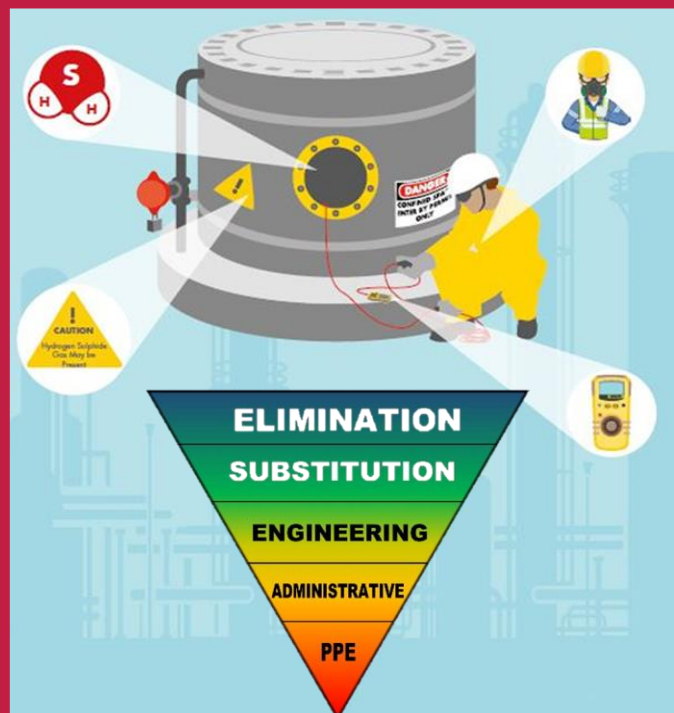


Golden Rules of Process Safety for:

Hydrogen Sulfide

硫化氢黄金法则



GR3 - H2S, May 2023

Copyright 2023 American Institute of Chemical Engineers

www.aiche.org/ccps

致谢

美国化学工程师协会（AICHE）和化学过程安全中心（CCPS）对特定技术过程安全黄金法则项目团队的所有成员表示赞赏和感谢，感谢他们在制定和准备这一重要指南方面所做的慷慨努力。CCPS 还要感谢小组委员会成员各自的公司支持他们在该项目的不同阶段的参与。

核心团队成员：

Denise Chastain-Knight, Chair	exida
Della Mann, Vice Chair	CCPS 名誉顾问
Warren Greenfield	CCPS 顾问
Denise Albrecht	3M
Kevin Campbell	Shell
Walt Frank	CCPS 名誉顾问
Anil Gokhale	CCPS 员工
Mike Hazzan	Acutech
Ng Ern Huay	Petronas
Pete Lodal	D&H Process Safety
Frank Renshaw	CCPS 名誉顾问
Louisa Nara	CCPS 员工
Linda Bergeron	CCPS 名誉顾问
Jeff Fox	CCPS 名誉顾问
Curtis Clements	Chemours

硫化氢黄金法则分团队成员：

Della Mann, Lead	CCPS 名誉顾问
Gary Amideneau	CCPS 员工
Andy Crerand	Shell
Andrew Moulder	Inter Pipeline
Jason Vercher	Arkema

团队成员的全面的行业经验和知识使本指南对开发和管理过程安全计划和管理系统的人员特别有价值。

在发布之前，所有 CCPS 指南都要经过同行评审程序。CCPS 非常感谢同行评审员的深思熟虑的意见和建议。他们的工作提高了该准则的准确性和清晰度。

硫化氢过程安全黄金法则的同行评审员：

Steven Betteridge	Shell
Danielle Brown	Buckeye Partners
Andrew Goddard	Arkema
Rizal B Harris Wong	Petronas

尽管同行评审员提供了意见和建议，但没有要求他们支持该指南，也没有请他们在发布前审查最终手稿。

化学过程安全中心由美国化学工程师协会于 1985 年成立，专注于工程和管理实践，以防止和减轻涉及危险化学品和碳氢化合物泄漏导致的重大事故。CCPS 通过其全面的出版计划，年度技术会议，研究和本科工程教育的教学材料活跃于全球。有关 CCPS 的更多信息，请致电 (+1) 646-495-1371，发送电子邮件 ccps@aiiche.org 或访问 www.aiiche.org/ccps

本文档可供使用，不承担任何法律义务或假设。更正、更新和建议应发送 Anil Gokhale 博士，CCPS 高级主任 ccps@aiiche.org

如果您正在离线阅读本文，则可能没有阅读最新版本。请在 CCPS 网站上查看当前版本。
<https://www.aiiche.org/ccps/publications/golden-rules-process-safety>

我们真诚地希望本文件中提供的信息将为整个行业带来更令人印象深刻的安全记录；但是，美国化学工程师协会、其顾问、CCPS 技术指导委员会和小组委员会成员、其雇主、雇主的高级职员和董事及其雇员均不保证、代表、明示或暗示本文件中提供的信息内容的正确性或准确性。在（1）美国化学工程师协会、其顾问、CCPS 技术指导委员会和小组委员会成员、其雇主、雇主的官员和董事、及其雇员和分包商之间，以及（2）本文件的用户，用户对其使用或误用的后果承担任何法律责任或责任。

硫化氢黄金法则

黄金法则#1：永远理解并尊重 H₂S 的危害性

黄金法则 #1 永远理解并尊重 H₂S 的危害性

❖ Why:

- 1) H₂S 令人中毒的浓度很低。
- 2) H₂S 是易燃气体 H₂S [1]。
- 3) H₂S 不易识别，没有颜色。
- 4) 在浓度高的情况下，H₂S 的气味类似臭鸡蛋，但它会使嗅觉麻木，因此人就会逐渐闻不到 H₂S 气体。
- 5) H₂S 比空气重，它会在低空累计。
- 6) H₂S 燃烧会产生有毒气体二氧化硫。
- 7) H₂S 可由一些含硫化合物与酸性溶液反应产生。
- 8) H₂S 能与水结合形成硫酸（H₂SO₄），这是一种腐蚀性酸[2]。
- 9) 铁锈（氧化铁）在 H₂S 存在下转化为硫化铁。硫化铁可以自燃产生火灾（即，它是自燃的）。
- 10) H₂S 是一种非常侵蚀性的气体水合物形式（即，H₂S 在水存在下容易形成最高温度的水合物之一）。在酸性油或天然气的生产、加工或运输中，由于 H₂S 水合物的形成，可能会发生流量限制 [3]
- 11) 可能存在虚假的安全感，例如在以下情况下：
 - a) 员工、承包商和访客对 H₂S 几乎没有经验。
 - b) 暴露的可能性尚不清楚。
 - c) 以前使用 H₂S 的经验没有导致伤害。这可能会使人们不会重视 H₂S 的潜在危害和伤害。
- 12) 事故历史：
 - a) 2019 年 10 月 26 日晚，泵房内的一台泵发生故障，导致含有 H₂S 的水泄漏。一名员工开车前往该设施，以解决泵油位警报。进入泵房后，该员工 H₂S 气体中毒。晚上 9 点 30 分左右，由于几个小时没有收到丈夫的回复，该员工的妻子开着他们的私人车辆，带着他们的两个孩子到泵房检查他。她进入泵房寻找她的丈夫，然后她也 H₂S 气体中毒了。后来到达的紧急救援人员注意到妻子汽车后座上有两个孩子。一名紧急救援人员穿上防护装备，包括自给式呼吸器（SCBA）并进入泵房。H₂S 气体暴露对该员工和他的妻子都是致命的[4]。紧急救援人员从车上救出了两个孩子。

这起事故涉及的黄金法则，让我们学习到管理层和员工不了解 H₂S 危害，这可以从以下方面得到证明：

- (1) 未穿戴所需的个人防护设备（即未佩戴公司提供的个人 H₂S 检测器）
- (2) 无效的上锁/挂牌
- (3) 机械通风设计不足导致 H₂S 在泵房内聚集
- (4) 无法正常工作的 H₂S 固定探测器和报警系统
- (5) 工厂安保缺失
- (6) 在有含有 H₂S 设备的泵房中，对情况和潜在危害的标识/理解不足，正确的标识请参见图 1。

硫化氢黄金法则
黄金法则#1：永远理解并尊重 H₂S 的危害性



图 1 在采取行动之前，请注意 H₂S 的毒性危害
来源: Shutterstock.com

b) 2003 年 12 月 23 日晚上 9 点 55 分，一口气井爆炸，导致天然气和有毒的 H₂S 气体云延伸至 30 米高。云团覆盖了 25 平方公里（10 平方英里），导致 234 人死亡，1000 多人受伤，数百头牲畜死亡。在通知安全官员之前，延迟了大约 1.5 小时。山区地形导致大量 H₂S 聚集在人口稠密的低层地区。图 2 显示了受影响的区域。总共有 6 万人被疏散。专家小组于第四天抵达受影响地区。在第五天，泄漏得到控制，一天后人们开始回家[5]。

与这一黄金法则相关的教训是，对 H₂S 的危害没有理解或尊重。如果了解这些危害，以下每个问题都不会存在：

- (1) 当时，法规没有考虑 H₂S 危害的程度，并允许在井 30 米（98 英尺）内建造房屋。
- (2) 没有遵守操作程序。
- (3) 事件报告太晚，无法进行有效的应急响应。
- (4) 最初在知之甚少且缺乏设备的情况下进行应急响应。

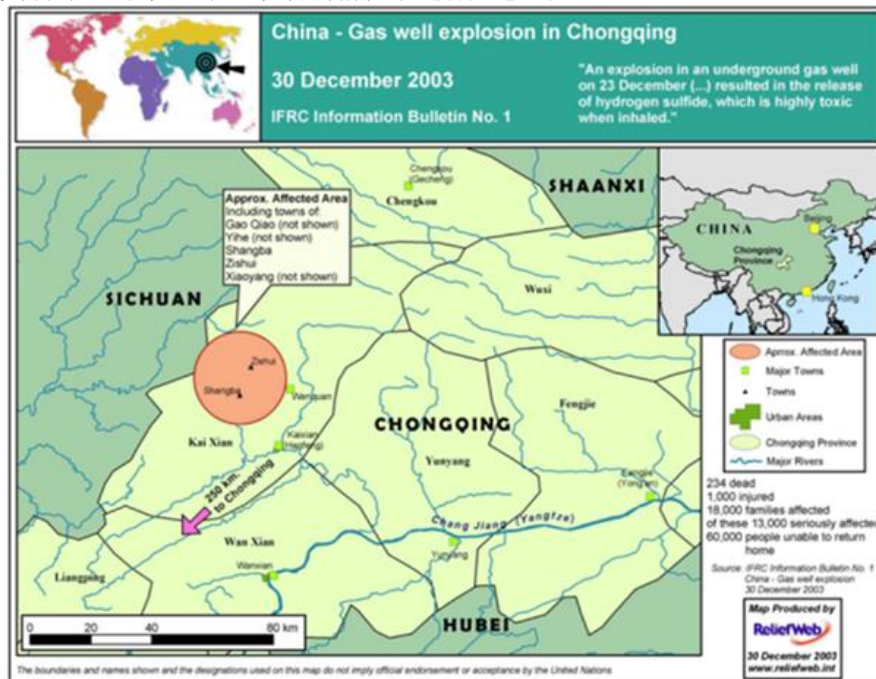


图 2 H₂S 泄漏到大气中主要影响的区域
来源: [5]

硫化氢黄金法则
黄金法则#1：永远理解并尊重 H₂S 的危害性

❖ **如何-所有使用者:**

- 1) 通过接受足够的培训[6]来了解您所在区域是否有可能接触 H₂S，以了解 H₂S 危害，包括：
 - a) 是有毒的。
 - b) H₂S 的毒性关注度。低浓度时可发生短期健康影响，而中等浓度时人员可迅速丧失人体机能，如表 1 所示。
 - c) H₂S 可导致嗅觉麻木。
 - d) H₂S 是易燃气体，如表 2 所示。
 - e) H₂S 可以积聚在低处。
 - f) H₂S 是无色的
 - g) H₂S 可溶于水和碳氢化合物。
 - h) H₂S 泄漏会飘散到很远的距离。

硫化氢黄金法则

黄金法则#1：永远理解并尊重 H₂S 的危害性

表 1 硫化氢危害 – OSHA

健康危害

硫化氢气体会对健康造成广泛的影响。工人主要通过呼吸接触硫化氢。其影响取决于您吸入硫化氢的量和时间。暴露于非常高的浓度会很快导致死亡。

短时（也称为急性）症状和影响如下所示：

工人接触限值
<u>NIOSH REL (10 分钟上限)</u> : 10 ppm
OSHA PEL:
<ul style="list-style-type: none"> • <u>一般工业上限</u>: 20 ppm • <u>一般工业峰值限值</u>: 50 ppm (如果轮班期间没有其他暴露, 则最多 10 分钟) • <u>施工 8 小时限值</u>: 10 ppm • <u>船厂 8 小时限制</u>: 10 ppm
<u>NIOSH IDLH</u> : 100 ppm
IDLH: 对生命和健康立即造成危险 (干扰逃生能力的水平) (NIOSH)
PEL: 允许暴露限值 (可执行) (OSHA)
ppm: 百万分之一
REL: 推荐暴露限值 (NIOSH)

浓度 (ppm)	症状/影响
0.00011-0.00033	典型背景浓度
0.01-1.5	气味阈值 (当某些人首先注意到臭鸡蛋味时)。浓度达到 3-5 ppm 时, 气味变得更难闻。超过 30 ppm, 气味被描述为甜或令人作呕的甜。
2-5	长时间接触可能会导致恶心、流泪、头痛或失眠。一些哮喘患者出现气道问题 (支气管收缩)。
20	可能会出现疲劳、食欲不振、头痛、烦躁、记忆力差、头晕等症状。
50-100	1小时后出现轻微结膜炎 (“气眼”) 和呼吸道刺激。可能会导致消化不良和食欲不振。
100	咳嗽、眼睛刺激、2-15 分钟后失去嗅觉 (嗅觉疲劳)。15-30 分钟后呼吸改变、嗜睡。1小时后喉咙发炎。几个小时内症状的严重程度逐渐增加。48 小时后可能会发生死亡。
100-150	嗅觉丧失 (嗅觉疲劳或麻痹)。
200-300	1小时后出现明显的结膜炎和呼吸道刺激症状。长时间接触可能会发生肺水肿。
500-700	令人震惊, 5分钟后崩溃。30分钟内对眼睛造成严重伤害。30-60分钟后死亡。
700-1000	快速失去知觉、“击倒”或在 1 至 2 次呼吸后立即崩溃、呼吸停止、几分钟内死亡。
1000-2000	几乎立即死亡

备注：不同生理效应发生的确切浓度和暴露时间尚不清楚，不同的行业使用略有不同的边界浓度对生理效应进行分类，包括死亡率。因此，OSHA 发布的表格只能用作管理 H₂S 危害的近似指南，特别是在较高浓度水平下。

来源：OSHA [7]

表 2 硫化氢国际化学品安全卡

H	硫化氢	分子式: H ₂ S	CAS#: 7783-06-4	RTECS#: MX 1225000	IDLH: 100ppm
	转化: 1 ppm = 1.40 mg/m ³		DOT: 1053 117		
义词/商品名: 氢硫酸、下水道气体、硫化氢					
暴露限制: NIOSH REL: C 10 ppm (15 mg/m ³) [10-分钟] OSHA PEL: C 20 ppm 50 ppm [10-分钟最大值]			测量方法 (见表 1): NIOSH 6013 OSHA ID141		
物理描述: 无色气体, 具有强烈的臭鸡蛋气味。 备注: 嗅觉很快就会疲劳, 并且不能用来警告 H ₂ S 的持续存在。以液化压缩气体形式运输。					
化学及物理性质		个人防护/卫生 (见表 2): 皮肤: 冻伤 眼睛: 冻伤 皮肤清洗: N.R. 去污: When wet (flamm) 变更: N.R. 提供: 冻伤洗液		呼吸器建议 (见表 3 and 4): NIOSH 100 ppm: PappS/GmFS/Sa7/ScbaF S: ScbaF/Pd,Pp/SaF-Pd,Pp/AScba Escape: GmFS/ScbaE	
不相容性和反应性: 强氧化剂、强酸、金属					
暴露途径、症状、靶器官 (见表 5): ER: Inh, Con SY: Irrit eyes, resp sys; apnea, coma, convuls; conj, eye pain, lac, photo, com vesic; dizz, head, lass, irrry, insom; GI dist, liquid: frostbite TO: Eyes, resp sys, CNS				First Aid (见表 6): 眼睛: 冻伤 皮肤: 冻伤 呼吸: 佩戴呼吸器	

来源: [8]

硫化氢黄金法则
黄金法则#1：永远理解并尊重 H₂S 的危害性

❖ **如何 - 操作员、设备员师和技术员：**

- 1) 注意 H₂S 的所有特性。
- 2) 了解 H₂S 危害的性质。
- 3) 了解 H₂S 的个人防护设备（PPE）要求（见图 3），包括个人 H₂S 检测器。
- 4) 了解 H₂S 泄漏的报警通知系统。
- 5) 制定和/或帮助制定针对 H₂S 危害的操作程序。
- 6) 了解 H₂S 暴露的正确响应程序。
- 7) 当有潜在 H₂S 危害的情况下，工作许可证和工作任务危害分析中应包括对 H₂S 暴露的考量。
- 8) 拆除含有 H₂S 的设备时，请遵循 H₂S 清洁和气体释放程序。
- 9) 注意当 H₂S 与铁接触时可能产生的自燃性硫化铁。打开此类设备时要小心
- 10) 观察同事的 H₂S 操作，并提供积极/建设性的反馈，以鼓励良好的 H₂S 行为。



图 3 选择正确的个人防护装备
来源: 图 1, 2 and 3: Shutterstock, 图 4: CSB

❖ **如何-管理：**

- 1) 为所有可能接触 H₂S 的工人提供足够的培训。
- 2) 确保过程安全信息/过程知识管理数据库中有 H₂S 的危害性质。
- 3) 定义并执行所有工人对 H₂S 危害的安全期望。
- 4) 确保由了解 H₂S 危害和对所审查系统有正确理解水平的合格人员完成定性/定量研究，如定量风险评估/过程危害分析/危害识别（QRA/PHA/HAZID）。
- 5) 建立并记录全厂 H₂S 政策，指定将适用哪些标准和法规以及可能超过这些标准和法规的任何公司要求。
- 6) 对于不可能/不适当使用其他方法的情况下，实施 H₂S 泄漏的风险管理政策。这种情况需要进行彻底的风险分析。
- 7) 即使 H₂S 浓度等于或低于允许的暴露水平，也不要容忍工作场所的 H₂S 气味。有关更多信息，请参阅补充阅读“硫化氢和羰基硫化物的毒理学特征” [9]。

❖ **如何-工程师和设计人员：**

硫化氢黄金法则

黄金法则#1：永远理解并尊重 H₂S 的危害性

- 1) 如果您可能接触 H₂S 或参与 H₂S 相关设计，需要参加充分的培训。
- 2) 遵循相关的 H₂S 设计标准。
- 3) 在存在 H₂S 危险的现场提供标识牌。
- 4) 针对 H₂S 泄漏要有视觉和听觉警报。
- 5) 审查并记录 H₂S 工艺成分信息，包括可能的副反应。尽管可能性不大，但应考虑这些副反应可能使 H₂S 与现场存在的其他物料接触的可信情景。
- 6) 参与/支持解决 H₂S 危害的定性/定量评估（如 QRA/PHA/HAZID）。

❖ 如何-应急响应小组成员：

- 1) 了解可用喷水的方式分散 H₂S 气云。
- 2) 谨慎处理和储存冲洗水。响应者应该知道 H₂S 在水中溶解度的危害，因为含有 H₂S 的水可能会对健康造成危害。
- 3) 由于紧急状态是动态的和 H₂S 的毒性，在响应 H₂S 泄漏情况时，请始终准备好最高级别的保护（见黄金法则 4）。

❖ 补充阅读：

- API RP 55 涉及硫化氢的石油和天然气生产和天然气工厂运营的推荐实践 [3]
- 小型、便携式石油和天然气生产设施：设计和操作的推荐解决方案（安全指南） [6]
- OSHA：硫化氢 - 危害 [7]
- 硫化氢和羰基硫化物的毒理学特征 [9]
- 杀伤毒气公报 CH026，艾伯塔省政府 [10]
- 基于风险的过程安全，第 8 章和第 9 章 [11, pp. 169-244]
- API 49 涉及硫化氢的钻井和油井服务作业的推荐做法 [12]
- 环境卫生标准 19 硫化氢 [13]
- API STD 2015 石油储罐安全进入和清洁要求 [14]
- 致命服务 - 快速指南 [15]
- ASME，第八节锅炉和压力容器规范第 1 部分 UW-2 节 [16]
- 硫化氢毒理学评论 [17]
- 物质信息 - 硫化氢 [18]
- H₂S 泄漏速率评估和审核表 [19]

硫化氢 (H₂S) 黄金法则

黄金法则#2: 必须知道在那些地方存在或可能产生 H₂S 危害

为什么:

- 1) 了解什么地方可能存在或是产生 H₂S 对于风险管理至关重要。
- 2) 缺乏知识可能导致 H₂S 危害意识了解不充分、识别或评估不彻底。

H₂S 存在于自然界和非常广泛的行业/场所, 包括皮革鞣制, 纸浆和造纸, 化学, 染料, 分解有机材料, 废水厂, 死水系统, 温泉, 矿物开采和石油和天然气生产[20]。很多事故都是由于人们没有充分做好防范 H₂S 的危害, 因为他们不知道 H₂S 可能存在在哪里或在哪里产生:

 - a) 人们不知道产生 H₂S 的反应。反应可以通过有意混合(例如, 在装有 H₂S 水溶液的容器上使用盐酸洗涤进行化学清洁)、加料顺序错误或是或通过错误投料来产生 [21] [22] [23]。
 - b) 人们不知道 H₂S 可以在低点累积。人们很难理解发生了化学反应并产生了 H₂S。
 - c) 人们不了解隔壁区域工作(例如, 在不同楼层同时工作)。H₂S 泄漏扩散不明显, 因为它可以飘入/飘出建筑物或其他相邻区域 [24]。
 - d) 人们在帮助回应受伤人员的同时, 却没有意识到他们正暴露在 H₂S 危险中。许多人有一种天生的自发反应来受伤人员。人们有一种自发反应, 首先帮助他人(在确保自己的安全之前)。
 - e) 由于 H₂S 云无色, 人们很难识别 H₂S 气云。
 - f) 人们对导致 H₂S 泄漏的异常工况的毫无准备。
- 3) 通过了解 H₂S 是否存在或可能存在, 管理、工程、运营、维护和应急响应人员可以采取积极预防措施, 防止与 H₂S 相关的过程安全事故。另请参阅黄金法则#3 和黄金法则#4。
- 4) 事故历史:

合同建筑工人在纸浆和造纸厂工作。2002 年 1 月 15 日, 硫化钠 (NaSH) 槽车在卸料站卸料。卸料站周围有收集坑, 收集雨水、冷凝水, 偶尔还会从卸料作业中泄漏出的化学物质(例如 NaSH)。坑可以排入下水道, 见图 4。然而, 由于环境问题, 从坑到下水道的排水阀通常被锁定关闭。事发当天, 即 2002 年 1 月 16 日, 坑中含有大量用水稀释的 NaSH 溶液。为了避免施工人员站在充满液体的坑中, 操作员解锁并打开了一个阀门, 将坑中的内容物排入下水道。5 分钟后, 阀门关闭并重新锁定。

事发当天, 为了调节污水处理区的 PH 值, 在下水道加入硫酸。硫酸与下水道中的 NaSH 反应, 产生 H₂S。下水道人孔密封的间隙会泄漏 H₂S 气体, 这些气体飘入建筑工人的区域。人行道附近的两名建筑工人因 H₂S 中毒而死亡。此外, 7 名建筑工人和 1 名卡车司机因 H₂S 暴露而中毒 [25]。

与这一黄金法则相关的学习是, 当打开坑和下水道之间的隔离, 有可能产生 H₂S。

- (1) 公司没有向参与 NaSH 运输、卸料和处理的工人传达与酸混合会产生 H₂S 的信息。
- (2) 在事故发生的工厂附近区域, 没有识别 H₂S 的危害。因此该地区没有检测器、报警或警告标志。
- (3) 设计工程师在将卸料站排水管连接到工厂的酸性下水道系统时没有评估产生 H₂S 的风险 [26]。
- (4) 维护人员没有意识到保持酸性下水道系统隔离的重要性。

硫化氢(H₂S)黄金法则

黄金法则#2: 必须知道在那些地方存在或可能产生 H₂S 危害

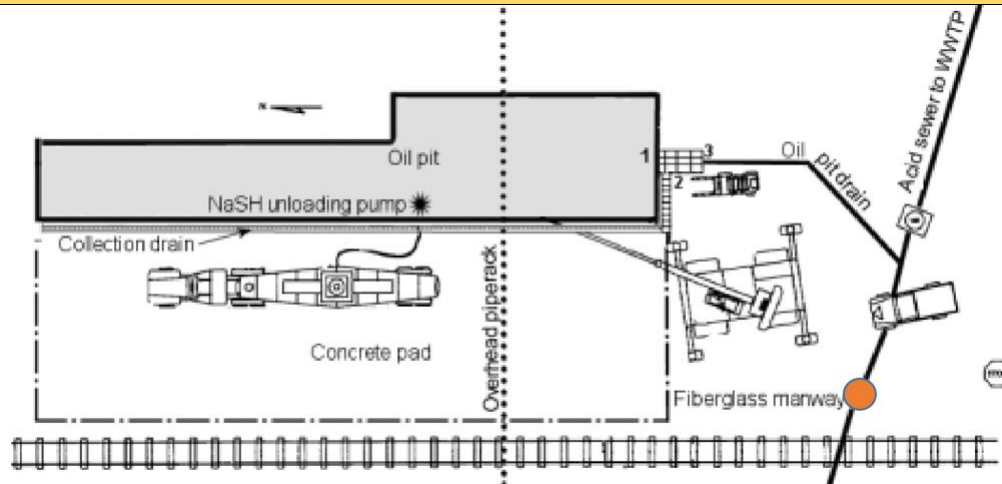


图 4 酸性下水道系统安全关键设备故障-非密封人孔盖使 9 人暴露于 H₂S 气体中
资料来源: 美国化学品安全与危害调查委员会 [25]

❖ 如何 – 所有人:

- 1) 注意您所在区域可能出现 H₂S 的地方或是当你参观一个新工厂时可能出现 H₂S 的地方。例如，
 - a) 在皮革工业中，H₂S 可以存在于生皮的预鞣制中
 - b) 在死海水系统中，H₂S 可以通过某些类型的细菌的作用产生
 - c) 在下水道系统中，有机物的腐烂会产生 H₂S
 - d) 在炼油厂中，H₂S 可以存在于许多单元中
 - e) 在 H₂S 生产现场，H₂S 遍布整个现场
- 2) 遵循标牌说明。未经允许，请勿进入 H₂S 限制区域。
- 3) 询问 H₂S 可能存在的地方。
- 4) 参加提供的任何培训或知识宣讲，以确保了解所有 H₂S 危害、潜在暴露地点和应急响应程序。
- 5) 了解并注意 H₂S 释泄漏的信号和所有警报。
- 6) 注意指定的疏散路线和集合/集合点要求。
- 7) 了解个人防护用品的使用并遵守要求。例如，一些场所将要求人员在 H₂S 泄漏可能性特别高的地区工作或进入时携带紧急疏散呼吸器。

❖ 如何-运行&维修:

- 1) 让操作人员、设备人员和技术员参加与 H₂S 危害、H₂S 位置和涉及暴露可能性的高级培训，包括学习应急响应程序。
- 2) 报告对 H₂S 泄漏的所有观察结果，并让所有人包括可能不太了解的潜在危害人也熟悉危害。
- 3) 在变更工艺运行状态时，要确保在变更过程中 H₂S 始终处于安全状态，尤其是在涉及工艺操作边界时。在图纸可对于关键的 H₂S 隔离位置应作出标记。从而了解 H₂S 存在的位置 [27] [28]。
- 4) 当需要对含 H₂S 的设备进行维护工作时，必须先批准工作任务分析，并且对这种工况进行风险分析 [29]。
- 5) 由于 H₂S 的危害，对程序变更需要额外小心。历史事故显示可能会发生不必要的化学反应。通过变更管理和工艺危害审查（如果适用）工艺变更。有关更多信息，请参阅 CCPS 的补充读物“编写有效操作和维护程序的指南”和“过程工厂操作的人为因素：手册” [30] [31]。
- 6) 确保操作和维护程序着重强调 H₂S 的存在或可以产生的地方。
- 7) 在建立维护计划时考虑 H₂S 的存在的可能性。另请参阅黄金法则#3。

硫化氢(H₂S)黄金法则

黄金法则#2: 必须知道在那些地方存在或可能产生 H₂S 危害

❖ 如何-管理:

- 1) 建立基于风险的安全措施, 防止公众进入化学设施 [32]。这应包括有毒化学品警告标志、视频监控或周边围栏。
- 2) 为可能接触 H₂S 的工人提供培训。他们必须意识到工作场所的危险 [33]。
- 3) 成立一个多专业小组参与危害识别和过程评估, 以确定 H₂S 存在的可能性或可以生成的地方, 包括产生 H₂S 的潜在意外化学反应。
- 4) 广泛传达 H₂S 危险源位置以及 H₂S 的特性和与 H₂S 相关的应急响应程序。
- 5) 在有 H₂S 大量泄漏可能性的地区强制实施适当水平的 H₂S 检测和预警系统。此外, 要求这些系统始终保持功能状态。
- 6) 建立强制性工作许可制度 (如果尚未建立), 强调 H₂S 暴露的风险, 提高对 H₂S 风险和潜在泄漏地点的认识。

❖ 如何-工程师和设计人员:

- 1) 参加工艺危害分析 (PHA), 尤其是那些涉及 H₂S 的工艺危害分析。工程师将了解可能产生 H₂S 的正常和异常情况。应保存 PHA 文件, 并将 PHA 的结果与工厂进行沟通从而加强有关 H₂S 危害存在或可能产生的过程安全知识 [11, pp. 169-244]。

资产完整性工程师必须了解 H₂S 存在的位置和可能产生的位置, 并评估对 H₂S 对容器机械完整性的潜在影响。请参阅补充阅读“机械完整性系统指南 [34]。

例如, H₂S 和拉应力的共同作用会引起金属材料的硫化物应力开裂腐蚀 (SSC)。资产完整性工程师可以提供已知 SSC 危害的预测。当焊接 (例如管件) 应采用已批准的焊接程序进行时尤其如此 (例如避免焊接材料中锰和铬含量过多、焊接材料沉积不足或焊脚尺寸不足)。充分的准备是必要的 (例如烘烤程序, 尤其是碳钢) [35] [36]。

当存在 H₂S 泄漏到大气中的可能性时, 使用基于风险的方法, 依靠止回阀来防止 H₂S 气体或液体回流。应安装主动 (非被动) 隔离, 除非可以通过基于风险的方法证明其合理性 [37]。

当工艺涉及 H₂S 时, 避免采用开放式设计。当 H₂S 存在或可能产生时, 工程师应评估封闭系统设计, 以避免打开设备进行 pH 检测 或液位测量等活动 [23] [38]。

了解该过程的化学性质和物理性质 (特别是亨利定律), 以确定是否以及何时可以从溶液中释放 H₂S。H₂S 气体可能直接从其原始来源或产生点释放, 或者由于其在水和碳氢化合物中的溶解度而在下游位置释放出来。有关更多信息, 请参阅补充阅读“熔硫储存和处理的危害” [39]。

- 2) 较高的温度和较低的 pH 值会增加释放量。针对所有可能得工况应设计 H₂S 气体排放。例如, 含有溶解 H₂S 的废水箱会随着温度升高而释放出 H₂S 气体。如果工程解决方案不可能, 则使用分层控制原理 (见 **Error! Reference source not found.**)。
- 3) 确定 H₂S 固定气体检测和相关报警系统的标准和位置。考虑因素可能包括潜在的泄漏位置、H₂S 的特性 (例如, 比空气重) 以及泄漏时 H₂S 的迁移潜力 (例如, 主导风速、风向以及与顺风敏感受体的距离, 例如人们)。

❖ 如何-应急响应人员:

- 1) 在响应 H₂S 泄漏时要考虑风向、建筑通风和地形等因素。
- 2) 使用监测设备了解哪里存在 H₂S 或在紧急情况下哪里可能产生 H₂S。另请参见黄金法则#4。

硫化氢(H₂S)黄金法则

黄金法则#2: 必须知道在那些地方存在或可能产生 H₂S 危害

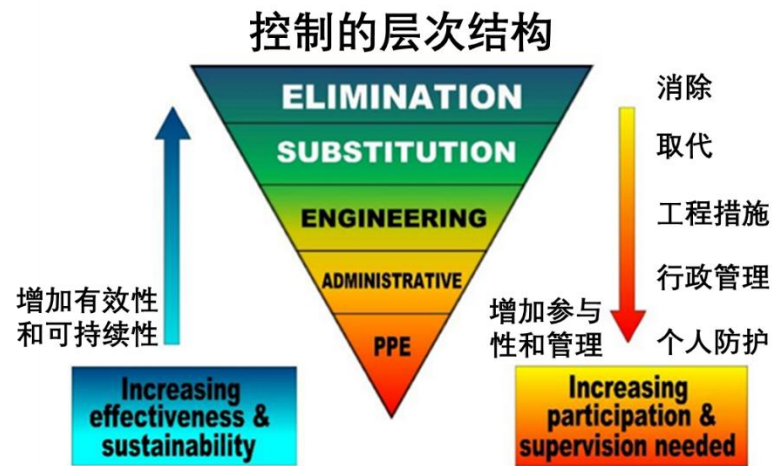


图5 分级控制

来源: Shutterstock.com

补充阅读:

- Toxicological Profile for Hydrogen Sulfide 2016 [9]
- CCPS, Guidelines for Risk Based Process Safety [11, pp. 169-244]
- CSB Georgia-Pacific Corp. Hydrogen Sulfide Poisoning [25]
- Guidelines for Writing Effective Operations and Maintenance Procedures [30]
- Human Factors for Process Plant Operations: A Handbook [31]
- Guidelines for Mechanical Integrity Systems [34]

硫化氢 (H₂S)黄金法则

黄金法则#3: 建立针对 H₂S 泄漏的防范控制措施

❖ 为什么

- 1) 保护工人和其他人免受可能导致伤害甚至死亡的有毒气体的影响 [40] [41] [42]
- 2) 防止对环境造成伤害 [43]
- 3) 事故历史:

1993 年 H₂S 7 月 7 日, 法国格拉斯, 废水从储罐转料到槽车时发生 H₂S 释放, 导致槽车司机死亡。生产过程中产生的需要在废水转移前根据程序要求进行中和。然而, 由于其中一种关键反应物发生了变化, 中和程序并未按照书面规定进行。此外, 没有仪器监测废水中的 H₂S 浓度, 技术人员只能依靠嗅觉来监测中和反应。由于中和步骤测试无效, 废水中残留有大量 H₂S。当废液通过真空泵输送时, 高浓度的 H₂S 通过泵的排气口释放出来。该泵没有设计有处理有毒排气的功能, 由于排气高度较高, 导致路过的司机吸入烟雾并受致命伤 [44]。

与这条黄金法则相关的知识是:

- (1) 未严格遵循 H₂S 处理条件, 在未分析所需量的情况下改变了关键反应物之一。中和过程不完整, 并且在任何阶段都没有受到监督。
- (2) 程序包含不必要的细节, 未包含必要的信息。
- (3) 富含 H₂S 的废水在转移前未进行分析。
- (4) 未遵循准则和程序 (即运行开始报告没有签字、未读取中和后废物罐的读数)。
- (5) 已知 H₂S 是现场危险物质, 但测量浓度的仪器没有提供。

❖ 如何 –所有人:

- 1) 始终思考并实践消除/替代/避免使用 H₂S 的方法 [45]。根据图 5, 控制方法的优先级应从消除开始。
- 2) 了解 H₂S 危害并严格遵守程序和其他管理控制措施, 以防止自己接触 H₂S。例如, 确保个人硫化氢检测仪正常运行并维护, 包括定期校准。

❖ 如何 –操作和维修:

- 1) 编写/遵循正确的操作和维护程序, 其中包括:
 - a) 在程序中突出有硫化氢危害的地方
 - b) 强调需要预防性监测/控制 H₂S 的关键步骤
 - c) 验证/确保这些程序清晰且是最新的内容[30]
- 2) 编写/遵循 H₂S 设备去污程序, 其中可能包括使用蒸汽或氧化剂, 例如高锰酸钾 (KMnO₄) [46]。
- 3) 编写/遵循破管程序。这至少应包括首次破管和人员保护要求 (包括呼吸保护, 直至并包括针对未知 H₂S 浓度的自供式呼吸器 (SCBA))。
- 4) 当 H₂S 工艺设备重新投入使用以及 H₂S 服务设备发生变更时, 参与运行准备审查, 包括开车前的安全审查[40]。一些例子包括:
 - a) 巡查管线以确保手动阀处于正确的操作位置, 并且不存在末端开放的管线
 - b) 确保所有工艺仪表处于良好的工作状态, 包括固定的 H₂S 检测器。
- 5) 遵守工作许可程序, 该程序涉及与 H₂S 设备相关的常见的工作, 包括但不限于:
 - a) 一般作业
 - b) 动火作业 [47]
 - c) 受限空间作业 [48]
 - d) 挂牌上锁作业[49]
- 6) 在工作许可证程序中中进行现场风险评估/工作危害评估, 审查 H₂S 等危害。
- 7) 对于涉及关键安全功能的维修申请, 需优先处理。

硫化氢(H₂S)黄金法则

黄金法则#3: 建立针对硫化氢泄漏的防范控制措施

如何-管理:

- 1) 制定一项政策, 要求对所有 H₂S 泄漏和未遂事件进行过程事件调查, 并要求在整个组织内共享关键调查结果 [50]。了解硫化氢泄漏和未遂事故调查结果可能有助于组织制定未来的预防措施。另请参阅黄金法则#5。
- 2) 建立包括 H₂S 设备的变更管理制度 [40]。该计划应包括对 H₂S 预防控制措施的审查, 以确保变更是可以接受的。
- 3) 确保管理系统反映 H₂S 的危险, 从而增强对潜在 H₂S 泄漏严重后果的意识。这可能包括工程标准、应急响应计划和入职培训。请参阅黄金法则#1。
- 4) 创建绩效指标, 以确保及时处理安全关键功能受损的维护工单。
- 5) 识别故障的根本原因, 对于防止安全关键设备故障再次发生至关重要[51]。

如何-工程和项目:

- 1) 建立包含 H₂S 相关信息的设计基础, 以便明显地对 H₂S 成分的变化进行适当标记, 以进行变更管理分析。例如, 原料的变化。
- 2) 制定并遵循解决 H₂S 危害的内部工程标准, 包括:
 - a) 按照图 5 使用本质上更安全的设计 (ISD) 方法设计 H₂S 装置。例如, 工程师可以:
 - (1) 通过用碱 (NaOH) 与 H₂S 中和来消除下游的 H₂S 危害, 这将改变下游对产生的 NaSH (或 Na₂S) 溶液 (液体) 的危害。这可能比 H₂S (气体) 更容易安全运输。
 - (2) 提供故障安全设计, 例如减压阀, 以“失效打开”的方式连接到火炬系统。
 - (3) 简化管道设计, 防止交叉污染。
 - (4) 用清除剂处理酸性天然气的设计, 以消除/减少下游设备 (例如管网) 中的 H₂S。
 - b) 通过确定后果 (或风险) 等值线来确定 H₂S 危害的设施布局评估, 以确定间隔距离和布局设计。计算 H₂S 影响区域, 并使用该数据进行风险决策, 以解决安全室、设施选址和应急响应计划 (包括场外影响) [52] [53] [54]。H₂S 的危害包括其有毒和易燃特性。
 - c) 进行确定检查、测试和预防性维护任务和制定检维修频率时, 遵循正确认可和普遍接受的良好工程实践 (RAGAGEP), 特别是对于酸性水介质。由于该区域可能会增加腐蚀, 因此需要进行密切的预防性维护 (PM) 监测[55] [56]。
 - d) 为在 H₂S 危险区域内有人常驻的建筑物提供专门设计的通风系统 [57]。
- 3) 设计 H₂S 介质设备时应遵循致命设施标准[58]。
- 4) 在含 H₂S 的应用中指定适当的结构材料, 以减少/消除腐蚀。例如, 在硫化氢应用中必须避免使用黄铜和铜。[59]
- 5) 尽量减少泄漏源 (例如, 不允许在含 H₂S 的设施中使用小型或螺纹配件)。
- 6) 进行例行工艺危险分析, 重点是泄漏预防和评估防护措施的充分性[60]。
- 7) 对于含 H₂S 设备应设计隔离和换风装置, 以便其可以进入和/或退出运行。由于条件可能发生变化 (例如, 由于被认为已完全关闭的阀门缓慢泄漏), 请注意在长时间后重新建立非 H₂S 环境。
- 8) 了解您在 H₂S 事故或未遂事故的责任 (包括材料和设备选择、工艺设计、化学反应和副反应等)。

补充阅读:

- CCPS, Guidelines for Process Safety Documentation [61]
- CCPS, Guidelines for Engineering Design for Process Safety 2nd Ed [62]
- WHO, H₂S Human Health Aspects [63]

硫化氢 (H₂S)黄金法则

黄金法则#4：针对 H₂S 泄漏制定缓解措施

为什么：

- 1) H₂S 泄漏的早期预警增加了人们采取有效缓解措施的可能性。
- 2) 限制 H₂S 泄漏的量增加了最大程度避免出现伤亡的可能性。
- 3) 演练应急响应预案和配备合适的个人防护装备用于撤离，可以增加最大限度减少伤亡的可能性。
- 4) 设置安全地点可以增加人们免受泄漏影响的可能性。
- 5) 事故历史：
 - a) 一名石油工人在操作阀门时因接触 H₂S 而晕倒。领班试图营救他，但也中毒了，第三名救援人员也是如此。因为两名潜在救援人员都没有配备硫化氢气体检测仪，也没有佩戴呼吸防护设备。剩下的船员戴好自供式呼吸器，最终将受伤的工人带离了该地区。第三名工人被救活，但第一名工人和领班死亡 [64]。与这条黄金法则相关的知识是：

如果没有配备适当的个人防护装备 (PPE) 和接受培训，施救救援人员可能会成为受害者。参见图 3。
 - a) 两名工人正在调查建筑物内不明原因或程度的硫化氢泄漏。工人们在没有呼吸防护的情况下进入大楼进行空气质量检测。一名工人的个人硫化氢警报在大楼入口处响起，两名工人离开了该区域。一名工人把检测器绑在扫帚柄上，测量到 H₂S 的浓度是 250ppm（该问题区域的浓度是立即致死量 (IDLH) 浓度的两倍多）。两名工人都接受医疗救助 [64]。与此黄金法则相关的知识是：
 - (1) 如果建筑物安装了适当的气体检测器，那么工作人员就会得到更早的报警，并且不会冒高 H₂S 浓度风险进行调查。
 - (2) 也不需要返回该地区进行临时测试，这会增加人员的风险。
 - (3) 仅当工人使用 SCBA 或同等供应空气时才应允许人员进行调查 H₂S 泄漏情况。这降低了人员面临的暴露风险，特别是在发生泄漏后，泄漏可能发生变化/恶化。
 - b) 请阅读黄金法则#2 中的为什么事故。

七名受伤的承包商被私家车送往地区医疗中心，紧急医疗服务 (EMS) 将另外三名受害者（包括两名致命伤者）送往不同的医院。一名受伤者的衣服被完全脱掉并放入袋子中；另外两名受害者的衣服没有被脱掉。运送受伤者的急救人员出现了接触硫化氢的症状；然而，脱掉病人衣服的两名急救人员报告说他们硫化氢中毒症状较轻。所有急救人员均经过医学评估后出院。

与此黄金法则相关的知识是：
 - (1) 在事故指挥系统建立之前，将受害者从事故现场转移至工厂急救站，且现场未进行消毒处理。工厂指南并未要求在现场或急救站进行净化处理。
 - (2) 被送往医院的三名受伤者中，其中一名受伤者的衣服被脱掉，而另外两名受伤者则没有脱掉衣服。由于衣服被污染，医护人员接触到了硫化氢。
 - (3) 当地的医疗管理指南没有认识到硫化氢气体暴露受害者的衣服可能会释放硫化氢，这可能对急救人员造成医疗风险[25]

如何 –所有使用者：

- (1) 始终注意现场存在或可能产生 H₂S 的位置以及检测 H₂S 泄漏和发出的警报。
- (2) 参加有关 H₂S 危险性（包括可燃性和毒性）的培训。
- (3) 根据现场程序的规定，携带逃生呼吸器。
- (4) 积极参加所有应急响应演练，了解当 H₂S 警报响起时如何逃生；（例如，按照垂直风向的方向撤离并使用逃生呼吸器（如果提供）[10]。
- (5) 听从应急响应人员的指挥。
- (6) 请勿尝试营救受 H₂S 影响的人员，除非您接受过相关培训并且佩戴了适当的个人防护装备，包括 SCBA。

硫化氢(H₂S)黄金法则

黄金法则 #4: 针对 H₂S 泄漏制定缓解措施.

❖ How –操作和维修:

- (1) 按照制造商的规范维护固定式和便携式气体检测系统，例如定期校准（通常是制造商指定的每月或每两个月一次的任务）。
- (2) 定期测试气体检测和声音报警系统。
- (3) 检查、维护和对 H₂S 探头触发关闭的联锁回路进行功能测试。
- (4) 检查并维护现场所有逃生呼吸器和自供式呼吸设备。
- (5) 维护现场的 H₂S 安全距离，以有效防止 H₂S 气体进入。
- (6) 在现场动工之前讨论适用于工作许可证的 H₂S 危害，包括任何设备首次断开时的 H₂S 危害缓解。这将使人员做好准备，在硫化氢泄漏时减弱硫化氢暴露危害的影响。
- (7) 如果发生硫化氢泄漏，请做好缓解措施的准备并接受培训，包括紧急停车流程。
- (8) 准备好缓解措施，熟悉逃生路线，包括进入工艺区域和其他可能存在 H₂S 的位置。
- (9) 能够向任何应急响应 (ER) 团队传达有关潜在暴露的适当信息。

❖ 如何-管理:

- (1) 根据紧急情况在现场或场外建立 H₂S 安全位置
- (2) 确认公司各个级别都在进行有关 H₂S 危害（包括可燃性和毒性）的现场培训。为所有可能在场的人员（例如访客、承包商、非操作人员、管理人员）设置适当的培训级别。
- (3) 确保工厂进行风险评估，为所有可能接触 H₂S 的人员提供适当的逃生/呼吸设备。
- (4) 确认防护装备不会对工人的健康和生命安全造成危害。例如，请勿在救援行动中使用逃生瓶/逃生包。
- (5) 确保制定全场应急响应计划，定期进行演习和演练，并进行记录和批评。
- (6) 为应急响应团队提供正确的设备来应对硫化氢事件。
- (7) 确保现场 H₂S 政策包括缓解和预防措施。
- (8) 确保与社区监管机构（包括应急响应机构）进行协调。

❖ 如何-工程&项目:

- (1) 遵循公司、监管机构和/或行业关于警报值的指南，设计并安装固定 H₂S 气体检测器，有效覆盖检测范围 [65]。
- (2) 根据公司标准、监管要求和最佳实践指南，设计和安装适当级别的报警（视觉和听觉）。针对 H₂S 泄漏，快速报警避免任何潜在的延迟，因为 H₂S 扩散速度快 [66]。
- (3) 设计任何泄漏防护室时，应将报警安装在室外，通知人员内部 H₂S 泄漏（例如，室内泄漏报警触发外部声音和报警灯）。
- (4) 设计控制措施以减少室内/室外工作场所的 H₂S 危害；例如，加强排风或自动关闭 HVAC 以保护建筑物内的人员。
- (5) 基于泄漏场景、主要风向和浓度，设计现场 H₂S 安全避难点，以有效防止 H₂S 气体进入。理想情况下，应提供多个安全位置，用于多种风向。
- (6) 给 H₂S 设备上安装远程紧急隔离阀。这可能包括定义的阈值数量或可能出现大量泄漏的位置。

❖ 如何-应急响应负责人:

- (1) 根据现场 H₂S 浓度指定合适的呼吸设备。佩戴全面罩使用自供式呼吸器进行应急响应。切勿使用逃生包或循环呼吸器进行应急响应[64] [66] [67]。
- (2) 针对现场所有识别的位置，制定 H₂S 泄漏的应急管理计划。
- (3) 针对这些场景进行应急响应演练，包括实际使用 SCBA。
- (4) 完成专门针对与 H₂S 相关危害的应急响应 (ER) 和急救培训。
- (5) 进入室内时，使用气体监测设备来判断内部气体浓度，以避免进入有毒环境[66]。
- (6) 在应对 H₂S 泄漏时，遵循既定的应急响应计划 (ERP)，包括持续监测风向。
- (7) 警惕 H₂S 泄漏时可能会造成大片区域受到严重影响的可能性。厂外也可能受到影响，因此应包含在工厂应急响应计划和当地政府的应急响应计划中。
- (8) 除非接受过使用 SCBA 的培训，否则请勿尝试在发生 H₂S 释放的情况下营救任何人员。可以采用伙伴系统 [4] [64]。

硫化氢(H₂S)黄金法则

黄金法则 #4: 针对 H₂S 泄漏制定缓解措施.

- (9) 将受到 H₂S 影响的人员转移至安全地点（例如空气新鲜处）。如果受害者呼吸困难或停止呼吸，请使用带单向阀的防护面罩（例如袖珍面罩）开始辅助通气，并向面罩中添加氧气（如果有）。如果工人没有脉搏，请开始心肺复苏 (CPR)。由于如果脱离暴露，身体会自行清除 H₂S，因此在医疗援助到达之前继续为受害者提供氧气辅助通气至关重要 [64]。
- (10) 防止 H₂S 暴露，采取措施防止接触可能污染受伤者皮肤或衣服。这可能包括在通风空间脱掉受伤者的衣服，以帮助保护受伤者和紧急救援人员。
- (11) 制定协调计划，通过社区资源，获取有助于治疗 H₂S 暴露的设备（例如高压氧设备） [68]。
- (12) 评估事件应急响应（包括演习和真实事故）持续提高。

❖ 补充阅读:

- Rethink your refuge [69]
- Shelter-in-place. Reducing Risk from Toxic Impacts [70]
- 29 CFR. 1910.119 Occupational Safety and Health Administration [71]
- CCPS Guidelines for Technical Planning for On-Site Emergencies [72]
- CCPS Guidelines for Post Release Mitigation Technology in the Chemical Process Industry [73]

❖ 为什么:

- 1) 导致许多事件的根源都与管理体系的缺陷有关。
- 2) 对硫化氢涉及的事故和未遂事件进行调查, 可以获得宝贵的经验教训, 如果应用得当, 可以减少未来再次发生类似事故的可能性。
- 3) 学习事故调查可以提供了加强管理体系和公司文化 (包括其他过程安全要素) 的机会。
- 4) 从其他公司网站或行业其他地方获得的事故调查经验可能为改进管理系统提供有价值的见解 [74]。
- 5) 事故历史:

2002 年 12 月 11 日, 一名员工在进入废水处理室时因接触 H₂S 而晕倒 (见图 6)。该员工走进房间取回工具。他闻到了“臭鸡蛋”的味道, 并感到肺部有压力, 呼吸困难。他试图撤离, 但倒在了房间里。同事们把他拉到了安全的地方。

该设施之前曾发生过硫化氢事故, 导致市政府官员进行了外部调查并发出了书面减排令。为此, 安装了 H₂S 检测器, 但未制定所需程序, 也未实施培训以确保员工了解与废水处理过程相关的 H₂S 危害和控制措施。

与这条黄金法则相关的经验教训是:

- (1) 硫化氢管理体系薄弱, 为事故发生提供了途径。该公司没有健全的系统来管理 H₂S 危害并通过有效的危害识别和管理来确保员工的安全。
- (2) 公司缺乏正式的事故件调查和沟通系统。未能从公司之前的事故中汲取教训, 为事故再次发生留下了机会。以往事故发生后, 没有充分吸取教训, 管理制度也没有得到充分改进。
- (3) 缺乏正规的废水处理区运营程序和培训。如果装置操作员意识到可能产生 H₂S 的反应, 这一事件本可以避免。
- (4) 异常现象的常态化导致人们自满并接受这样的事实: 难闻的气味是设施运营中的常见现象, 员工已经习惯了“臭鸡蛋”等气味。并非所有人都熟悉与 H₂S 相关的危险
- (5) 化学安全委员会 (CSB) 调查期间进一步发现, 该事故是由于在容器中对废物进行化学处理造成的, 该设备的设计并不是用于这个功能 [75]。

硫化氢(H₂S) 黄金法则

对黄金法则#5：对于涉及 H₂S 的事故，要进行事故调查，不断改进管理体系



图6 工人已经习惯在该位置闻到 H₂S 气味
来源:化学安全委员会 Chemical Safety Board [75]

❖ 如何-所有使用者:

- 1) 参与涉及 H₂S 事故和未遂事件的报告和调查计划，并帮助在整个公司内实施该计划。
- 2) 使用 H₂S 培训以及事故和未遂事故培训中的知识来识别需要调查的 H₂S 事故和未遂事故。请参阅黄金法则#1。
- 3) 使用适当的技术来调查事故和未遂事故 [50]。
- 4) 只要有可能，导致事故发生的原因不要局限在物理和/或人为因素，从而能够识别管理体系层面的原因。这样可以了解物理和人为因素出现的原因，以便更广泛、更有效地预防未来的事故。
- 5) 评估保护层的有效性，并根据事故调查发现确定需要改进的缺陷。
- 6) 参与记录和分享事故和未遂事件调查结果。
- 7) 根据调查结果提出解决建议。这包括与建议相关的实施、培训和管理系统更新。
 - a) 跟踪事故和相关的根本原因，以识别可能导致重复发生的事故和未遂事件的原因。
 - b) 不断改进管理体系，以减少发生事故和未遂事故的可能性。
 - c) 认识到并非所有事故都代表“最坏情况”事故。尽管该事故只造成了轻微的后果，并不意味着不可能发生更重大的事故。
 - d) 确保事故的“企业记忆”保持有效，并定期与新员工和现有员工分享经验教训
 - e) 使用跨行业（同一行业内和不同行业内）的方法来收集从事件中吸取的经验教训。

❖ 如何-操作工和维修人员:

- 1) 了解如何识别需要调查的 H₂S 事故和未遂事件。请参阅黄金法则#2。
- 2) 了解在实施调查计划中的角色。
- 3) 报告 H₂S 事故和未遂事故，并进行调查。
- 4) 根据要求参与调查（作为团队成员或证人）。

硫化氢(H₂S) 黄金法则

对黄金法则#5：对于涉及 H₂S 的事故，要进行事故调查，不断改进管理体系

- 5) 坚持学习 H₂S 事故和未遂事故，树立通过生产和维修学习事故持续改进有关 H₂S 安全的工作流程。
- 6) 帮助落实调查建议。
- 7) 时刻注意您的行为可能导致事故或未遂事件，这些行为还包括应对异常情况的措施。
- 8) 了解并在可行的情况下实施可采取的行动，以防止事件后果升级。
- 9) 在适当的情况下分享您的事故经验或知识，以帮助其他人了解和获得涉及 H₂S 的真实事故；例如，在参与工艺危害分析时。

❖ 如何 – 管理

- 1) 制定并实施事故和未遂事件调查程序。
- 2) 提供事故调查程序培训。
- 3) 加强鼓励报告事故和未遂事故。
- 4) 提供所需的资源，以确保应用各行业事故经验教训和方法。
- 5) 建立并加强对遵守事故调查程序的期望。
- 6) 确保及时启动事故调查，并在事故清理之前和/或期间开始数据收集（包括物证、证人观察和电子数据）。
- 7) 提供资源和训练有素且经验丰富的资深调查员的可用性，并在必要时召集外部专家。
- 8) 确保调查小组由能够提供客观调查的人员组成。
- 9) 要求调查小组包括了解 H₂S 物性（请参阅黄金法则#1）、H₂S 工艺和该地点的管理体系（政策，标准和程序）的人员。
- 10) 提供足够的资源和优先次序，以确保调查小组能够进行高质量的调查。
- 11) 提供资源，以便及时解决调查建议项。
- 12) 与其他装置和行业分享经验。
- 13) 监控 H₂S 事故引发原因的趋势，以识别和解决系统性问题。
- 14) 监督调查程序的绩效和遵守情况。这包括监督及时完成调查和及时执行建议。
- 15) 确保事故调查的完整性包括事故行动项的完成时间。一些事故的行动项需要一定的时间才能完成。

❖ 如何-工程师和设计人员：

- 1) 了解如何识别需要调查的事故和未遂事故。请参阅黄金法则#2。
- 2) 了解每个人在实施事故调查程序中的作用。
- 3) 根据要求参与事故调查（作为首席调查员，团队成员或证人）。
- 4) 可以访问工艺数据（数字事件日志、仪器记录、系统状态等），以确定事件发展时间表。
- 5) 保持对事故和未遂事件的认识。
- 6) 帮助实施调查建议项，并在适当的情况下实施解决方案，以消除过往事故的根本原因。
- 7) 为参与人员提供事故调查学习培训。
- 8) 汇报事故和未遂事件，进行调查。
- 9) 为了让工程师更好地设计 H₂S 装置，应回顾以往的事故。

❖ 如何-应急响应指挥人员：

- 1) 了解实施事故调查程序中的角色。
- 2) 根据要求参与调查（作为团队成员或证人）。

硫化氢(H₂S) 黄金法则

对黄金法则#5：对于涉及 H₂S 的事故，要进行事故调查，不断改进管理体系

- 3) 向调查小组报告应急响应人员在应急响应期间所做的任何操作变化（例如，打开或关闭阀门、重新安置物品）。
- 4) 回顾以往事故的处置，从而改进应急响应计划。

❖ 补充阅读:

- CCPS, Guidelines for Risk Based Process Safety, Chapters 8 and 9 [11, pp. 169-244]
- CCPS, Guidelines for Investigating Process Safety Incidents 3rd Edition [50]
- CCPS, A Practical Approach to Hazard Identification For Operations and Maintenance Workers [76]
- CCPS, Guidelines for Implementing Process Safety Management Systems [77]
- CCPS, Guidelines for Process Safety Metrics [78]
- CCPS, Guidelines for Preventing Human Error in Process Safety [79]
- CCPS, Driving Continuous Process Safety Improvement from Investigated Incidents [80]

参考文献

- [1] OSHA, "OSHA Fact Sheet: Hydrogen Sulfide," OSHA (U.S. Occupational and Health Administration, U.S. Department of Labor), Washington, D.C. U.S., 2005.
- [2] American Petroleum Institute (API), RP 571 Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry, Washington, DC, USA: American Petroleum Institute, 2020.
- [3] American Petroleum Institute (API), API RP 55, 2nd edition, Recommended Practice for Oil and Gas Producing and Gas Processing Plant Operations Involving Hydrogen Sulfide, Washington, DC, U.S.A.: American Petroleum Institute (API), 2000.
- [4] CSB, "Hydrogen Sulfide Release at Aghorn Operating Waterflood Station, No. 2020-01-I-TX," US Chemical Safety and Hazard Investigation Board (CSB), [csb.gov](https://www.csb.gov), 2021.
- [5] International Federation of Red Cross And Red Crescent Societies, "China: Gas Well Explosion in Chongqing - Information Bulletin n° 1," OCHA, 2003.
- [6] Canadian Association of Petroleum Producers (CAPP), "Small, Portable Oil & Gas Production Facilities: Recommended Solutions for Design and Operation (Safety Guide)," Canadian Association of Petroleum Producers, Calgary, Alberta Canada, 2014.
- [7] OSHA (U.S. Occupational and Health Administration), "Hydrogen Sulfide - Hazards," [Online]. Available: <https://www.osha.gov/hydrogen-sulfide/hazards>.
- [8] NIOSH, NIOSH pocket guide to chemical hazards, Cincinnati OH: National Institute for Occupational Safety and Health, Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control and Prevention, 2010.
- [9] U.S. Department of Health and Human Services, "Toxicological Profile for Hydrogen Sulfide and Carbonyl Sulfide," U.S. Department of Health and Human Services, Atlanta, GA, U.S.A., 2016.
- [10] Government of Alberta, "H₂S The Killer CH026," Worksafe Alberta, Alberta, Canada, 2012.
- [11] CCPS (Center for Chemical Process Safety), Guidelines for Risk Based Process Safety, Hoboken, NJ: John Wiley and Sons, 2007.
- [12] American Petroleum Institute (API), API RP 49, 3rd Edition, Recommended Practice for Drilling and Well Servicing Operations Involving Hydrogen Sulfide, Washington, DC, U.S.A.: American Petroleum Institute, 2001.
- [13] United Nations Environment Programme, the International Labour Organisation, and the World Health Organization, Environmental Health Criteria 19 Hydrogen Sulfide, Geneva, Switzerland: World Health Organization, 1981.
- [14] American Petroleum Institute (API), API STD, 8th Edition, Requirements for Safe Entry and Cleaning of Petroleum Storage Tanks, Washington, DC, U.S.A.: American Petroleum Institute (API), 2015.
- [15] L. Brundrett, "Lethal Service – Quick Guide," 23 February 2017. [Online]. Available: <https://www.pveng.com/lethal-service-notes/>.
- [16] National Board Inspection Code, *ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 1, Subsection A*, New York: ASME, 2021.
- [17] U.S. EPA, "Toxicological Review Of Hydrogen Sulfide," U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, U.S.A., 2003.
- [18] ECHA - European Chemicals Agency, "Substance Information - ECHA," 21 December 2021. [Online]. Available: <https://echa.europa.eu/substance-information>.
- [19] Canadian Association of Petroleum Producers (CAPP), "H₂S Release Rate Assessment and Audit Forms," Canadian Association of Petroleum Producers, Calgary, Alberta, Canada , 2012.
- [20] Government of Alberta, "Hydrogen Sulphide at the Work Site CH 029," Worksafe Alberta, Alberta, Canada, 2010.
- [21] CCPS, "Fatality caused by unloading the wrong chemical into a storage tank!," *Process Safety Beacon*, March 2009.
- [22] CCPS, "CCPS Process Safety Incident Database No. 624: Chemical Cleaning Results in Hydrogen Sulfide Release, 2009," Center for Chemical Process Safety.
- [23] CCPS, "CCPS Process Safety Incident Database No. 810: Exposure to Hydrogen Sulfide while Charging the Reactor, 2000," Center for Chemical Process Safety.
- [24] CCPS, "CCPS Process safety Incident Database No. 567: Sour Steam Release in Oil Refinery, 2000," Center for Chemical Process Safety.
- [25] CSB, "Georgia Pacific Naheola Mill Hydrogen Sulfide Poisoning," U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board, [csb.gov](https://www.csb.gov), 2002.

- [26] CCPS (Center for Chemical Process Safety), Guidelines for Management of Change for Process Safety, Hoboken, NJ: John Wiley and Sons, 2008.
- [27] CCPS, "CCPS Process safety Incident Database No. 449: Operator Mistakenly Drained Hydrogen Sulfide to an Open Sewer, 2004," Center for Chemical Process Safety.
- [28] CCPS, "CCPS Process Safety Incident Database No. 498: H₂S Release when Liquids Dumped to Chemical Sewer, 1996," Center for Chemical Process Safety.
- [29] CCPS, "CCPS Process Safety Incident Database No. 509: H₂S Released during Relief Valve Replacement, 1997," Center for Chemical Process Safety.
- [30] CCPS, Guidelines for Writing Effective Operations and Maintenance Procedures, Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 1996.
- [31] CCPS, Human Factors for Process Plant Operations: A Handbook, Hoboken, NJ USA: John Wiley & Sons, 2022.
- [32] U.S. Homeland Security, "Chemical Facility Anti-Terrorism Standards: Risk-Based Performance Standards Guidance," U.S. Homeland Security, Washington DC USA., 2009.
- [33] AB OH&S, "Alberta Occupational Health & Safety Code Regulation 191/2021, Section 21,," Alberta Occupational Health & Safety, Alberta, 2021.
- [34] CCPS, Guidelines for Mechanical Integrity Systems, Hoboken, N.J.: John Wiley and Sons, 2006.
- [35] CCPS, "CCPS Process Safety Incident Database No. 496: Hydrogen Sulfide Release due to Weld Failure on Level Control, 1997," Center for Chemical Process Safety.
- [36] UK Health & Safety Executive, "The Offshore SECE Management and Verification Inspection Guide," HSE, Published under oper government license, 2020.
- [37] CCPS, "CCPS Process Safety Incident Database No. 697: Sour Water Release, 2003," Center for Chemical Process Safety.
- [38] F. Renshaw, "Open System Chemical Operations – Eliminate Them or Control Them," in *CCPS Pharma, Food & Fine Chemicals (PFFC) Subcommittee Quarterly Meeting, 2022*.
- [39] J. E. Johnson and N. A. Hatcher, "Fundamentals of Sulfur Recovery: Hazards of Molten Sulfur Storage & Handling," in *53rd Lawrence Reid Gas Conditioning Conference Proceedings, 2003*.
- [40] OSHA, "OSHA Publication 3133," 1994. [Online]. Available: <https://www.osha.gov/sites/default/files/publications/osha3133.pdf>.
- [41] World Health Organization, "Hydrogen Sulfide: Human Health Aspects," 2003. [Online]. Available: <http://www.who.int/ipcs/publications/cicad/en/cicad53.pdf>.
- [42] USA EPA, "H₂S FAQs," 2017. [Online]. Available: https://www.epa.gov/sites/default/files/2017-12/documents/appendix_e-atsdr_h2s_factsheet.pdf.
- [43] T. Ausma and L. J. DeKoK, "Atmospheric H₂S: Impact on Plant Functioning," *Front. Plant Sci.*, vol. 2019, no. 10, p. 743, 2019.
- [44] French Ministry of Environment, "H₂S Leakage during the transfer of effluents," French Ministry of Environment, 1993.
- [45] Canadian Centre for Occupational Health and Safety, "Substitution of Chemicals-Considerations for Selection," 27 October 2021. [Online]. Available: <https://www.ccohs.ca/oshanswers/chemicals/substitution.html>.
- [46] P. Vella and J. L. Nickerson, "Hazardous Material Decontamination With Potassium Permanganate for Refinery Turnarounds," in *CORROSION 98*, San Diego, 1998.
- [47] US Occupational Safety and Health Administration (OSHA), *29CFR1910.252 Hot Work Permit General Requirements*, Washington, DC: OSHA, 2012.
- [48] US Occupational Safety and Health Administration (OSHA), *29 CFR 1910.146 Permit Required confined spaces*, Washington, DC: OSHA, 2011.
- [49] US Occupational Safety and Health Administration (OSHA), *29CFR1910.147 The Control of Hazardous Energy*, Washington DC: OSHA, 2021.
- [50] CCPS, Guidelines for Investigating Process Safety Incidents 3rd Ed., Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 2019.
- [51] CSB, "Investigation Report: Hydrogen Sulfide Poisoning," U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board, [csb.gov](http://www.csb.gov), 2002.
- [52] API, RP 752 Management of Hazards Associated with Location of Process Plant Permanent Buildings, 2009.
- [53] API, RP 753 Management of Hazards Associated with Location of Process Plant Portable Buildings, American Petroleum Institute, 2007.
- [54] API, RP 756 Management of Hazards Associated with Location of Process Plant Tents, American Petroleum, 2014.

- [55] API, RP 580 Risk-Based Inspection 3rd Ed., API, 2016.
- [56] Det norske Veritas Industry, Inc., "Inspection Programs and Engineering Analysis of Pressure Vessels in Wet Hydrogen Sulfide Service," in *27th Annual Loss Prevention Symposium*, Houston, 1993.
- [57] OSHA, "OSHA Technical Manual (OTM)," OSHA, 2014. [Online]. Available: <https://www.osha.gov/otm/section-3-health-hazards/chapter-3>. [Accessed 4 February 2022].
- [58] ASME, Section VIII Boiler and Pressure Vessel Code Division 1 Section UW-2, ASME, 2021.
- [59] ANSI/NACE, MR0175/ISO15156-1 Materials for use in H₂S containing environments in oil and gas production, Houston: Nace International, 2015.
- [60] CCPS, Guidelines for Hazard Evaluation Procedures 3rd Ed., Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 2011.
- [61] CCPS, Guidelines for Process Safety Documentation, Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 1995.
- [62] CCPS, Guidelines for Engineering Design for Process Safety 2nd Ed., Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 2012.
- [63] WHO, "H₂S Human Health Aspects," 2003. [Online]. Available: <https://www.who.int/>.
- [64] W. S. BC, "Hydrogen Sulfide in Industry," worksafebc.com, 2010.
- [65] CCPS, "CCPS Process Safety Incident Database No. 651: Hydrogen Sulfide Exposure, 2002," Center for Chemical Process Safety.
- [66] CSB, "Toxic Chemical Release at the DuPont La Porte Chemical Facility," US Chemical Safety and Hazard Investigation Board (CSB), Washington, D.C., 2019.
- [67] "OSHA FactSheet Hydrogen Sulfide (H₂S)," US Department of Labor, 10/2005.
- [68] Calgary First Aid, "Treatment and Management of H₂S Poisoning," 2022. [Online]. Available: <https://firstaidcalgary.ca/>.
- [69] J. A. Rau, A. Wong and M. McDermott, "Rethink your refuge," *Chemical Processing: Process Safety eHANDBOOK: Take a Closer Look at Process Safety*, pp. 28-37, 2019.
- [70] Baker Risk, "Shelter-in-place. Reducing Risk from Toxic Impacts.," www.bakerrisk.com, San Antonio Texas, 2020.
- [71] US Occupational Safety and Health Administration (OSHA), *29 CFR 1910.119 Process safety management of highly hazardous chemicals*, Washington, DC: OSHA.
- [72] CCPS, Guidelines for Technical Planning for On-Site Emergencies, Hoboken NJ, U.S.A: John Wiley & Sons, 1995.
- [73] CCPS, Guidelines for Post Release Mitigation Technology in the Chemical Process Industry, Hoboken, NJ, U.S.A.: John Wiley & Sons, 1996.
- [74] CCPS, Recognizing and Responding to Normalization of Deviance, Hoboken, N.J.: John Wiley and Sons, 2018.
- [75] CSB, "Hydrogen Sulfide Exposure," U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board, csb.gov, 2003.
- [76] CCPS, A Practical Approach to Hazard Identification For Operations and Maintenance Workers 1st Ed, Hoboken, NH, USA: John Wiley & Sons Inc., 2010.
- [77] CCPS, Guidelines for Implementing Process Safety Management Systems, 2nd Edition, Hoboken, N.J.: John Wiley and Sons, 2016.
- [78] CCPS, Guidelines for Process Safety Metrics 1st Ed., Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2010.
- [79] CCPS, Guidelines for Preventing Human Error in Process Safety, Hoboken, NJ, U.S.A.: John Wiley & Sons, Inc., 2004.
- [80] CCPS, Driving Continuous Process Safety Improvements from Investigated Incidents, Hoboken, NJ, U.S.A.: John Wiley & Sons, Inc., 2021.

Golden Rules of Process Safety for: Hydrogen Sulfide

GR3 – H₂S, May 2023

Copyright 2023 American Institute of Chemical Engineers

www.aiche.org/ccps
