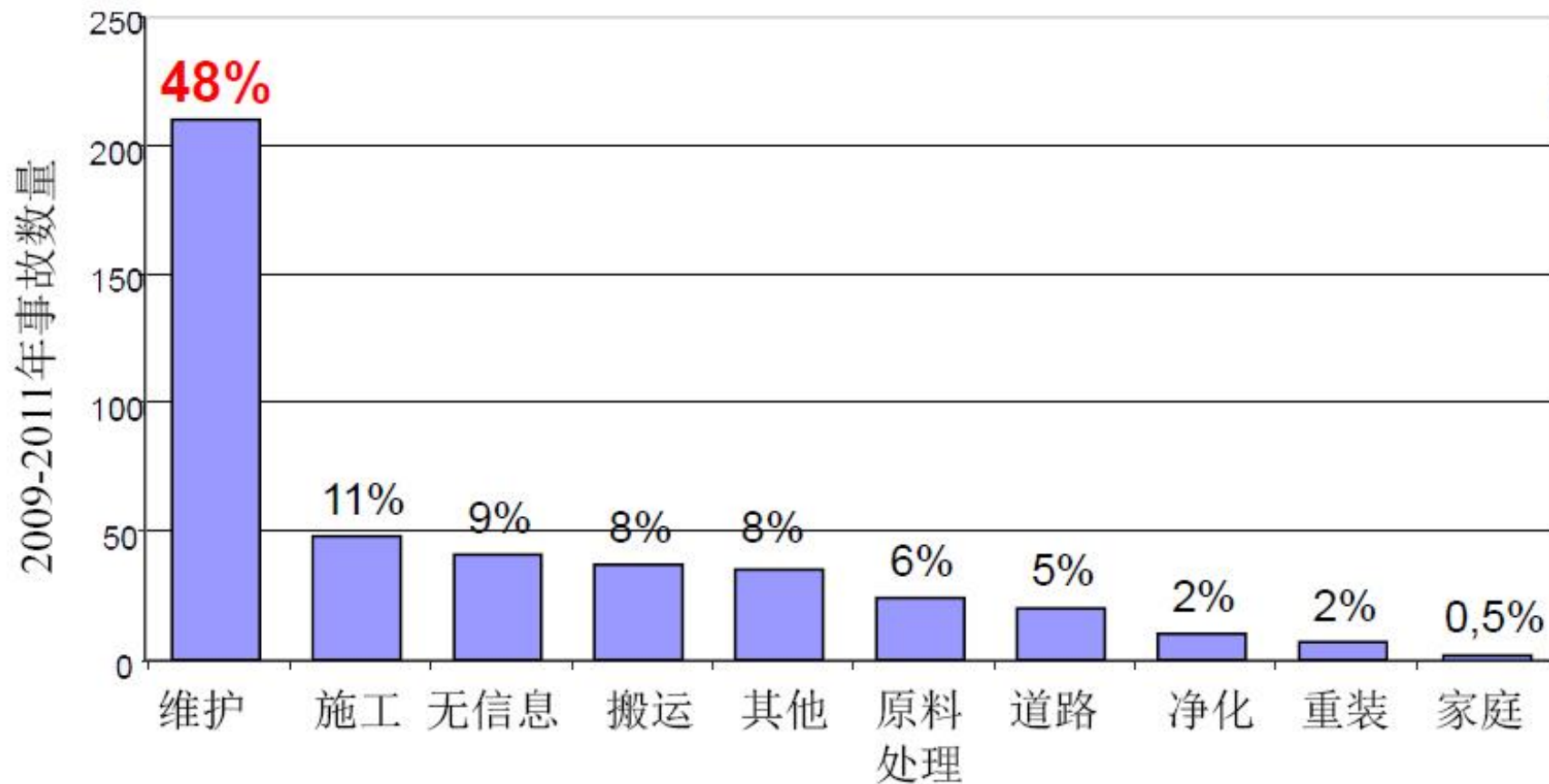
(1) 鱼骨图分析





2.2 沼气工程事故类型及预防

2.2.4 沼气工程事故因果分析



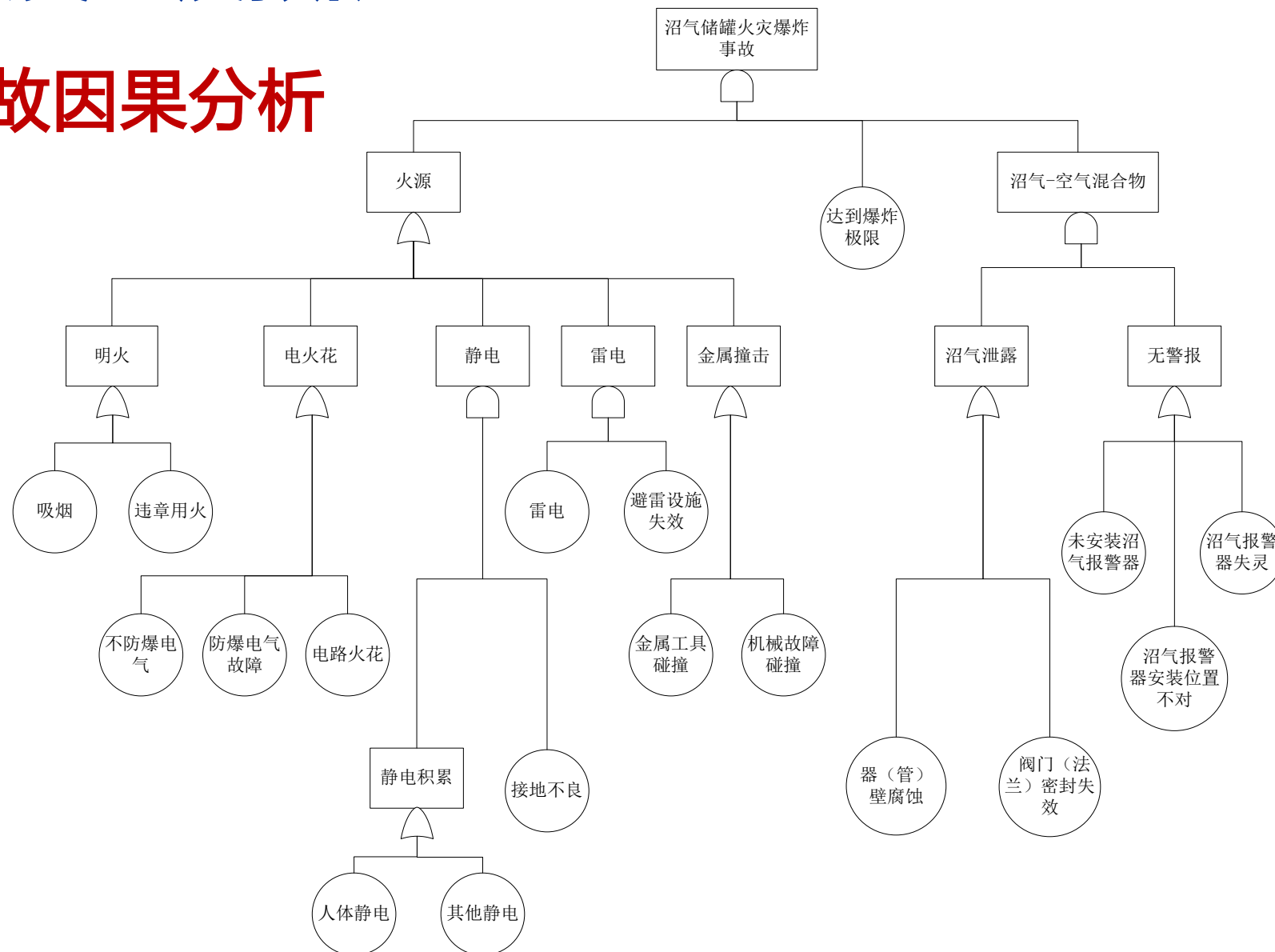
沼气工程事故发生的位置及环节统计



2.2 沼气工程事故类型及预防

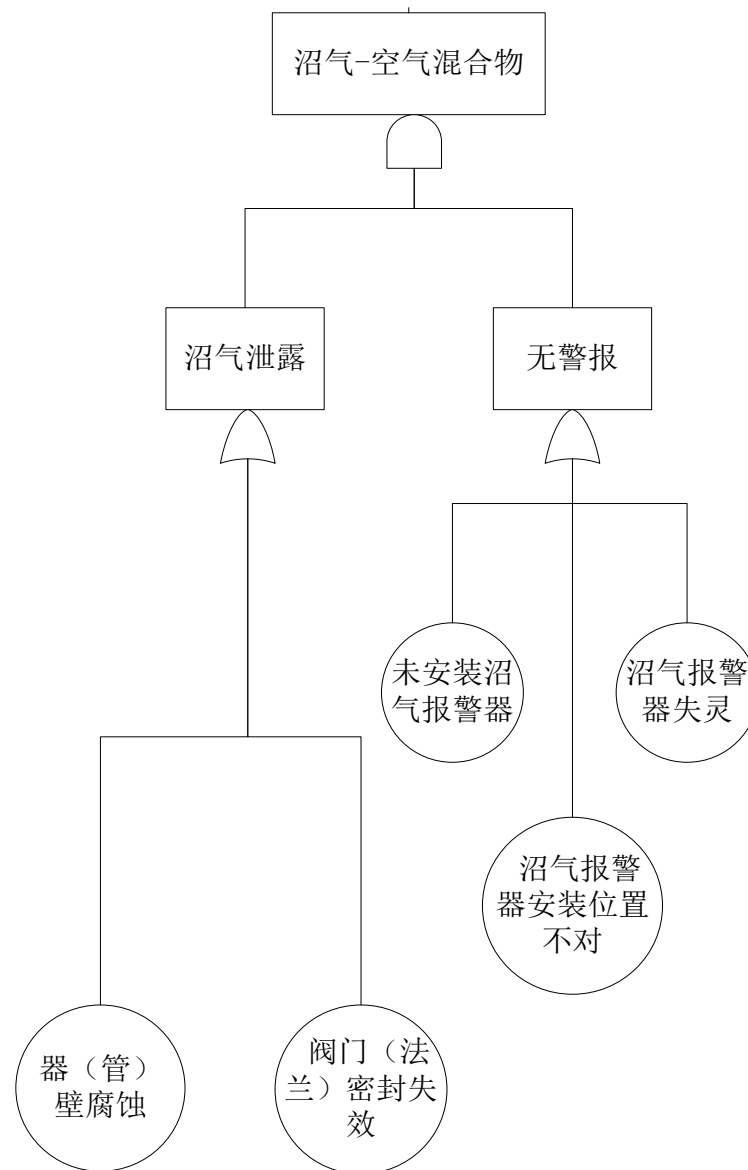
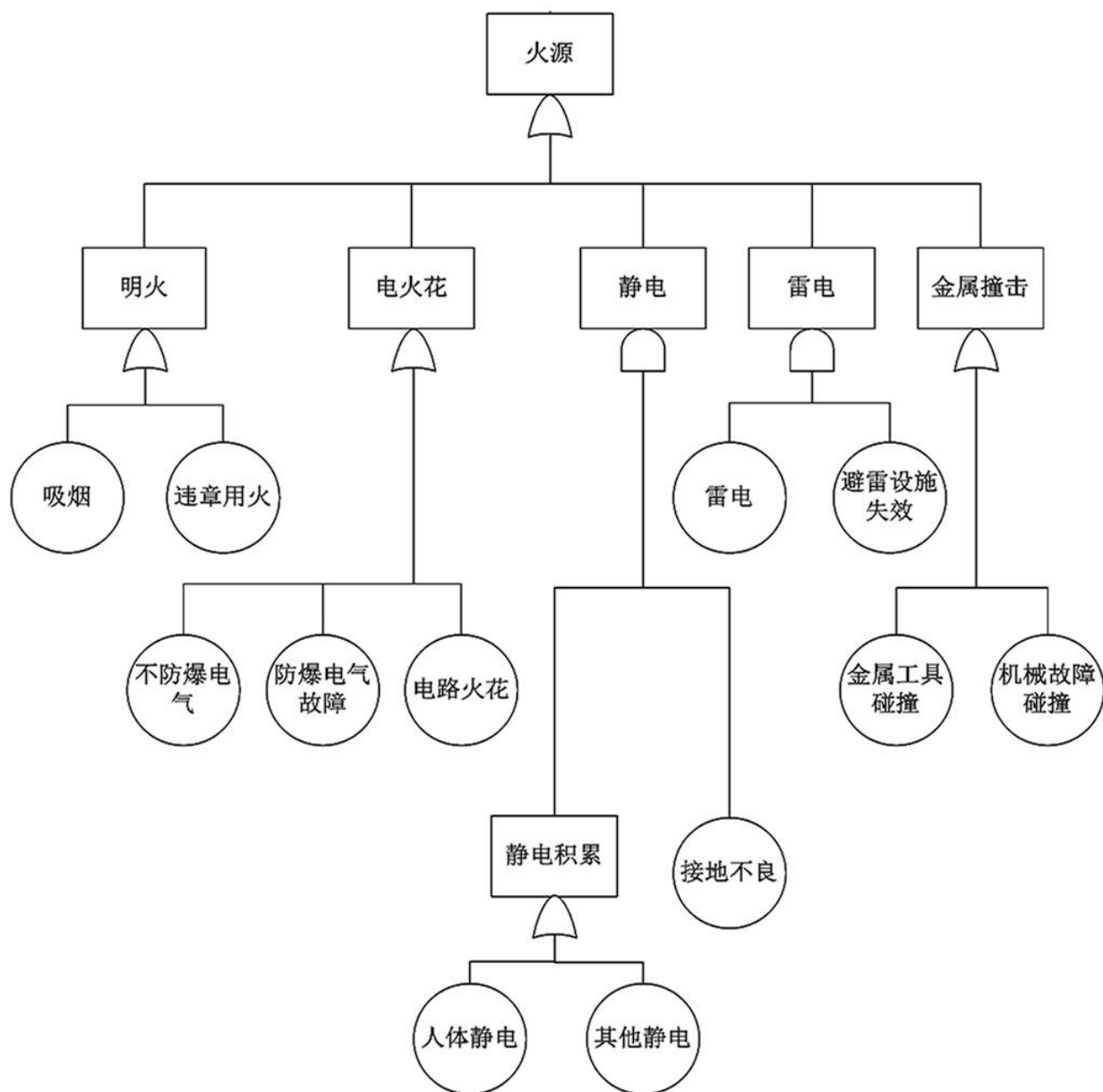
2.2.4 沼气工程事故因果分析

(2) 故障树分析





2.2 沼气工程事故类型及预防

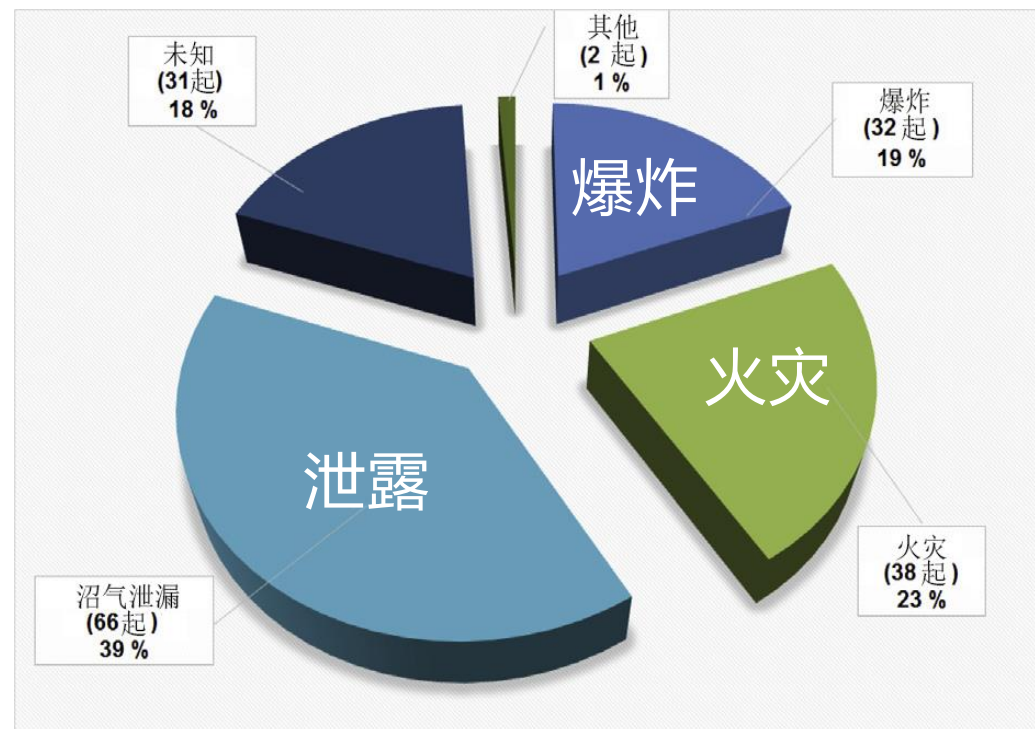




2.2 沼气工程事故类型及预防

2.2.4 火灾与爆炸预防和控制措施

- (1) 消除火源
- (2) 防止沼气泄露
- (3) 创造良好的沼气扩散条件
- (4) 防止形成新的燃烧条件，阻止火灾范围的扩大



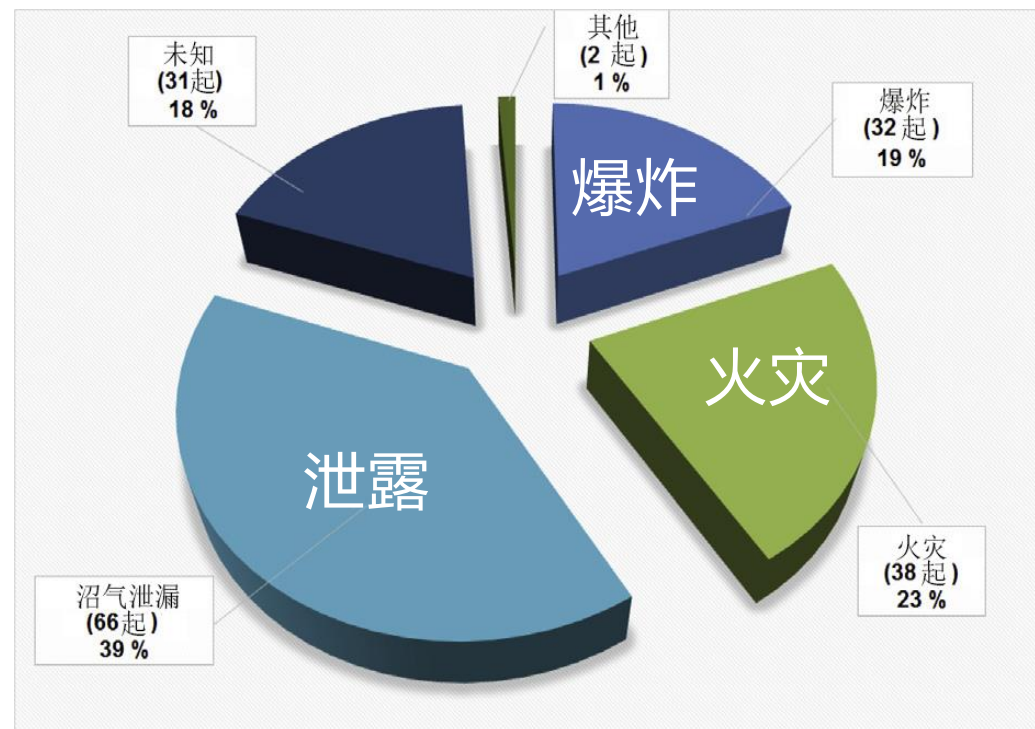
沼气事故类型统计



2.2 沼气工程事故类型及预防

2.2.4 火灾与爆炸预防和控制措施

- (1) 消除火源
- (2) 防止沼气泄露
- (3) 创造良好的沼气扩散条件
- (4) 防止形成新的燃烧条件，阻止火灾范围的扩大



沼气事故类型统计



2.2 沼气工程事故类型及预防

主要的着火源：

- ◆ **热表面**：比如大于500℃的涡轮增加机表面
- ◆ **明火**：比如火焰、余烬等
- ◆ **机械火花**：主要指由于摩擦、敲打、碾磨等产生的火花
- ◆ **电火花**：比如电切割、焊接、电器接触不良产生的火花
- ◆ **放热反应**：比如粉尘自然等
- ◆ **静电放电**：生产工艺中的挤压、切割、搅拌、喷溅、流动和过滤，以及生活中的行走、站立、穿脱衣服都会产生静电
- ◆ **闪电**

2.2 沼气工程事故类型及预防

2.2.5 机械伤害



机械转动部件



危险平面部位

2.2 沼气工程事故类型及预防

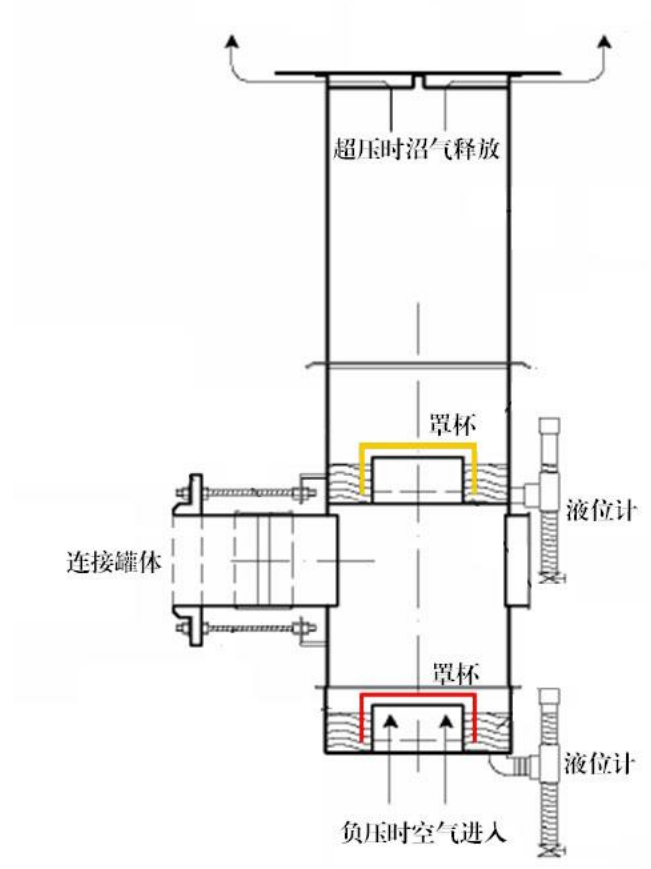
2.2.5 机械伤害



跌落危害

2.3 沼气工程安全设施

2.3.1 正负压保护装置



2.3 沼气工程安全设施

2.3.2 防雷接地装置





2.3 沼气工程安全设施

2.3.3 防回火装置





2.3 沼气工程安全设施

2.3.4 废气收集处理装置





三、沼氣工程事故典型案例剖析

3.1 荷蘭某污水處理廠沼氣爆炸事故

3.2 德國某沼氣廠 H_2S 釋放致人死傷事故

3.3 上海某垃圾焚燒廠滲濾液調節池爆炸事故

3.4 意大利某廢物處理罐爆炸事故

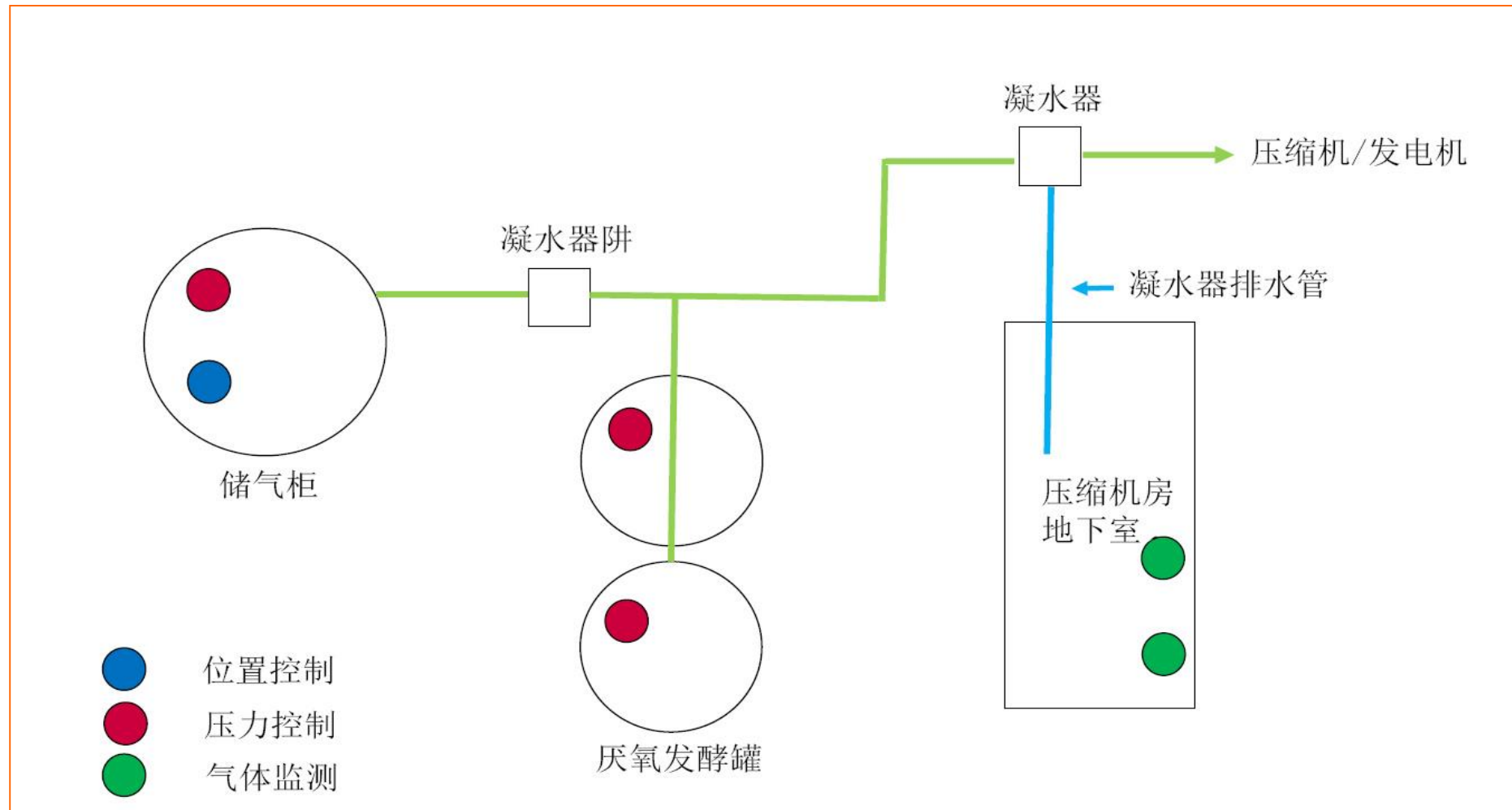


3.1 荷兰某污水处理厂沼气爆炸事故

基本情况：2012年10月21日凌晨7:45分，荷兰某污水处理厂发生沼气爆炸事故



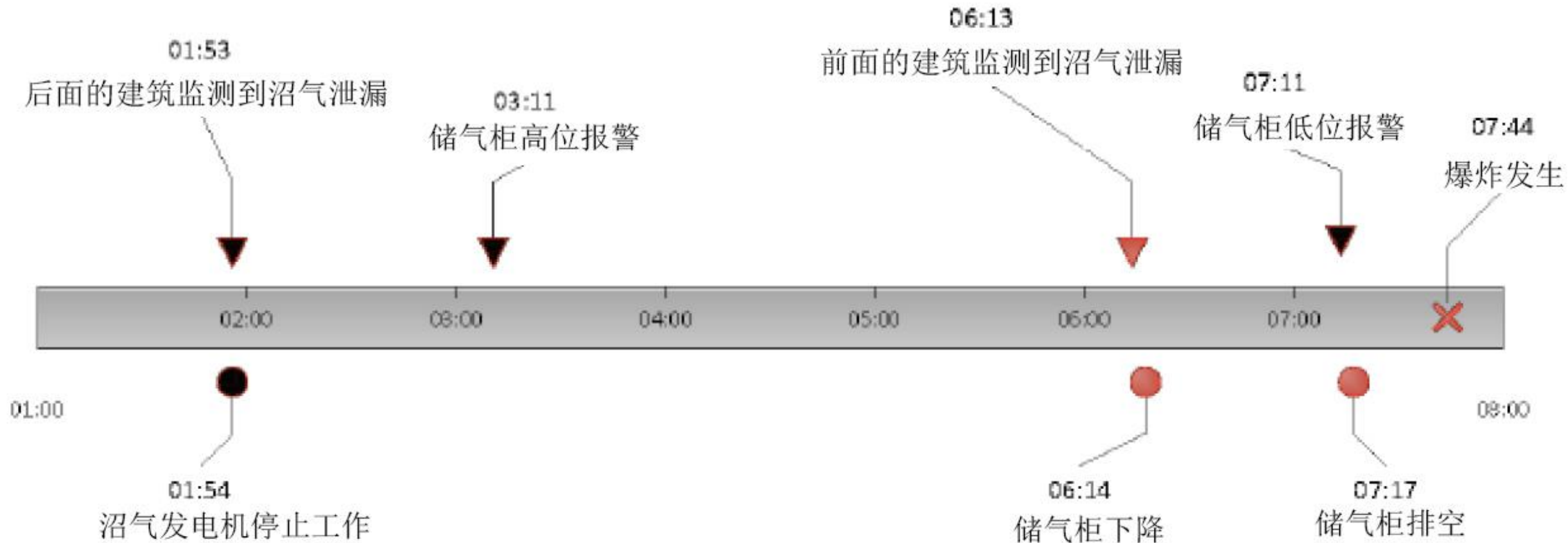
3.1 荷兰某污水处理厂沼气爆炸事故



发生事故的沼气工程平面布局



3.1 荷兰某污水处理厂沼气爆炸事故



事故发生时间线



3.1 荷兰某污水处理厂沼气爆炸事故

事故原因：

人为过错：事故发生当天的凌晨2点值班工人就接收到了沼气泄露的信号，但是他直到爆炸发生后他才到达现场。

设计失误：将凝水器排水管通到压缩机房的地下室就埋下了事故隐患，而且输气管道与地下室之间只通过凝水器作为安全屏障。

事故教训：

沼气工程安全涉及多方面因素：设计、操作、管理、紧急处理程序等。

当与这些因素相关的**安全保障全部失守后**，发生事故就是不可避免的。

3.2 德国某沼气厂H₂S释放致人死伤事故

基本情况：2005年11月5日，一个位于德国Rhadereistedt的沼气厂发生了一起因H₂S释放导致4人死亡和1人重伤的事故。





3.2 德国某沼气厂 H_2S 释放致人死伤事故

事故经过：

- （1）荷兰的制药厂将提取了药物后的猪肠膜剩余物用卡车运输到了德国的沼气厂；
- （2）运输车由于晚到在沼气厂大门外停了一夜；
- （3）第二天（大约6点）运输车开始将25t猪肠膜剩余物卸载到储料池；
- （4）100m³的储料池还有约20%存留有动物粪便和乳酸废物；
- （5）卸料不是通过密封管道，而是通过储料池打开的盖门，该盖门之所以呈打开状态是由于开启笨重金属盖门的起重设备出了故障；
- （6）抽风和搅拌装置处于运行状态；



3.2 德国某沼气厂H₂S释放致人死伤事故

事故经过：

- (7) 大量的H₂S释放出来；
- (8) 卸料操作工人晕倒；
- (9) 司机和其他人员跑过去施救；
- (10) 结果4人死亡，1人重伤入院。



3.2 德国某沼气厂 H_2S 释放致人死伤事故

事故原因：

- (1) 硫的来源：猪肠膜及所用的稳定剂 NaHSO_3 （1.5%）；
- (2) pH值的下降：废料的pH由卸载之前的8.5~8.6，经过与储料池中存留的废物混合后降低到了5.6~5.9，这由留存的乳制品废物中的乳酸所致；
- (3) H_2S 的释放：可能是由于使用了开启的盖门作为卸料口；
- (4) 卸料操作工人不知道会有 H_2S 释放；
- (5) H_2S 的浓度太高以至于操作工人没能通过嗅觉感知到；
- (6) 现场没有检测和报警设施；
- (7) 没有对员工进行紧急情况处理培训导致施救工人死亡。



3.2 德国某沼气厂 H_2S 释放致人死伤事故

事故教训：

- (1) 对熟悉但缺乏深入认识的事物应保持警觉，比如该事故中的有气味的废物；
- (2) 不能没经过思考就采用营救行动；
- (3) 了解关于 H_2S 形成的知识是重要的；
- (4) 应经常分析和评估沼气厂可能发生的化学反应；
- (5) 应对设备进行良好的维护；
- (6) 应有检测 H_2S 和pH的设备；
- (7) 在缺乏规范的操作程序和正常设备的沼气厂这种事故同样也可能发生。



3.2 德国某沼气厂 H_2S 释放致人死伤事故

事故教训：

- (1) 对熟悉但缺乏深入认识的事物应保持警觉，比如该事故中的有气味的废物；
- (2) 不能没经过思考就采用营救行动；
- (3) 了解关于 H_2S 形成的知识非常重要；
- (4) 应经常分析和评估沼气厂可能发生的化学反应；
- (5) 应对设备进行良好的维护；
- (6) 应有检测 H_2S 和pH的设备；
- (7) 在缺乏规范的操作程序和正常设备的沼气厂这种事故同样也可能发生。



3.3 上海某垃圾焚烧厂渗滤液调节池爆炸事故

事故经过：

12月2日，除臭系统设备安装改造公司项目负责人安排作业人员进行风管拆除、加装风机外罩等作业，并在作业前关闭了除臭系统风机。

12月5日，改造实施公司项目负责人安排3人组装风管，另一组共4人安装生物滤池玻璃钢外壳。15时许，2个工人开始安装风管三通管（内有关闭的风门）。15时10分，两人在抬起三通管，使用铁质圆规校对螺孔时，调节池发生爆炸。



3.3 上海某垃圾焚烧厂渗滤液调节池爆炸事故

事故直接原因：

- （1）除臭风管与大气相通、调节池液位波动，空气进入池内与因风机维修停排而逐渐聚集的沼气混合，达到爆炸极限浓度；
- （2）池内液位升高，混合气体沿风管外逸，到因安装风门关闭的三通管时受阻并富集，达到可燃爆的浓度；
- （3）作业人员使用的铁质圆规与风管铁质法兰摩擦和撞击产生火花，引燃风管内混合气体并蔓延至调节池内，引发调节池爆炸。



3.3 上海某垃圾焚烧厂渗滤液调节池爆炸事故

事故间接原因：

- （1）对除臭系统改造中存在的安全风险辨识不足；
- （2）作业现场安全管理存在漏洞；
- （3）安全生产管理工作缺失。



3.3 上海某垃圾焚烧厂渗滤液调节池爆炸事故

事故教训：

（1）垃圾渗滤液处理厂的调节池、厌氧反应设施应配备 CH_4 、 H_2S 检测仪表和报警装置，渗滤液处理厂性能测试应包含有毒、有害气体的测定，应配备危险气体的控制与防护措施。

（2）对调节池等有可能产生易燃易爆气体的处理设施、构筑物，应在设计规范中明确其区域内使用易产生点火源类作业工具的注意事项，以及与人员滞留、作业或办公场所的安全距离要求；研究调节池通排风设施冗余系统设置的必要性和可行性。



3.3 上海某垃圾焚烧厂渗滤液调节池爆炸事故

事故教训：

（3）在调节池等有沼气产生的隐患场所实施检维修**动火作业**前，必须按照动火作业操作规程或管理制度实施**动火分析**，动火分析合格后方可动火；企业在实施动火作业或其他有可能引发火灾爆炸危险的作业时，应配备具有相应的**资格证书**的安全监护人员；调节池等有可能产生易燃易爆气体的场所实施检维修作业时，检维修人员应配备并携带便携式可燃气体或有毒气体**检测报警仪**，检测浓度超标时，应停止作业，企业应采取有效措施排除隐患。

3.4 意大利某废物处理罐爆炸事故

基本情况：2010年9月10日，位于意大利Brindisi的某抗生素有效成分生产工厂的废物处理罐发生了气云爆炸事故，导致1人当场死亡，4人受伤送医。

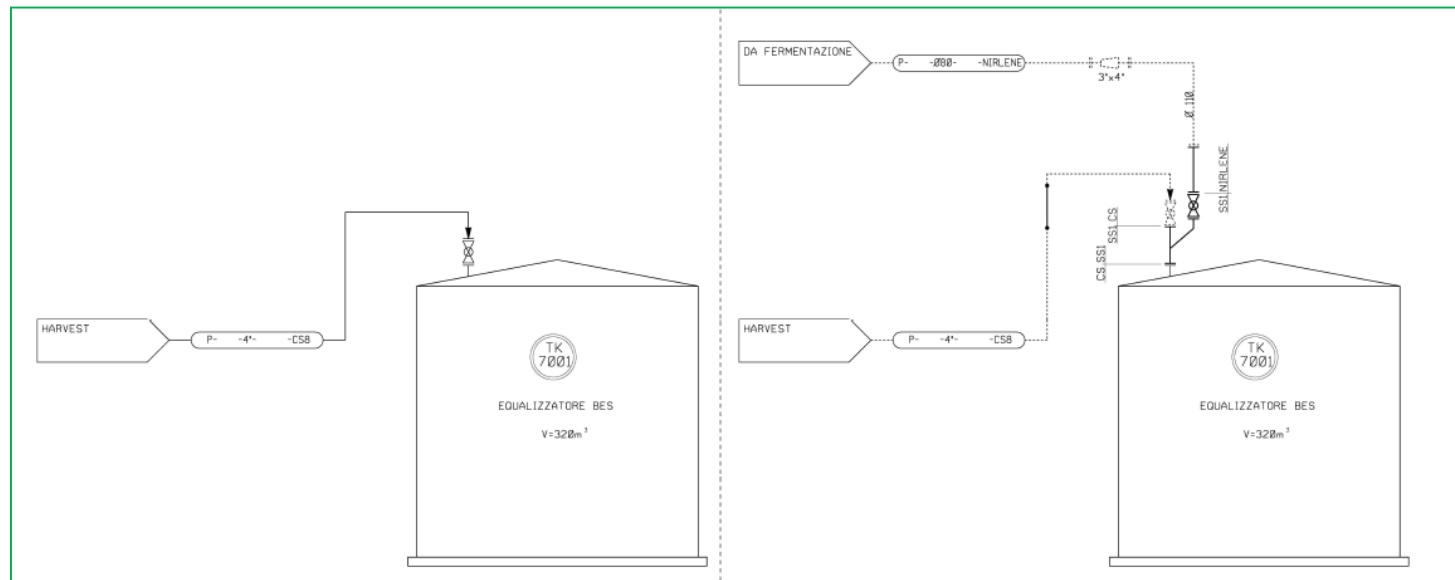




3.4 意大利某废物处理罐爆炸事故

事故经过： 事故发生于TKX罐改造施工期间，改造的目的是给该罐接一个新的输料管道，用于把一套新的抗生素生产线所产剩余物（BES）送入罐。原有的输料管已经清空且与罐体分离，但是拆卸输料管后没有在拆卸法兰部位安装**盲板**。

当时现场共有5个人。其中1人开始用电切割机切割输料管，切割产生的火花引燃了罐体内的可燃性气体，结果导致爆炸的发生。





3.4 意大利某废物处理罐爆炸事故

事故直接原因：

- （1）TKX罐内存在**爆炸性气体**，这种气体被被电切割产生的**火花**点燃。电火花点燃气体的原因在于输料管撤下后，没有用**盲板**封闭，使罐口呈开放状态；
- （2）TKX罐内爆炸性气体由BES在厌氧条件下产生，事故后开展的试验表明，BES在**厌氧**条件下所产气体的组分包括 CH_4 、 H_2 等；
- （3）TKX罐内发生厌氧发酵是由罐底和罐壁上长期积存了**污泥**和**有机残渣**所致；
详细原因见下页：



3.4 意大利某废物处理罐爆炸事故

原因3之详细原因：

- ◆BES含有高浓度有机物，COD达80000mg/L；
- ◆罐内缺氧环境，这是因为最初设计的曝气和排气装置在2000年罐体改造时关闭了；
- ◆罐内的搅拌装置太小，不足以对BES充分搅拌，从而使得污泥和有机残渣在罐底和罐壁上积存；
- ◆罐体上的出料口的位置距池底40cm，这使池底可以积存40cm的污泥和有机残渣；
- ◆TKX罐内的温度40-50°C，非常适合微生物厌氧发酵；
- ◆BES在罐内2-3天的停留时间有利于发酵的进行。



3.4 意大利某废物处理罐爆炸事故

事故间接原因：

(1) 导致TKX罐内爆炸性气体被电切割火花点燃的根本原因：危险评估过错、人员培训过错和维修程序过错。

- ◆危险评估过错：在进行电切割操作时，没有进行爆炸性测试且没有将输料罐接口用盲板封闭，这表明该操作区域并没有被认为是爆炸危险区域；
- ◆人员培训过错：消防员对维修工程承包方负责人的询问表明，承包方及雇员对工作许可程序认识不清而且缺乏对设备进行封闭的知识；
- ◆维修程序过错：厂方给承包方的维修程序描述并不清楚。



3.4 意大利某废物处理罐爆炸事故

事故间接原因：

(2) 导致TKX罐内BES厌氧发酵产生爆炸性气体的原因：危险物质辨识过错、危险过程辨识过错和风险评估和改造管理过错。

- ◆ 危险物质辨识过错：厂方不认为BES是危险物质；
- ◆ 危险过程辨识过错：BES可能在TKX罐内发酵没有被辨识为危险过程；
- ◆ 风险评估和改造管理过错：废物处理区域在危险评估过程中没有被列入爆炸危险区域，而且2000年罐体改造时错误地将内部曝气系统关闭。



3.4 意大利某废物处理罐爆炸事故

事故间接原因：

- (3) 污泥和有机残渣长期在罐底和罐壁上积存使得BES的厌氧发酵成为可能的原因：未遵守安全要求过错和改造管理过错。罐体改造后的10年内曝气和通风设备被关闭，这违背了罐体最初设计时的安全要求，存在未遵守安全要求过错和改造管理过错。

3.4 意大利某废物处理罐爆炸事故

事故教训：

生物技术是一个处在快速发展中的领域，对其可能产生的各种物质必须开展正确的
风险评估！





四、事故的典型特征与安全法则

4.1 事故的典型特征

4.2 安全法则



4. 事故的典型特征与安全法则

4.1 事故的典型特征

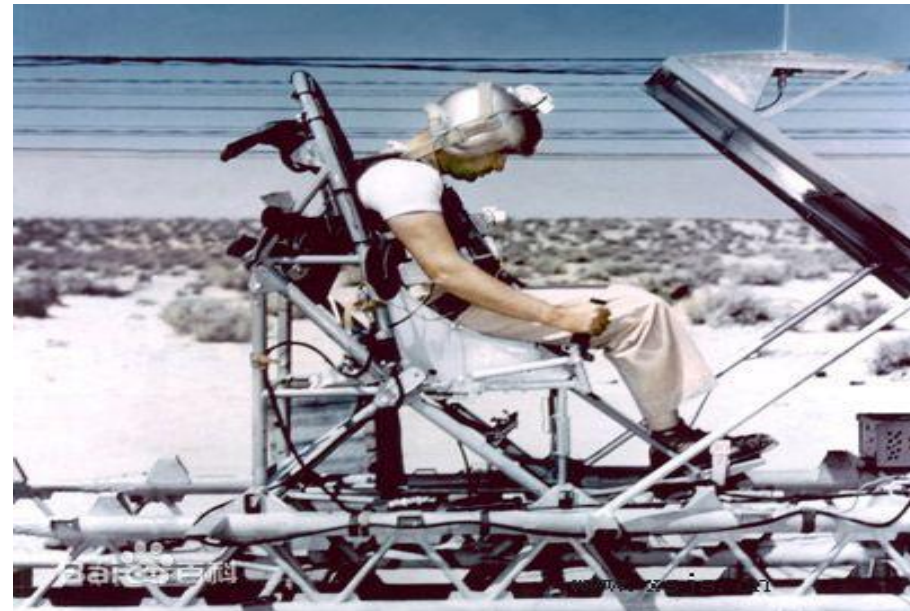
- (1) **普遍性**。发生事故的可能性就普遍存在。这就要求在生产过程中必须坚持“安全第一，预防为主”的方针。
- (2) **因果性**。事故的发生都是有原因的，事故原因大致可分为人的不安全行为和物的不安全状态两类。
- (3) **潜伏性**。生产活动中，导致事故发生的隐患是潜在的，条件成熟时，在特定的时间和场所就会显现为事故。
- (4) **可预测性**。通过对已有事故的分析 and 依靠专业知识，在生产活动开始之前，可以对可能出现的危险作出预测，并采取相应的防治措施。

4. 事故的典型特征与安全法则

4.2 安全法则

墨菲法则：事情如果有变坏的可能，不管这种可能有多小，它总会发生。另一简单的表述是“有可能出错的事情，就会出错”（Anything that can go wrong will go wrong）或者“会出错的，终将会出错”。

墨菲定律告诫人们：安全意识时刻不能放松！
所以，该定律被认为是安全管理过程中的长鸣警钟





4. 事故的典型特征与安全法则

墨菲定律告诉我们：**容易犯错误是人类与生俱来的弱点**，不论科技多么发达，事故都会发生。而且我们解决问题的手段越高明，面临的麻烦越严重。

4. 事故的典型特征与安全法则

4.2 安全法则

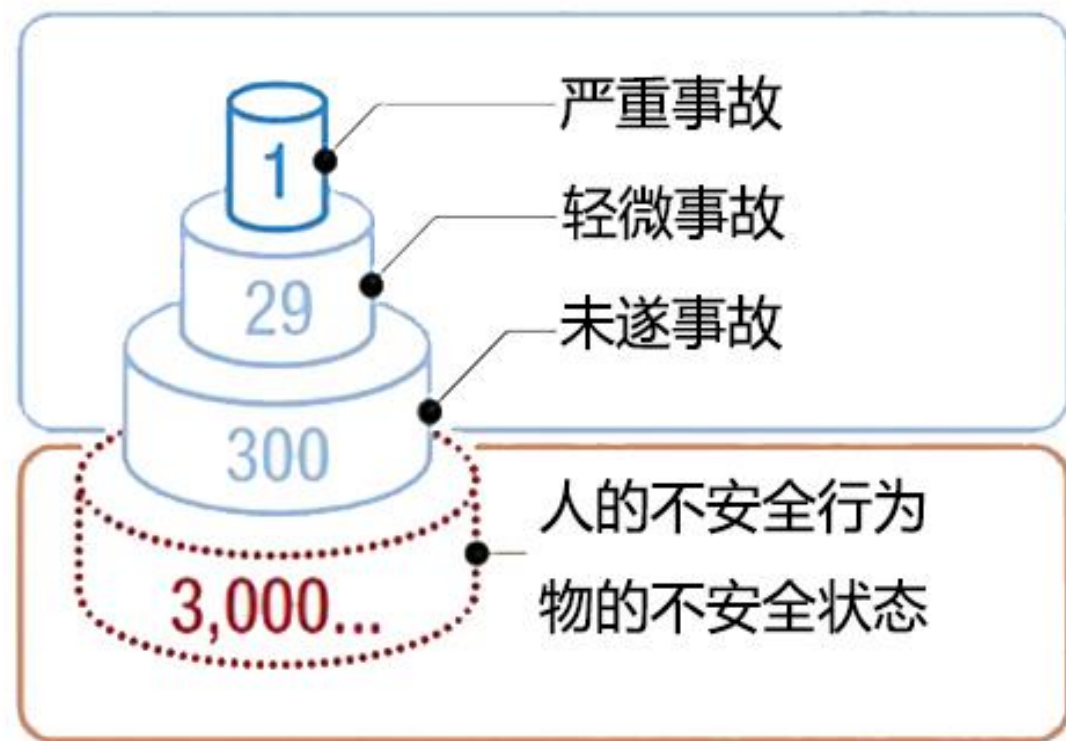
海因法则：

是由海因里希提出的300 : 29 : 1法则，其含义是：每一起严重事故的背后，有29次轻微事故和300次未产生人员伤亡的事故。

法则强调两点：

- ◆事故的发生是量的积累导致的结果；
- ◆二是再好的技术和再完美的规章，在实际操作层面也无法取代人自身的素质和责

Heinrich's Law

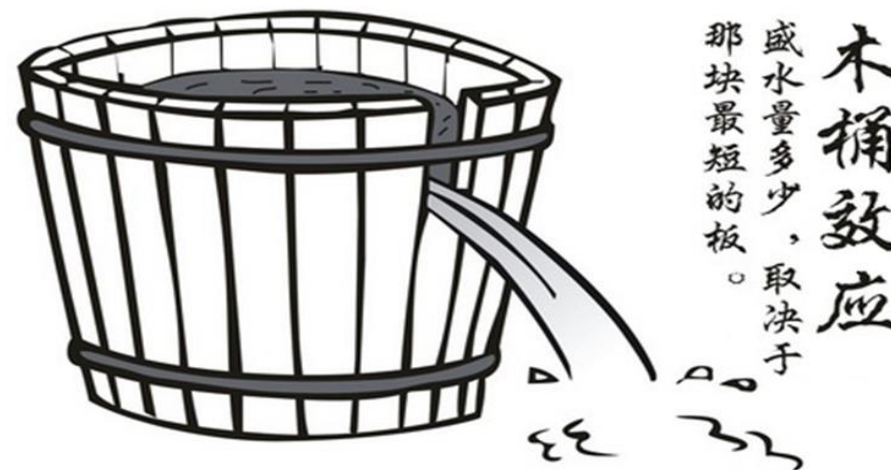




4. 事故的典型特征与安全法则

4.2 安全法则

木桶法则：又称木桶定律或木桶效应，是讲一只木水桶能装多少水取决于它最短的那块木板



法则启示：

要重视弱项管理。所谓弱项管理是指管理者要认识影响安全生产的主要原因或薄弱环节，并有针对性的加以改进。也就是说管理过程中要重视存在的“短板”，并尽早补足它。

4. 事故的典型特征与安全法则

4.2 安全法则

破窗法则： 又称破窗效应，其含义是指一幢楼有少许窗户被打破，如果破窗不被修好，将会导致更多的窗户被破坏。



法则启示：

- ◆对于违反安全规定的行为，管理者如果没有引起重视并加以严肃处理，就会使类似行为再次甚至多次重复发生，从而埋下事故的隐患；
- ◆如果受损的设备没有得到及时修复，人们会有意无意地加快它的损坏速度。



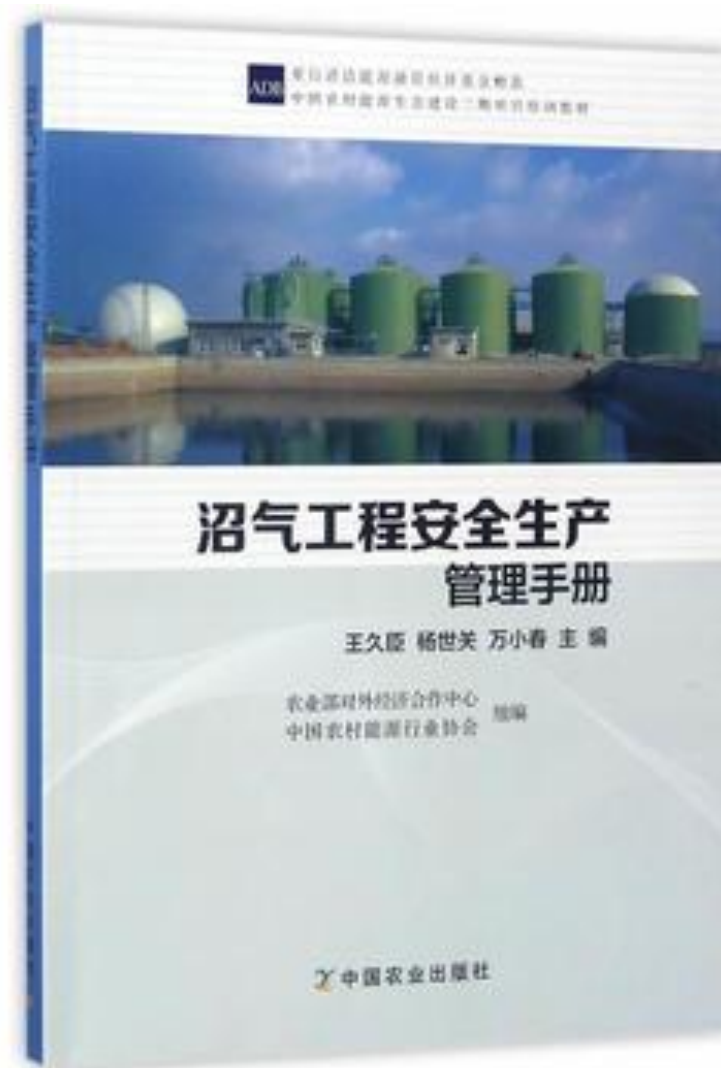
杨世关联系方式:

华北电力大学可再生能源学院, 102206

15011298869 (微信号)

shiguanyang@126.com

shiguanyang@ncepu.edu.cn





谢 谢 ！

Thanks for your attention