

失效模式与效应分析下盐穴储气库设施设备爆炸风险评估

陈伟 张惠明

江苏苏盐井神股份有限公司

DOI:10.12238/jsse.v3i1.12029

[摘要] 盐穴储气库是一种新型能源储存方式,其在能源利用、经济效益以及环境保护等方面具有重要意义,但是由于工程技术水平、管理水平等的差异和不足,使其具有一定的风险性。本文针对盐穴储气库设施设备爆炸风险进行辨识,运用失效模式与效应分析(FMEA)方法,识别潜在的失效模式,并开展风险影响和风险评估分析,分析得到:安全阀失效为高风险,管道焊缝缺陷、管材质量问题、第三方破坏、雷击、摩擦热、高温表面、通风系统故障、通风设计不合理、仪表失灵、管道振动为中风险;气候条件影响为低风险。根据风险分析结果提出涵盖技术、管理和应急响应的综合防范策略,为保障盐穴储气库的安全稳定运行提供理论指导。

[关键词] 盐穴储气库; 设施设备; 爆炸风险; 失效模式与效应分析; 防范措施

中图分类号: X932 **文献标识码:** A

Failure mode and effect analysis: explosion risk assessment of salt hole gas storage facilities

Wei Chen Huiming Zhang

Jiangsu Suyan Jingshen Co., Ltd.

[Abstract] Salt cavern gas storage is a new type of energy storage method, which has important significance in energy utilization, economic benefits, and environmental protection. However, due to differences in engineering technology and management level, it also has certain risks. This article comprehensively identifies the risk of explosion in salt cavern gas storage facilities and equipment, and uses the Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) method to identify potential failure modes and conduct risk impact and risk assessment analysis. The analysis shows that safety valve failure is a high risk, while pipeline weld defects, pipe quality issues, third-party damage, lightning strikes, frictional heat, high-temperature surfaces, ventilation system failures, unreasonable ventilation design, instrument failures, and pipeline vibrations are medium risks; The impact of climate conditions is considered low-risk. Based on the risk analysis results, a comprehensive prevention strategy covering technology, management, and emergency response is proposed to provide theoretical guidance for ensuring the safe and stable operation of salt cavern gas storage facilities.

[Key words] salt cavern gas storage; facilities and equipment; explosion risk; Failure Mode and Effect Analysis; Precautionary measures

引言

随着全球人口数量的不断增加,人们对高质量生活水平的追求,能源消耗量在不断增加,能源储备的重要性日益凸显。近年来,各国均在积极探究高效、可行的能源储备技术,盐穴储气库作为一种高效、安全、环保的能源储存方式,应用范围在不断增加。目前我国已建设完成并投产5座盐穴储气库,8座盐穴储气库正在建设中,工作气量达16.79亿方。

针对盐穴储气库安全风险评估,国内外研究人员在事故分析、风险影响因素研究、失效可能性分析、事故后果分析和风险评估方法等方面做了一定的研究^[1]。常晓云^[2]对储气库稳定性影

响的主要因素进行分析,以江苏金坛盐矿能源储气库为例,利用层次分析法和模糊综合评价法进行指标的稳定性分析,得出盐穴型地下储气库的稳定性和失稳后果以及相应的评价等级。陈伟等^[3]通过人因分析和分类系统(HFACS)模型进行事故建模,并运用模糊层次分析法对盐穴储能过程进行安全风险分析,最终得到盐穴储能项目的安全风险等级。刘洁营等^[4]以江苏金坛储气库为例,基于构建的盐穴地下储气库事故致因模型结合相关文献调研结果,对地下储气设施的各风险评估单元进行风险因素辨识。

爆炸是盐穴储气库存在的最大的风险隐患,而生产储存设施设备是导致爆炸发生的主要危险源。目前研究学者对储气库

的研究主要是对储气库安全风险进行综合性和系统性的研究,对设备设施的内在失效模式和影响后果缺乏研究,本文通过失效模式与效应分析(FMEA)方法,系统地识别盐穴储气库设施设备爆炸的潜在失效模式,分析其可能产生的效应,并对风险的严重程度进行评估,提出有效的防范措施,以降低储气库设施设备爆炸风险,保障盐穴储气库的安全运行。

1 盐穴储气库设施设备爆炸风险识别

1.1 介质泄漏导致的爆炸风险

(1)管道焊缝缺陷。由于焊接作业前未对管道进行清洁、焊接速度不当、管道自身质量不佳等原因,可能导致焊接存在夹渣、气孔等缺陷,由于管道内介质压力的变化或随着时间的推移,焊接缺陷则可能会逐渐变大,导致管道发生泄漏。(2)管材质量问题。盐穴储气库项目所选用的管材质量不达标,在运行过程中管材易发生破裂,导致管内介质的泄漏。(3)第三方破坏。如在储气库周边开展项目施工、项目维修等作业时,可能由于作业前交底不彻底或误操作导致作业过程中损坏储气库的管道设施;对于涉及到挖掘的作业,由于挖掘深度较深距离储气库距离较近则可能对储气库所在区域的地质产生影响,影响储气库的稳定性。

1.2 点火源引发的爆炸风险

(1)雷击。盐穴储气库的选址一般位于空旷地带,如果接地装置、避雷器等防雷设施不完善或失效,储气库易发生雷击事故,可能导致储气库介质的泄漏,遇上雷击产生的电火花易发生燃烧、爆炸事故。(2)摩擦热。在设备运转过程中,部件之间的摩擦可能产生高温,如果与泄漏的天然气接触,可能引发爆炸。(3)高温表面。某些设备在运行过程中由于长时间运行,加上通风效果不良,则会导致设备表面温度上升,当设备表面温度达到泄漏易燃介质闪点后,则可能发生燃烧爆炸事故。

1.3 通风不良导致的爆炸风险

(1)通风系统故障。通风设备损坏、风道堵塞、风机故障等问题可能导致通风系统失效,使天然气无法及时排出。(2)通风设计不合理。在项目安全设施设计阶段对通风口位置设置不符合要求,或者通风机设备选型不当导致通风量不足等,会影响区域通风效果,易造成可燃气体介质的堆积,易发生燃烧爆炸事故。

1.4 设备故障引发的爆炸风险

1.4.1 仪表失灵。压力仪表、温度仪表、流量仪表等失灵,可能导致操作人员无法准确掌握设备运行参数,从而引发超压、超温等异常情况,增加爆炸风险。

1.4.2 安全阀失效。安全阀是保障设备安全的重要装置,如果安全阀不能正常起跳或回座,可能导致设备内压力过高而发生爆炸。

1.4.3 管道振动。由于气流脉动、共振等原因,管道可能发生强烈振动,导致管道连接部位松动、破裂,造成介质泄漏,由于摩擦生热或遇电火花可能发生燃烧、爆炸。

2 基于FMEA的盐穴储气库设施设备爆炸风险分析

盐穴储气库设施设备系统复杂,涉及多个环节和多种设备。FMEA方法能够系统地梳理各个环节和设备可能出现的失效模式,

评估其风险,并为制定针对性的防范措施提供依据。同时,FMEA方法具有较强的可操作性和适应性,可以根据盐穴储气库的特点和实际情况进行灵活应用。

2.1 FMEA的基本原理和步骤

2.1.1 失效模式识别。通过对系统或产品的组成部分进行分析,识别可能出现的各种失效模式,如断裂、泄漏、堵塞等。

2.1.2 效应分析。针对每个失效模式,分析其可能产生的后果,包括对系统功能、性能、安全性、可靠性等方面的影响。

2.1.3 风险评估。对每个失效模式的发生可能性(O)、严重程度(S)和可检测性(D)进行评估,计算风险优先数(RPN)。RPN=O×S×D。

2.2 基于FMEA的分析

假设将盐穴储气库爆炸风险的各因素分配权重如下:发生可能性(O)权重:40%;严重程度(S)权重:40%;可检测性(D)权重:20%。

对于每个因素的评分可以采用1~10分的等级,分数越高表示风险越高。例如:发生可能性:1分表示几乎不可能发生,10分表示极有可能发生;严重程度:1分表示影响极小,10分表示后果极其严重;可检测性:1分表示很容易检测到,10分表示极难检测到。

爆炸风险等级划分可以如下:加权后分数小于等于4分为低风险;加权后分数大于4分且小于等于7分为中风险;加权后分数大于7分为高风险。

对本文识别出的盐穴储气库设施设备爆炸风险因素进行分析计算,结果如下:

表1 分析计算结果

风险因素	发生可能性(O)评分	严重程度(S)评分	可检测性(D)评分	加权后分数(O×权重+S×权重+D×权重)	爆炸风险等级
管道焊缝缺陷	6	8	4	(6×40%+8×40%+4×20%)=6.4	中风险
管材质量问题	5	7	5	(5×40%+7×40%+5×20%)=5.8	中风险
第三方破坏	4	7	6	(4×40%+7×40%+6×20%)=5.2	中风险
雷击	3	9	5	(3×40%+9×40%+5×20%)=5.8	中风险
摩擦热	4	8	6	(4×40%+8×40%+6×20%)=5.6	中风险
高温表面	3	8	7	(3×40%+8×40%+7×20%)=5.4	中风险
通风系统故障	5	7	5	(5×40%+7×40%+5×20%)=5.8	中风险
通风设计不合理	4	6	6	(4×40%+6×40%+6×20%)=5.2	中风险
气候条件影响	3	5	7	(3×40%+5×40%+7×20%)=4.4	低风险
仪表失灵	5	8	5	(5×40%+8×40%+5×20%)=6.2	中风险
安全阀失效	6	9	4	(6×40%+9×40%+4×20%)=7.2	高风险
管道振动	4	7	6	(4×40%+7×40%+6×20%)=5.2	中风险

由上表可知: 安全阀失效为高风险, 管道焊缝缺陷、管材质量问题、第三方破坏、雷击、摩擦热、高温表面、通风系统故障、通风设计不合理、仪表失灵、管道振动为中风险; 气候条件影响为低风险。

3 盐穴储气库设施设备爆炸风险防范措施

3.1 技术防范措施

3.1.1 泄漏监测与预警系统。针对储气库中介质类型选择安装合适的高精度泄漏检测传感器, 并与设备管理系统、预警系统进行联动, 实现实时监测预警。同时应当制定详细、可行的应急预案, 明确泄漏应急处置措施和人员逃生措施等。为保证监测预警系统的可靠性和准确性, 定期进行维护更新, 随着技术的不断进步和应用需求的变化, 监测预警系统也需要不断地进行优化和升级, 以实现更高效、更准确的泄漏检测和预警功能。

3.1.2 防火防爆技术。爆炸危险场所内的电气设备需选用防爆设备, 线路必须按照相关要求要求进行防爆处理, 同时相关生产设备和管道应安装安全装置, 如阻火阀、止回阀、爆破片等, 避免造成更严重的安全事故。在可能产生火源的区域设置防火分隔和灭火设施, 如防火墙、防火阀、灭火器、消火栓等。定期对防火分隔设施进行检查和维护, 确保其完整性和有效性; 灭火设施应按照规定进行定期检验和维护, 保证在紧急情况下能够正常使用。

3.1.3 设备本质安全设计。在设备设计阶段, 采用本质安全设计理念, 如减少设备的压力等级、降低设备的运行温度、优化设备的结构、采购设备智能化监测等, 做到本质安全化。提高机械化和自动化水平, 避免人员误操作导致安全事故的发生。在设备安装过程中, 严格按照设计要求进行施工, 确保设备的安装质量。

3.2 管理防范措施

3.2.1 完善的安全管理制度。建立完善的安全管理制度体系, 确保各项制度符合国家法律法规和行业标准, 明确全员安全职责, 将安全责任落实到具体的岗位和个人。制定安全操作规程, 明确各岗位安全职责和操作要求。根据法律法规修订、企业经营状况变化等定期对安全管理制度进行修编, 确保有效性。

3.2.2 人员培训与教育。制定安全教育培训计划, 培训计划应全面、可行, 按照计划定期开展安全教育培训, 并开展考核, 确保安全教育培训的参与率和培训内容的掌握率, 形成“我要安全”的安全氛围。鼓励员工参与安全管理, 提出合理化建议和改进措施。

3.2.3 设备维护与管理。对于爆炸危险场所内的电气设备确

保电气设备符合特定的防爆标准。制定详细的设备维护计划, 包括定期巡检、保养、维修和更换, 确保设备始终处于良好的工作状态。建立设备设施档案, 记录设备的运行状况、维护历史和故障处理情况。不同岗位人员对本岗位设备设施的运行状况进行实时监测, 发现问题及时采取措施处理并向上级人员报告。

3.3 应急响应措施

3.3.1 应急预案制定。制定详细、可行的应急预案, 涵盖各种可能发生的紧急情况, 确保在突发事件发生时能够迅速有效地进行处置, 并确保应急预案与上级部门和周边单位的应急预案相衔接, 形成协同应对的机制。定期对应急预案进行演练和评估, 根据演练结果和实际情况进行修订和完善应急预案。

3.3.2 演练与优化。定期组织应急演练, 包括桌面演练、功能演练和全面演练等多种形式。演练过程中注重检验应急预案的可行性、应急响应的及时性和协同作战的有效性。对演练中发现的问题, 及时对应急预案进行修订、补充、完善, 实现应急预案的不断优化和动态管理。

4 结论与展望

本文通过FMEA方法对盐穴储气库设施设备爆炸风险进行了深入研究, 识别了盐穴储气库设施设备潜在的失效模式, 并开展风险影响和风险评估分析, 分析得到: 安全阀失效为高风险, 管道焊缝缺陷、管材质量问题、第三方破坏、雷击、摩擦热、高温表面、通风系统故障、通风设计不合理、仪表失灵、管道振动为中风险; 气候条件影响为低风险。本文根据风险分析结果提出涵盖技术、管理和应急响应的综合防范策略, 为保障盐穴储气库的安全稳定运行提供理论指导。

[参考文献]

- [1]冯雨翔.盐穴地下储气库风险评估研究[D].西南石油大学,2019.
- [2]常晓云.盐穴型地下储气库稳定性评价研究[D].西安建筑科技大学,2016.
- [3]陈伟,刘洋.基于HFACS的盐穴压气储能安全分析及风险管控对策研究[J].中国井矿盐,2023,54(01):21-24.
- [4]刘洁莹,毕智高.盐穴型储气库风险评估的应用研究[J].价值工程,2022,41(31):117-119.

作者简介:

陈伟(1980--),男,江苏盐城人,正高级工程师,工学博士;研究方向:风险管理。

张惠明(1976--),男,江苏连云港人,高级政工师、工学学士,制盐工艺。