



基于“2-4”模型的高校实验室安全事故分析及对策

高月淑, 许振明, 胡晓芳

(上海交通大学 环境科学与工程学院, 上海 200240)

摘要: 为深入探讨高校实验室安全事故发生的整体规律和内在原因, 该文分析了 2015—2024 年发生的 42 起实验室安全事故, 结合事故致因理论中的“2-4”模型分析了安全事故中的不安全行为和事故发生的原因。在当前实验室安全工作形势下, 从实验室层级的安全管理角度出发, 从危险源识别、网格化责任管理和定制化安全教育培训、数智赋能全过程监管、实验室安全文化构建 4 个方面制定对策, 以期提高实验室层级安全管理水平, 为高校实验室安全管理提供思路和参考。

关键词: 高校实验室; 安全管理; 事故分析; “2-4”模型

中图分类号: X928.7

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20240389

Analysis and Countermeasures of University Laboratory Safety Accidents Based on “2-4” Model

GAO Yueshu, XU Zhenming, HU Xiaofang

(School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: To deeply explore the overall patterns and internal causes of safety accidents in university laboratories, this paper analyzes 42 laboratory safety accidents that occurred between 2015 and 2024. The “2-4” model from accident causation theory is applied to analyze the unsafe behaviors and root causes involved in these accidents. Given the current situation of laboratory safety work, this paper proposes countermeasures from a laboratory-level management perspective to enhance its efficacy. These measures, encompassing hazard identification, grid-based responsibility management and customized safety education and training, digital and intelligent empowerment for whole-process supervision, and the building of a laboratory safety culture, are expected to provide insights and references for laboratory safety management in universities.

Key words: university laboratory; safety management; accident analysis; “2-4” model

随着我国教育事业的快速发展, 国家对高校科研的投入逐年攀升, 高校教学和科研实验室的数量快速增长, 实验室安全问题成为管理的重点和难点。由于学生流动性大、实验探索性强、危险源涉及面广等原因, 高校实验室安全事故多有发生, 不仅给国家造成严重的经济损失, 更对高校师生的人身安全构成了极大威胁。2018 年 12 月 26 日, 北京某大学发生 1 起严重实验室爆炸事故, 造成参与实验的 3 名研究生死亡, 教训深刻而惨烈^[1]。其中暴露出来的高校实验室安全管理薄弱环节引起国务院和教育部各级管理部门的高度重视, 并出台了一系列纲领性、指导性的文件

对高校实验室的安全管理工作进行指导和规范。然而, 根据文献 [2] 的统计, 实验室安全事故发生的频率仍然居高不下, 与当下日益完善的实验室安全管理体系、日益增强的实验室安全技术措施相悖^[3]。因此, 深入探讨高校实验室安全事故发生的整体规律和内在原因, 以便采取有效的管理措施, 对改进安全管理理念、减少高校实验室安全事故的发生具有重要意义。

文献 [4] 通过对 2001—2015 年发生的 46 起高校实验室事故的不安全行为进行分析, 提出实验室管理主要从应用行为安全事故预防系统、危险实验安全评审、实验室危险程度分级管理 3 个方

收稿日期: 2024-06-27

基金项目: 上海交通大学实验室规范化建设项目(SYSGFH2024-012)。

作者简介: 高月淑, 博士, 实验师, 主要从事实验室建设与安全管理方面的研究。E-mail: ysgao2199@sjtu.edu.cn

面来采取措施。文献[5]运用层次分析法对涉化类专业实验室事故影响因素进行分析,认为事故的最重要因素是人的不安全行为。文献[6]运用模糊集定义比较分析法(qualitative comparative analysis of fuzzy sets, fsQCA)对30起高校实验室事故发生因素之间的权重关系进行分析,提出安全意识、安全伦理和个人能力等权重对实验室安全影响较大。但是,总体上,近年来发生的实验室安全事故缺少全面系统的统计和分析。

本文以2015—2024年发生42起高校实验室安全事故为基础,分析了事故发生的类型和主要发生地点。运用事故致因理论“2-4”模型,从不安全的一次性行为 and 物态、不安全习惯、安全管理制度不健全、安全文化不足4个方面进行了事故原因分析。结合分析结果,提出了当前形势下预防和减少安全事故发生的对策建议,以期为高校实验室安全管理工作提供借鉴和参考。

1 实验室安全事故的统计与分类

事故类型按照爆炸、火灾和其他类(含泄漏、投毒等)安全事故进行划分。对42起事故进行统计,结果如图1所示。各类安全事故中,爆炸事故发生18起,占事故总数的42.9%;火灾类事故发生22起,占事故总数52.4%;气体泄漏和投毒类事故各1起,共占4.7%。这42起高校实验室安全事故,共造成10人死亡,59人受伤。其中爆炸事故引起的伤亡最大,造成7人死亡,57人受伤,占全部伤亡人数的92.8%。

爆炸事故发生地点及起数如图2所示。在18例爆炸事故中,有15起事故发生在环境、化工、材料或药学等涉化类实验室,占全部爆炸事故的83.3%,其造成的伤亡人数占爆炸事故伤亡人数的95.4%。在涉化类实验室中,易燃、易爆炸、有毒的化学品(含气体)是最重要的危险源,实验研究中蒸馏、电解、热解、萃取、合成反应多,实验操作往往涉及到高温、高压、辐射、激光、高速的仪器设备,尤其是高压气瓶、高压反应釜、高压灭菌锅等设备。这些研究项目的探索性强,可能释放的物质能量未知性高,发生事故的可能性和偶发性增大,若操作不当,就有可能引发爆炸等安全事故的发生。且因为涉及高压反应或者化学合成反应,爆炸事故造成的伤亡往往最大。

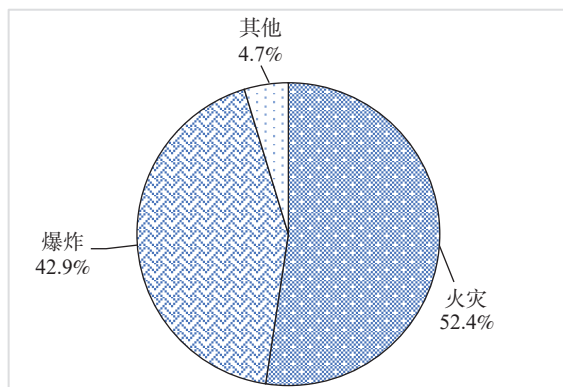


图1 实验室安全事故类型及比例图

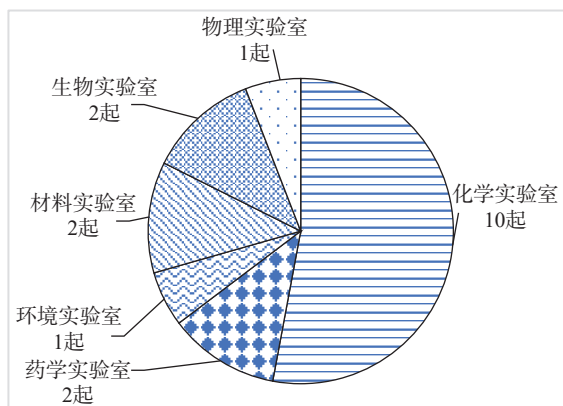


图2 爆炸事故发生地点及起数比例图

火灾事故发生地点及起数如图3所示。在这23起火灾事故中,化学实验室发生9起,占39%,其他发生在药学实验室、电气类实验室、生物类实验室等。引起实验室火灾事故的直接原因主要分为3类:涉化类实验室中易燃的化学试剂使用或存储不当,约占火灾事故原因的40%;设备老化、用电不规范引起的电路短路,约占火灾事故原因的30%;日常实验习惯不良,易燃物堆放、实验室无人值守等不安全行为,约占火灾事故原因的30%。

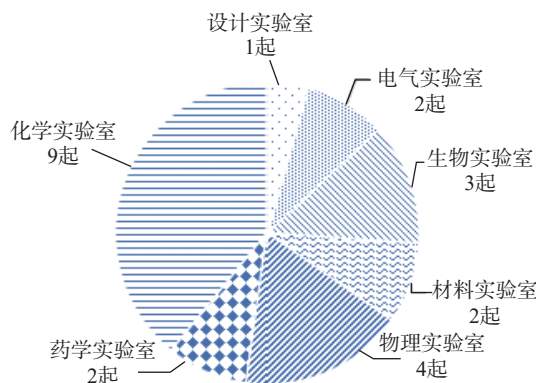


图3 火灾事故发生地点及起数比例图

整体而言，高校实验室安全事故的类型主要集中在爆炸和火灾两类，高校涉化类实验室是实验室安全检查和监管工作的重中之重。如何有效减少这两类事故的数量是减少实验室事故发生的关键。

2 实验室安全事故原因分析

根据海因里希对 75 000 件工伤事故发生的原因调查，88% 的事故是由人的不安全行为造成，10% 是由物的不安全状态造成，还有 2% 是由不可

控因素造成^[7]。如图 4 所示，事故致因理论“2-4”模型结构图在海因里希事故法则的基础上，通过定性和定量相结合的方式，对事故的原因进行了更深层次的分析 and 讨论^[8]。事故的发生是一系列行为共同作用的结果，其中安全文化不足和安全管理体制不完善属于组织层面原因，安全知识不足、安全意识不强、安全习惯不佳、安全心理和安全生理不佳等习惯性行为属于个人层面原因，它们共同导致了事故的发生^[9]。

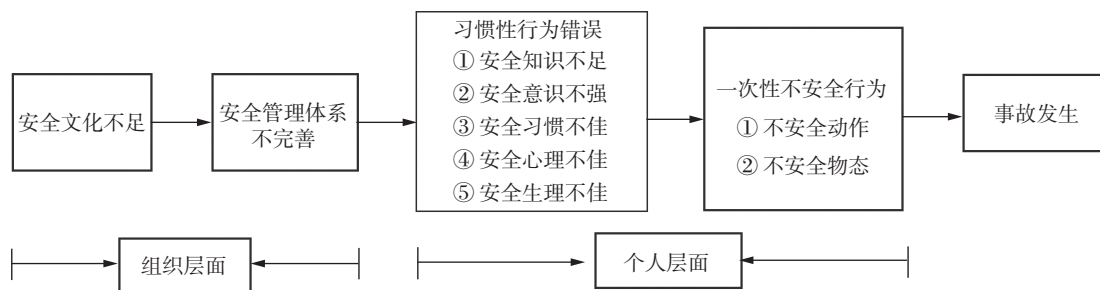


图 4 “2-4”模型结构图

2.1 一次性不安全行为

一次性不安全行为，具体包含了不安全动作和不安全物态两种，这是导致事故发生的直接原因^[10]。在事故发生时，常见的不安全动作主要包括实验过程违反操作规程；仪器或材料使用不当；涉及危险时操作人员处于不安全位置；实验过程无人值守；独自一人从事涉危实验等。常见的不安全物态主要包括设备或者防护装置故障、缺陷或缺失，实验室内线路老化或故障；材料、试剂存放不

规范；高速高压高温设备设施老化或者超期服役；实验室空间环境不佳，易燃物品大量堆放等。

根据实验室不安全动作及物态的具体情形，对引起高校实验室 42 起事故的直接原因进行归类分析，有 26 起事故包含不安全动作，占事故总数的 61.9%，有 21 起事故包含不安全物态，占事故总数的 50.0%（注：有些事故由不安全动作和不安全物态共同引起）。其中引起爆炸和火灾事故的具体原因分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 高校实验室 18 起爆炸事故直接原因分类统计

事故类型	直接原因分类	起数	占比/%	具体原因	起数	占比/%
爆炸	不安全动作	18	100.00	违规操作	8	44.44
				操作不当	15	83.33
	不安全物态	4	22.22	化学品或危废品储存不当	1	5.56
				电路短路或老化	1	5.56
				设备不符合资质	2	11.11

表 2 高校实验室 22 起火灾事故直接原因分类统计

事故类型	直接原因分类	起数	占比/%	具体原因	起数	占比/%
火灾	不安全动作	7	31.82	违规操作	4	18.18
				操作不当	3	13.64
	不安全物态	16	72.72	化学品或危废品储存不当	5	22.73
				设备短路或电路老化	9	40.91
				环境不当	3	13.64

注：一起事故可能由不安全动作和不安全物态共同造成，因此不安全动作和不安全物态的总起数大于事故总起数。

根据表1统计结果可知,引起爆炸事故的具体原因主要是违规操作、操作不当、化学品或危废品储存不当、电路短路或老化、设备不符合资质5类。每一次爆炸事故都涉及不安全动作,其中操作不当是最主要的原因,占83.33%;22.22%的事故涉及不安全物态,尤其是不符合资质的设备占11.11%。根据表2统计结果可知,引起火灾事故的具体原因主要是违规操作、操作不当、化学品或危废品储存不当、设备短路或电路老化、环境不当5类。有7起事故涉及不安全动作,占全部火灾事故的31.82%;有16起事故涉及不安全物态,占全部火灾事故的72.72%,其中设备短路或电路老化占40.91%,化学品或危废品存储不当占22.73%。

由以上事故原因分析可知,要想减少实验室事故的发生,必须从实验室层级的具体管理入手,加强实验室人员具体安全教育培训,做好危险化学品的管理以及实验设备和用电管理,维护安全有序的实验室环境。

2.2 不安全习惯

实验操作人员的不安全习惯是引起事故发生的间接原因。实验操作人员安全知识不足,不了解仪器设备和实验对象的使用方法,对于事故发生前期没有正确的应急知识;实验操作人员安全意识不强,对于安全问题麻痹大意,存在侥幸心理,对于实验过程中可能出现的危险没有提前判断,个体防护不足或者不遵守标准操作流程,实验过程中随意离岗、串岗;实验操作人员安全生理不佳,如身体疲惫时继续实验,增加了实验事故发生的风险,致使部分事故发生在深夜这一时段。

2.3 不健全的安全管理体系

不健全的安全管理体系是引起事故发生的根本原因。安全管理制度是否完备、安全责任落实是否明确、安全隐患排查和整改制度是否建立并有效执行,实验室内各类化学品安全和管理制度是否健全等都属于安全管理体系的范畴。同时,安全应急制度、项目风险评估、安全教育培训人员和要素是否全覆盖都关系到实验室的安全。

2.4 安全文化不足

组织层面安全文化不足是事故发生的根源性原因。由于实验室负责人科研压力大或安全意识不足,在指导学生时常忽视实验过程中可能的安

全隐患,导致学生安全意识淡薄,存在侥幸心理。安全管理注重形式,但是实效性不强,社会体系和管理体系尚未形成安全文化共识,尤其是在顶层设计上没有将安全放在首要位置上。意识决定行为,要想从根源上减少或杜绝事故发生,安全意识培养和安全文化构建是重中之重。

3 预防实验室安全事故的对策和建议

实验室安全管理的直接责任在于实验室,目前大多数高校和院系已经建立了相对系统的责任体系、管理制度、教育培训等管理内容,但总体上呈现“上热-中温-下凉”的态势,尤其在实验室执行层面做得还远远不够^[11]。本文总结2015年以来安全事故的经验教训和发展形势,从实验室层级的安全管理角度出发,提出如下几个方面的对策和建议,以降低实验室安全事故的发生。

3.1 做好危险源识别是实验室安全管理的基础

危险源识别是实验室安全管理的基础,其核心在于系统性地辨识实验环境中存在的各类潜在风险因素,主要包含静态危险源和动态危险源两方面的内容。

3.1.1 静态危险源的识别与管控

实验室需对固有存在的各类危险源进行全面排查,建立详实的危险源清单^[12]。高校实验室中常见的静态危险源包括如下5类。

1) 设备。高温加热设备、高压设备、机械设备、高速设备、激光设备等。

2) 危险化学品。易燃易爆类化学品、易制毒类化学品、剧毒化学品等。

3) 气体。易燃易爆气体(如氢气、甲烷、一氧化碳)、腐蚀性气体(如氯化氢、硫化氢、二氧化硫)、惰性气体(如氮气、氩气、二氧化碳)等。

4) 生物类危险源。实验动物、病原微生物等。

5) 辐射源。X射线装置、放射性同位素等。

3.1.2 动态危险源的识别与管控

各类实验操作中可能产生的过程性风险被称为动态危险源,实验室要对此进行系统分析。

1) 高压反应实验。需关注压力容器爆炸、介质泄漏等风险。

2) 合成实验。着重防范反应比例、添加顺序、失控反应等问题。

3) 高温热解实验。重点防控温度失控。

4) 机械操作。重点防范设备夹击、切割、卷入等机械伤害。

5) 电气操作。注意电击、短路、电弧等电气风险。

6) 气体操作。警惕窒息、中毒、爆炸等潜在危险。

实验室应对所有实验过程建立标准操作程序, 实施风险等级评估(如采用作业条件危险性评价法), 并根据评估结果采取相应的防护措施。

通过建立“危险源清单-风险矩阵-管控措施”的三级管理体系, 实现实验室危险源的可知、可控、可防, 为实验安全提供系统保障。

3.2 构建网格化责任体系与精准化安全培训机制

3.2.1 建立网格化责任落实制度, 实现危险源精细化管理

实验室安全管理的关键在于责任到人、措施到位。应以危险源清单为基础, 构建实验室层级的“横向到边、纵向到底”的网格化管理体系, 确保每一类危险源均有明确的管理主体和监管流程。具体措施如下。

1) 实行“实验室负责人总体负责+专人专项管理”机制。由实验室负责人负总责, 同时针对不同危险源(如化学品、高压设备、生物材料等)设立专项管理员, 确保管理责任层层落实。

2) 建立危险源管理台账。对每类危险源登记造册, 明确存放位置、使用规范、应急措施, 并定期核查更新。

3.2.2 构建实验室层级的精准化安全培训体系, 提升培训实效性

当前实验室安全培训普遍存在内容泛化、针对性不足的问题, 难以真正提升实验人员的安全意识和操作能力。应以危险源辨识为基础, 建立实验室定制化安全培训体系, 增强培训的专业性和可操作性。

1) 开发“危险源-风险-应对”三位一体培训内容。针对不同实验类型(如化学合成、生物实验、高温高压操作等), 编制专项安全手册, 明确实验过程中的关键风险点及应对措施。借助 VR/AR 技术及实战演练, 增强安全培训的实战性, 避免流于形式。

2) 推行“准入培训+定期强化”机制。所有进入实验室的人员必须通过本实验室危险源专项考核, 确保掌握相关安全规范; 每学期或每季度开

展针对性安全培训, 强化高风险实验操作的规范性。

3) 建立“培训-考核-授权”闭环管理。培训后需进行实操考核, 合格者方可获得相应实验操作的授权, 确保培训效果落地。

3.3 以智慧化技防为手段, 做好安全隐患排查和过程监管

随着全球信息技术的跨越式发展, 加强信息化技术支撑、推进实验室数字化建设是高校实验室提升安全管理水平和效率的重要手段^[13]。

实验室安全风险具有突发性、隐蔽性特点, 仅依赖人工巡查难以实现全天候监管。应结合物联网、AI 视觉识别、智能传感等技术, 逐步推进“智能监管体系”建设。

1) 环境监测。安装温湿度、挥发性有机物、氧气浓度等传感器, 实时监测实验室环境, 异常时自动报警并联动通风系统。

2) 设备状态监控。对高温设备、高压容器、离心机等加装运行状态传感器, 超温、超压、异常振动时自动停机并报警。

3) 危险行为识别。通过 AI 摄像头识别未佩戴防护装备、违规操作、闯入禁区等行为, 实时语音提醒并推送告警至管理人员。

4) 非工作时段智能巡检。利用红外感应和 AI 画面识别技术, 在夜间、节假日智能监管实验室, 检查是否发生烟雾、火焰等隐患, 减少管理盲区, 并在事故发生的前期, 及时发现风险并实现智能告警。

3.4 以立德树人为导向, 构建以人为本生命至上的实验室安全文化

大学生正处在人生观、世界观、价值观形成的关键时期。高校有责任增加安全知识的传授和促进其安全意识的建立, 将实验室安全文化建设作为高校立德树人工作的一部分, 持续推进和践行。

具体到实验室安全管理层面, 实验室负责人要将“以人为本, 生命至上”的安全文化理念融入日常科研和教学, 通过“组会常规讨论、突发事件复盘、可视化警示上墙”等措施, 推动师生由被动监管督促到主动自我管理的转变, 从强制规范变为日常行为习惯, 形成良性的实验室安全文化氛围, 从而降低实验室安全事故发生的可能性。

4 结束语

高校实验室安全是校园安全中的最重要的一环,是高等教育发展的基础和保障。它作为一项复杂的系统工程,需要高校各职能部门协同合作,坚持不懈地形成长效管理机制,防微杜渐,久久为功。在新时代的形势下,实验室层级的安全管理要从危险源识别、网格化责任管理和定制化安全教育培训、数智赋能全过程监管、实验室安全文化构建等方面入手,创新安全管理模式,努力做到本质安全,共同促进我国高校实验室安全高质量建设和发展。

参考文献

- [1] 彭华松,许歆瑶,刘闯,等.新工科背景下高校实验室安全教育的问题及对策[J].实验室研究与探索,2021,40(10):295-299.
- [2] 安宇,郭子萌,王彪,等.高校实验室事故致因分析与安全管理研究[J].安全,2022,43(8):34-39.
- [3] 黄开胜,艾德生,江轶,等.以科研的态度和方法来全面研究实验室安全:述评 Nature Chemistry 期刊发文《学术实验室安全研究的回顾与评论》[J].实验技术与管理,2020,37(1):3-9.
- [4] 董继业,马参国,傅贵,等.高校实验室安全事故行为原因分析及解决对策[J].实验技术与管理,2016,13(10):258-261.
- [5] 张焱,王晓艳,金星龙.基于层次分析法的涉化类专业实验室事故影响因素研究[J].天津理工大学学报,2023,39(2):47-50.
- [6] 阳富强,尹航,黄宗侯,等.基于fsQCA方法的高校实验室事故影响因素分析[J].实验技术与管理,2024,41(3):257-262.
- [7] 张东,聂百胜,王龙康.我国煤矿安全生产事故的致灾因素分析[J].中国安全生产科学技术,2013(5):136-140.
- [8] 傅贵,殷文韬,董继业.行为安全“2-4”模型及其在煤矿安全管理中的应用[J].煤炭学报,2013,38(7):1123-1129.
- [9] 韩杨,苗馨月,李海建,等.基于“2-4”模型对高校实验室不安全行为原因分析及预防[J].吉林化工学院学报,2023,40(2):27-31.
- [10] 付净,刘虹,刘辉,等.事故致因“2-4”模型在高校实验室事故分析中的应用[J].实验室研究与探索,2019,38(4):277-281.
- [11] 艾德生.高校实验室安全形势与任务[J].实验技术与管理,2025,42(1):1-10.
- [12] 中华人民共和国教育部.高等学校实验室安全规范[EB/OL].(2023-02-14)[2024-06-01].http://www.moe.gov.cn/srcsite/A16/moe_784/202302/t20230220_1045998.html.
- [13] 石磊,庄志洪,李博.基于“智慧实验室”的高校实验室信息化探究与实践[J].实验室研究与探索,2023,42(7):269-273.

编辑 钟晓