

工艺危害分析(PHA)复审 在高含硫天然气工程中的应用

施隋靖^{1*}, 冉文付²

(1. 机械工业仪器仪表综合技术经济研究所, 北京 100055;
2. 中国石油西南油气田公司川东北作业分公司, 四川 成都 610011)

摘要:将工艺危害分析(PHA)技术应用于固有风险较高的高含硫天然气工程,通过风险辨识全面准确梳理风险场景,并通过风险评估进一步量化风险发生可能性和影响严重性。同时提出了按照一定周期开展PHA复审对于风险管控的重要意义,并根据实践经验总结了复审的时机、方法、要点和人员要求等,为企业的风险管理和行业实践提供参考。

关键词:高含硫天然气;工艺危害分析;复审

中图分类号:TE64

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)S1-0381-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.S1.069

Application of process hazard analysis review in high-sulfur natural gas engineering

SHI Sui-jing^{1*}, RAN Wen-fu²

(1. Instrumentation Technology & Economy Institute, Beijing 100055, China; 2. Chuandongbei Operation Branch, PetroChina Southwest Oilfield and Gasfield Company, Chengdu 610011, China)

Abstract: Process Hazard Analysis (PHA) technology is applied to the high-sulfur natural gas projects with high inherent risks. Through risk identification, risk scenarios are figured out and classified comprehensively and accurately. Moreover, the possibility of risk occurrence and the severity of corresponding impact can be further quantified through risk assessment. It also proposes the importance of conducting PHA review periodically for risk control, and summarizes the timing, methods, key points, and personnel requirements for review based on practical experience, providing references for enterprise risk management and industry practice.

Key words: high-sulfur natural gas; process hazard analysis; review

在“碳达峰”目标的推动下能源结构将发生重大变化,相比于煤炭和石油而言,天然气是由化石能源向非化石能源过渡阶段的最优选择之一,将在社会运行和发展中扮演更为重要的角色。对高含硫(硫化氢含量较高)气田的开发利用是天然气主要来源之一。由中国石油西南油气田公司与美国雪佛龙公司(简称“雪佛龙”)合作开发的川东北天然气项目是我国陆上最大的对外天然气合作项目,该项目的特点是天然气中硫化氢含量较高(体积分数8%~15%)^[1]。天然气属于易燃易爆物质,夹带的硫化氢具有易燃性、剧毒性和腐蚀性,再考虑到高压运行属性,该项目的固有风险极高,生产过程的任何异常都可能导致高含硫天然气的泄漏,进而造成企业及周边出现人员中毒和火灾爆炸等事故,在社会上引起巨大的负面影响。

因此通过开展过程安全管理(PSM)确保安全

平稳运行是该项目运营的第一要务,其核心基础是工艺危害分析(PHA)。PHA是通过有组织的、系统的、全面的分析活动来识别和评估生产过程的潜在风险,并且筛选或提出降低风险的措施。此外,根据相关标准规范要求及企业自身安全管理的需要,定期开展PHA复审可以确保整个生产过程的风险场景辨识和风险控制措施持续有效^[2-3]。

1 工艺危害分析

过程安全管理最早由美国职业与健康管理局(occupational safety & health administration, OSHA)于1992年提出,包含了14个管理要素,实质就是通过对危险介质生产、储存、使用等过程涉及的工艺、仪表、设备等系统进行有效管理和技术控制,从而消除隐患、预防危险介质泄漏或能量意外释放造成的安全事故,最终实现风险可控的目标。在结合国内

过程领域安全管理现状的基础上,同时借鉴国际先进理念和最佳实践经验,我国应急管理部发布了《AQ/T 3034—2022 化工过程安全管理导则》,在 2010 版本 12 个要素的基础上拓展到了 20 个,但核心仍然是利用 PHA 成果开展风险管理,即实施必要、全面和准确的风险辨识和评估。

1.1 风险辨识

风险辨识是指风险管理团队运用相关方法系统地辨识出潜在的风险事件,并分析导致该事件发生的可能原因以及最严重后果。这些方法普遍为定性的,其中危险与可操作性(HAZOP)分析方法以引导词与参数构成的偏离激发分析团队的思维,同时该方法的系统性和结构性又能帮助分析团队可以全面地辨识生产过程中潜在的风险场景,因此被最广泛使用。

1.2 风险评估

风险评估是指风险管理团队运用相关方法对风险场景发生可能性以及该场景在人员、财产、生产、环境和声誉等方面影响程度的量化评估。这些方法有半定量和定量的,其中保护层分析(LOPA)方法通常使用初始原因发生频率、后果严重程度和独立保护层(IPLs)失效概率的数量级大小来近似表征场景的风险,进而判定该场景发生时系统所处的风险水平是否达到可接受程度,并根据需要增加合适的 IPLs 以实现风险可接受。有效利用风险辨识(如 HAZOP 分析)的成果可以极大提高 LOPA 方法的效率。

1.3 PHA 的应用

川东北高含硫天然气工程包括采气单元、集输单元、净化单元、硫磺回收单元以及配套公用工程和辅助设施(如图 1 所示)。鉴于该工程存在易燃易爆、有毒有害、高压释放的固有风险,同时为满足相关标准规范要求,在项目初期川东北分公司组织成立了 PHA 团队,采用 HAZOP 分析与 LOPA 方法相结合的形式对整个生产过程自上而下开展了系统全

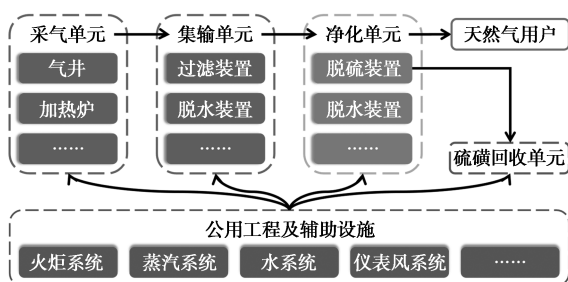


图 1 高含硫天然气工程流程示意图

面的 PHA。

1.4 HAZOP 分析与 LOPA 的结合

考虑到分别单独开展 HAZOP 分析和 LOPA 工作需要付出大量的人力和精力,同时鉴于监管部门对于 HAZOP 分析方法要求的愈加严格,PHA 团队将 HAZOP 分析与 LOPA 相结合,通过 HAZOP 分析方法从偏离找到初始原因和最严重后果来挖掘完整的风险场景,同时利用 LOPA 方法引入半定量的理念确定场景发生的可能性,完成 IPLs 的筛选及失效概率确定,引入适用的使能因子和条件修正得出更客观合理的风险水平,对每一个场景完成一次分析即可同时获得风险辨识和风险评估的双重成果。HAZOP-LOPA 分析工作表如图 2 所示。

场景序号	HAZOP 分析部分							LOPA 分析部分						备注		
	偏差		初始原因	发生频率	最终后果	严重程度	原始风险	使能条件		独立保护层			减缓措施		残余风险	建议
	参数	引导词						B	P	C	S	机械保护				

图 2 HAZOP-LOPA 分析工作表示意图

2 PHA 复审

2.1 复审的意义

PHA 成果往往是静态的,但生产运行工况和管理制度是复杂的、不是一成不变的;工艺流程或设备配置存在变更、规章制度和操作方式存在变化、运行人员也存在更替、周边社区及环境条件的改变等,这些因素都会导致先前 PHA 成果中的部分内容不再适用,也可能带来新的风险场景,因此需定期开展 PHA 复审,对不适用的风险场景进行删除或修改,补充各种变更引发的、已发生或未遂事故事件揭示的风险场景,同时着重关注新的风险场景是否处于可接受范围^[4]。

此外,考虑到 PHA 为基于假设的模式,分析团队的水平决定了 PHA 成果的好坏,很多风险场景是基于分析团队的知识经验讨论出来的,难免会存在分析不到的场景,如果在实际生产运行中出现了未在 PHA 成果中体现的场景,有必要对 PHA 成果进行补充,因为这些场景是该企业应着重关注的。

再者,PHA 依据的标准规范或者相关政府部门的监管要求也在不断更新,应按照最新的要求审查先前 PHA 成果,对于不适用的内容进行完善,以避免出现合规性问题^[5]。

美国化学过程安全中心(center of chemical process safety, CCPS) 2001年出版的《Revalidating Process Hazard Analyses》专门描述了PHA复审相关内容,将复审定义为:再次确认PHA成果可以准确反映当前工艺操作、设备配置、人员及环境状况,同时满足最新的法律法规要求。

2.2 复审的时机

PHA复审的周期过短,可能因为没有产生明显的场景更新而无法体现复审的意义,反而会造成人力和物力的浪费,导致参与人员的懈怠和反感,影响PHA复审质量,也影响人员参加下次PHA的积极性;但周期过长可能会造成风险较高的场景无法被及时关注,严重影响PHA成果的时效性。

美国 OSHA 发布的 PSM 标准中提出了“复审”这个概念,要求在初次 PHA 完成后至少每 5 年应进行一次复审,确保 PHA 成果与当前实际保持一致。美国环保总局(environmental protection agency, EPA)在其风险管理规程、欧洲在其“SEVESO II 指令”中都有相关要求。我国原安监总局发布的《关于加强化工过程安全管理的指导意见》(安监总管三〔2013〕88号)要求:对涉及重点监管危险化学品、重点监管危险化工工艺和危险化学品重大危险源(以下统称“两重点一重大”)的生产储存装置进行风险辨识分析,要采用危险与可操作性分析(HAZOP)技术,一般每3年进行一次。对其他生产储存装置的风险辨识分析,针对装置不同的复杂程度,可每5年进行一次。基于上述基本要求,企业可根据实际运行情况合理安排PHA复审的时间(周期不能超过上述要求,否则可能会被安全检查活动列为隐患整改项),组织和鼓励相关专业人员充分参与其中,以保证PHA复审的质量。

2.3 复审的要点

2.3.1 工艺及设备变更

《关于加强化工过程安全管理的指导意见》还要求:企业管理机构、人员构成、生产装置等发生重大变化或发生生产安全事故时,要及时进行风险辨识分析。企业要组织所有人员参与风险辨识分析,力求风险辨识分析全覆盖。

在上一次 PHA 完成后的运行时间内产生的工艺或设备变更引发了新的风险场景,此时原先对应的风险场景就不再适用,因此对变更项进行充分的风险辨识是必要的,以确定新的风险是否处于可接受范围;若新的风险场景不可接受,应采取有效措施以确保风险可控;同时对 PHA 报告进行更新,以免

不适用内容对报告使用者造成误导从而引发风险^[6]。

2.3.2 以往 PHA 建议项的落实

在 PHA 复审中分析团队应追踪上一次 PHA 建议项的落实情况。

对于已经落实的建议项,应核实建议实施的效果是否达到预期;考虑到建议项的落实属于变更项,可以抽查部分建议的变更程序是否到位,以确保变更项均处于受控状态。

对于未予落实的建议项,应明确未实施的原因:是否采取了替代措施;或者经过更深入的讨论之后确定该风险场景处于可接受范围,无需采取进一步措施。

2.3.3 事故事件分析和借鉴

在行业内或者企业内难免会发生一些异常事件或安全事故,这些真实发生的场景案例是企业管理和运行人员应格外关注和吸取的教训,应及时开展自查,若存在同类隐患应采取有效措施或加强管理以避免类似场景的发生,因此充分讨论和记录这些场景对 PHA 复审来说是有意义的。

2.3.4 对半定量分析使用参数的修正

在初次 PHA 过程中,难免会因为现场运行经验不足等原因而无法为分析人员在参数赋值时提供足够参考,比如初始事件发生频率的赋值等,分析人员通常会基于现场管理情况、行业经验以及标准规范推荐值给出一个分析团队普遍认可的数值。PHA 复审活动发生时,可以根据这一周期内现场运行情况对相关参数赋值进行适当修正,以更接近实际情况^[7]。

2.3.5 IPLs 可用性及可靠性分析

PHA 中承担风险降低能力的 IPLs 在实际运行中可能存在有效性衰减的情况。

IPLs 相关设备出现过故障或者老化会降低可靠性。

报警设定值不当导致真实触发之后人员的响应时间不足。

连锁设定值不当或者设备选型不当导致即使真实触发后执行单元到位前风险后果已经出现。

火气系统因为探测器设置(位置或数量)或选型不当导致误报警过多或者真实的泄漏/火灾无法被有效检测等问题。

因此在 PHA 复审时应应对实际运行期间有效性不足的 IPLs 重新讨论,确定是否可以继续被赋予风险降低能力;若无法解决有效性不足的问题,应完善

这些 IPLs 的设置和管理,或采取其他措施替代承担风险降低能力,以确保相关风险处于可接受范围。

2.4 复审的方法

更新完善法:如果企业的安全管理水平较高,且配置有能够熟练运用 PHA 工具或深度参与过上一次 PHA 的技术人员,同时上一版 PHA 报告经过认真审核或行业专家认可,复审就可以在上一版的基础上进行更新完善,主要是针对差异项、变更项和事故事件项的分析和补充,同时可以纠正上一版 PHA 报告中不恰当的内容;这样完成复审所需时间会远低于初次分析,当然分析团队需要在前期花费时间和精力去整理待补充项,这样才能使复审的价值得到体现。

重新分析法:如果企业的安全管理水平一般,且内部没有能够熟练运用 PHA 工具或者在岗人员在上一次 PHA 的参与度较低,或第三方出具的 PHA 报告水平一般,或国家法律法规或者企业管理出现重大变化等情况下应组织重新开展分析,因为上一版 PHA 报告的很多内容可能存在较大误差或者完全不适用,这种情况下仅开展更新完善工作的话,PHA 复审的效果不明显,甚至可能是不合格的。

选用复审方法应考虑的因素见表 1。针对 HAZOP 分析复审,许晶等^[8]综合了各个要素的影响程度建立了打分表,通过专家小组评分结果决定所采取的方法。更新完善法与重新分析法相比省时又省力,避免对现有资源造成浪费,并实现了针对性评估,但作为 PSM 的一个重要环节,必要时重新分析也是应该的。

表 1 PHA 复审方法选用应考虑的因素

项目	内容
上次 PHA 报告质量	分析依据工艺安全信息 (PSI) 的全面性和准确性、分析逻辑的准确性、分析记录的完整性等
被评估企业风险管理水平	标准作业程序 (SOP) 的详细程度及执行情况、变更管理 (MOC) 程序、人员培训情况、设备设施故障记录及维修情况、事故事件分析记录等
上次 PHA 之后至今的运行情况	生产过程复杂程度、变更数量及风险分析情况、法规标准更新情况等

2.5 复审的人员

对参与 PHA 的人员通用要求同样适用于复审阶段,需特别说明的是,分析团队中最好有深度参与

上一次 PHA 的技术人员,他们可以负责解释上一版 PHA 报告中的场景分析逻辑,这样能够大幅度提高复审的效率,缩短会议时间。

如果企业能够组织一支具备 PHA 技能的人员团队,在企业内部组织阶段性 PHA 会议(每月或每季度)实现对 PHA 报告的及时更新,可以有效提高周期性全面复审的工作效率,同时可以避免因复审周期过长导致部分风险场景被遗漏,从而提高企业隐患排查和风险管理水平。

2.6 复审的过程

开展 PHA 各个环节的通用要求同样适用于复审阶段,但需要特别注意以下问题:

(1)对于无变更的风险场景,重点审查分析逻辑的准确性和所使用 IPLs 的有效性。

(2)补充历次变更项配套的 PHA 内容,并核实可信性。

(3)补充企业或相同行业内发生的事故事件案例,并讨论和记录针对类似情况的预防和减缓措施。

(4)针对实际运行过程中有效性不足的 IPLs 应进行修正或替代。

2.7 复审的成果

本次 PHA 复审全面核实了现有生产运行模式下的风险场景,补充了历次变更产生的 PHA 分析记录和生产过程中实际发生的事故事件,根据上次 PHA 建议项落实情况更新了对应场景的风险等级,根据设备设施维护效果更新了 IPLs 风险降低能力赋值,对于响应时间不足的报警进行了优化,也发现了一些新的风险场景。

(1)发现问题 1:集输单元使用低压燃料气对井场清管器发球筒 L101(如图 3 所示)进行吹扫作业期间,工艺气管线阀门 V101 如果被意外打开(如人员误操作引起),高压工艺气会窜至燃料气系统,导致燃料气系统超压,造成易燃和有毒气体泄漏至环境,风险极高。该阀门所在管线虽然设置有 V103 和 V1042 道单向止逆阀,但现场反馈在实际运行过

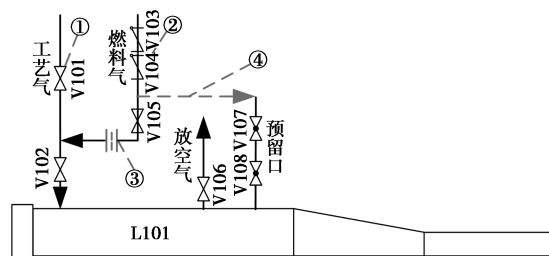


图 3 复审发现问题 1 及解决方案示意图

程中未纳入维护管理,因此无法保证其有效性,风险未降低至可接受范围。

工作组建议:①工艺气管线阀门 V101 仅在发球操作时打开,在其他工况下进行锁关处理;②将这 2 道单向止逆阀纳入维护管理,以确保其有效性;③在燃料气吹扫管线上设置合理规格的限流孔板,以降低高压窜低压的影响,但可能会延长吹扫时间;④将燃料气管线更改接入发球筒 L101 上预留口,实现低压燃料气管线与高压工艺气管线分开独立设置,燃料气吹扫时工艺气管线的阀门 V101 和 V102 均为关闭状态,从根本上避免了高压窜低压的风险。

(2)发现问题 2:集输单元三甘醇吸收塔液位控制功能 LIC101 发生失效时可能导致 LV101 开度过大,当排放量大于进料量时会出现液位过低的情况,严重时造成吸收塔内无液相阻隔,高压气相经塔底液相管线窜至后系统,现场反馈液相管线限流孔板与 SIS 切断阀间(如图 4 所示)可能存在高含硫天然气超压泄漏的风险。

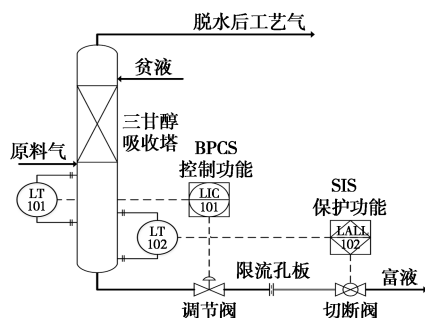


图 4 三甘醇吸收塔示意图

工作组建议:核实确认该部分管线设计压力是否高于气相压力;若否,则液位低低联锁关闭切断阀(SIS 保护功能)无法有效保护,需采取额外措施以实现必要的风险降低;同时为避免长期冲刷导致的限流效果不足,应对限流孔板加强维护保养以满足有效性要求。

(3)发现问题 3:本次复审发现净化单元中的酸气切断阀 V2001 作为多个联锁功能的执行单元,且在部分联锁中需具备 SIL2 的能力,该 SIL 要求高于先前 PHA 的级别,现场实际配置可能无法满足。

工作组建议:将酸气切断阀 V2001 升级为安全相关的关键阀门进行管理,通过开展 SIL 验证等工作确认其实际可达到的 SIL 能力;若低于要求则应

设置冗余或更换为可靠性更高的设备以满足整个连锁回路 SIL2 要求。

(4)发现问题 4:现场反馈存在部分连锁功能因为仪表为 1oo1 配置而出现误动作的情况,影响了生产运行平稳性,造成了一定经济损失。

工作组建议:对于在现有远传仪表相邻位置设置有现场仪表的连锁功能,可以将现场仪表更换为远传仪表并与现有连锁仪表构成 2oo2 的配置以降低误触发的可能性,同时应开展必要的 SIL 验证工作以确认该配置变更后仍然能够满足其应具备的 SIL 要求;若不满足要求,则需采取进一步措施。

3 结论

工艺危害分析(PHA)是过程工业领域开展风险管理的重要基础,生产运行过程中人员、设备及管理等均可能发生变化,先前 PHA 成果可能不再适用或不完整,因此按照一定周期开展 PHA 复审是对风险管理输入的必要补充,PHA 复审的主要目的是审查已完成的 PHA 结果,并辨识、评估和控制可能存在的新风险场景。本文中基于高含硫天然气工程开展了 PHA 复审实践,取得的成果为企业风险管理的提升指明了方向,并总结了复审的相关要点,为行业内开展 PHA 复审提供参考。

参考文献

- [1] 丁华,刘艳,罗伟.以 PHA 为核心的过程安全管理及 PHA 成果应用实践[J].化工安全与环境,2023,36(1):50-53.
- [2] Sammons S,Higgins S.Evergreening Your PHA[C]//Salt Lake City: American Institute of Chemical Meeting,2010.
- [3] 徐志杰,韩雪峰,孙峰,等.关于过程危险分析再验证最佳实践的探讨[J].石油化工自动化,2022,58(6):51-57.
- [4] Barney S.PHA data quality-mining the hidden risks! [C]//New Orleans: American Institute of Chemical Spring Meeting,2019.
- [5] Gill S.PSM auditing: Thinking beyond compliance[J].Process Safety Progress,2016,35:295-299.
- [6] Hoff R,Gathright P.The HA-MOC interaction-getting the best out of both processes[C]//New Orleans: American Institute of Chemical Engineers Spring Meeting,2014.
- [7] Downes A M T,Goteti P,Krishnaswamy S.Using process historian data to adjust risk estimates[C]//Pittsburgh PA: American Institute of Chemical Engineers Meeting,2018.
- [8] 许晶,赵东风,赵志强.HAZOP 再审查方法研究[J].石油与天然气化工,2014,43(1):99-103.■