

案例 2 情景浸入、虚实结合的磷酸铵盐干粉灭火剂制备及性能测试虚拟仿真实验项目建设与教学实践

我国磷酸一铵（MAP）年产量约为 1400 万吨，产能利用率仅为 68.7%，存在严重产能过剩的问题，亟需找到一条磷酸一铵高值化利用的新出路。采用肥料级磷酸一铵生产环保型磷酸铵盐干粉灭火剂具有磷矿资源优势，产品市场容量大，原料可持续供给，价格稳定等优点，是解决磷酸一铵产能过剩的有效路径。

火灾事故的不确定性及其高破坏性严重损害着人民群众的生命和财产安全，尤其近年来高校学生宿舍火灾事故频发，造成了诸多悲剧的发生，而熟练掌握灭火器的使用可最大程度减小火灾事故带来的危害。磷酸铵盐干粉灭火剂具有灭火迅速、适用范围广、不损害环境等优良特性，是当前使用最为广泛的灭火剂之一。由于磷酸铵盐干粉灭火剂制备及性能测试具有高危性、高成本、高消耗及不可逆性等特点，导致出现学生难以实操和教学效果差等问题。

针对上述问题，贵州大学化学与化工学院化工虚拟仿真实验教学中心多次带领仿真教学团队下厂深入了解磷酸一铵生产工艺流程。然后仿真教学团队在认真分析了解磷酸一铵的合成、磷酸铵盐干粉灭火剂配制及性能测试的基础上，重点建设了磷酸一铵合成半实物仿真实习实训装置，并重点打造以 Unity3d 作为 3D 引擎，采用 C#语言并通过 Visual Studio 工具进行程序开发，研发了磷酸铵盐干粉灭火剂的制备及性能测试虚拟仿真实验项目。该仿真实验项目包括磷酸一铵的合成、磷酸铵盐灭火剂材料的制备及干粉灭火剂性能测试，包含化工合

成设备单元操作、材料制备配方设计及性能检测系统模拟实验，训练并提升学生化工单元操作和材料性能测试表征的知识和能力，具有学科交叉性、系统完整性及一定的先进性。

1 实验设计思路

(1) 模拟现实磷酸一铵生产工艺流程。考察学生对磷酸与氨气的反应过程，蒸发浓缩结晶过程等操作单元掌握情况；

(2) 采用磷酸一铵与一定比例的硫酸铵混合粉磨。考察学生对磷酸铵盐灭火剂材料的配方设计，以及掌握粉磨工艺参数对材料性能的影响；

(3) 模拟测试磷酸铵盐干粉灭火剂的灭火性能。采用高压氮气将磷酸铵盐干粉罐装至灭火瓶，在模拟实验室内搭建木材垛，将其点燃，使用所罐装的灭火剂对燃烧的木材垛进行灭火性能测试。

2 实验目的及实验原理

2.1 实验目的

(1) 掌握磷酸一铵合成过程工艺和控制系统的动态特性、提高对工艺过程的运行和控制能力；

(2) 掌握磷酸铵盐灭火剂材料配比的设计及性能测试；

(3) 培养学生探究式的思维方式和解决复杂问题的综合能力。

2.2 实验原理

(1) 灭火剂制备原理

首先是磷酸与稀氨水发生化学反应，反应方程式如下：

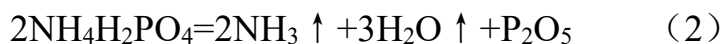


磷酸一铵溶液蒸发结晶造粒后，将磷酸一铵与硫酸铵按一定比例混合粉磨至一定细度，经高压氮气罐装至灭火器中，最后测试磷酸铵盐干粉灭火性能。

(2) 灭火原理

一是干粉中无机盐的挥发性分解物，与燃烧过程中燃料所产生的自由基或活性基团发生化学抑制和负催化作用，使燃烧的链反应中断而灭火。

二是干粉粉末落在可燃物表面后发生化学反应，在高温作用下形成一层可隔绝氧气的玻璃状覆盖层，进而窒息灭火。磷酸一铵加热到130℃时开始分解，放出氨气转化为焦磷酸($\text{H}_4\text{P}_2\text{O}_7$)、焦磷酸铵及偏磷酸铵，130-400℃生成 $(\text{NH}_4)_{n-x}\text{H}_x\text{P}_n\text{O}_{3n+1}$ ，大于400℃时生成 $(\text{NH}_4\text{PO}_3)_n$ 。反应方程式如下：



(3) 过程知识点

磷酸一铵中和反应原理及反应控制条件；磷酸一铵双效蒸发结晶原理及工艺操作条件；喷雾干燥工艺参数控制；磷酸一铵与硫酸铵混合比例参数控制及粉磨细度参数控制；磷酸铵盐灭火剂罐装操作；磷酸铵盐灭火剂灭火原理及性能测试。

3 实验教学过程与实验方法

本实验项目综合应用多媒体、三维建模等网络化、数字化技术手段，建立了磷酸一铵合成、磷酸铵盐干粉灭火剂制备，以及干粉灭火

剂性能测试三大主要场景。首先进入磷酸一铵合成场景，考察学生对磷酸与氨水的中和反应过程，蒸发浓缩结晶过程等操作单元掌握情况。其次，进入磷酸一铵与硫酸铵混合粉磨场景，考察学生对磷酸铵盐灭火剂材料的配方设计，以及掌握粉磨工艺参数对材料性能的影响。最后，进入模拟测试磷酸铵盐干粉灭火剂的灭火性能，即磷酸铵盐干粉罐装至灭火瓶中，充氮气加压，并在模拟实验室内搭建木材垛，并将其点燃，再用所罐装的灭火剂对燃烧的木材垛进行灭火性能测试。通过以上三大场景以及专业角色体验，完成本实验项目的学习与操作。教师通过实验操作环节和评分系统对学生学习效果进行考核，进一步通过互动反馈，为学生下一阶段学习提供建议，持续提升学生学习效果，促使每位同学扎实掌握磷酸铵盐干粉灭火剂制备及性能测试设计和规模化生产技术。

具体仿真实验教学过程如图 1 所示，主要分为实验背景及简介、实验操作及分析、实验报告及讨论三个阶段，涉及理论基础学习、角色定位、学生实践、教师反馈、报告撰写、实验考核等实验场景和模块，综合采用观察法、归纳法、类比法、控制变量法、科学推理法等实验方法，使学生全面掌握磷酸铵盐灭火剂从原料到产品再到性能测试的整个实验过程。同时，在实验教学过程中以学生为中心，以学习成果为导向，发挥虚拟仿真技术的优势，采用了“情景浸入式”、“虚实结合式教学”和“线上线下混合式教学”的实验教学方法，充分调动学生的积极性和主动性，培养学生的动手实践能力和创新能力。

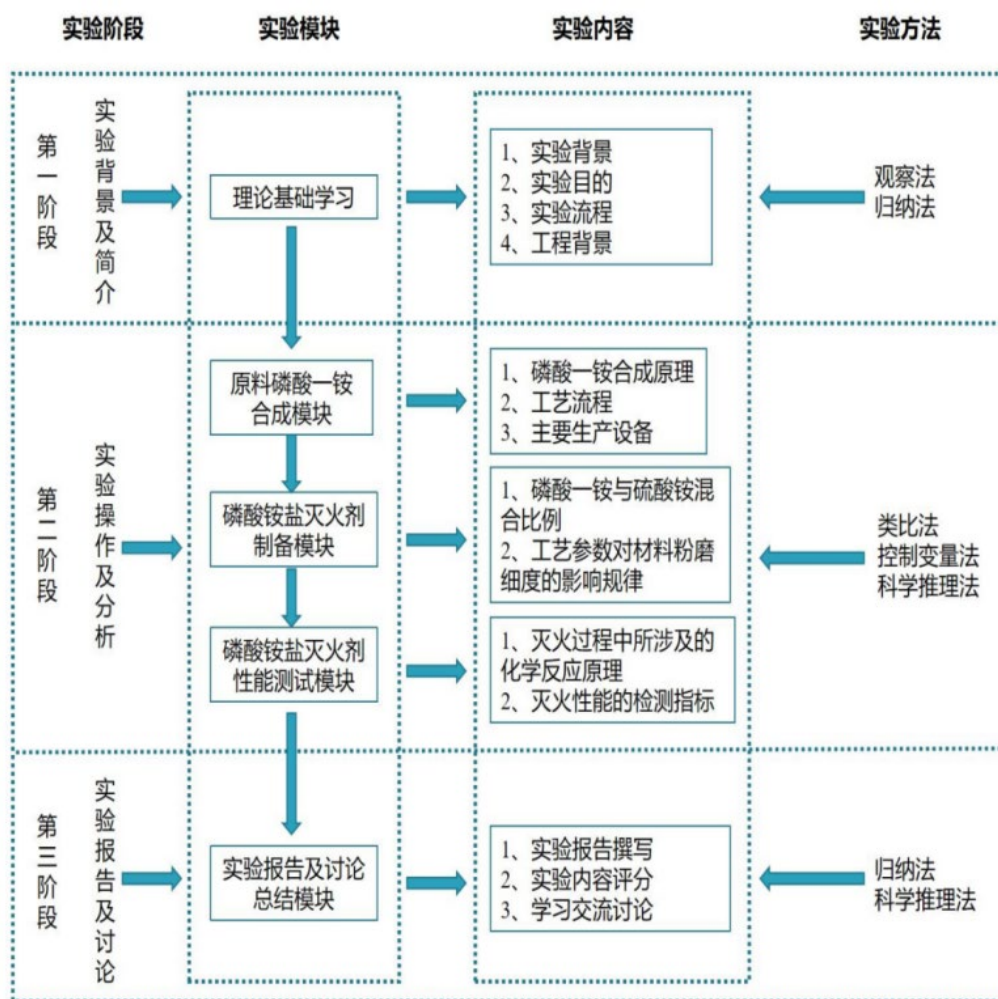


图 1 实验教学过程设计示意图

“情景浸入式”教学：学生在开展虚拟仿真实验时，以虚拟实验人员角色，进入虚拟实验平台，身临其境，从了解生产工艺和认识实验装置开始，到完成磷酸一铵制备、制备磷酸铵盐干粉灭火剂，并进行干粉灭火器性能测试等一系列操作，从简单到复杂，从生产到检测，全身心体验磷酸铵盐干粉材料工艺的各环节。

虚实结合式教学：实验项目涉及中和反应釜的加料、升温、反应、冷却清洗等过程，具有生产工艺耗时长、安全性要求高、操作精细度高等特点，因此我们教学过程中让学生利用虚拟仿真软件操作，用少量学时了解和掌握该生产工艺原理、装置操作方法等。同时，利用磷

酸一铵合成半实物仿真实习实训装置,用水和原料在低温低压下进行安全的实体实验,进行虚实结合式教学,方便学生更直观了解反应釜的结构和工作原理,锻炼学生动手能力。

线上线下混合式教学:充分利用网络平台的优势,开展线上虚拟仿真实验教学,学生可在国家虚拟仿真实验教学课程共享平台完成相关实验项目(图2),教师也可在网络平台上与学生充分交流、讨论,方便学生自主学习。同时,在线下实验教学中,将线上学生反馈的部分问题可在现场直观解答。线上线下混合式教学能发挥虚拟实验和实体实验各自的优势,有利于将“虚实结合”落到实处。



图2 国家虚拟仿真实验教学课程共享平台登录界面

4 实验内容

4.1 学生交互性操作步骤（共 15 步）

表 1 学生交互性操作步骤

步序 号	步骤目标要求	步骤合理用 时（min）	步骤 满分	成绩类型
1	思考题作答	5	5	预习成绩
2	建立真空条件	10	7	操作成绩
3	建立水循环	7	5	操作成绩
4	向中和反应器进料	10	8	操作成绩
5	稀磷酸储罐与中和器液位控制	3	7	操作成绩
6	向蒸发器进料	4	8	操作成绩
7	磷酸一铵和硫酸铵干粉按配比混合磨粉	8	8	操作成绩
8	灭火器灌装	3	7	操作成绩
9	灭火器充压	3	5	操作成绩
10	学生穿戴防护用品	3	5	操作成绩
11	木垛点火预燃	3	3	操作成绩
12	先使用（磷酸一铵：硫酸铵为 75%： 25%）的灭火器作灭火测试	5	8	操作成绩
13	使用（磷酸一铵：硫酸铵为 85%： 15%）的灭火器作灭火测试	5	8	操作成绩
14	重复灭火成功的实验减小实验成功的 偶然性	5	8	操作成绩
				实验报告
15	实验报告	3	8	教师评价报 告



图 3 理论知识学习的交互设计界面

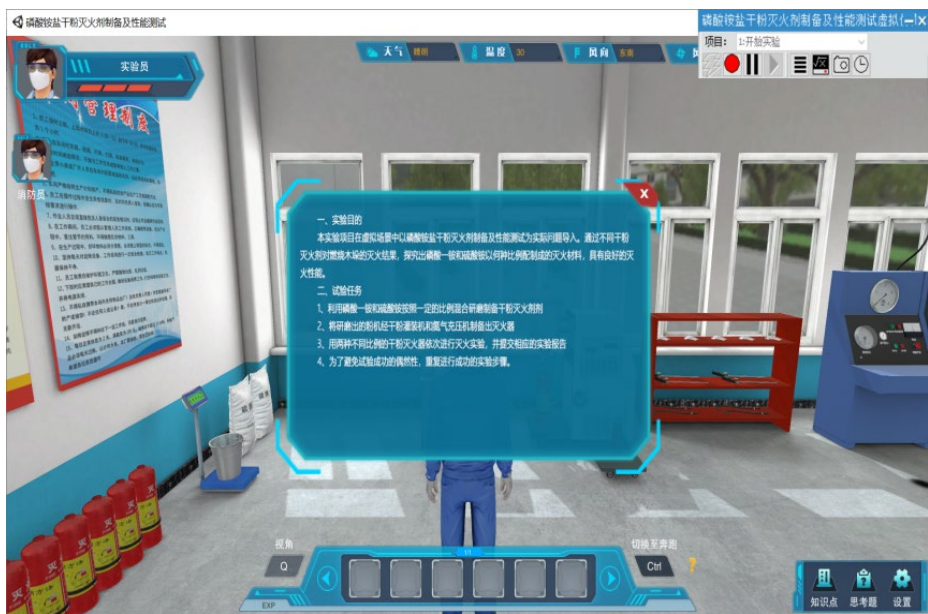


图 4 灭火剂配制的交互设计界面

4.2 实验结果与结论

在本项目中，不同的虚拟仿真实验模块由于教学实验目的不同，对实验结果与结论的要求也不同。对于仿真操作型的实验，要求学生需进行一定内容的学习，并按照规定步骤完成实验操作，并能够达到一定的熟练程度，从而保证学生对于基础知识的充分掌握。对于工程

拓展型的实验，由于采用任务驱动，学生在进行实验过程中，要对遇到的现象和参数变化进行分析，并解决在虚拟仿真实验过程中遇到的各种问题，最后完成一定的实验任务。这些模块要求学生在实验结果与结论中针对具体的实验过程进行分析，并得出正确的结论，完成预设的实验任务。

5 实验教学特色

磷酸铵盐干粉灭火剂制备及性能测试虚拟仿真实验将化工操作单元与材料性能表征有机结合，对化工、材料及相关专业学生综合能力提高起到积极作用。此外该虚拟仿真实验不仅可以节省大量的教学资源，同时也提高了整体教学水平。丰富自由的实验尝试，帮助学生更方便的学习到想要学习的知识，具体教学特色表现在如下几个方面：

（1）成本的降低。采用虚拟实验室教学成本及研究经费都可以合理的节省，并能够充分利用现有的现代化教学设别，提高使用率，避免大型仪器设备的重复添置和浪费。

（2）突破传统实验条件的限制。磷酸铵盐干粉灭火剂性能测试虚拟实验突破了传统实验教学受高危险性，不可逆操作性限制的问题，在网络等环境下建立的虚拟实验室更方便进行互动学习。

（3）实验操作的便利性。使用虚拟实验室使实验变得简单方便，做实验时刻自行选择实验系统及实验仪器，任意完成不同的实验。软件技术是虚拟实验的关键，虚拟仪器由于在组建上具有高效性与灵活性，能够适应测试功能的多样化，以及可用表格、图形快速准确显示结果，达到一机多用，从而具备了传统实验难以比拟的优势。

6. 小结

项目围绕人才培养需求和本校教学特色,开展了虚拟仿真实验教学项目的建设,在建设过程中,通过共同体建设各单位的协同共建实现了项目建设的持续改进,通过教学组织、教学设计过程中的虚实结合、情景浸入等提升了教学效果,达到了预期的人才培养目标。