

化工安全方向虚拟仿真实验的设计与应用

魏丹, 赵声萍

(南京工业大学 安全科学与工程学院, 江苏 南京 211816)

摘要: 为推动化工安全人才培养体系实践环节改革, 解决化工安全方向实验高危险性、复杂性、耗时性及高成本致线下实验难以开展的难题, 应用虚拟仿真技术开展化工安全实验教学设计与实践。以合成反应热危险评估实验为对象, 通过虚拟仿真技术还原物质热危险性测试、反应过程热危险性测试、实验数据处理、热危险性评估等关键环节, 一站式解决参数如何测、参数如何算、参数如何用的实验教学关键问题。成功应用于化工、安全等相关专业学生的工程能力培养, 并面向化工企业开展从业人员安全职业技能提升培训服务。合成反应热危险性评估虚拟仿真实验进一步丰富了化工安全教学培训资源, 可支撑化工安全复合型人才培养质量提升。

关键词: 化工安全; 虚拟仿真; 反应热危险评估; 实验教学

中图分类号: G642

Design and application of virtual simulation in chemical safety experimental

WEI Dan, ZHAO Sheng-ping

(College of Safety Science and Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing Jiangsu 211816, China)

Abstract: As most experiment was hazardous, complicated, time-consuming and costly to conduct the thermal runaway hazard evaluation experiment of chemical process, making it hard to teach offline labs. The virtual simulation technology was applied to online experiment in chemical safety, which

also can promote the reform of the practical part of chemical-safety engineering training system. Evaluating thermal runaway hazard of chemical process is critical to prevent accident caused by thermal runaway. There is an urgent need for professionals in chemical industry, who can conduct assessment of thermal runaway hazard. Practical training for college students on thermal hazard evaluation should be conducted. Thus we construct online experiment for assessing thermal runaway hazard of chemical process. Critical parts of thermal hazard evaluation were reappeared, including calorimetric test of materials, calorimetric test of reaction, data analysis, and thermal hazard evaluation. The experiment contains five modules, preparation for experiment, test of thermal hazard, thermal hazard evaluation and optimization of chemical process, and expand. Test, data analysis and application part were connected through virtual simulation. The virtual experiment has been used for students majoring in chemical engineering, safety engineering and so on. And it also was used as a training course for employees of chemical enterprises. The application of virtual simulation enriched the teaching resources in chemical safety. And it was useful in improving the competence of chemical safety engineers.

Key words: chemical process safety; virtual simulation; thermal runaway hazard evaluation; experiment teaching

为夯实化工安全发展的人才保障，全面推动化工行业高质量发展，国家相关部门发布《关于全面加强危险化学品安全生产工作的意见》等多个文件^[1-4]明确指出，要持续推进化工安全高质量复合型人才培养，构建线上线下融合的教学培训体系，实施全覆盖高质量的安全教育培训。因此开设化工、安全等相关专业的院校都积极探索化工安全复合型人才培养模式与课程体系。如中国石油大学韩丰磊等^[5]探索建立了化工安全方向复合型工程硕士的教育模式，华南理工大学严宗诚等^[6]探索建立了将工程教育与化工安全教育融合的培养体系，大连理工大学叶莉莉等^[7]依托工程教育专业认证探索了化工安全高层次人才培养的实践

路径，山东科技大学田文德等^[8]提出依托虚拟仿真的学科竞赛有助于促进化工安全人才培养，南京工业大学钱剑安等^[9]探索构建了互联网+应用型化工安全人才培养体系，并指出可通过虚拟仿真技术开展试验教学改革。因为化工安全方向实验多具有高风险的本质属性，虚拟仿真技术可有效化解实验高风险、不可逆转的难题，还可以有效减低实验教学成本和消耗。并且还可以依托虚拟仿真技术能将化工安全前沿科研成果及时转化为优质教学资源。因此将虚拟仿真技术融入化工安全人才培养，可进一步提高教学内容的高阶性和学生的创新意识。下文将以南京工业大学安全科学与工程学院自主研发的《合成反应热危险性评估虚拟仿真实验》为实例，介绍虚拟仿真技术在化工安全课程教学中的应用及成效。

1 应用实例

1.1 应用背景

近年来由物质、反应热失控引发的化工安全事故层出不穷^[10-13]，给社会、行业带来了较大的负面影响。开展反应热危险性评估进行化工工艺过程本质安全设计，对于提升化工过程的本质安全度和促进化工行业的安全发展具有重要意义^[14,15]。为强化反应热危险辨识和管控，相关部门发布了《关于加强精细化工反应安全风险评估工作的指导意见》^[16]、《危险化学品安全专项整治三年行动实施方案》^[17]，明确提出涉及到危险化工工艺的间歇和半间歇反应要开展反应热危险评估，否则不得生产。在此背景下，化工过程的反应热危险已成为化工安全行业关注重点^[18]，也促使行业对从事反应热危险评估的专业人才产生了较大需求。因

此开展热危险性评估能力培训符合行业发展需求，对于提升化工安全复合型人才培养质量、增强学生就业竞争力有重要意义。然而反应热危险评估涉及强放热反应过程、不稳定化学物质及高危工艺过程条件，本质上是风险较大且不确定的过程。并且由于实验的危险性、复杂性及耗时性^[19]，实验人员通常须经过一定时长的安全操作培训和实习操作才可开展实验，在有限的本科实验教学课时内难以完成实验教学目标。其次反应安全评估实验涉及多台大型精密仪器、关键耗材价格高，前期设备配置的一次性投入和长期开展本实验教学的维持费用较高。这些客观因素决定了以实体形式开展反应热危险评估教学实验的可行性不高。虚拟仿真实验由于交互性强、可设计、不受时空限制、零风险，是一种弥补实体教学不足的教学模式^[20-22]。因此基于南京工业大学安全工程专业的“化工安全”教学基础、重点科研项目^[23,24]及工程实践经历，建设了面向化工安全的合成反应热危险性评估虚拟仿真实验项目。

1.2 教学目标

1.2.1 知识目标

通过仪器操作学习，帮助实验人员掌握差示扫描量热仪、绝热加速量热仪、反应量热仪的测试原理、操作步骤及数据分析方法，深化理解反应热危险评估相关理论知识点；通过反应热危险评估及工艺优化环节，引导学生反向思考并探索最优方案，培养学生应用课堂理论知识分析、解决复杂工程问题的综合能力，从而提高防范化解化工过程热失控风险的能力。增强学生敬畏生命的安全意识，牢记安全人的职责使命，培育学生解决化工安全问题的创新素养，积极投身于建设更高水平的

绿色化工行业。

1.2.2 应用目标

通过虚拟仿真技术，基于行业需求将反应热危险评估相关科研前沿成果转化化工安全人才培养体系，打造产-学-研深度融合的化工安全教学资源，进一步提高学生实践能力和创新精神；并驱动化工安全专业实验体系改革升级，发挥对专业领域内实验教学信息化建设的示范引领作用，支撑化工安全人才培养质量全面提高。同时为政府监管部门安全执法人员、企业相关从业人员提供继续教育的实习实训线上资源，从而不断提升安全素养。

1.3 虚拟仿真项目内容设计

实验依托安全工程核心课程《化工过程安全》，以过氧乙酸叔丁酯合成反应为目标工艺，共设计了实验预习、实验准备、物质热危险测试、反应热危险评估及工艺优化和实验拓展 5 个模块、18 步交互操作步骤。实验内容设计框架见图 1 所示。

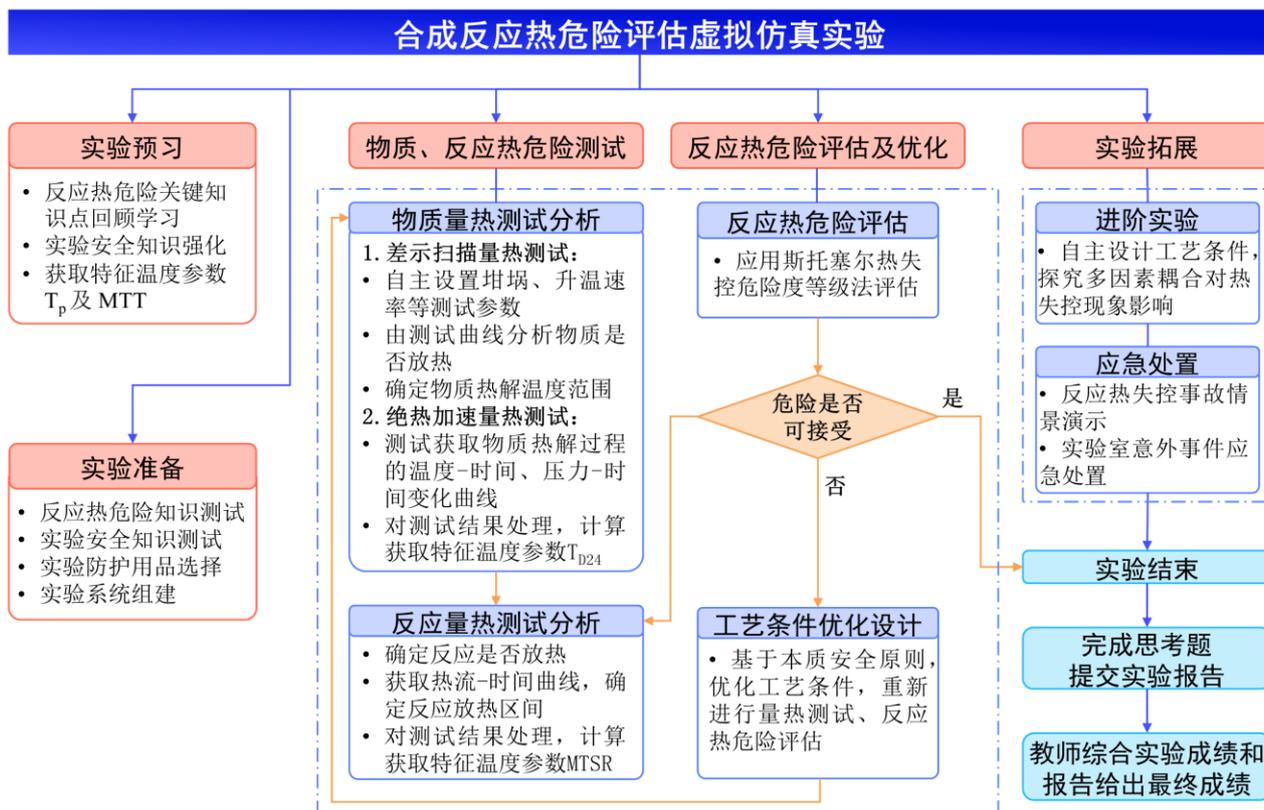


图 1 合成反应热危险评估虚拟仿真实验设计框架

1.3.1 实验预习

在正式开始实验操作前，学生首先通过实验预习模块学习过氧乙酸叔丁酯合成的工艺条件、量热基础知识及斯托塞尔热失控危险度评估等关键知识点，获取反应温度 (T_p) 和技术允许最高温度 (Maximum Temperature for Technical reasons, MTT) 两个特征温度参数。在实验过程中，学生还可继续查看相关知识点，以理论指导实践，以实践深化理论认知。

1.3.2 实验准备

为考察学生是否具备开展实验所需的安全素养和专业能力，

在实验准备模块设置了实验安全和热危险评估理论测试。通过实验室安全测试和个人防护用品选择，强化实验人员的安全意识和素养。通过热危险性评估知识测试和实验系统平台搭建环节，帮助学生进一步熟悉反应热危险评估理论知识。有助于老师掌握学生的预习情况和知识点掌握情况，开展更具针对性的指导。

1.3.3 物质、反应热危险测试

量热测试模块为本实验的核心操作模块，包含了基础数据测试和数据分析处理两个环节，分为物质量热实验和反应量热实验两部分实验内容。

物质量热实验用于分析过氧乙酸叔丁酯合成反应涉及到的原料、中间体及产物的热稳定性。利用差示扫描量热仪（Differential Scanning Calorimetry, DSC）测试周期短的特点，首先快速筛选出受热会发生分解的物质。对于 DSC 初步判断为放热的物质，基于 DSC 测试的分解温度大致范围，进一步开展物质绝热量热测试。利用绝热加速量热仪获取绝热情况下物质受热分解的活化能、指前因子和反应级数等动力学参数，并经过数据处理得到特征温度参数 T_{D24} 。

反应量热环节中，在充分保障安全的情况下，学生可自主探索进料速率、搅拌速度、反应温度及体系条件对过程热危险性的影响。通过反应量热仪测试获取反应过程的温度-时间、热流曲线后，学生应能识别并选择热流曲线的放热区间以积分获得反应的绝热温升(adiabatic temperature rise, ΔT_{ad})，进而计算获得反应最大速率到达时间(Maximum Temperature of the Synthesis Reaction, MTSR)。

1.3.4 反应热危险评估及工艺优化

完成实验测试和数据处理后，应用斯托塞尔热失控危险度等级法对当前工艺进行评估，确定该工艺的热危险等级。根据评估结果判定反应风险是否处于可接受范围，从而决策是否需进行工艺条件优化。工艺优化主要基于本质安全设计原则进行，包括最小化、替代、缓和、简化。如基于替代原则更换溶剂，基于最小化原则改变试剂用量，缩短反应时间等。然后对优化后的工艺，重新进行物质热-反应热-反应热危险评估，直至筛选出反应热危险可接受的工艺。

1.3.5 实验拓展

实验拓展包括进阶实验和事故应急处置。进阶实验旨在引导学生耦合多工艺参数，自主探究反应失控诱发机制，满足学生深入探索学习的需求。其次反应热危险评估实验由于其复杂性，实验过程极有可能出现误操作的情况。事故应急处置是安全生产中的重要一环，因此借助虚拟技术预设误操作引发的事故情景（见图2、图3），让学生意识到反应失控会以何种事故形式体现、会由何种条件触发，以及在事故初期如何快速正确地应急处置。

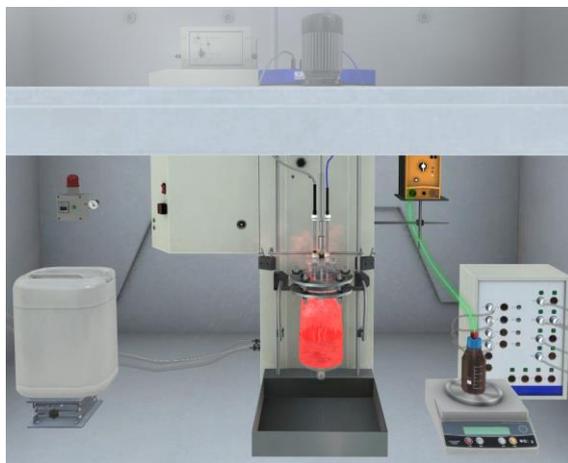


图 2 反应体系失控导致物料沸溢事故



图 3 反应体系失控导致火灾事故

2 特色与创新

2.1 面向化工安全科研前沿，拓宽知识视野

基于虚拟仿真低投入高效率的优点，将我院近年化工安全科研成果及时转化为教学资源，提升课程高阶性，有助于拓宽学生视野、深化对化工安全的认知。将知识、能力、素养目标有机结合，进阶地培养复杂工程问题的解决能力和创新思维。借助虚拟仿真实验的可重复性、容错性，鼓励学生自主探索误差对安全水平的影响，从事故致因角度帮助学生认知风险、学习防控风险的思路。有效培养学生解决复杂安全工程问题的能力，满足社会对既懂化工又懂安全的复合型人才的培养需求。

2.2 以“安全素养”为主线，打破课程思政壁垒

通过实验安全考核学习、劳保用品选择、安全设施等贯穿实验全过程的设置，凸显实验室安全的重要性，进一步提升实验人员的安全素养。利用虚拟仿真技术模拟反应失控事故情景，演示事故发展历程，强化尊重生命、敬畏安全的意识。通过沉浸式体验本质安全评估与设计的过程，

培育学生求真务实、精益求精、开拓创新、追求卓越的工匠精神和卓越工程师优秀品质。

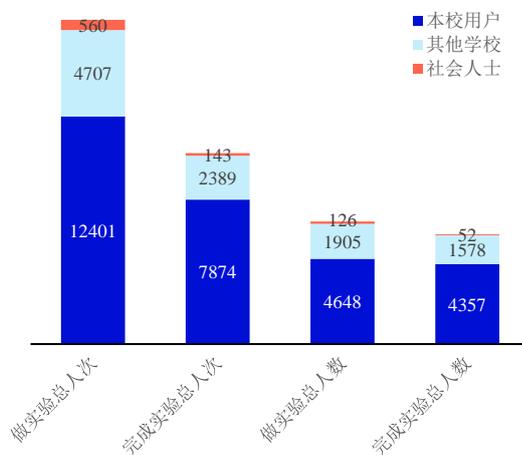
2.3 以本质安全为目标，以行业需求为导向

现有安全方向虚拟仿真实验多为防火抑爆、安全防护、事故应急方面，而本实验着眼于本质安全，以根源上提升化工安全水平为思路。在工艺研发阶段，对工艺的热危险性进行评估辨识，进而开展本质安全优化设计确定本质更安全的工艺过程，与行业高质量发展的目标契合一致。并且是国内首个应用虚拟仿真技术搭建的反应热危险性评估实验项目，可有效降低实验产生的能耗，面向高校、社会开放共享进一步提升了资源利用效率，具有良好的示范引领作用和社会效益。

3 应用成效

《合成反应热危险评估虚拟仿真实验》自 2021 年上线国家虚拟仿真实验教学课程共享平台，持续为全国开设相关专业的院校、科研院所、行业企业提供虚拟仿真教学服务，实现实验教学资源最大程度和最高效率的开放共享。课程于 2023 年入选第二批国家一流本科课程，自 2021 年 8 月年截止到 2023 年 12 月，实验总人次超 1 万次，见图 4。在高校教学服务方面，该实验课程已列为我校安全工程、消防工程本科课程的必修内容，并在安全专业研究生选修课程中得到了初步应用。并在辽宁石油化工大学、广东石油化工学院、常州大学、常熟理工学院等兄弟高校实现共享应用。在促进产教深度融合，服务企业实践方面，虚拟仿真实验也在不断的深化建设。2023 年在我校为中国石化扬子石油化工有限公司安全员的定制培训中，学员通过《合成反应热危险性评估虚拟仿

真实实验》参与合成反应热危险性评估和优化的实训，这种线上线下融合的教学形式得到了企业和学员的一致好评。



数据来源：国家虚拟仿真实验教学课程共享平台，统计时间段：
2021年8月-2023年12月。

图4 合成反应热危险性评估虚拟仿真实验参与课程人员统计

4 结论

以合成反应热危险评估虚拟仿真实验项目为例，介绍了虚拟仿真技术在化工安全实验教学中的应用。通过虚拟仿真技术，可一站式联通“热危险参数检测-评估特征温度参数计算-反应热危险评估应用”环节，帮助学生更好地反应热危险评估的理论要点、掌握测试技巧及分析评估技能。并且在充分保证实验安全的情况下，提升实验人员自主探索创新的能力和用理论知识解决实际工程问题的能力。虚拟仿真技术的应用可助力化工安全体系实践环节改革，从而驱动化工安全人才培养体系升级，持续推动化工安全复合型人才培养质量提升。

基金项目：2022年教育部产学合作协同育人项目“合成反应热危险性

评估虚拟仿真实验 (220503132244456); 2023 年南京工业大学校级教改课题“国家一流课程可持续建设探索与实践”

作者简介: 魏丹 (1993-), 女, 四川绵阳人, 硕士, 南京工业大学安全学院实验师, 研究方向为化工安全。赵声萍 (1977-), 女, 云南昭通人, 博士, 南京工业大学安全学院院长助理, 教授, (通信作者), 主要从事本科教学研究和管理工作, 研究方向为安全管理、消防工程。

参 考 文 献

[1] 中共中央办公厅国务院办公厅印发《关于全面加强危险化学品安全生产工作的意见》 [EB/OL]. (2020-02-26) [2024-02-20].

https://www.gov.cn/zhengce/2020-02/26/content_5483625.htm.

[2] 应急管理部关于印发《“十四五”危险化学品安全生产规划方案》的通知 [EB/OL]. (2022-03-10) [2024-02-20]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/22/content_5680411.htm.

[3] 两部门印发关于加强化工安全人才培养的指导意见 [EB/OL].

(2014-09-15) [2024-02-20]. https://www.gov.cn/xinwen/2014-09/15/content_2750773.htm.

[4] 国务院安委会部署开展安全生产治本攻坚三年行动 [EB/OL].

(2024-02-05) [2024-02-20].

<https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202402/>

[t20240205_477370.shtml](https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202402/t20240205_477370.shtml).

[5] 韩丰磊, 刘杰夫, 赵东风, 等. 化工安全高层次人才学位教育模式的建设与实践[J]. 实验室研究与探索, 2018, 37(12): 192-195.

[6] 严宗诚, 陈砺, 吴妙娴, 等. 化工安全复合型人才培养探索与

实践——以华南理工大学为例[J]. 化工高等教育, 2022, 39(3): 33-36.

[7] 叶莉莉, 毕明树, 高伟, 等. 工程认证背景下化工安全人才培养模式构建[J]. 中国安全生产, 2023, 18(9): 28-30.

[8] 田文德, 陈秋阳, 王婷. 基于虚拟仿真的学科竞赛对化工安全人才培养的促进作用[J]. 山东化工, 2020, 49(24): 233+235.

[9] 钱剑安, 周汝, 王华, 等. 互联网+化工安全应用型安全工程创新人才培养[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(5): 120-125.

[10] 国家安全监管总局关于河北克尔化工有限责任公司“2·28”重大爆炸事故情况的通报[EB/OL]. (2013-03-13) [2022-08-09].
http://www.gov.cn/zwggk/2012-03/13/content_2090821.htm.

[11] 四川通报宜宾恒达科技有限公司“7·12”重大爆炸着火事故调查情况[EB/OL]. (2019-02-15) [2023-08-16].
https://www.yibin.gov.cn/xxgk/rdgz/201902/t20190214_533093.html

[12] 江苏连云港“12·9”重大爆炸事故调查结果公布[EB/OL]. (2018-08-22) [2022-08-16].
https://www.gov.cn/xinwen/2018-08/22/content_5315662.htm

[13] 江苏响水“3·21”特别重大爆炸事故调查报告公布[EB/OL]. (2019-11-16) [2023-08-09].
<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1650318984402278913&wfr=spider&for=pc>.

- [14] 张海锋, 李大庆, 卫敏, 等. 交联剂 TAIC 反应风险评估分析[J]. 工业安全与环保, 2020, 46(1): 28-31+83.
- [15] 王晓明, 吕颖, 李俊, 等. 聚二甲基硅烷(PDMS)生产工艺反应安全风险评估[J]. 应用化工, 2020, 49(A1): 90-92.
- [16] 国家安全监管总局关于加强精细化工反应安全风险评估工作的指导意见 [EB/OL]. (2017-01-12) [2023-08-09].
https://www.mem.gov.cn/gk/gwgg/agwzlf/gfxwj/2017/201701/t20170112_242769.shtml.
- [17] 危险化学品安全专项整治三年行动实施方案[EB/OL]. (2020-06-23) [2023-08-09].
http://safety.jiangsu.gov.cn/art/2020/6/23/art_76441_9811272.html.
- [18] 孙培琴, 陈延青, 孔祥北, 等. 醋酸酐与水在化学反应量热方法确认中的应用[J]. 化工进展, 2022, 41(S1): 91-96.
- [19] 李陈, 马凤国, 睢贺良, 等. 含能材料热分解动力学求解及热安全性理论评估的进展[J]. 含能材料, 2020, 28(8): 798-809.
- [20] 刘亚丰, 苏莉, 吴元喜, 等. 虚拟仿真实验教案设计及实践[J]. 实验室研究与探索, 2017, 36(3): 185-188.
- [21] 陈涛, 范林坤. 汽车运输安全虚拟仿真实验设计[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(3): 129-132.
- [22] 祁鹤翔, 刘阳秋, 蒲敏, 杨作银, 李亚平, 雷鸣. 分子点群虚拟仿真实验的建设与实践[J]. 化学教育(中英文), 2022, 43(12): 104-113

[23] SHEN S, JIANG J, ZHANG W, et al. Process safety evaluation of the synthesis of tert-butyl peracetate[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2018, 54: 153-162.

[24] 吴昊, 蒋军成, 倪磊. 间歇式反应器热失控情景研究:以酯化反应为例[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(8): 126.