

基于 RAMP 安全原则的有机化学实验安全教育探索

赖榕*, 朱可佳, 李厚金, 许先芳

中山大学化学学院, 广州 510275

摘要: 安全教育是实验教学中的一个重要内容, 本文立足 RAMP 安全原则, 编制有机化学实验安全讲义, 将安全教育有效整合到有机化学实验教学中, 锻炼学生正确识别评估教学实验项目中的具体危险、合理减控风险及应急处置能力, 有利于提高学生的安全意识和防控能力, 加强实验教学全过程管理, 并有效保障了实验室安全。

关键词: 有机化学; 实验教学; 安全意识; 风险评估

中图分类号: G64; O6; G4

Research on Safety Education of Organic Chemistry Laboratory Based on RAMP Safety Principle

Rong Lai*, Kejia Zhu, Houjin Li, Xianfang Xu

School of Chemistry, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, P. R. China.

Abstract: Safety education is an important part of laboratory teaching. This paper compiles safety handouts of organic chemistry laboratory based on RAMP safety, and effectively integrates the safety education into the teaching plan of organic chemistry laboratory, trains the students to correctly identify and evaluate the specific risks in the experimental project, reasonably reduce and control the risks and prepare to respond to emergency. That is conducive to improving the students' safety consciousness, and prevention and control ability, strengthening the whole process management of laboratory teaching, and effectively ensuring the laboratory safety.

Key Words: Organic chemistry; Laboratory teaching; Safety consciousness; Risk assessment

2019年1月《教育部办公厅关于进一步加强高校教学实验室安全检查工作的通知(教高厅[2019]1号)》强调了广大师生的实验室安全意识和安全防护能力是教学实验室安全工作的关键, 尤其是应该强化本科生的规范动作以预防后续学习、工作中的常规性错误。

基础有机化学实验是化学类专业本科生的必修课程, 与各专业联系非常紧密, 是后续各专业实验课程的基础。有机化学实验与水、电, 易燃易爆、有毒有害药品接触密切, 实验装置组装较繁琐, 操作空间较紧张, 操作常涉及加压、减压, 实验室安全风险高。而且基础有机化学实验开课对象多为低年级学生, 因此, 在有机化学实验教学中重视安全教育, 规范学生实验基本操作, 培养学生自主安全意识、良好的实验习惯以及安全防控能力是非常必要的, 这将有利于学生日后成为岗位安全的践行者、引领者和终身受益者。

收稿: 2020-01-26; 录用: 2020-02-19; 网络发表: 2020-03-09

*通讯作者, Email: lairong@mail.sysu.edu.cn

基金资助: 中山大学本科教学质量工程项目(31000-18842502)

1 有机化学实验安全教育现状分析

安全教育是化学实验教学中的一个重要内容,学校和学院都高度重视实验室安全教育和安全意识培养,从规章制度、配套硬件、培训演练和宣传教育等多方面入手,已经形成了卓有成效的实验室安全管理体系。近年来,我校基础有机化学实验课程在实验教学内容、实验教学操作指导的统一规范性、实验安全教育、实验室管理的科学与智能化等全方面进行改革,教学质量明显提高^[1,2]。学院面向新生开设了实验室安全教育独立课程,定期开展实验室安全知识讲座、实验室安全专业演练、消防应急疏散演练、应急医疗急救知识讲座与演练等安全教育培训,并发起和组织了“实验室安全知识竞赛”活动。随着通风设备、消防等安全硬件设施的改造完善,同时有机化学实验室也加强了制度建设、制度上墙、安全标识制作、规范操作手册和开通“丰盛堂基础化学实验室”微信公众号发布实验室安全相关信息^[3]等安全文化建设,进一步加强实验室安全环保教育和宣传,营造安全的实验室环境和文化。

多方的努力提高了学生的基础安全知识,增强了学生的安全意识和自我保护意识,但我们往往从实验教学过程观察到,学生的安全知识学习意识增强了,但危机意识和防范意识还较弱;学生的自我保护意识增强了,但仍有部分学生实验时存在畏惧心理;学生的安全设施使用能力增强,但风险识别能力、风险防范能力却没相应增强。基础化学实验教学小组 2017 年对中山大学化学类专业新生的实验室安全环保意识开展的问卷调查结果显示,大部分学生的实验室安全意识还是比较薄弱^[4]。

有机化学实验室相对其他基础化学实验室危险性高,又面向低年级学生,这些学生前期学习了普通化学实验,虽获得了一定的安全知识,但对有机化学实验安全性认知还需进一步提高,而目前的实验教学重视培养学生的创新能力,实验内容安排紧凑,学时有限。而学生所做的课前预习很大部分倾向实验原理学习、实验步骤了解、实验技巧学习、相关仪器设备使用方法以及更多的知识拓展。在实验课堂中,指导教师在课前针对实验安全注意事项进行提醒和警告,课堂中针对个别学生反复纠错。然而,在实验教学课堂中,由于学生个体差异性大,仍有少部分学生暴露出各种实验安全隐患,如学生搭建反应装置前不做计划,仪器用到时才满柜子查找,也没检查就直接取用,如学生拿着称取好的试剂满实验室游走咨询,再如反应时学生整个身体探入通风橱内操作观察等等,这些现象都表明学生预习中往往只是了解了实验步骤,对安全与规范操作的重视不足,没有深入分析实验中可能出现的问题和潜在危险,也导致学生缺乏自主性的安全防范意识。

因此,本科生的安全教育重心应从知识的单向传授向能力培养转变^[5],教育策略应从死守严防教育向积极引导分析并主动防控教育转变,我们应在实验教学中引导学生有针对性地对实验项目进行危险因素分析,思考危险规避办法,设计安全防护方案以及有效实施。

2 基于 RAMP 原则的有机化学实验讲义编写

2.1 实验室安全的 RAMP 原则概述

实验室安全的 RAMP 原则^[6]包含四个部分内容,其中 R 代表 Recognize hazards 识别危险,即识别实验室中可能引发有害或负面效应的各种物质、情景及危害;A 代表 Assess risks of hazards 评估风险,即要求仔细考虑实验将涉及的操作与将接触的化学品,考虑如何将风险最小化;M 代表 Minimize hazards 减控危险,强调完善安全管理体系,强调严格遵守操作规程和全程做好实验防护措施;P 代表 Prepare for emergencies 应急准备,即使完成了风险评估和相应的防范措施,实验事故仍然可能发生,因此要准备突发事件的处理方案。基于实验室安全的 RAMP 原则,要保障实验安全必须要正确识别风险,准确评价风险,才能有效防控风险,全面增强安全工作的预见性、防范性和科学性。而关于风险识别,美国化学学会实验室安全委员会风险识别与评价特别小组提出的“实验室风险识别与评价”指南^[7]推荐了五种风险研究方法:① 化学安全级别法:即化学品职业危害分类控制,分析实验室里可能发生的化学危险并确定化学安全级别,建立与每一级别相匹配的控制方法;② 工作危险分析法:记录化学实验所涉及的每个步骤,逐项应对;③ 假设分析法:假设化学实验

可能发生的一系列问题,找出可能存在的风险点,提出应对措施;④ 清单分析法:根据以往该项目的实验经验,列明风险点检查清单,一一对应排查,采取有针对性的预防措施;⑤ 标准操作程序的结构发展:严格规范化学实验操作程序,明确风险所在。

2.2 编制实验安全讲义(以“己二酸的制备”实验为例)

我校有机化学实验课程为 144 学时,4 学分,开设了 21 个实验。课程中大多是综合性较高的实验项目,具体实验项目区别较大,但相同的是都选择了多步合成,实验难度较大,实验课时长达 8 小时。要求学生在 8 小时中都保持高度紧张是比较难的,实际上学生往往随着时间延长而懈怠甚至放松警惕,此时,风险将增大,安全难以保障。实验教学小组根据课程的实际需求,围绕实验安全的 RAMP 原则,借鉴清单分析法和工作危险分析法对教学实验项目进行风险识别评价,建立了相应的实验安全讲义,帮助学生熟知实验的程序,正确识别风险,准确评价风险,引导学生差异化应对不同的实验项目和实验的各个环节,合理减控实验可能出现的危险隐患。如学生在遵守有关使用个人防护设备(PPE)规则时,能正确判断什么时候能偶尔摘下护目镜,什么情况下通风橱推拉窗一定要拉到规定低位,什么情况下要戴手套等。

“己二酸的制备”是有机化学实验长期开设的教学实验^[8],该实验涉及的实验仪器设备及操作步骤比较多,涉及到剧烈放热反应和有毒气体生成,有一定实验风险,如果课前没有很好进行思考分析,不但无法顺利完成实验,还容易出现危险。我们以此次实验为例,探讨如何编写安全讲义,引导学生进行实验危害识别,评估风险,风险减控及制定应急措施,从而提高学生的自主安全意识和防控能力。

每项实验项目安全讲义主要涵盖实验风险检查表和实验危险性分析表两项内容。其中实验风险筛查清单的设计考虑了目前有机化学实验室具体情况,适用于目前开设的所有教学实验。清单列举了教学实验项目中潜在的化学性、物理性或行为性危险并确定针对其实施相应的预防控制措施将这些风险进行有效的减轻和消除。通读检查表能清晰了解当次实验的风险所在及应对措施,并根据实验风险等级进行分级管理,以便实验室的管理侧重点和教师的实验教学方法手段适时调整,也使学生在实验过程中抓住重点,有的放矢,从而有效地消除实验安全隐患。

实验风险检查表包含六个栏目,其中栏目“危害的严重性”中的子栏目“(CV)危害值”从人员安全、工作绩效、财产损失和实验室声誉四个方面考虑设定为:无风险 = 1;小风险 = 2;中风险 = 3;高风险 = 4;栏目“事件发生可能性”中的子栏目“(OV)事发值”根据事件概率设定为:几乎不 = 1;可能发生 = 2;较大可能 = 3;必然发生 = 4;栏目“风险等级(CV*OV)”计算公式为:风险等级(RR) = 危害值(CV) × 事件概率(OV),计算风险等级并对照风险等级矩阵可使师生清楚认识到风险程度的大小,以便正确调整实验态度与防护措施。风险等级矩阵如表 1 所示。检查项包括四个方面的内容共 17 条问题,其中第一项“化学品安全与承受风险评估”包括 5 条:① 化学实验操作是否存在起火、爆炸或者其他不受控制的反应?② 是否存在接触腐蚀性物质的风险?③ 是否存在接触急性毒性物质的风险?④ 是否存在易燃易爆物质?⑤ 是否存在呼吸致敏物、诱变物、致癌物、生殖毒素、特定目标器官毒性物质以及吸入性危害物质?⑥ 是否有单独回收的废料?第二项“个人防护服、防护器及工程控制”包括 3 条:① 是否存在喷洒性物质进入眼睛和面部的危险?② 是否存在皮肤和手部的危险?③ 是否会接触锋利物质?第三项“器械及物理危害承受风险评估”包括 4 条:① 是否会接触电气危害?② 是否部分操作流程在高压或低压下进行?③ 实验人员是否需要搬起或操作重物?④ 是否会接触具有捏碎或压破人体部位风险的器械?第四项“泄露及应急预案”包括 4 条:① 操作流程有无火灾爆炸风险?② 在操作中是否有部分操作无人监管?③ 对于一定性质和规模的危害,是否存在足够的、可用的疏散设施?④ 通道空间是否清除障碍物?地面是否状况良好?实验风险检查表的设计模板如表 2,由于篇幅关系,本文只列举了“己二酸的制备”实验的前 3 条检查项。

表 1 风险等级矩阵

事发值(OV)	危害值(CV)			
	CV = 1	CV = 2	CV = 3	CV = 4
OV = 4	RR = 4 低	RR = 8 高	RR = 12 危险的	RR = 16 危险的
OV = 3	RR = 3 低	RR = 6 中	RR = 9 高	RR = 12 危险的
OV = 2	RR = 4 低	RR = 4 低	RR = 6 中	RR = 8 高
OV = 1	RR = 1 低	RR = 2 低	RR = 3 低	RR = 4 低

表 2 “己二酸制备”实验风险检查表部分内容

实验风险评估检查表	是/否	接触到这 种危害的 后果	危害的严重性		事件发生可能性		风险等级 (CV*OV)
			预期危害 有哪些？	(CV)危害值 (1,2,3,4)	现有控制措施	(OV)事发值 (1,2,3,4)	
化学品安全与承受风险评估							
化学实验操作流程是否存在起火、爆炸或者其他不受控制的反应？	是	人员伤亡/ 设备损坏/ 中毒	爆炸/起火 /NO ₂ 泄露	4	严格控制反应速 度/通风橱双面 贴防爆膜	2	8
是否存在接触腐蚀性物质的风险？	是	人员伤亡	皮肤烧伤	3	制定强酸使用安 全操作规程	2	6
是否存在接触急性毒性物质的风险？	否	/	/	/	/	/	/

实验危险性分析是以分析实验者、实验任务、所需工具及实验环境之间的相互关系为重点,细化实验操作流程所面临的风险并给出针对性的措施,即将实验危险性分析嵌入实验步骤中,记录实验涉及的每一个工作步骤和风险,逐项应对,这就很好地将安全问题有效地整合到实验方案中。

实验危险性分析范围太宽泛、太笼统或者范围太窄、太局限都会导致学生无法有效利用实验危险性分析这个工具,从而忽视可能的有效措施和必要的控制措施。如我们发现学生在分析当日实验的同时,只考虑了实验任务的过程,没有考虑到实验前和实验后的事项,如实验前提前 15 分钟来检查实验柜桶,清点评估自己要用到的仪器设备是否正常并排列整齐备用;如实验后要正确回收废弃试剂,拆卸反应装置,清洗所有实验器具,整理清洁公共桌面与共享仪器设备,保证所有物品都收起,实验室干净整洁,共享仪器设备状况良好等。

“己二酸的制备”实验过程比较长,我们要指导学生将这一过程分为多个步骤,确定每个步骤的风险,学生通常倾向于合并或跳过步骤,例如“在三颈烧瓶中加入 8 mL 水和 16 mL 浓硝酸,混合均匀,另将 5.3 g 环己醇加入滴液漏斗中”这几个步骤常合并作为加料步骤,忽略了量取腐蚀性强酸(浓硝酸)这个危险步骤的分析,也忽略了警惕量取浓硝酸和环己醇不可用同一量具这个问题,更可能没考虑到环己醇的粘稠性,宜采用称取法在干燥的滴液漏斗里直接称取(漏斗务必提前检漏并关闭)。因此,我们要将实验合理分解为多个步骤,并对每个步骤都详细分析,识别其危害,找出安全防控方式。

实验危害分析表设计模板如表 3 所示,其中应急预案包括锐器割伤、皮肤腐蚀或刺激、烫伤、NO₂ 泄露、爆炸等几个方面的内容。由于篇幅有限,只列举了其中几个关键步骤的分析。

表3 “己二酸制备”实验危害分析表的部分内容

实验危害分析		(阅读整个实验安全分析文件并在实验前签名确认)
实验项目：己二酸的制备(利用硝酸氧化环己醇制备己二酸，并进行红外光谱测定)		
需要的设备、试剂及仪器：	试剂：浓硝酸、环己醇、5%氢氧化钠	
	仪器：搅拌器、搅拌子、通风橱、三颈烧瓶、温度计、滴液漏斗、回流冷凝管、气体吸收装置、红外光谱仪	
	必需的个人防护设备：实验服、丁腈手套、护目镜	
实验任务和步骤(按顺序描述)	每个任务/步骤中确定存在的危险	每一步实验步骤的控制方法/安全章程
步骤1-4 略		
步骤5 加热搅拌至三颈烧瓶中硝酸的温度升到60 °C	● 加热器烫伤人、电线和冷凝水管 ● 加热温度过高	1) 确认加热器面板远离电线和冷凝水管 2) 确认冷凝水管已接紧且水流通畅 3) 确保温度计正常，密切注意温度计并严格控制反应温度 4) 在通风橱操作(反应中将通风橱推拉窗尽量拉低，并在玻璃外操作) 5) 佩戴护目镜
步骤6 从滴液漏斗中滴加5-6滴环己醇	● 放热反应 ● 剧烈反应 ● 有毒气产生	同上1)-5)步 6) 环己醇严格按量滴加。
步骤7 以约每3 s一滴的速度小心滴加，在整个反应过程中控制反应温度在85-90 °C，反应物处在微沸状态	同上	同上1)-5)步 6) 严格控制环己醇滴加速度 7) 注意反应装置不要漏气，也不能装成密闭系统。
步骤8-20 略		
危险清单：		
1. 实验者是否会接触到化合物？化合物是否有危险性？是[确认已阅读所有试剂MSDS (Material Safety Data Sheet)，包括产物]		
2. 实验者是否会滑倒摔跤？会不会伤害别人？是[保持实验柜门关闭，过道畅通，地面干燥干净，谨慎慢行，尤其拿着试剂走动时]		
3. 实验者是否会受到伤害？是，如果控制不当，反应将非常剧烈且可能出现事故，反应有NO ₂ 产生[严格遵守实验标准操作规程SOPs (Standard Operating Procedures)]		
指导教师或实验员意见：反应为强烈放热反应，实验必须严格控制环己醇的滴加速度，绝不能将环己醇一次性加入或大量加入，环己醇的滴加速度以保持反应处于沸腾状态为宜，如果环己醇滴加速度太快，反应将非常剧烈且可能出现事故，反应大量放热引起爆炸，如果反应过于缓慢，如不沸腾，则也应该停止滴加环己醇，待先加入的环己醇全部作用后再继续滴加，否则会造成未反应的环己醇积累过多，一旦反应引发将会带来巨大的危险；全过程在通风橱里进行，将通风橱的推拉窗尽量拉低，并在通风橱外操作；要防范浓硝酸和NO ₂ 危害		
应急预案：(略)		
实验者签名：	实验室/班级：	实验时间：

清单检查法既有一目了然的优点,也有其局限的缺点:清单只是提出了一系列明确“问题”的“有限工具”,学生只能大致了解到危害种类、程度和风险等级,初步了解控制措施,但对具体问题、具体过程没能深入分析。实验危险性分析表内容丰富,将危害分析嵌入实验步骤中,记录实验涉及的每一个工作步骤和风险,逐项应对,这就很好地将安全问题有效地整合到实验方案中。两份检查表优势互补,利于查缺补漏。安全讲义是动态的,需要定期梳理审查当前工作与条件,并结合学生的安全实验报告,利用实验员工作组会讨论新发现的危险隐患,集思广益提出消除或控制这些风险的建议,修订讲义。

2.3 以安全讲义为主线,贯穿学生实验前、中、后全过程

开学伊始,我们把同一个实验室的学生以相邻实验位置为原则分为几个安全小组,4-6人一组,组内学生由于实验位置的缘故,相互关注与影响都较大,也容易发生互相伤害事件,因此大家共同讨论、互相监督是非常必要也是非常有效的。

课前,安全讲义将在实验前发送给学生作为课前预习的一部分,引导学生思考实验中的每一步骤,分析每一个可能存在的危害因素,研究其规避方法,将教学实验发生事故的风险控制到最小。讲义内容是开放性的,小组内同学可以通过QQ群、微信群等网络渠道进行讨论并共交一份电子版的安全预习报告,在安全讲义内容上增删小组的见解。

课堂上,组内成员互相督促,确保大家佩戴个人防护设备,确保通风橱推拉窗处于正确高度,确保试剂取用后盖好盖子等等,实验结束后,小组也作为值日小组,确保每个成员的所有物品及时清理收起,确保实验室公共卫生及共享仪器设备复原。

实验课后,要求安全小组在安全实验预习报告基础上增加一项课后反思,讨论当日实验安全情况,包括自己的执行情况,安全小组内同学的好现象和存在问题以及自己发现的新问题。

这种实验课前预习、课中督查、课后反思的引导性的安全教育方案促使学生在实验过程中建立自主安全意识,也锻炼学生在实验安全的基础上更深入地思考实验内容,思考安全前提下改革实验某些变量使实验更安全更环保。有安全小组就通过安全问题思考后提出用另一种更安全的化学试剂或方法替代现有方案的提议:在扁桃酸的制备、呋喃甲醛和呋喃甲酸的制备和植物生长剂2,4-二氯苯氧乙酸的制备等三个实验中使用更环保的试剂替代无水乙醚作为萃取试剂,而教学小组经过反复实践讨论后也确定了绿色环保的新方案:将无水乙醚更换成乙酸乙酯。

3 结语

有机化学实验安全教育工作既要注重基础安全知识的传授、安全意识的培养,更要重视安全防护能力的培养。安全教育的方式除了强化培训力度、建立准入制度、增强宣传力度,更重要的是要将安全教育有机融合在实验教学中,让学生在实验教学中进行识别风险、评价风险、减控风险及应急处置等环节的反复实践练习,这种锻炼不但提高了学生安全意识和防控能力,更有力保证了有机化学实验室的安全。

参 考 文 献

- [1] 李厚金, 赖璐, 朱可佳, 张利, 陈六平. 大学化学, 2017, 32 (4), 21.
- [2] 李厚金, 陈六平. 大学化学, 2018, 33 (1), 7.
- [3] 赖璐, 郑赛利, 王周, 彭敏, 朱可佳, 李莲云, 李晓洁, 于志广, 许先芳, 陈六平. 大学化学, 2017, 32 (3), 43.

-
- [4] 王周, 赖榕, 彭敏, 郑赛利, 李莲云, 朱可佳, 许先芳, 陈六平, 石建新. 大学化学, **2018**, 33 (10), 39.
- [5] 李伯平. 实验室研究与探索, **2019**, 38 (9), 161.
- [6] Robert, H. H., Jr.; Finster, D. C. *Laboratory Safety for Chemistry Students*; Wiley: New Jersey, 2010.
- [7] American Chemical Society. Identifying and evaluating hazards in Research Laboratories. [2013-09-04].
<https://cen.acs.org/content/dam/cen/static/pdfs/ACSHazardAnalysis20130904.pdf>.
- [8] 李厚金, 石建新, 邹小勇. 基础化学实验. 第2版. 北京: 科学出版社, 2015.