

基于事故分析和风险管理的化工实验室安全管理体系建设探讨

孔宇，范志磊*，丁红红
南京南工应急科技有限公司，江苏南京，中国
*通讯作者

【摘要】 本文通过分析整理 1991~2024 年事故案例，发现进入中试阶段后，事故数量降低 55%，一旦发生事故，死亡人数增至 2.5 倍；每年的 3 月、6 月和 12 月是安全事故起数和伤亡人数较多的月份；因无规操作或违规操作导致的事故平均死亡人数（1.3 人/起）最多，平均受伤人数最多的是危险化学品管理不当导致的事故，为 5.5 人/起。结合事故分析提出风险识别与评估、风险控制与监测、应急管理响应、持续改进与提升等措施和改进策略，帮助化工实验室提升安全管理水平，确保科研活动的安全性和高效性。

【关键词】 化工实验室；事故分析；风险管理；安全管理体系

1.引言

当前化工实验室主要分为政府主导型、大学主导型、企业主导型三类。随着 2019 年科技部《关于促进新型研发机构发展的指导意见》的发布，以企业主导的新型研发机构在全国得到蓬勃发展。化工实验室通常以灵活性和创新性为特点，但因其涉及的化学品种类繁多[1]、工艺和人员变动频繁，在安全管理方面面临诸多挑战。如山西太原机械学院 405 教研室“4·29”爆炸事故导致 4 死 44 伤，重庆特斯拉化学原料有限公司中试试验“1·9”中毒事故导致 5 死 14 伤，对研发机构的安全发展构成了巨大的阻碍。本文基于国内 1991~2024 年化工实验室安全事故统计数据，系统分析事故发生时的研发阶段、事发月份和事故原因，提出相应的预防对策，为化工实验室的安全管理提供科学参考。

2.化工实验室安全事故分析

本文收集的高校与科研院所实验室安全事故数据，主要来源于化工安全人网站 (<https://www.ichemsafe.com/>)。在数据收集过程中，对每一起安全事故通过多个政府网站和行业协会网站进行核实，确认最终的事故原因、伤亡人数等信息。通过对政府、高校、企业所属的化工实验室在小试、中试等阶段发生的安全事故的收集、整理和分析，发现在 1991~2024 年期间，共发生 119 起化工实验室安全事故，造成 97 人死亡、310 人受伤。

2.1 事故发生的研发阶段分析

因化工实验室一般不涉及工业化放大阶段，故仅统计小试和中试阶段的安全事故。经统计，小试阶段安全事故 82 起，中试阶段安

全事故 37 起，详见表 1。从事故起数看，小试为中试的 2.2 倍；从死亡人数看，小试为中试的 0.4 倍；从受伤人数看，小试为中试的 2.3 倍。说明小试阶段的工艺路线和操作水平尚不成熟，事故发生概率较高，但因其在线物料较少，造成的事故后果也相对较低。进入中试阶段后，事故数量降低 55%，但因在线物料量大，一旦发生事故，死亡人数增至 2.5 倍。

表 1.不同研发阶段的事故起数

研发阶段	事故起数(占比)	死亡人数(占比)	受伤人数(占比)
小试	82 (68.9%)	26 (26.8%)	216 (69.7%)
中试	37 (31.1%)	71 (73.2%)	94 (30.3%)

从小试、中试阶段的事故类型分析，泄露和中毒事故在小试和中试阶段均占比较少，且在两个阶段差别不大。小试的火灾事故有 16 起，是中试（5 起）的 3.2 倍；小试的爆炸事故有 60 起，是中试（28 起）的 2.1 倍。说明中试阶段对物料的基本特性（特别是火灾特性）已经有了较为完整的了解，火灾、泄露、中毒事故控制措施较为完善；但对于工艺及操作的研究仍不成熟，爆炸事故时有发生。

2.2 事故发生的月份分析

因各行业领域特点不同，安全事故的发生在时间上的规律也不尽相同。按照事故发生月份进行统计，化工实验室安全事故起数和伤亡人数如图 1 所示。以事故起数排序，前三位是 12 月、3 月和 6 月；以死亡人数排序，前三位是 3 月、12 月和 6 月；以受伤人数排序，前三位是 4 月、1 月和 12 月。总结一下，3-4 月份为研发试验阶段，科研人员经过一段为较长的假期，思想有所松懈，仪器设备缺乏维护

保养,产生误操作或违规操作的概率增高;6月份为中期论证阶段,试验数量剧增,同时学生面临毕业、企业研发人员调整,安全信息传递、仪器设备操作等工作交接不到位,可能是导致安全事故增加的原因;前一年12月-1月为研发结题阶段,科研人员存在最后冲刺的心态,在试验过程中实施大量的变更,以期快速取得技术突破,心态的失衡易导致对安全风险的忽视,从而引发更多的安全事故。

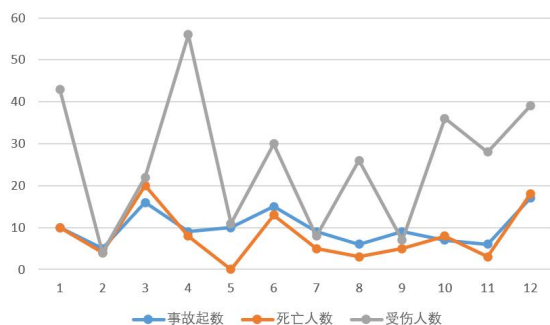


图 1. 不同月份事故起数及伤亡人数

从事故类型分析,火灾事故多发于5月、6月和7月;爆炸事故集中于3月、6月和12月。除了上述原因之外,干燥的天气是火灾事故高发的重要原因之一。另外,每年的2月和8月是安全事故起数和伤亡人数最少的2个月份,可能和处于节假日有关。

2.3 事故发生的原因分析

对化工实验室安全事故的原因进行统计分析,结果见表2。七种事故原因按事故起数排序分别为:无规操作或违规操作(37.8%)、仪器故障或设备缺陷(18.5%)、危险化学品管理不当(14.3%)、不清楚工艺安全风险(10.9%)、实验人员脱岗(8.4%)、环境因素影响(5.9%)和其它原因(4.2%)。

因无规操作或违规操作导致的事故平均死亡人数(1.3人/起)最多,平均受伤人数(3.0人/起)排名第二,说明操作规程对化工实验室至关重要,而这通常是化工实验室的安全管理难点,谢恬等[2]研究表明,实验习惯方面的权重值是最高的,是影响实验不安全行为的主要因素。平均受伤人数最多的是危险化学品管理不当导致的事故,为5.5人/起,其中事故排序前五名的是:爆炸性混合物、禁水性物质、自燃性物质、高含能物质和可燃有毒气体。

表 2. 事故原因分析及伤亡人数

事故起因	事故数/起	死亡人数/人	受伤人数/人	平均死亡人数(人/起)	平均受伤人数(人/起)
无规操	45	59	135	1.3	3.0

作或违规操作					
仪器故障或设备缺陷	22	15	41	0.7	1.9
危险化学品管理不当	17	12	94	0.7	5.5
不清楚工艺安全风险	13	8	26	0.6	2.0
实验人员脱岗	10	0	3	0.0	0.3
环境因素影响	7	3	8	0.4	1.1
其它	5	0	3	0.0	0.6

按照风险管理环节区分,危险化学品管理不当和环境因素属于风险辨识环节,事故占比20.2%;不清楚工艺安全风险属于风险评估环节,事故占比10.9%;无规操作或违规操作、实验人员脱岗属于风险控制环节,事故占比46.2%;仪器故障或设备缺陷属于风险监测环节,事故占比18.5%。可以看出风险管理全过程均存在缺陷,特别是风险辨识与风险控制环节亟待完善,这与董小翠等[3]对高校学生实验室安全调研的结果基本一致。

3. 基于风险管理的安全管理体系构建

针对上述分析结果,结合化工实验室化学品种类繁多、工艺变更和人员变动频繁的特点,笔者认为化工实验室的安全管理体系需以全生命周期风险管理为核心,通过“风险辨识-精准评估-分级管控-实时监测-应急响应-持续改进”的闭环机制,结合数字化工具和安全文化建设,以系统性思维防范事故发生,保障人员安全与研发可持续。

3.1 风险辨识与评估

(1) 开展全面的风险辨识。化工实验室应建立风险辨识程序,从工艺、仪器设备、化学品、环境、设施、人员等方面,采取JHA、SCL、PHA等方法对作业活动、设备设施、工作场所各环节进行风险识别。重点识别反应机理安全性、物料相容性、设备匹配性以及操作流程可靠性。当设备、材料、方法、环境、人员等方面发生变化时,应重新进行风险识别。

(2) 选用适当的风险评估方法。化工实验室可选用HAZOP分析方法对工艺流程进行系统性风险评估,选用LEC法对日常操作风

险进行评估, 选用 LS 法快速对固定设施、设备的静态风险进行评估, 涉及重点监管危险化工工艺或者和金属有机物合成反应的尚需开展反应安全风险评估。《江苏省生产经营单位安全风险管理条例》将安全风险分为重大安全风险、较大安全风险、一般安全风险和低安全风险四个等级, 对较大以上安全风险实行目录化管理和报告制度, 可供各行业领域参考。

3.2 风险控制与监测

(1) 采用风险分级管控制度。根据风险辨识和评估结果, 化工实验室可从组织、技术、管理、应急等方面制定并落实风险管控措施。在控制风险时, 宜参考本质安全理论制定管控原则[4]。如按照消除、替代、隔离、减弱的顺序制定技术管控措施, 明确组织、管理和应急措施。在采用其他有效的措施不可行时, 选用合适的个体防护装备。重点要明确工艺、化学品、仪器设备的安全操作规程, 写明操作步骤、控制指标、纠偏方法、人身安全保障、职业健康注意事项等内容。

(2) 完善风险监测技术。一方面将风险管控措施分级纳入日常隐患排查中, 及时发现、整改管控措施落实不到位的问题; 另一方面利用火灾报警系统、可燃有毒气体报警系统、视频监控系統、自动化联锁系统等监测手段实时监测化工实验室的安全风险。具备条件的, 也可选用数字孪生技术[5]、AI 识别技术、红外热成像技术等先进技术, 提高风险监测的及时性、准确性和可靠性。要注重对现有问题的整治力度, 特别是发现仪表设备存在故障或缺陷的, 应及时修复或更换。

3.3 应急管理 with 响应

(1) 编制应急预案并定期演练。化工实验室应根据风险辨识评估结果和应急资源调查情况编制火灾、爆炸、特种设备等专项应急预案, 现场处置方案至少应包括泄漏、中毒和窒息、灼烫、触电等常见风险。方案应明确异常工况和紧急状态下的报警报告、处理处置、扑救程序、注意事项等。建议每年至少组织一次综合或专项演练, 每半年至少组织一次现场处置方案演练。在事故发生前与消防、公安、医疗进行协调联动模拟演练, 以最高效率进行现场救援^[6]。

(2) 强化应急响应与处置能力。化工实验室应按照国家有关规定建立专兼职应急队伍, 配齐配足应急物资。一旦发生安全事故, 应立即作出响应, 启动应急预案, 迅速采取有效措施, 开展人员救护、警戒隔离、现场处置、

信息发布、事故报告等工作。涉及危险化学品事故的, 应根据其危险特性采取相应的应急处置方法, 如选用正确的灭火剂、同时控制泄漏物和泄漏源、及时将中毒人员转移至安全区域等。

3.4 持续改进与提升

(1) 合规性审查与审计。化工实验室应对照法律、法规、标准和其他要求, 定期对组织职责、人员管理、化学品管理、仪器设备管理、设施管理、环境管理、应急管理要素进行合规性审查, 明确安全管理机构和人员, 提供必要的安全投入, 保障安全管理体系顺利运行。安全管理审计中应坚持客观独立的立场[7], 查找各要素运行过程中的问题点, 归类梳理出制约要素运行的症结, 从根本上改进组织、加强管理、提高效率、降低风险、保证安全。

(2) 提升人员安全能力。化工实验室应扎实做好三级安全教育, 建立工作场所准入管理制度[8], 建立培训需求矩阵, 明确各级人员的培训内容和目标。按照国家相关要求开展风险辨识管控、实验操作技能、安全操作规程、事故预防措施、个体防护装备的使用等相关培训活动, 确保进入操作人员和管理人员熟悉工作场所的安全规定、风险和程序, 具备必要的安全知识和安全技能。涉及高危工艺或特种设备管理或操作的, 应取得相应资格证书后持证上岗。

(3) 数字化工具应用。建议化工实验室引进实验室信息管理系统[9], 集中管理实验数据、样本信息、设备状态及人员权限; 应用智能危险化学品管理系统[10], 具备库存查询、出入库管理、采购清单、自动称量、配制记录、安全周知卡等功能, 联动温湿度监测、视频监控电子门禁、智能终端等多端硬件, 生成统计分析报表, 精准追溯化学品全生命周期的动态变化。有条件的, 使用 Gaussian、ChemDraw、Aspen、Cantera、Simulis 等数据分析与建模工具, 通过数字化技术模拟真实实验环境, 支持虚拟环境下的实验操作、数据分析与安全培训。

(4) 安全文化建设。安全文化建设是预防事故、保障人员与物资安全的核心, 化工实验室需结合制度、技术、培训与人文关怀, 构建全员参与的长效机制。要树立“预防为主、风险管理、全员责任、持续改进”的安全文化理念; 要制定安全责任清单, 加强安全考核, 用好奖惩机制, 组织丰富多彩的安全文化活动, 强化全员安全意识; 要通过领导示范与承诺, 应用行为安全观察工具, 使科研人员将“我要

安全、我会安全、我懂安全”植根心中，尽可能减少人的不安全行为。

4.改善策略的实施步骤

化工实验室应根据安全审查与审计情况，制定安全改善计划，分类实施改善措施，重构安全生产管理体系。

(1) 隐患问题的改善策略。现场类问题，涉及到仪器设备设施损坏、跑冒滴漏现象的，能改马上就改；资料、文件类问题，涉及到缺失的内容、错误的内容，因已发生过，可做下一步纠正预防措施；执行类问题，如标准与制度明确提出的，因人员不执行而偏离的，追溯根本原因，开展培训教育。

(2) 体系不符合项的改善策略。类似管理体系的不符合项，需要制定管理要素的中长期提升改进计划，不应过多或过快的追求整改率。否则，一方面整改工作只停留在问题的表面，会使问题整改不彻底；另一方面，盲目整改反而会造成新的隐患，或在整改过程中因控制措施不完善导致现场事故的发生。

5.结论

(1) 本文根据 1991~2024 年化工实验室安全事故分析，提出了基于风险管理的安全管理体系和改善策略。通过风险识别与评估、风险控制与监测、应急管理响应、持续改进与提升等措施，帮助化工实验室提升安全管理水平，确保科研活动的安全性和高效性。

(2) 考虑到数据来源的局限性，统计中可能遗漏部分安全事故；由于无法精准掌握事故发生的全部细节，未对事故原因类型进一步细化。这些不足之处可能对事故分析结果产生偏差。

(3) 随着科技创新的不断发展，化工实验室的安全数据将会越来越系统化、规范化。在下一步研究工作中，需要结合相关数据，细

化化工实验室安全管理体系要素内容与权重，增加量化指标，以便精准衡量安全管理水平的变化。

参考文献

- [1] 张亚彬, 闫旭焕, 赵义平, 等. 高校材料与化工专业实验室安全现状及应对措施[J]. 天津化工, 2023, 37(06): 153-156.
- [2] 谢恬, 王冯云, 冯祥瑞, 等. 基于层次分析法的高校化工实验室不安全行为研究[J]. 科学技术创新, 2024, (03): 26-31.
- [3] 董小翠, 舒心. 对高校学生实验室安全教育调研的思考——以北京化工大学化学学院为例[J]. 当代化工研究, 2025, (04): 139-141.
- [4] 李志华, 吴阿清, 陈涛, 等. 应用本质安全原理加强化学类实验室安全预防管理[J]. 实验室研究与探索, 2014, 33(05): 283-286.
- [5] 胡淼, 谢华, 李俊, 等. 数字孪生技术在高校实验室建设中的应用研究[J]. 互联网周刊, 2024, (09): 66-68.
- [6] 姜伟丽, 周广林, 黄澄. 高校化工实验室安全管理下的实验室安全管理建议[J]. 化工管理, 2024, (36): 107-110.
- [7] 田珍, 刘卫英, 李杰, 等. 论引入第三方安全审计的作用[J]. 中国水泥, 2024, (S1): 32-34.
- [8] 鲁珍, 王亚珍, 谢芳, 等. 化工专业认证背景下高校基础化学实验室安全建设与实践[J]. 化工管理, 2023, (27): 113-116+128.
- [9] 李纯成, 徐建强, 陶涛. 化学化工类实验室安全信息化建设的探索与实践[J]. 广州化工, 2022, 50(16): 259-261.
- [10] 杨飞龙, 张嘉琪, 王敏, 等. 基于 RFID 技术的危险化学品智能仓储管理系统[J]. 安全与环境工程, 2015, 22(03): 111-116.