

高校环境实验室危险源的风险分级 与防范网络屏障的构建

雷灵琰, 白向玉*, 张洪建, 王丽萍

(中国矿业大学环境与测绘学院, 徐州 221116)

摘要: 高校环境实验室危险源的种类和危险特性多样, 危险源的风险分级与防范网络屏障构建对高校实验室危险源的管理具有较大的推进作用。文章采用系统工程的方法, 进行了环境实验室危险源的分类统计分析; 基于事故风险链理论、多层次综合评价法和墨菲定律, 构建了环境实验室危险源的风险分级指标体系和防范网络屏障。结果表明: (1) 实验室的危险源风险分为危险因素和危险单元风险两个层次, 危险因素和危险单元的风险分为极度危险、重度危险、显著危险、潜在危险和稍有危险五个等级。(2) 实验物质、工艺设备、环境、人员、安全管理构成实验事故风险链条, 事故发生是一个链条事件, 构建层层防御屏障大大降低事故的发生概率。构建基于实验项目的实验全员分工负责、物环人管环环相扣、危险单元全周期、全方位、分级化精准监管的防范网络屏障是实验室安全的强有力保证。

关键词: 实验室危险源; 危险单元; 事故风险链; 防范网络屏障

Risk classification and prevention network barrier construction of hazardous sources in university environmental laboratories

LEI Ling-Yan, BAI Xiang-Yu*, ZHANG Hong-Jian, WANG Li-Ping

(School of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

ABSTRACT: The types and characteristics of hazards in university environmental laboratories are diverse, and the risk classification and prevention network barrier construction of hazards have a significant promoting effect on the management of hazards in university laboratories. The article adopts the method of system engineering to classify and statistically analyze the hazards in environmental laboratories; Based on the theory of accident risk chain, multi-level comprehensive evaluation method, and Murphy's law, a risk classification index system and prevention network barrier for environmental laboratory hazards have been constructed. The results indicate that: (1) The hazards in the laboratory are divided into two levels: risk factors and risk units. The risks of risk factors and risk units are divided into five levels: extreme danger, severe danger, significant danger, potential danger, and slightly dangerous. (2) Experimental materials, process equipment, environment, personnel, and safety management constitute the risk chain of experimental accidents. The occurrence of accidents is a chain event, and is greatly reduced by building layers of defense barriers. Building a prevention network barrier based on experimental projects, with division of labor and responsibility among all experimental personnel, interlocking of material, environmental, human and management, grading and precise supervision of hazardous units throughout the entire cycle, in all aspects, is a strong guarantee for laboratory safety.

KEY WORDS: laboratory hazard; dangerous unit; accident risk chain; network barrier

基金项目: 江苏省高校实验室研究会重中之重项目(2023JSJG027); 中国矿业大学实验技术与开发项目(S2021Y003); 中国矿业大学教学学术重大课题(2022ZDKT05)

Fund: Jiangsu Provincial University Laboratory Research Association's Top Priority Project (2023JSJG027); China University of Mining and Technology's Experimental Technology Research and Development Project (S2021Y003); China University of Mining and Technology's Major Teaching and Academic Project (2022ZDKT05)

*通信作者: 白向玉, 博士, 高级实验师, 研究方向: 环境污染治理与实验室安全管理研究工作。E-mail: bxy-cumt@163.com

*Corresponding author: BAI Xiang-Yu, Ph.D, Senior Lab Master, School of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and technology, Xuzhou 221116, China. E-mail: bxy-cumt@163.com

0 引言

近年来,高校实验室事故不断发生,据统计,2001-2021年共发生214起^[1],累计造成13人死亡、114人受伤,造成不可避免的人员伤亡和财产损失,实验室安全成为社会密切关注的焦点。

高校实验室作为教学科研的实践平台,承担着实验教学、实习训练、科研创新、社会服务和人才培养等多项任务,服务范围广泛,项目数量大,更新速度快,危险源的种类和特性复杂多变。从系统风险理论的角度出发,全方位掌握危险源的危险特性,准确评估危险源的风险等级,建立精准的监管体系和防范屏障,是保障实验室安全的根本。

众学者从不同角度、采用不同的方法进行了高校实验室风险评估指标体系和管控方法的研究^[2],一些学者还结合专业特点进行了研究。实验室风险的影响因素多,评估指标体系受主观因素影响大,评估模型结果的应用范围有一定局限性,构建系统、全面、规范、简单、可行、通用性强的风险评估体系尤为必要。

高校环境实验室化学试剂多、实验系统体量大、管道连接复杂,实验测试使用高温、高压、高速等多种设备和乙炔、二氧化硫、氮气等各种气体,实验产生大量废弃物^[3]。环境实验室危险源的种类和危险特性多样,危险源的风险分级与防范屏障构建对高校实验室危险源的管理具有较大的推进作用。

1 环境实验室危险源的分类统计分析

基于实验室功能区划,采用系统工程的研究方法,分区、分室、分组、分项、分类对危险源数量和危险特性进行了统计分析。

1.1 实验项目和人员数量大、流动性强、开放周期长

我院环境实验室开设课程实验58项/年、学生创新实验约80项/年、科研项目约40项/年、大型仪器测试项目约1500项/年。本科生实验人员约150人/年,研究生实验人员约70人/年。实验室全年全天开放,每年更新一批实验人员和实验项目^[4]。庞大的实验项目和人员、全年无休的运行开放对实验室危险源

的管理提出极大的挑战。

1.2 化学试剂种类多、数量大、存期长、危险性多样

2022年,我院环境实验室存储化学试剂810种、3665瓶,其中普通化学试剂672种、2603瓶,危险化学试剂138种、1062瓶,分别占比17%和29%。易爆、易燃、氧化剂、毒害物和腐蚀品等危险化学品分别为18种、43种、28种、24种和25种。危险化学试剂量大且危险性多样^[5]。

易制爆和易制毒试剂受到严格管制,存储期限不超过半年。非管制类危险化学试剂和普通化学试剂由课题组管理,存储期限较长,存期<1年、1~3年、3~5年、>5年的试剂数量占比分别为25%、65%、8%、2%。长期存储的大量化学试剂导致实验室风险增加。

1.3 气体种类多、用量大、危险性大

2022年,我院环境实验室存储压缩和液化气体共10类、890L。其中,易燃气体乙炔和甲烷分别存储40L和10L,助燃气体氧气160L,低温液氮30L,毒害气体二氧化硫和一氧化氮分别为20L和10L,窒息气体氮气、氦气、氩气和二氧化碳分别为400L、80L、120L和20L。易燃、助燃、低温、毒害类气体共6种,体积占比30.33%,而窒息类气体共4种,体积占比69.67%。这些有害压缩气体是实验室安全的重要危险源之一^[6]。

2 环境实验室危险源的风险分级

危险物质、工艺设备在实验过程中客观存在,是实验室安全事故的固有危险源。固有危险源具有潜在的危险性,在一定的触发因素作用下,意外释放或泄漏有害物质或能量,转变为安全事故。实验环境不合理,实验人员操作不正确,现场监管乏力,都可能引发安全事故,安全事故是固有危险源和触发因素综合作用的结果。实验环境是固有危险源存在的场所条件,实验人员的行为作用于固有危险源和实验环境,安全管理监督固有危险源、实验环境和实验人员的状况^[7]。危险物质、工艺设备、实验环境、人员、安全管理相连构成安全事故风险链,如图1所示,实验室安全事故的风险取决于风险链条的每个环节。

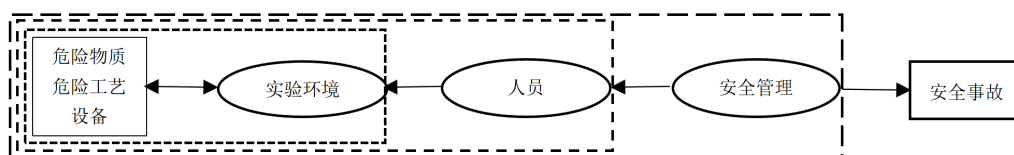


图1 实验安全事故风险链

Fig.1 Experimental Safety Accident Risk Chain

2.1 危险因素的风险分级

实验物质风险由其危险特性(包括易燃性和毒性)、数量和质量决定。根据规范,这些特性分为五个等级:极度危险至轻微危险。实验室安全检查表对易燃易爆物数量有具体规定,设备

设计负荷和工作剂量也是评估因素,物质数量风险以标量倍数分级,而物质质量风险则根据存放条件和质保时效分级。

实验设备风险因类型和工况而异,主要受功能危险特性和工艺危险特性影响,以及材质和安全防护功能状况。设备风险

分级依据《压力容器安全技术监察规程》和《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》,而动能、热能和电气设备则根据功能特征参数风险分级。工艺危险性分为反应和状态危险性,分别评估风险^[8]。材质状况根据服务时效和完好度分级,安全防护功能则依据配置和自动化程度。

实验环境风险涉及建筑、布局、设施;人员风险关乎安全意识、知识和技能;安全管理风险包括责任体系、制度、培训和执行^[9]。这些因素共同构成复杂风险,通过达标率等指标评估。

2.2 危险单元的风险分级

危险因素相互联系、相互作用组成危险单元,危险单元具有独立的功能和明显的界线。单因素危险单元的评估方法比较简单,采用单因素指标分级评估方法。多因素复合系统危险单

元的风险受多个因素影响,多因素相互关联、处于不同的层次,具有多目标特点,需采用多指标综合评估方法^[10-11]。

实验室危险单元由危险物质、工艺设备、实验环境、人员 and 安全管理多因素组成,危险物质和工艺设备是危险单元的固有风险,实验环境、人员 and 安全管理对固有风险具有修正作用,固有风险和修正作用形成综合风险,危险单元风险分为固有风险 RI 和综合风险 RC。

基于大量实验室风险评估指标体系的研究基础,结合环境实验室的具体实际情况和管理目标要求,构建了环境实验室危险单元固有风险和综合风险评估的指标体系,用层次分析法确定了各指标权重,确定了危险因素风险水平和危险单元风险等级赋值,如表 1。

表 1 环境实验室危险单元风险评估指标体系与层次权重

Table 1 Risk assessment index system and hierarchical weights for hazardous units in environmental laboratories

危险单元类别	准则层因素	固有风险权重	综合风险权重	指标层因素	准则层权重	
固有风险	危险物质	1	1/2	物质危险特性	1/2	
				物质数量	1/3	
				物质质量	1/6	
固有风险	危险设备工艺	1	1/2	设备功能危险性	1/2	
				工艺反应危险性		
				工艺状态危险性	1/3	
				设备材质状况		
综合风险	实验环境	0	1/6	安全防护装置	1/6	
				建筑结构 with 材料、	1/3	
				空间布局 with 人员密度、 空气质量和基础、应急设施	1/3	
	修正作用	实验人员	0	1/6	安全意识和责任感	1/6
					理论知识和操作技能	1/2
					风险评估与应急能力	1/3
修正作用	安全管理	0	1/6	责任体系、管理制度和操作规程,	1/6	
				实验准入培训与审查,	1/3	
				实验过程检查、隐患整改和废弃物处置	1/2	

设备功能危险性、工艺反应危险性、工艺状态危险性根据工艺设备所处状态选取最大值进行风险评估。

危险单元风险水平等级: $R \geq 12$ 为极度危险, $12 > R \geq 8$ 为高度危险, $8 > R \geq 4$ 为显著危险, $4 > R \geq 2$ 为潜在危险, $2 > R \geq 1$ 为轻微危险。

通过评估危险单元中物质、设备的种类和风险因素水平,计算得到固有风险 RI 和综合风险 RC。以管制试剂库房为例,其 RI 为 8.2, RC 为 4.5,表明固有风险高度危险,综合风险显著危险^[12]。环境和安全管理措施有效降低了风险。分析风险水平可识别薄弱环节并采取改进措施,以降低风险并确保安全。

3 环境实验室危险源的防范网络屏障构建

实验项目生命周期中风险多样,墨菲定律指出长期存在风险将导致安全事故。事故发生是链条事件,通过增设防范措施可降低发生概率和后果。建立全周期、全方位、分级化的精准监管体系是确保实验室安全的有力措施。

3.1 实验前,强化全员分工负责、开展安全技能培训

人员是实验项目的主体,不同人员在实验过程中担任不同

的角色,承担不同的责任,人员的安全责任意识和基本技能素质对实验成败至关重要。开展实验前,实验人员、实验负责人、管理人员、管理负责人必须完成学校和学院组织的责任体系、管理制度、操作流程、实验基本理论与技能、危险源风险评估与事故防范责任意识 and 能力的基础培训教育,达到考核要求后,方可开启实验项目。

3.2 严把实验准入关口,危险源风险引入最小化

实验准备是实验项目开始的关键步骤。高校实验项目众多且流动性大,实验人员需在进入实验室前完成《实验项目物料预算表》和《危险源风险评估与防范措施落实情况表》,精确计算物料和危险源数量,评估风险等级^[13]。对于极度和重度危险源,应寻求替代方案,否则需根据风险等级配备监测预警 and 防护设备。实验人员、负责人 and 管理人员需接受危险源岗位的

理论、操作和应急培训,做好个人防护。实验室环境需实施监测、预警和应急防护措施,以降低危险源风险,确保实验安全准入,并从源头上控制危险源风险。

3.3 严控实验过程,危险源全程精准监管到位

在实验运行过程中,危险源必须全程责任到人、精准监管到位。在实验室入口处,必须张贴《危险源总体分布图》,准确标明危险源名称、数量和风险等级^[14]。在室内危险单元上,必须悬挂《危险单元风险说明卡》,标明危险因素、危险特性、应急防护措施、责任人和联系电话。依据危险源风险等级、管理制度和岗位责任,实验人员、实验负责人、管理人员、管理负责人必须分工负责,严格完成危险源的保管与使用记录、人、物、防的自查、巡查和专项检查记录、隐患整改与复核记录、废弃物产生与处置记录的全生命周期跟踪监管,确保及时发现安全隐患、及时整改到位,杜绝任何安全事故隐患的存在。

3.4 严审收尾交接,确保实验环境可持续发展

实验项目结束后,必然产生一批闲置物资和废弃物。在撤出实验室前,实验人员必须完成《实验物料交接表》和《废弃物处置申请表》,完成物料交接和废弃物处置,严禁物料堆积侵占空间、废弃物不安全存放制造安全隐患,确保实验室内物料的进出动态平衡和实验项目的交替更新,维持实验环境正常良性运转^[15]。

4 展望

危险因素分级的可靠程度与危险因素的特征提取和指标量化方法紧密相关,实验室的危险因素种类多样,危险因素分类分级的细则数量不足,危险因素风险分级体系尚需进一步研究完善。随着新科技和管理水平的发展变化,危险单元风险分级体系也需同步调整。实验室危险因素和危险单元的风险分级体系是一个动态开放的评价指标体系。

实验室危险因素多、分布范围广,构建基于物联网的危险单元的全周期、全方位、层次化精准智能管控系统成为必要。

实验室安全工作包括安全教育、物料预算、危险源风险评估、应急防控配置、准入审查、实验过程检查、安全隐患整改与复核、物料交接和废弃物处置等一系列内容,工作量大,工作周期长,涉及人员多。将安全工作任务制度化、流程化和程序化,构建基于物联网的安全工作智能化管理系统,是高校实验室安全工作的未来发展趋势,并将引领社会各领域的安全工作进入智能化发展时代。

参考文献

- [1] 李祥春,刘嵘,崔哲.安全工程专业实验室风险定量分析[J].实验室研究与探索,2019,38(02):272-277.
[2] 吴悠悠,胡立嵩,王帅,等.基于DEMATEL/ISM的安全工

程实验室风险影响因素分析[J].武汉工程大学学报,2022,44(05):585-589.

- [3] 徐超,李丹,王凯,等.基于AHP分析法的高校安全工程专业实验室风险评价研究[J].实验技术与管理,2022,39(05):211-216.
[4] 刘音,胡文静.高校电子实验室风险评价体系构建与分析[J].实验技术与管理,2020,37(06):281-284.
[5] 刘义,刘尚志,赵东风,等.高校化工类实验室风险辨识评价方法研究[J].实验技术与管理,2020,37(12):288-291.
[6] 刘音,石汶夕.基于鱼刺图与GAHP的高校煤化工实验室风险评价[J].实验室研究与探索,2022,41(07):302-306.
[7] 马庆,赵雨霄,白亮,等.优化的LEC法在高校实验室安全风险评估中的应用[J].实验技术与管理,2022,39(11):220-224.
[8] 杨念哥,陈硕琛,邓义芳.基于物元熵权模型的实验项目的实验室风险评价[J].实验室研究与探索,2022,41(12):314-318.
[9] 杨巍,程慧高,云霞.工程实验室安全风险评估与控制模型研究[J].工业安全与环保,2019,45(12):66-69.
[10] 屈泳,赵洋,阮小军.理科实验室安全风险排查与监控体系的研究[J].实验技术与管理,2020,37(11):290-293.
[11] 贾海江,李培省,赵明,等.基于三类危险源理论的高校科研实验室风险分级管控方法研究[J].实验室研究与探索,2022,41(10):322-327.
[12] 李祥春,刘嵘,崔哲.安全工程专业实验室风险定量分析[J].实验室研究与探索,2019,38(02):272-277.
[13] 吴悠悠,胡立嵩,王帅,等.基于DEMATEL/ISM的安全工程实验室风险影响因素分析[J].武汉工程大学学报,2022,44(05):585-589.
[14] 徐超,李丹,王凯,等.基于AHP分析法的高校安全工程专业实验室风险评价研究[J].实验技术与管理,2022,39(05):211-216.
[15] 刘音,胡文静.高校电子实验室风险评价体系构建与分析[J].实验技术与管理,2020,37(06):281-284.

作者简介



雷灵琰,博士,讲师,研究方向:环境污染治理与实验室安全管理研究工作。



白向玉,博士,高级实验师,研究方向:环境污染治理与实验室安全管理研究工作。