

# “发酵工程原理与技术”混合式教学研究与实践：以“抗生素发酵生产工艺与工程实践”内容为例

李其昌<sup>1</sup>, 班宜辉<sup>\*1</sup>, 徐舟影<sup>2</sup>, 谢浩<sup>1</sup>, 李媛<sup>1</sup>, 陈碧峰<sup>1</sup>

1 武汉理工大学化学化工与生命科学学院, 湖北 武汉 430070

2 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070

李其昌, 班宜辉, 徐舟影, 谢浩, 李媛, 陈碧峰. “发酵工程原理与技术”混合式教学研究与实践：以“抗生素发酵生产工艺与工程实践”内容为例[J]. 微生物学通报, 2022, 49(4): 1245-1254

Li Qichang, Ban Yihui, Xu Zhouying, Xie Hao, Li Yuan, Chen Bifeng. Mixed teaching of Principle and Technology of Fermentation Engineering: an example of process and practice of antibiotic production by fermentation[J]. Microbiology China, 2022, 49(4): 1245-1254

**摘要：**“发酵工程原理与技术”是理工科高校生物专业的核心课程之一，具有较强的应用性和实践性。然而目前以线下教学为主的传统教学方式不利于学生对知识的理解和掌握。同时，该课程实验教学环节存在发酵设备更新不及时、缺乏大型工艺设备、易受场地限制等问题，严重影响实践教学效果。线上线下相结合的混合式教学模式是丰富教学资源和提升教学质量的重要手段。我们以“抗生素发酵生产工艺与工程实践”内容为例，基于虚拟仿真平台设计并构建虚拟仿真实验项目，同时结合课堂教学和实验室教学等线下教学方式，形成线上线下高度融合的混合式教学新模式。混合式教学强化了课堂教学与在线教学、虚拟实验与实体实验的有机结合，促进了学生扎实掌握理论知识和实验技能，培养了学生的创新精神和实践能力，提高了学生的综合素质。

**关键词：**发酵工程原理与技术；虚拟仿真技术；混合式教学；教学改革

基金项目：武汉理工大学虚拟仿真实验教学项目(119-312040000104)；武汉理工大学教学改革研究项目(w2019085, w2019122, w20210140)

Supported by: Virtual Simulation Experiment Teaching Project of Wuhan University of Technology (119-312040000104); Teaching Reform Research Projects of Wuhan University of Technology (w2019085, w2019122, w20210140)

\*Corresponding author: E-mail: banyihui@whut.edu.cn

Received: 2021-11-27; Accepted: 2022-02-14; Published online: 2022-02-28

# Mixed teaching of Principle and Technology of Fermentation Engineering: an example of process and practice of antibiotic production by fermentation

LI Qichang<sup>1</sup>, BAN Yihui<sup>\*1</sup>, XU Zhouying<sup>2</sup>, XIE Hao<sup>1</sup>, LI Yuan<sup>1</sup>, CHEN Bifeng<sup>1</sup>

1 School of Chemistry, Chemical Engineering and Life Sciences, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China

2 School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China

**Abstract:** Principle and Technology of Fermentation Engineering is a core course of Biology major in colleges and universities of science and engineering, which has been widely applied. Traditional teaching method mainly based on offline teaching is not conducive to students' mastery of knowledge. Additionally, there are some problems in the experimental teaching of this course, such as delay in updating fermentation equipment, lack of large-scale process equipment and site restrictions, which seriously affect the teaching quality. Hybrid teaching mode incorporating online and offline teaching is an important means to enrich teaching resources and improve teaching quality. Taking process and practice of antibiotic production by fermentation as an example, we constructed a virtual simulation experiment project on the basis of virtual simulation platform. In addition, combining offline teaching methods such as classroom teaching and laboratory teaching, we formed a new hybrid teaching mode highly integrating online and offline teaching. The hybrid teaching strengthened the organic combination of classroom teaching and online teaching, as well as virtual and physical experiment, which facilitated students' mastery of theoretical knowledge and experimental skills, cultivated their innovative spirit and practical ability, and improved their comprehensive quality.

**Keywords:** Principle and Technology of Fermentation Engineering; virtual simulation technology; hybrid teaching; teaching reform

“发酵工程原理与技术”是一门涉及生命科学和工程学范畴并集理论与实践于一体的工科类课程,是高等院校生物技术、生物制药和生物工程等多个生物专业的核心专业课。该课程系统讲授发酵工业生产过程以及各类发酵产品生产的共性原理和技术归纳,内容以菌种(或细胞)—发酵—分离纯化—产物为主线,涵盖生物学和工程学主题,以传统的微生物发酵与动植物细胞发酵为主要对象,系统介绍发酵工程的类型、特点、关键技术、现状及发展趋势<sup>[1]</sup>。国内众多高等院校如江南大学、华东理工大学、华南理工大学等均在生物专业中开设了发酵工程相关课程,为食

品、医药和环境工程等领域培养急需的工程应用型人才<sup>[2]</sup>。

传统教学模式下“发酵工程原理与技术”课程的理论与实践教学均以线下为主,但因为教学内容涉及较多结构和工作原理都比较复杂的工艺和设备,教师在线下讲授过程中难以将其阐述清楚,从而会影响学生学习的主动性与积极性。同时,以实验室教学为主的传统实践教学模式也易受诸多因素的影响和限制。在实践环节,因发酵设备维护及运行费用高昂,实践教学往往无法大规模开展;发酵设备占地大,实践教学易受场地限制;学时有限,学生很难了解到包含菌种选

育、培养基优化及发酵过程控制等在内的发酵工艺的所有环节<sup>[3-4]</sup>。因此,传统的“发酵工程原理与技术”教学模式不利于学生对理论知识的理解与掌握,也较难实现对学生实践动手能力的培养和提升,教学质量难以保证,课程教学改革势在必行。

虚拟仿真技术是指以仿真软件为工具,利用计算机系统模拟真实物体、环境及过程进行系统实验和系统研究的一门应用技术<sup>[5]</sup>。虚拟仿真教学是指基于虚拟仿真软件和多媒体技术在计算机和网络上搭建相关软硬件操作环境,使教学内容、虚拟设备和实验对象有机融合,学生可以通过人机交互终端完成课程的理论学习和实践操作<sup>[6-7]</sup>。虚拟仿真教学不仅能够拓展课堂理论教学的维度和深度,而且能够极大地丰富传统实践教学内容,其与实体教学相结合能够有效提高实践教学质量。“发酵工程原理与技术”课程的虚拟仿真教学可以最大程度地还原真实的发酵生产工作环境和生产过程,有利于学生更直观地了解发酵设备的结构和工作原理,从而进一步强化和延伸理论教学内容。同时,学生还可以进行实验模拟操作,不仅提高了设备的操作感和实验过程的安全性,而且使他们对发酵过程控制有更为直观的认识,可以激发学生的学习兴趣并提高实践教学质量。

单一的教学模式较难达到教学目标,而将课堂教学与在线教学、虚拟仿真实验与传统实践教学相融合的混合式教学方式是提高学生工程应用能力和创新创业能力的有效途径<sup>[8]</sup>。本研究以虚拟仿真平台为基础,以“虚实结合、相互补充、能实不虚”为原则,以“抗生素发酵生产工艺与工程实践”为内容,精心设计虚拟仿真实验,并基于此实验项目,结合课堂教学和实验室教学等线下教学方式,构建线上线下相融合的混合式教学模式,并在实践中完善课程考核评价体系。

## 1 基于虚拟仿真平台的实验项目设计与实现

我们以我校生物制药专业实验教学平台为依托,以化工和制药工程等现有工艺和工程设计为基础,以“虚实结合、相互补充、能实不虚”为原则,坚持以突出学科重点特色为前提,以提高学生实践能力和培养学生创新精神为目标,建设“抗生素发酵生产工艺与工程实践”虚拟仿真实验项目。

虚拟仿真教学平台和教学资源为发酵工程实践教学团队自主设计,委托武汉翼高天成科技有限公司完成开发。虚拟仿真实验的开放运行依托于开放式虚拟仿真实验教学管理平台,二者通过数据接口无缝对接,保证学生能够随时随地通过浏览器访问该项目,并通过智能指导和自动批改等服务功能,帮助学生完成自主实验。开放式虚拟仿真实验教学管理平台以计算机仿真技术、多媒体技术和网络技术为依托,采用面向服务的软件架构开发,集实物仿真、创新设计、智能指导、虚拟实验结果自动批改和教学管理于一体,是具有良好自主性、交互性和可扩展性的虚拟实验教学平台。虚拟仿真实验项目的实验操作界面如图1所示,学生们可以通过网络终端登录进入虚拟仿真技术平台对实验内容进行预习,根据实验要求完成虚拟仿真实验,并完成实验过程的记录。该实验项目包含抗生素发酵生产工艺认知、工程实践、综合考核等3个虚拟仿真子模块。

### (1) 抗生素发酵生产工艺认知模块

根据我校生物制药专业课程设置的特点,认知子模块包括抗生素功能、分类及应用、抗生素发酵生产工艺及生产实例、发酵设备结构及功能等三方面内容。此模块借助多媒体和实景资料模拟出内容丰富的教学情境,以视频、动画、图文和声音等多个形式呈现教学信息,有助于学生对抗生素发酵理论知识的深入理解,为下一步的实践训练奠定基础。



图 1 虚拟仿真实验项目实验操作界面

Figure 1 Experimental operation interface of virtual simulation experiment project.

## (2) 抗生素发酵工程实践模块

工程实践子模块包括生产前安全检查训练和抗生素发酵生产的实际操作训练。抗生素发酵生产实际操作环节包含 3 个内容: 1) 菌种制备, 此部分是抗生素发酵生产最关键的一个环节, 是整个生产的基石, 内容主要涉及菌种的保存、活化和扩大培养等。2) 发酵生产, 主要包括培养基的制备与灭菌以及温度、溶氧、pH、补料等工艺参数的设计和确定等。3) 产品制备, 主要包括抗生素的分离、提取、精制及成品化等。

## (3) 抗生素发酵综合考核模块

综合考核模块又分为理论知识考核和操作技能考核。理论知识考核点可以由教师自行设计和导入, 内容一般涉及抗生素发酵工艺流程、设备工作原理和操作方法等。指导教师可以利用操作技能考核模块了解学生对抗生素发酵生产工艺的熟悉程度并依此综合评价仿真实训的教学效果。考核完成后, 学生的成绩以 Office 文件格式导出并存档, 可作为课程综合考核的重要内容。

虚拟仿真软件中包含的生产装置主要有发酵罐、蒸汽发生器、空气压缩机、空气过滤器、洗涤罐和真空干燥机等, 所有设备都采用 3D 技术绘制模型, 生动形象。学生可以通过软件自主操控发酵罐的空罐灭菌与实罐灭菌、培养基连续灭菌、过滤除菌、进料和补料等关键操作环节, 并通过实时呈现的数据曲线图动态监测发酵状况, 及时判断各参数设置的合理性及操作的规范性, 从而加深对发酵过程的认识。通过虚拟仿真实验, 学生可以深入了解抗生素发酵生产工艺流程以及发酵罐的结构、工作原理和关键操作技术, 学习过程不受时间、场地的限制, 可以重复多次进行实验, 提高了学习效率。

## 2 基于虚拟仿真实验的混合式教学模式的构建与应用

在以“发酵工程原理与技术”为代表的工科课程中, 虚拟仿真实验开设的目的是实现实体实验不具备或难以完成的教学功能, 只能作为实验

教学的有效巩固和补充,而不可直接代替实体实验<sup>[9]</sup>。如何将虚拟仿真实验与实体实验相结合稳步提高教学质量成为值得关注的课题。

### 2.1 混合式教学模式的设计

以“抗生素发酵生产工艺与工程实践”内容为例,“发酵工程原理与技术”混合式教学模式的设计框架如图 2 所示,课程教学主要由课堂理论教学、虚拟仿真教学和实验室实物教学三部分组成。课堂教学的内容主要包括抗生素基础知识(抗生素定义、命名、分类和作用机制等)、抗生素生产工艺原理与过程控制、抗生素发酵应用实例等。虚拟仿真教学内容既包括发酵工艺基本流程、发酵设备的结构与功能、管道阀门的设计与控制等理论知识,也包含发酵的上游工程(优良菌株的选育、培养基的选择和制备)、中游工程

(最适发酵条件的确定、发酵培养与过程控制)和下游工程(发酵液预处理、活性物质的分离提取与精制、成品包装等)<sup>[10]</sup>,同时还涵盖了考核环节(基础知识考核和实践技能考核),而实验室实物教学主要由学生分组完成发酵设备认知和抗生素发酵生产的实践操作。

在学时设置方面,该部分内容课堂教学 2 学时,虚拟仿真教学 2 学时,实验室实物教学与实践环节 14 学时。课堂教学系统介绍发酵工程理论、发酵过程基本规律和工艺原理。此部分内容是开展实践教学的前提,是虚拟仿真教学的重要基础,是线下实验室教学的重要支撑。虚拟仿真教学环节则以抗生素发酵生产工艺流程为主线,以生产“工序”为载体,通过解剖工艺流程,进一步强化设备结构与功能、发酵过程控制等理

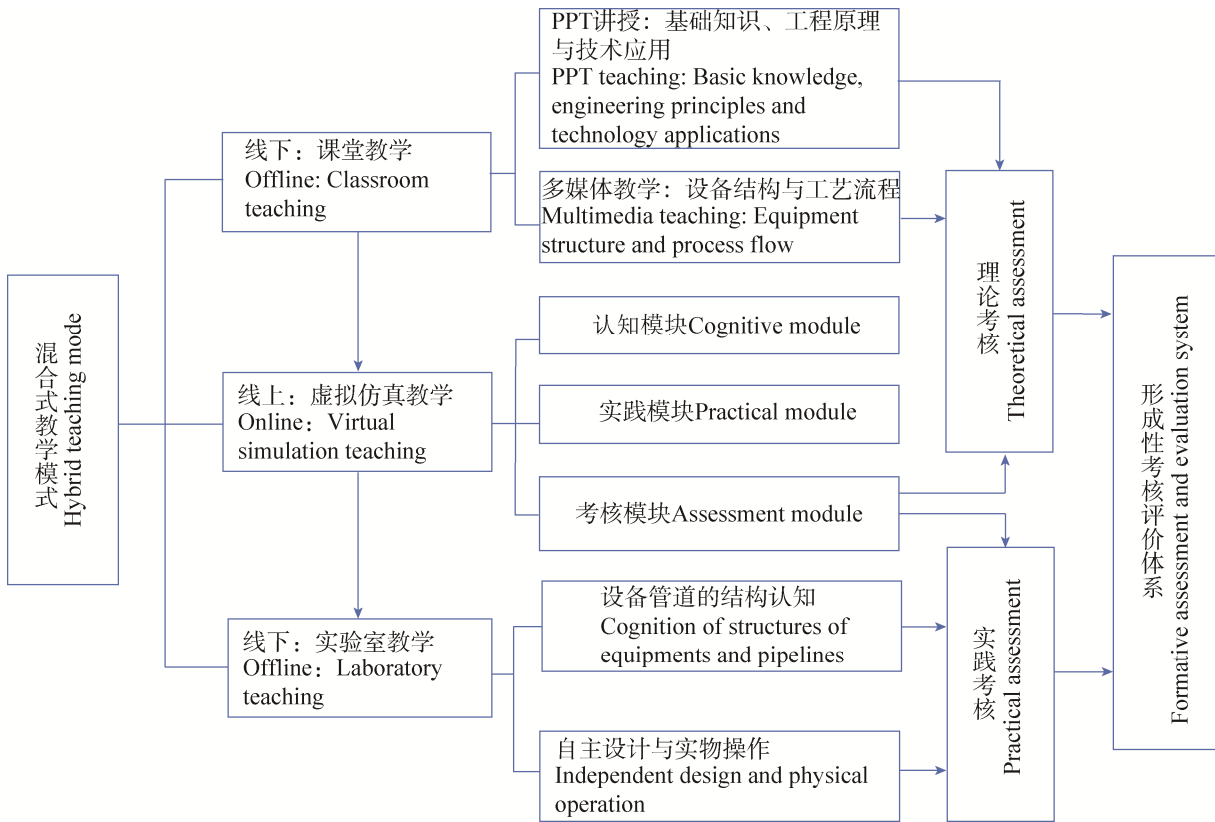


图 2 基于虚拟仿真实验的混合式教学模式与考核评价体系

Figure 2 Mixed teaching mode and evaluation system based on virtual simulation experiment.

论内容。虚拟仿真教学是理论教学内容的重要辅助与升华,二者相互融合,最终实现了理论知识的巩固和深化。另外,虚拟仿真教学又是衔接发酵理论与工程实践之间的桥梁,可以有效促进理论教学与实践教学的有机融合。实验室实物教学以前期理论知识储备及线上模拟操作训练为基础,以实物认知、知识应用和实践动手能力培养为目标,是课堂教学与虚拟仿真教学的重要补充与延伸。课堂教学、虚拟仿真教学、实验室教学三者成为相辅相成的有机统一体,线上线下相结合的混合式教学可以将理论知识、实践操作、自主设计、考核评价等内容完美融合,最大程度地提高教学资源利用率,提高学生的学习自主性。

## 2.2 虚实结合的教学方式

### 2.2.1 虚拟仿真教学与课堂教学相结合

课堂教学注重基础理论知识的讲授,如抗生素基本概念和作用机制、抗生素生产工艺原理与技术概述等,但对于较抽象的发酵设备内部构造、管道阀门设置与功能等内容,学生往往较难理解和掌握。例如,全自动发酵罐有结构复杂的双层罐体与管道,如连接的压缩空气、冷凝水和循环水等管路,各管路功能不同且连接线路错综复杂。然而虚拟仿真实验中所有生产装置和管路均以3D模型呈现,界面美观且生动形象,操作场景更加真实,并以动画、视频和图片等多媒体形式辅助教学,学生能够在较短时间内掌握知识,教学效果显著。因此,课堂教学与虚拟仿真教学相结合的教学方式能显著提高学生的学习效率。

### 2.2.2 虚拟仿真教学与实验室教学相结合

虚拟仿真教学的实践模块几乎包含了抗生素发酵工艺的整个流程,既包括菌种培育、种子制备、发酵罐的空罐灭菌与实罐灭菌、发酵罐接种和培养过程控制等环节,学生也能通过对管道阀门的控制以及对温度、溶氧量、pH值、进料

和出料等各参数的设置,最后完成实验目标。虚拟仿真实验解决了大型设备不足的问题,提高了学生的积极性和参与度,而且大大缩短了发酵实验的周期,并提高了操作安全性。然而虚拟仿真实验不能完全代替实体实验,不能忽略学生实体实验的重要作用。在实验室实际操作过程中,学生需要完成的内容主要包括菌种活化、种子制备、发酵罐的实罐灭菌、接种和发酵过程控制、产品分析和数据处理等,同时也涉及发酵罐、蒸汽发生器和空气压缩机等设备的自主操作。在实际操作环境中,学生能接触到更真实的发酵过程信息。例如,在培养液的配制过程中学生可以真实地感受到培养液的颜色、黏度、气味以及发酵设备工作时发出的声音等,此类信息建立起学生对发酵过程的直观感受,而这些在仿真软件中却难以体现。实体实验也能提高学生的安全意识和实验操作的规范性。例如,在实际操作过程中,误操作可能会损坏设备,甚至发生安全事故,如果只开展线上实验教学,学生会对实际操作的风险认识不足,不利于培养学生严谨科学的实验作风。教师可以通过实体实验教学引导学生对实际操作过程中容易出现的各种问题进行分析和解决,有利于激发和培养学生的科研创新思维,也有利于培养学生的团队协作意识。因此,虚拟仿真和实体实验相结合的实验教学方式更能充分地提升教学效果,并提高学生的综合素质。

### 2.2.3 线上考核与线下考核相结合

虚拟仿真教学模块中设置了综合考核模块,包括理论知识考核和操作技能考核。线上考核注重考查学生对发酵工艺流程的掌握情况、对各项参数设置的正确性及发酵过程操作的准确性,而线下考核则包含了课堂考勤、设备实际操作技能和实验报告等内容,从多方面考查学生的积极性、实践动手能力和分析问题的能力等。因此,将线上考核与线下考核相结合,强化了对学生学

习过程的评价,更能科学全面地反映出学生对知识和技能掌握情况。

### 2.3 课程考核评价体系改革

“发酵工程原理与技术”课程成绩由课堂考勤(5%)、虚拟仿真在线考核(20%)、线下实物操作技能考核(15%)、实验报告(10%)和期末考试(50%)等5个部分组成。期末考试以发酵工艺基本原理与技术要点为主要考核内容;虚拟仿真实验和线下实际操作考核着重考查学生对发酵过程的基本操控技能;实验报告主要检验学生对发酵工艺的掌握情况以及实验过程中分析问题和解决问题的能力。构建注重过程性、自主性和实践性的形成性考核评价体系,通过多种考核方式对学生进行多方位的综合评价。

## 3 混合式教学的成效分析

### 3.1 教学效果评价

基于虚拟仿真实验的混合式教学充分发挥了虚拟仿真的优势,弥补了线下教学的诸多不足。通过虚实结合的混合式教学模式改革,课程教学达到了当前高校对大学生工程素质教育的要求,学生综合素质有所提高,成效显著。与传统教学模式相比,学生在各方面取得了明显的进步。

#### 3.1.1 学习的积极性和主动性明显提高

与传统的实验室教学相比,虚拟仿真实验内容更加生动形象,可操作性强,大大提高了学生的实验参与度,学生学习热情高涨,上课出勤率由以前的92.3%上升到98.5%。学生也不用担心损坏设备和发生安全事故,实验主动性显著提高。问卷调查结果显示,超过80%的学生非常认同此教学模式。

#### 3.1.2 学习效率明显提高

混合式教学模式下学生成绩提高显著,优秀率提高了16.9%,低于70分的比例由30.9%降

至10.6%。虚拟仿真实验的引入使学生能清晰地了解整个发酵过程,对发酵罐结构、阀门的功能、发酵过程的生化反应都有更直观的认识,与线下教学的结合加深了学生的印象,强化了学生对发酵工艺的理解。虚拟仿真实验的周期明显缩短,学生可以通过系统控制实验的进程,有效减少了单次练习的时间,提高了学生的学习效率。

#### 3.1.3 实践动手能力和工程应用能力明显提升

虚拟仿真实验保障了每个学生均能了解到发酵工艺的整个流程,各个单元模块将抗生素发酵生产的上游、中游和下游工程有机融合,避免了因各部分知识点的不连贯造成学生理解上的偏差。学生通过线上线下的学习,既可掌握抗生素发酵的基本工艺流程和主要参数设置要求,也可独立完成整个发酵工艺流程的操作,最终了解抗生素的发酵生产全过程。学生实践动手能力测评结果显示,在混合式教学模式学生的平均成绩提高了17.9%,学生将专业理论知识应用于生产实践的能力明显增强,实验操作技能得到提升,设备操作规范性进一步提高。在面对发酵过程出现的问题时学生们也表现出较强的分析问题和解决问题能力。

#### 3.1.4 创新思维和团队协作精神明显增强

传统教学模式下,实验缺乏设计性和创新性,不能较好地完成学生创新意识的培养。然而虚拟仿真实验的引入可以让学生自主设计符合实验要求的实验内容,获得不同的实验结果,然后对结果进行对比分析和讨论,从而激发学生的创新能力。虚实结合的实验训练可以扩展学生的逻辑思维能力,培养学生的创新思维,引导学生主动开展科学研究探索。2021年,我校化学化工与生命科学学院学生自主申报的以微生物发酵为研究背景的“武汉理工大学自主创新研究基金(本科生项目)”项目数达到7项,超过之前三年的总和,其中4项获得立项,成绩斐然。混

合式教学模式下学生的实验参与度提高,每个学生对实验内容的理解更深刻,在线下实际操作环节各小组分工明确、通力合作,不再出现一人操作多人围观的现象,培养了学生的团队协作精神。

### 3.2 学生满意度调查与综合能力评价

选取武汉理工大学 2018 级生物制药专业 1801 班的 68 名学生为实验组,课程中引入虚拟仿真实验,实施混合式教学;1802 班的 66 名学生为对照组,采用传统教学模式。两组学生由同一位教师授课,总学时相同。为检验混合式教学的成效,课程结束一周后对学生课程教学满意度调查和综合能力测评。

#### 3.2.1 学生满意度调查

以实验组和对照组学生对课程学习效果进行满意度调查。学生主要依据学习的兴趣与主动性、理论知识和实验技能的掌握情况、实践动手能力的提升、创新意识与创新思维的培养等多个方面综合评价对课程教学模式的满意度。满意程度设 4 个等级:非常满意、满意、一般、不满意,学生根据自身学习情况进行选择。调查结果如图 3 所示,实验组学生对混合式教学模式评价“非常满意”和“满意”的分别达到了 27.5%和 52.9%,共占总调查人数的 80.4%,调查结果表明学生对混合式教学的满意度较高。对照组学生对传统教学模式的“非常满意”和“满意”的评价所占比例分别为 12.1%和 39.4%,评价“不满

意”的有 11 人,占比 16.7%,说明学生对传统模式下的学习效果认可度不高。在调查问卷中发现,实验组中 61.8%的学生表示,学习兴趣与主动性明显提高;70.6%的学生认为通过该课程的学习实践动手能力获得了提升;82.4%的学生高度认可了该教学模式对创新意识与创新思维的促进作用。由满意度调查结果可知,混合式教学能够激发学生的学习兴趣,锻炼学生的实践能力,提高学生的创新意识,充分发挥了学生的主体作用,取得了较好的效果。

#### 3.2.2 综合能力测评

实验组和对照组学生的综合能力测评包括理论知识测评和实践动手能力测评。理论知识测评以试卷的形式进行,实践动手能力测评主要依据学生对设备操作相关题目的完成情况进行打分,两部分测评满分均设为 100 分。采用 SPSS 20.0 统计分析软件对所得成绩进行分析,使用 SigmaPlot 13.0 进行绘图,所得结果以平均数 $\pm$ 标准差( $\bar{x} \pm SD$ )表示,两组间比较采用  $t$  检验,以  $P < 0.05$  为差异具有显著性。

实验组和对照组测评结果如图 4 所示。由图 4 可知,实验组学生对理论知识和实践动手能力的测评平均分数均高于对照组。实验组学生理论知识的测评平均分为 82.7,比对照组高了 10.9%(对照组平均成绩为 74.6),但差异未达到显著水平( $P > 0.05$ );实验组 80 分及以上学生人数占比

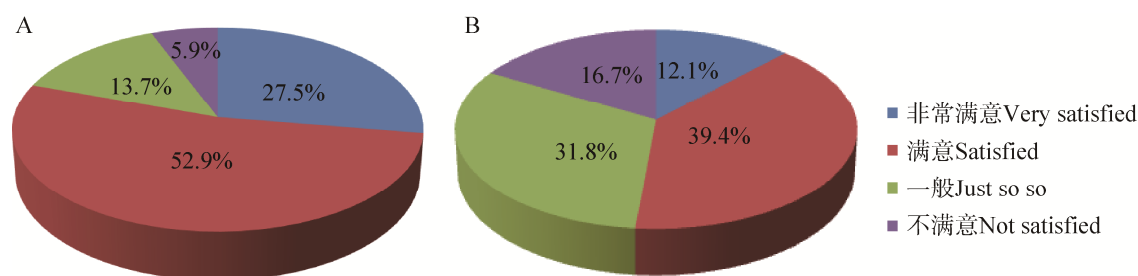


图 3 实验组(A)和对照组(B)学生对课程教学的满意度调查结果

Figure 3 Satisfaction survey results of the experimental group (A) and the control group (B) of students with the course teaching.



为 70.6%, 明显高于对照组的 33.3%; 实验组 70 分及以下学生人数占比为 10.3%, 低于对照组的 31.8%。两组学生实践动手能力测评平均成绩的差异有统计学意义, 实验组学生平均分数达到了 83.8, 显著高于对照组分数 71.1 ( $P<0.05$ ), 为对照组的 1.2 倍; 对照组 80 分及以上学生人数占比仅为 18.2%, 而实验组则达到了 72.1%; 实验组不及格率为 1.5%, 远低于对照组的 10.6%。由此可知, 基于虚拟仿真实验的混合式教学模式下, 学生对理论知识的掌握程度更高, 而混合式教学显著提升了学生的实践动手能力。

由满意度调查和综合能力测评结果可知, 虚拟仿真实验的引入得到了大多数学生的认可, 在提高学生在学习兴趣和效率上发挥了明显优势, 而混合式教学模式明显提高了学生的综合素质, 学生实践动手能力和创新意识都得到明显的提升。然而, 根据学生们对课程教学的反馈意见和建议, 仍需在以下几个方面对混合式教学进一

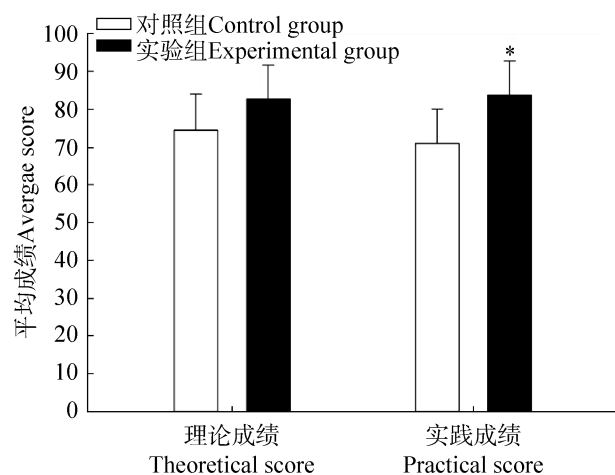


图 4 学生理论知识和实践动手能力测评平均成绩 图中数据为平均值±标准差; \*:  $P<0.05$ , 代表差异显著

Figure 4 The mean scores of students' theoretical knowledge and practical ability. Values in the figure are expressed as mean±standard deviation. \*:  $P<0.05$ , indicates significant difference.

步改进: (1) 虚拟仿真软件对操作细节的展示还不够清晰与真实, 如蒸汽流量的精准调控、溶解氧电极的标定、阀门的精细调节等, 需要对软件进一步升级, 提高细节的真实性和可操作性。(2) 虚拟仿真实验中设备操作流程应尽量与实体实验保持一致。如空气过滤器的安装与灭菌、发酵罐拆装与清洗、蒸汽锅炉的维护与保养等必要的实际操作环节在虚拟实验中未涉及, 虚拟仿真实验的内容不够完整, 仍需要进一步丰富。(3) 通过优化实验结构进一步提高实验的设计性和研究性, 充分发挥学生在实验中的主体作用, 这也是今后的改进方向。

### 3.3 实践过程中的成果孵化

自“发酵工程原理与技术”课程中引入虚拟仿真实验并开展混合式教学以来, 武汉理工大学生物技术和生物制药专业共有 260 余名学生完成了该课程。虚实结合、线上线下融合的教学模式深受学生喜爱, 学生的实际操作技能、创新能力和团队合作意识都有大幅度提高。学生以“发酵工程”为主题的创新创业实践活动明显增多, 成效显著。2021 年, 学生申请获得武汉理工大学“国家级大学生创新创业训练计划项目”1 项, 获得“全国大学生生命科学竞赛”二等奖 1 项, 获得“全国大学生生命科学创新创业大赛”一等奖 2 项、二等奖 1 项。我们团队成员围绕高素质应用型人才培养目标开展了一系列课程教学改革研究, 成果显著。课程负责人以虚拟仿真实验项目的设计与构建为基础获得“武汉理工大学教学改革研究项目”1 项, 团队成员获得“首届全国高校教师教学创新大赛”校级二等奖 1 项。

## 4 结语

“发酵工程原理与技术”作为生物专业开设的应用性较强的专业核心课程, 对于开拓学生专业视野、提高学生实践能力具有重要作用。虚拟

仿真实验教学是现代信息化高等教育的重要体现,是未来信息化教育发展的重要趋势,不仅开创了实验教学的新模式,也成为提高教学质量的有效途径。本研究基于虚拟仿真实验的设计与构建,采用“虚实结合”的教学方式,将线上教学与线下教学相结合形成混合式教学新模式。在“课堂教学+虚拟仿真教学+实验室教学”的教学模式下,学生学习积极性明显提高,综合素质明显提升,教学成果显著。在未来的教学改革中,还应进一步加强虚拟仿真技术与教学的深度融合,虚实互补,充分发挥各自的优势和特点,使课程教学更适于新时期高素质应用型人才的培养。

## REFERENCES

- [1] 宋存江. 发酵工程原理与技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2014  
Song CJ. Principle and Technology of Fermentation Engineering[M]. Beijing: Higher Education Press, 2014 (in Chinese)
- [2] 倪芳, 刘洋, 熊强, 朱本伟, 江凌, Matthaw Jay Malkmes. “互联网+”发酵工程实操与虚拟仿真中试实验室平台的建设与探索[J]. 微生物学通报, 2020, 47(11): 3725-3732  
Ni F, Liu Y, Xiong Q, Zhu BW, Jiang L, Malkmes MJ. Exploration and construction of Internet Plus Fermentation Engineering practice and virtual simulation pilot laboratory platform[J]. Microbiology China, 2020, 47(11): 3725-3732 (in Chinese)
- [3] 王启要, 张蕾蕾, 常雅宁, 范惠明, 高淑红, 李书慧, 庄英萍. 新工科背景下以 CDIO 理念为引领的虚拟仿真实验教学探索与实践[J]. 化工高等教育, 2021, 38(4): 114-119  
Wang QY, Zhang LL, Chang YN, Fan HM, Gao SH, Li SH, Zhuang YP. Exploration and practice of virtual simulation experiment teaching leading by CDIO concept under the background of new engineering[J]. Higher Education in Chemical Engineering, 2021, 38(4): 114-119 (in Chinese)
- [4] 樊安, 马沛, 赵亚玲, 惠俊峰, 骆艳娥. 发酵工程实践教学“产学研”三位一体模式探索[J]. 化工高等教育, 2019, 36(4): 77-81  
Fan A, Ma P, Zhao YL, Hui JF, Luo YE. The practice teaching model of industry-academia-research in Fermentation Engineering[J]. Higher Education in Chemical Engineering, 2019, 36(4): 77-81 (in Chinese)
- [5] Caño De Las Heras S, Kensington-Miller B, Young B, Gonzalez V, Krühne U, Mansouri SS, Baroutian S. Benefits and challenges of a virtual laboratory in chemical and biochemical engineering: students' experiences in fermentation[J]. Journal of Chemical Education, 2021, 98(3): 866-875
- [6] Zhao YX, An XW, Sun NL. Virtual simulation experiment of the design and manufacture of a beer bottle-defect detection system[J]. Virtual Reality & Intelligent Hardware, 2020, 2(4): 354-367
- [7] 常雅宁, 彭钰珂, 魏东芝, 胡晓鸣. 虚拟仿真技术在酶工程实验教学上的应用[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(2): 237-239, 244  
Chang YN, Peng YK, Wei DZ, Hu XM. Application of virtual simulate technology on Enzyme Engineering Experiment teaching[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2019, 38(2): 237-239, 244 (in Chinese)
- [8] 尹军霞, 杨受保, 沈国娟. 基于在线课程的混合式教学在微生物学课程中的探索和实践[J]. 微生物学通报, 2021, 48(8): 2910-2919  
Yin JX, Yang SB, Shen GJ. Exploration and practice of blended teaching based on online course in Microbiology teaching[J]. Microbiology China, 2021, 48(8): 2910-2919 (in Chinese)
- [9] 鲁明波, 刘亚丰, 杨英, 吴元喜, 余龙江. 虚实结合的发酵工程实验教学模式探索与实践[J]. 高校生物学教学研究(电子版), 2019, 9(6): 41-45  
Lu MB, Liu YF, Yang Y, Wu YX, Yu LJ. Exploration and practice of experimental teaching mode combining virtual simulation and real experiments for Fermentation Engineering[J]. Biology Teaching in University: Electronic Edition, 2019, 9(6): 41-45 (in Chinese)
- [10] 罗方. 虚拟仿真技术在发酵工程制药实践教学中的应用[J]. 现代职业教育, 2020(1): 90-91  
Luo F. Application of virtual simulation technology in Fermentation Engineering Pharmaceutical practice teaching[J]. Modern Vocational Education, 2020(1): 90-91 (in Chinese)