

化工装置设计阶段风险辨识不足对生产安全的影响研究

袁甫荣 刘尚生

鲁西化工集团股份有限公司, 山东 聊城 252200

[摘要]化工生产具有高温高压、易燃易爆、有毒有害等特点,装置的安全运行高度依赖于设计的科学性与完整性。然而,在实际工程实践中,一些看似微不足道的设计疏忽——伴热介质选型不当、垫片材质选择错误、保温措施遗漏缺失——往往在装置投产后演变为严重的生产安全事故,造成人员伤亡、财产损失和生产中断。文中基于氟材料事业部硫酸储罐腐蚀泄漏、双氧水装置垫片失效泄漏、氯甲烷反应器管道腐蚀泄漏等真实案例,系统分析了设计缺陷从“小疏忽”演变为“大问题”的机理与路径。研究认为,设计缺陷之所以能够在生产阶段酿成重大事故,根源在于工艺安全信息(PSI)未能有效指导设计决策、风险辨识未能覆盖全生命周期工况、合规保证未能落实到设计细节三个层面的系统性失效。文章提出,应从强化工艺安全信息管理、深化全生命周期风险辨识、完善设计审查与验收机制三个方面提升设计本质安全水平,从源头上消除安全隐患。

[关键词]化工设计;设计缺陷;工艺安全信息;本质安全;生产安全事故

DOI: 10.33142/sca.v9i8.20197

中图分类号: TQ016

文献标识码: A

Research on the Impact of Insufficient Risk Identification in the Design Stage of Chemical Plants on Production Safety

YUAN Furong, LIU Shangsheng

Luxi Chemical Group Co., Ltd., Liaocheng, Shandong, 252200, China

Abstract: Chemical production has the characteristics of high temperature and high pressure, flammability and explosiveness, toxicity and harm. The safe operation of the equipment highly depends on the scientific and complete design. However, in practical engineering practice, some seemingly insignificant design oversights - improper selection of heat tracing media, incorrect selection of gasket materials, and missing insulation measures - often escalate into serious production safety accidents after the device is put into operation, causing casualties, property losses, and production interruptions. The article systematically analyzes the mechanism and path of design defects evolving from "minor negligence" to "major problems" based on real cases such as corrosion and leakage of sulfuric acid storage tanks, gasket failure and leakage of hydrogen peroxide devices, and corrosion and leakage of chloromethane reactor pipelines in the Fluorine Materials Division. Research suggests that the reason why design defects can cause major accidents in the production stage is due to the systematic failure of Process Safety Information (PSI) to effectively guide design decisions, risk identification to cover the entire lifecycle, and compliance assurance to be implemented in design details. The article proposes that the intrinsic safety level of design should be improved from three aspects: strengthening the management of process safety information, deepening the identification of risks throughout the entire life cycle, and improving the design review and acceptance mechanism, in order to eliminate safety hazards from the source.

Keywords: chemical design; design defects; process safety information; intrinsic safety; production safety accidents

引言

现代工业体系中化工行业无疑占据重要位置,但化工行业生产过程涉及大量易燃易爆易腐蚀的介质,还会产生大量反应热或面临物质自聚、自燃现象,化工生产危险程度高,一旦发生事故,还会产生多米诺效应,后果比较严重。根据查阅近年来国内外多起重大化工生产安全事故的

调查结论,设计阶段的疏漏与设计缺陷会增加化工装置的危险程度。无论是博帕尔毒气泄漏,还是国内的多起管道泄漏、储罐爆炸事故,都说明安全源于设计,缺陷往往始于设计过程中的小疏忽。

在设计中一个小的失误,比如说在一个垫片材质选择过程中未考虑其对全工况的适应程度、或是一段管道未考

虑环境因素的影响遗漏保温设计,或者选择的伴热介质温度不合适带来潜在腐蚀风险。这些小失误若未被及时发现,在化工装置投入生产运行后,在特定的温度、压力、介质的运行工况下,缺陷就会被放大甚至发生事故。可能由于垫片材质选择不合理,在高温下变形、老化甚至融化,密封出现问题导致可燃有毒物料泄漏;酸性介质在保温材料缺失的情况下致使相变冷凝,腐蚀管道、设备;伴热温度过高,加速管道、设备壁厚减薄直至穿孔泄漏。这些小疏忽埋下安全隐患,甚至会酿成重大事故。

本文以三个真实案例为切入点,系统分析因为设计的小缺陷,引发生产安全事故机理,并从风险辨识、工艺安全管理、合规保证等角度探讨事故原因,提出提高设计本质安全的措施。

2 案例呈现:由三个设计“小疏忽”引发的事故

2.1 案例一:由于伴热介质、参数选择不当引发硫酸储罐腐蚀泄漏的风险

2022年1月5日,某氟材料事业部发现 TFE 装置稀

硫酸储罐中的稀硫酸颜色发黑。经排查发现,该储罐材质为 Q345R 碳钢,采用 80~84℃ 热水盘管伴热,稀硫酸储罐在高温下存在腐蚀,腐蚀物溶入稀硫酸中,造成颜色发黑现象,同时设备腐蚀严重存在安全风险。

2015—2018 年间,某氯甲烷事业部 98% 硫酸碳钢储罐也多次发生渗漏现象,漏点主要集中在伴热盘管与罐体接触位置。当时该储罐采用 0.35MPa、138.9℃ 的饱和蒸汽作为伴热介质,超过 98% 硫酸对碳钢的腐蚀温度。

这两个泄漏事故的共同原因是:对伴热介质选择不合理,未考虑到温度对腐蚀速率的影响。热水伴热和蒸汽伴热的目的是加热防冻,在解决防冻风险时却带来腐蚀的风险。

《硫酸生产技术》中明确论述:温度超过 65℃,储存、输送硫酸介质,一般不能使用碳钢。

98% 硫酸等腐蚀图也可以看到,硫酸介质采用碳钢设备管道,工作温度一般不超过 50℃,腐蚀速率控制在 0.5~1.3mm/a。如下图。

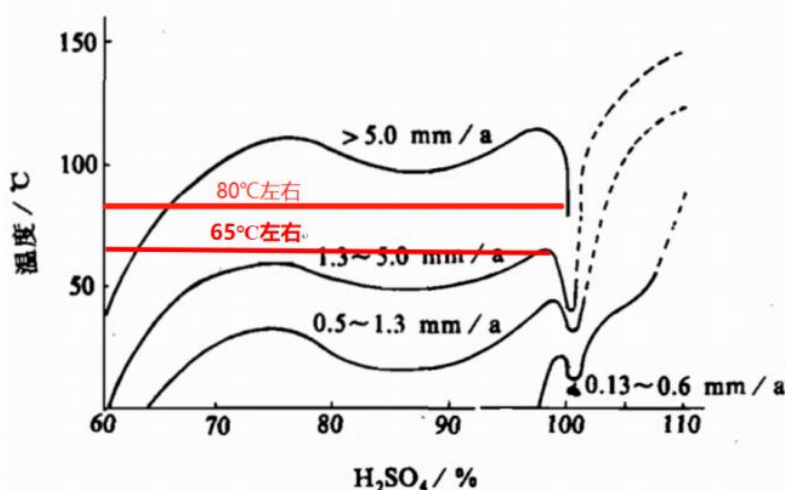


图1 碳素钢在浓硫酸中的等腐蚀曲线图。

等腐蚀曲线显示,当硫酸浓度为 101% 时,曲线明显下凹,表明此处腐蚀迅速增加;温度在 65℃ 以上时,硫酸对碳钢的腐蚀加强。温度在 50℃ 以下腐蚀速率较低,伴热介质的选择不能超过 50℃ 的工作温度,才能保障碳钢设备、管道的运行安全。

2.2 案例二:垫片材质选择错误导致法兰泄漏的风险

2020 年 6 月 5 日,某双氧水装置氧化液气液分离器视镜处法兰发生泄漏喷液。操作人员对法兰螺栓进行逐个紧固,但泄漏未能消除。经判断为法兰垫片局部损坏脱落,系统紧急停车后检查发现,该处垫片为普通橡胶垫片。调查追溯发现,原设计为橡胶垫片,后期项目组根据实际运

行情况已将同类设备垫片统一调整为四氟垫片,但在设备排查中遗漏了该台设备,设计人员也未对调整执行情况进行跟踪落实。

2017 年 12 月 9 日,天津某化工公司加氢树脂项目试开车阶段,由设计院承担设计和制造的一台降膜气液分离罐(介质为溶剂油,温度 179.8℃)下部突然冒白烟发生泄漏,约 2 吨溶剂油泄漏,一名操作人员因吸入烟气致短暂昏迷。经排查,泄漏点同样位于视镜密封处——视镜供应商配置的垫片材质为普通橡胶垫,在 179.8℃ 的高温下橡胶垫熔化失效。

垫片虽小,却是法兰连接密封系统的核心元件。一个

垫片材质的“小疏忽”，酿成了物料泄漏、人员受伤、装置停车的“大问题”。

2.3 案例三：管道保温措施缺失造成腐蚀风险

2010—2018 年期间，某氯甲烷氯化反应器出口镍管与激冷塔连接法兰频繁出现漏点。分析发现，反应产物（氯甲烷、氯化氢、水等）在靠近激冷塔进口的镍管处，因伴热不到位、保温不全，导致氯化氢和水在此处冷凝形成盐酸，腐蚀管道造成泄漏。完善伴热和保温后，管道运行周期恢复正常。

2022 年 2 月 11 日，TFE 蒸汽过热炉急冷器出口管线出现漏点。原因在于急冷器出口衬里管道较长且无保温，裂解气自急冷器出口进入管道后遇冷，部分水和氯化氢冷凝产生盐酸，倒流至急冷器出口腐蚀碳钢管节，最终发生泄漏。

2022 年 10 月 11 日，双酚 A 汽提塔塔顶压力波动上涨，塔顶收集槽液位不涨。经判断为双酚 A 在塔顶冷凝器内结晶堵塞。汽提塔出口至塔顶冷凝器气相管线虽设计有保温，现场却未施工。

根据《石油化工设备和管道绝热工程设计规范》（SH/T 3010），外表面温度高于 50℃以及工艺生产中需要减少介质温度降或延迟介质凝结的部位应设置保温。保温措施的缺失——无论是设计阶段未予考虑，还是施工阶段未予落实——都直接导致了物料的冷凝、腐蚀或结晶。

3 设计疏忽与事故后果的量化分析

3.1 硫酸腐蚀速率与温度的关系

碳钢在浓硫酸中的腐蚀速率与温度呈显著的指数关系。研究表明，40℃时 98%浓硫酸对碳钢的腐蚀速率为 0.75~1.0mm/a，50℃时腐蚀速率为 0.5~1.3mm/a。在考虑一定腐蚀裕量的前提下，使用碳钢材质储存浓硫酸应控制壁温在 50℃以下。当温度升至 65℃以上时，不论硫酸浓度多大，碳素钢一般也不能使用。

表 1 碳钢在 98%硫酸中不同温度下的腐蚀速率

温度（℃）	腐蚀速率（mm/a）	适用性评价
25	0.08~0.15	良好
40	0.75~1.0	可用，需控制
50	0.5~1.3	上限温度
65	急剧上升	不宜使用
80-84	严重腐蚀	禁止使用

数据来源：98%浓硫酸储罐电伴热带技术资料及硫酸腐蚀研究

案例一中，稀硫酸储槽伴热热水温度 80~84℃，远超 65℃的安全阈值，腐蚀速率较 50℃时上升数倍乃至数十倍。98%硫酸储槽使用 138.9℃的蒸汽伴热，更是将设备置于极端腐蚀条件之下。设计人员若能在选型时查阅上

述腐蚀数据，伴热介质的温度选择本可避免如此严重的偏差。

3.2 垫片材质适用温度对比

不同垫片材质有其特定的适用温度范围，选型错误将直接导致密封失效。

表 2 常用垫片材质适用温度范围对比

垫片材质	适用温度范围（℃）	主要特点	适用禁忌
天然橡胶	-50~90	弹性好，价格低	不耐油和有机溶剂
丁腈橡胶（NBR）	-30~110	耐油性良好	不耐高温氧化
氯丁橡胶	-40~100	耐候性好	不耐强酸
聚四氟乙烯（PTFE）	-250~+250	耐腐蚀性强	易蠕变松弛
柔性石墨	-200~+650	耐高温，回弹好	强氧化性介质中慎用
石棉橡胶板	视具体类型	传统密封材料	逐步被替代

数据来源：法兰密封垫片选用相关资料

案例二中，双氧水装置和加氢树脂项目的视镜处均使用了普通橡胶垫片，但其工作温度分别远超橡胶材质的耐受上限，导致垫片软化、熔化，密封失效。根据 HG/T 20614-2009《钢制管法兰、垫片、紧固件选配规定》，垫片应根据工作温度、压力、介质的腐蚀性和毒性、易燃性、允许泄漏程度等因素选用。设计人员若能在图纸中明确标注垫片材质要求并核实标准件适用范围，此类事故完全可以避免。

3.3 伴热介质的选用

根据 SH/T 3040《石油化工管道伴管及夹套管设计规范》，介质凝固点的高低决定不同伴热方式的选择。

表 3 伴热方式选用原则（SH/T 3040）

介质凝固点（℃）	推荐伴热方式	备注
低于 50℃	伴管伴热	热水或蒸汽伴管
50~100℃	夹套管伴热	提高伴热效率
高于 100℃	内管焊缝隐蔽型夹套管	全夹套伴热

表 3 摘自 SH/T 3040《石油化工管道伴管及夹套管设计规范》

根据 SH/T 3040 相关规定：输送介质的凝固点不低于环境温度的设备、管道，在停运时介质可能发生凝固现象，应采用伴热的方式解决结冰问题。案例一中 98%硫酸的凝固点约为-7℃，需要选择伴热，但只需伴热介质维持 20-30℃就能满足防冻要求，而设计却选用了 138.9℃的蒸汽，温度过来，又带来了设备、管道腐蚀的安全风险。

4 原因分析：设计小疏忽带来的安全隐患

上述三个案例虽然设备类型不同和故障模式也不同，但都是由设计的小失误造成的，主要原因表现在以下三个方面。

4.1 工艺安全信息掌握不全面导致设计偏差

工艺安全信息指化学品物性 SDS、工艺技术方案和工艺设备方案等。设计前期必须掌握、理解这些信息,并用这些信息指导设计。

在硫酸储罐案例中,设计人员、校审及审批人员对硫酸的腐蚀机理了解不深入,不掌握等腐蚀线,只知道常温下由于 98%硫酸的氧化作用,会在碳钢表面形成一层钝化氧化膜,防止碳钢设备的进一步腐蚀,不了解超过 50℃ 98%硫酸对碳钢的腐蚀性急剧增加,会击穿氧化膜形成进一步的腐蚀,造成设备管道泄漏风险。在垫片案例中,设计人员对垫片材质特性了解不够,并且未按设计要求根据视镜标准(NB/T47017)中相关垫片的适用温度核对垫片选材的正确性。在保温案例中,设计人员对介质冷凝、结晶温度掌握不足,导致漏掉保温,造成物料的冷凝腐蚀。

设计人员对工艺安全信息掌握不全面不完整,设计的图纸往往就会埋下隐患,装置运行后会存在安全风险。

4.2 风险辨识未覆盖所有工况

设计阶段风险辨识不全面,未覆盖所有工况,未考虑温度的变化对材料适用范围的影响,导致漏设计保温,误设计垫片选材,伴热介质。

硫酸储罐仅考虑了常温储存的常规状态下的工况,未辨识出冬季低温工况下,伴热管运行时因为伴热管温度较高,对碳钢设备、管道的腐蚀加剧现象。垫片选材仅考虑了垫片材料与存储的介质兼容性,是不是禁忌物质,却未考虑“开车、停车、事故”等异常工况下和温度升高对垫片耐压的影响,造成垫片变形、老化、甚至熔化,从而引发因垫片密封失效导致的泄漏事故。保温设计只是对正常运行时的热量损失进行输入设计,却未输入外部环境因素的影响,因保温缺失介质冷凝造成腐蚀、结晶风险。

总之设计阶段因风险辨识不全,导致设计产品存在安全隐患。

4.3 合规保证未能有效落地

设计文件必须满足法律法规、标准规范等要求,这是设计合规的基本保证。

在垫片案例中,未根据视镜标准中核对不同材质垫片的使用范围,忽略了垫片选材不适应本项目工况要求,设计图纸中也未在技术要求中明确标注垫片标准、检验和验收标准要求等。最终导致不符合标准要求的垫片被安装到设备上,造成泄漏停车问题。在保温案例中,反应产物(氯甲烷、氯化氢、水等)在靠近激冷塔进口的镍管处,因伴热不到位、保温不全,在现场服务和三查四定过程中也未能发现。

合规保证是保证设计安全的底线,若跨越底线,将面临设计承担相关安全风险。

5 对策与建议

5.1 强化工艺安全信息的全流程管理

设计院应建立完善的管理体系,确保与设计相关的工艺安全信息——包括化学品的物性参数、腐蚀数据、热稳定性数据、相变温度等——能够系统性地被收集、验证、更新和传递。具体而言:应在设计输入阶段明确 PSI 的获取来源和验证方法;在设计过程中建立 PSI 与设计决策的关联机制,确保每一个设计参数的选取都有 PSI 作为依据;在设计输出阶段将关键 PSI 以适当形式传递给采购、施工、运维等后续环节。尤其对于硫酸等强腐蚀性介质、垫片等关键非标元件、保温等容易被忽视的辅助系统,更应建立 PSI 专项审查机制,从信息源头杜绝设计偏差。

5.2 深化全工况的风险辨识

设计阶段的风险辨识不应局限于设计点工况,而应覆盖装置从开车、正常操作、负荷调整、停车、检修到事故工况的全生命周期。建议在设计过程中引入“工况枚举法”——系统罗列装置可能经历的所有操作状态和边界条件,逐一评估各工况下设备、管道、仪表、电气等系统的适应性和安全性。对硫酸、烧碱冬季易结晶的介质,应在设计中考虑保温、伴热等防冻措施,但伴热温度的选择要合理,不超出设备、管道材质在该温度下的腐蚀极限;对于垫片等密封元件,应考虑温度、压力的关联影响。风险辨识应该是完整的、全面的,对策应该是可靠的。

5.3 完善设计审查与验收的补漏环节

针对设计不足,通过设计审查查漏补缺,技术整改和变更设计不足。在设计阶段按照标准,审查图纸中的关键环节(如垫片材质、保温范围、伴热参数等)是否做出明确要求,是否符合标准要求,同时做好技术交底和现场服务,及时发现问题和解决问题。在验收环节,“三查四定”做实做细(查设计漏项、查工程质量及隐患、查未完工程量,对检查问题定任务、定人员、定时间、定措施),查设计问题、安装问题、保温问题,在装置运行之前解决问题,处理安全隐患。

5.4 培育“关注细节、关注安全”的安全理念

设计中的小错误之所以反复出现,最主要的原因在于设计人员未建立关注细节、关注安全的理念。设计院应将这次事故进行安全经验分享,并将形成事故原因制度化编制技术规划和要求,进行全员的培训,同时建立设计质量追溯和责任追究机制,让每个设计人员不敢忽略细节、不能忽略细节,向细节要安全。

6 结论

化工装置的安全,始于微小细节的疏忽,比如硫酸储罐的伴热温度选取不合理、法兰密封垫片材质的选择错误、管道保温的完整性缺失等。本文通过三个真实的案例分析可以看出:设计小疏忽会埋下隐患的种子,在生产运行中会被放大,以致形成事故,小则可能造成设备泄漏停车,大则可能造成财产损失、人员伤亡。

“安全源于设计”不应只是一句口号。它要求设计人员以敬畏之心对待每一个设计参数,以审慎之态审核每一份设计文件,以系统之思维辨识每一种可能的工况。工艺安全信息的有效管理、全生命周期风险的充分辨识、合规保证的闭环落实,是斩断“小疏忽”通向“大问题”演化链条的三把利剑。唯有如此,才能真正实现设计的本质安全,让化工生产在安全的轨道上稳健运行。

[参考文献]

[1]《硫酸腐蚀环境下材料的合理选择》SH/T3126[S].北京:

中国硫酸网,2024:7.

[2]《硫酸的腐蚀特点,及何时可用碳钢、不锈钢?》SH/T3126[S].北京:国家材料腐蚀与防护科学数据中心,2025:87.

[3]《耐硫酸材料如何正确的选择和合理使用》GB 50349[S].北京:中国腐蚀与防护网,2023:76.

[4]《98%浓硫酸储罐电伴热带》GB 50349[S].北京:搜狐网,2020:76.

[5]《钢制管法兰、垫片、紧固件选配规定(PN系列)》HG/T 20614-2009[S].北京:中国计划出版社,2024:78.

[6]《石油化工管道伴管和夹套管设计规范》SH/T3040-2012[S].北京:中国计划出版社,2024:78.

[7]《石油化工设备和管道绝热工程设计规范》SH/T3010-2025[S].北京:中国计划出版社,2024:78.

作者简介:袁甫荣(1975),女,汉族,山东东阿人,本科,研究方向:化工工艺设计、安全与咨询。