

“新工科”背景下电弧离子镀教学实验设计及混合式教学研究

项燕雄*, 邓炜怡, 邹长伟, 王晴宇

岭南师范学院物理科学与技术学院, 广东 湛江

收稿日期: 2022年9月13日; 录用日期: 2022年10月20日; 发布日期: 2022年10月28日

摘要

随着科学的发展与进步, 新工科应运而生。新工科的推行直接关乎到了国家未来的战略布局。作为基础技术之一的真空技术已被广泛运用到半导体、电子等新兴领域中, 已成为对理工科大学进行基础教学中不可或缺的一部分。真空阴极电弧离子镀膜实验是一门可以帮助理工科学生认识真空现象、掌握真空组成、了解真空获得、利用真空优势的专业实验。为了能更好地完成实验教学任务, 更好地契合新工科背景下的教学实验要求, 本文从教学内容、教学方法等方面开展了真空阴极电弧离子镀膜课程教学改革探索。在实验教学方案设计方面, 根据新工科教学需求, 在教学内容和教学过程中重点细化了电弧离子镀设备的真空系统构成、真空获得。在教学方面, 引入了“混合式教学”的教学模式, 结合“翻转课堂”理念, 变传统的以教师为中心的教学模式为以学生为中心, 教师为引导者的工程教学模式, 提高了学生课堂的参与度。合理优化了成绩评价机制, 拓展了学生的发散思维, 提升了学生的创新能力。

关键词

新工科, 混合式教学, 教学实验设计, 电弧离子镀

Study on Experimental Design and Blended Teaching of Arc Ion Plating under the Background of “New Engineering”

Yanxiong Xiang*, Weiyi Deng, Changwei Zou, Qingyu Wang

School of Physical Science and Technology, Lingnan Normal University, Zhanjiang Guangdong

*通讯作者。

文章引用: 项燕雄, 邓炜怡, 邹长伟, 王晴宇. “新工科”背景下电弧离子镀教学实验设计及混合式教学研究[J]. 创新教育研究, 2022, 10(10): 2621-2628. DOI: 10.12677/ces.2022.1010411

Abstract

New engineering is a new concept put forward with the progress of science and technology. The implementation of the new engineering strategy related to the national strategic layout. As one of the basic technologies, vacuum technology has been widely used in emerging fields such as semiconductors and electronics, and has become an indispensable part of basic teaching for science and engineering students. Arc ion plating experiment is a professional experiment that can help science and engineering students to understand the phenomenon of vacuum, master the composition of vacuum, understand the acquisition of vacuum, and make use of the advantages of vacuum. In order to better complete the experimental teaching task and better meet the requirements of teaching experiments under the background of new engineering, this paper carried out the teaching reform of vacuum negative arc ion plating course from the aspects of teaching content and teaching methods. According to the teaching demand of new engineering, the vacuum system composition and vacuum acquisition of arc ion plating equipment are mainly refined in the teaching content and teaching process. In terms of teaching, combined with the concept of "flipped classroom", introduced the teaching model of "blended teaching", changed the traditional teacher-centered teaching model into a student-centered engineering teaching model with teachers as guides, and improved the participation of students in class. It optimizes the achievement evaluation mechanism, expands students' divergent thinking, and improves students' innovation ability.

Keywords

New Engineering, Blended Teaching, Teaching Experiment Design, Arc Ion Plating

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

真空镀膜技术如 PVD、CVD、蒸发镀等因其工艺稳定、重复性好等优点现已在光学、电子技术、半导体、刀具等领域得到广泛的应用。在真空镀膜 PVD 技术中，真空阴极电弧离子镀膜技术因其沉积速率快、膜基结合力强、重复性好，备受镀膜行业青睐，现已逐渐实现产业化。阴极电弧离子镀膜系统通常由抽气系统、真空腔体、电源、冷却系统、控制系统等组成，其结构相对复杂，但在真空镀膜设备中极具代表性。为此，开设电弧离子镀膜实验，可以帮助学生系统了解真空获得、掌握真空系统结构、系统了解 PVD 镀膜过程。

混合式教学是随着互联网的发展而兴起的一种新的教学模式，其实质是将线上教学和传统线下教学的优势结合起来的一种“线上”+“线下”的教学。通过线上和线下的有机结合，弥补单一线上和单一线下的教学的不足，发挥线上和线下各自特有的优势，可以极大加强教学效果。随着新冠疫情的暴发，混合式教学模式已被广泛应用到教学实践中，并取得了良好的教学成果。

本文以我校岭南师范学院应用物理学专业为例，为满足“新工科”提出以来社会对“真空技术”人才培养的迫切需求[1]，对真空阴极电弧离子镀膜实验进行了教学实验方案改革，引入混合式教学模式，发挥“线上”+“线下”的教学优势，优化教学方法，引入“翻转课堂”理念，增加学生在课堂中的权

重。在教学中培养学生对真空获得、真空系统构成、真空镀膜技术尤其是 PVD 技术的理解, 并通过教学实验逐步养成了“为什么做”“做什么”“怎么做”“结果怎样”的基本科研逻辑思维及实践探索能力。

2. 实验教学方案设计

2.1. 教学内容设计

阴极电弧离子镀技术的原理是利用阴极电弧源产生的冷场致弧光放电, 发射稳定的高电流密度、高能量密度的等离子体流, 并通过电场等对离子的引导沉积到基片上的真空镀膜技术。在弧光等离子体中有高密度的热电子流、金属离子流和金属蒸汽流[2]。

1) 产生冷场致弧光放电的条件

冷场致弧光放电是从冷态的阴极靶材上发射的电子流。根据“电子气理论”, 金属价电子(电子)可被金属中的所有原子共用, 因此, 电子可在金属内部做自由运动, 但是由于金属键的存在, 没有办法逃离金属的束缚。但当金属表层电子获得指向靶表面外的动量, 并且具有克服金属表面势垒, 即可逃离附近其他原子或分子的束缚。让阴极表面发射出电子有两种方法, 一是将阴极靶材加热到高温, 使其电子内能超出逸出功。而另一种方法是, 让阴极靶材表面附近堆积形成离子空间电荷层(即离子云), 使其与阴极靶材形成的电场强度达到 $106\sim 108\text{ V/cm}$, 让电子逃离金属键的束缚, 从而发射出电子。从电场强度公式可得 $E = U/d$ 可知, 可以通过增大电压或者缩小两极间距 d 的办法实现, 但提高电压的难度和危险程度要远大于缩小极间距离 d 的难度。离子空间电荷层通常是在阴极靶材附近所成的, 其两极间距离约为 $10\ \mu\text{m}$ 。

2) 初始弧光引弧

将原料通过粉末烧结法等方法制备成圆饼状靶材, 通过车出的螺纹安装有水冷的靶座上, 阴极靶材接弧电源负极, 镀膜室接阳极。电弧靶前方安装引弧针, 引弧针通过电阻与弧电源正极接通。在通常情况下, 电弧靶表面不会自发击穿而产生放电, 需通过引弧针的伸缩动作引弧。在真空条件下通入 Ar 等气体, 开启弧电源, 打开引弧针的气动开关, 引弧针与靶材短暂接触, 形成短路。引弧针与阴极靶材接触后分离的一瞬间, 阴极原接触区温度升高, 金属内部电子高速运动, 使其有足够的能量克服金属表面的束缚向空间发射。与此同时, 在阴极靶材表面也有一定比例的金属原子蒸发, 热电子与其金属原子非弹性碰撞使其电离成正离子, 这些堆积在阴极表面弧斑的正离子就形成了离子空间电荷层(离子云), 由于阴极靶材表面凸起部位与离子空间电荷层之间距离最小, 电场强度最大, 因此有限被击穿, 产生冷场致弧光放电。

3) 金属蒸发熔池的形成

在阴极弧光放电过程中, 阴极表面会形成一圈圈闪动的耀眼弧光, 它是由一个或数个极小不连续、且极亮的弧光斑点(简称弧斑)的生成 - 熄灭、移位生成 - 再熄灭的一系列快速过程的弧斑轨迹而形成的一系列电弧过程。据研究, 弧斑面积积极小(约 $100\sim 200\ \mu\text{m}^2$), 一个弧斑内存在若干个微弧斑, 而微弧斑有 $1\sim 5\ \mu\text{s}$ 寿命。当微弧斑在燃烧或熄灭后, 新的微弧斑可在阴极表面凸起的地方产生, 看起来阴极弧斑像在阴极表面做跳跃式运动。微弧斑是强烈的电子发射区。每发射约十个电子的同时, 也发射一个金属原子, 且以约高达 $1000\ \text{m/s}$ 的速度发射金属蒸汽。因弧斑区内的阴极微弧电流密度高达 $104\sim 108\ \text{A/cm}^2$, 促使阴极弧斑局部快速升温并形成微熔池, 产生夹杂微液滴的大量金属材料蒸发[3]。由于阴极材料在局部微小区域的大量蒸发, 蒸发处留下微小灼坑, 该处的尖端消失, 且因其正离子空间电荷层被冲散, 场强下降, 无法引起该处弧光发电。由于放电电流的降低, 导致鞘层位降升高, 必然会在另一尖端处引发新的弧光放电, 形成新的熔池, 原来的熔池位置将凝固。随着正离子的鞘层的不断冲散, 阴极灼坑和阴极辉点(弧斑)将会不断变化位置, 因此, 靶材表面没有固定的熔池, 宏观上所有的熔池都会凝固成固态, 遂电弧源可任意方位、多源布置以保证镀膜均匀。具体放电过程如图 1 所示。

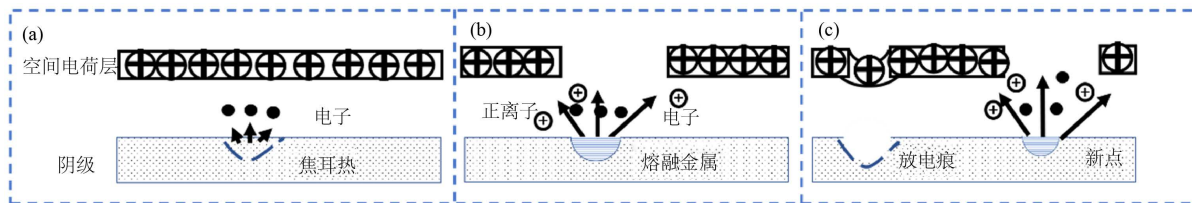


Figure 1. Mechanism of vacuum cathode arc discharge process

图 1. 真空阴极电弧放电过程机理

4) 靶材金属原子的离化

阴极电弧源既是蒸发源又是离化源。从靶材表面蒸发出来的金属原子与阴极发射的高电流密度、高能量密度的电子流进行非弹性碰撞使其电离，形成高密度的电子、离子、高能中性蒸汽原子组成的高密度等离子体。阴极电弧离子镀的沉积速率快，且金属离化率极高，可达 60%~80%。由于入射离子能量很高，使得电弧离子镀技术制备的涂层具有良好的膜 - 基结合力[4]。

2.2. 实验流程与准备

① 基体前处理：

将基片抛光至镜面，依次用丙酮、去离子水、无水乙醇作为清洗剂，放入超声波清洗机中对基片进行清洗，时间均为 15 min。

② 镀膜前的准备工作：

1) 打开空气压缩机。2) 打开冷却水循环装置，检查仪表盘上的水温及水压。3) 真空腔体清洁。4) 检查电弧蒸发源。5) 检查工件架的绝缘情况。6) 加热、抽真空。

电弧离子镀膜机及电弧离子镀机示意图如图 2 及图 3 所示。

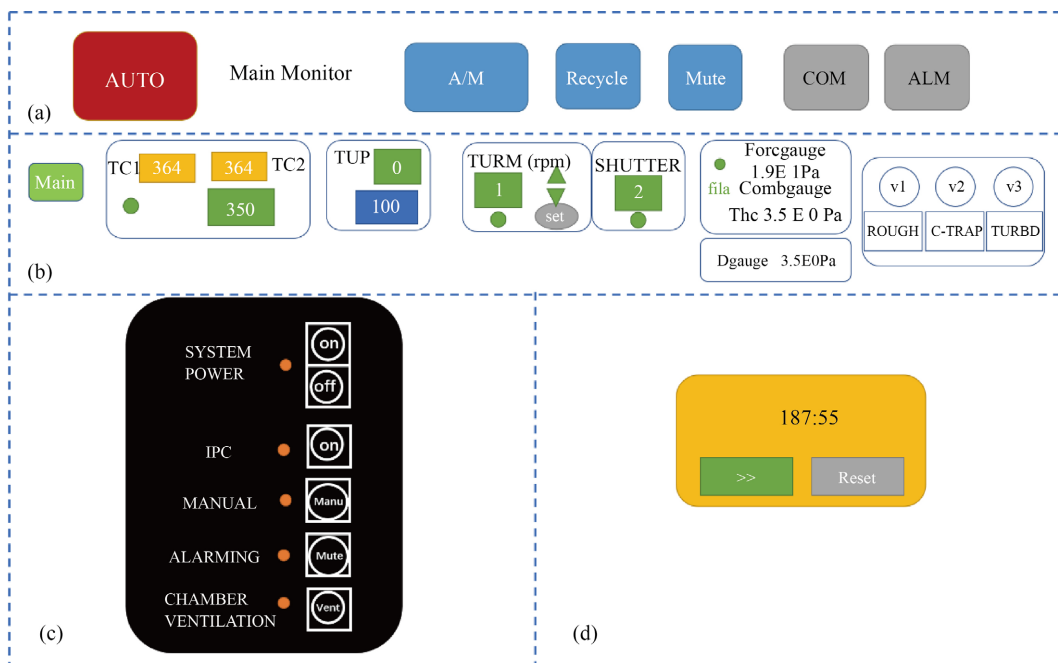


Figure 2. Operation interface diagram of the instrument

图 2. 仪器操作界面图

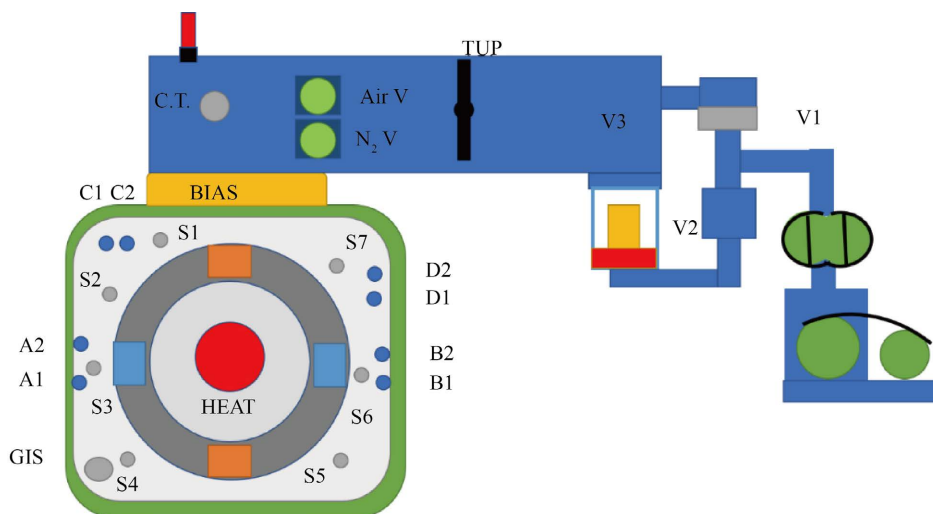


Figure 3. Structure diagram of arc ion plating machine
图 3. 电弧离子镀机结构示意图

③ 编写涂层沉积参数程序，编写结束后将其数据传输到镀膜系统中。具体步骤为：

- 1) 启动自动镀膜模式，沉积过程参数如图 4。2) 冷却降温、开炉取样。3) 清洁炉体。4) 关炉门，抽真空保压。5) 关电、关气、关水。

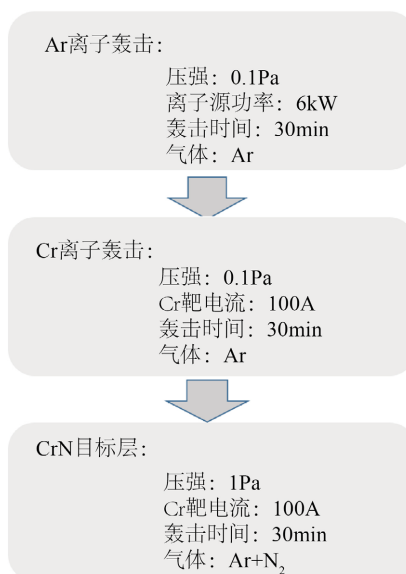


Figure 4. Experimental deposition process and parameters
图 4. 实验沉积过程及参数

④ 实验注意事项

- 1) 严格按照实验步骤的先后顺序进行操作。
- 2) 在实验过程中需带上口罩、手套以免污染基片的表层和其他器械的清洁活性。
- 3) 当阴极真空镀膜仪器出现警告提醒，需立即通知实验员进行处理。
- 4) 实验整体过程需严格按照图 5 流程顺序进行。

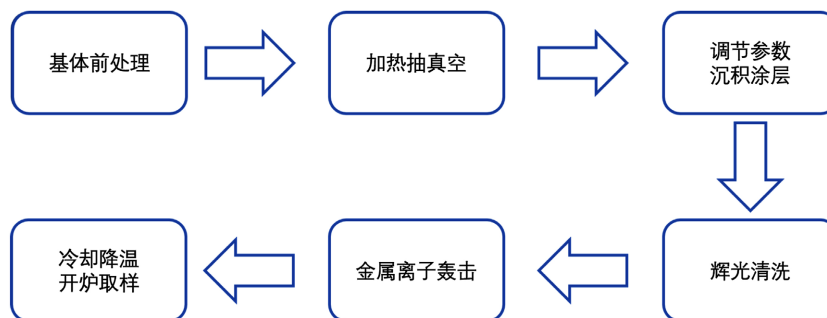


Figure 5. Schematic diagram of the experimental process
图 5. 实验流程图

3. 教学实验安排

“新工科”建设行动提出，要增强师生互动，推动信息技术与教育教学的融合，建设和推广线上线下结合的开放式课程，形成以学生为中心，教师为引导者的工程教学模式。随着互联网及其相关配套技术的高速发展，信息技术将会对高等教育产生颠覆性的影响，尤其是在新冠肺炎疫情背景下，翻转课堂、混合式教学等教学模式加速兴起，中国慕课(MOCC)、腾讯课堂、钉钉、QQ 等教学通讯工具在教学中得到了广泛的应用[5]。为推进实验教学模式的优化改革和提高学生培养质量，在重塑课程教学内容的基础上，对电弧离子镀实验课程开展了教学方法改革，实施了结合学习通、腾讯课堂及翻转课堂的教学模式。

翻转课堂(Flipped Classroom)起源于 2007 年美国科罗拉多州落基山森林公园高中教学中。其具体是指重新调整课堂内外的时间，把学习的决定权和主动权交给学生，学生可在课前课后通过多媒体教学、与同学交流等渠道进行自主学习，课堂变成学生与老师之间、学生与学生之间交流互动的平台。翻转课堂模式教学分为课前模式，课中实验与课后总结三个阶段。基于翻转课堂模式，利用“腾讯课堂 + 学习通”移动互联网技术构建的电弧离子镀实验的教学流程如图 6 所示。

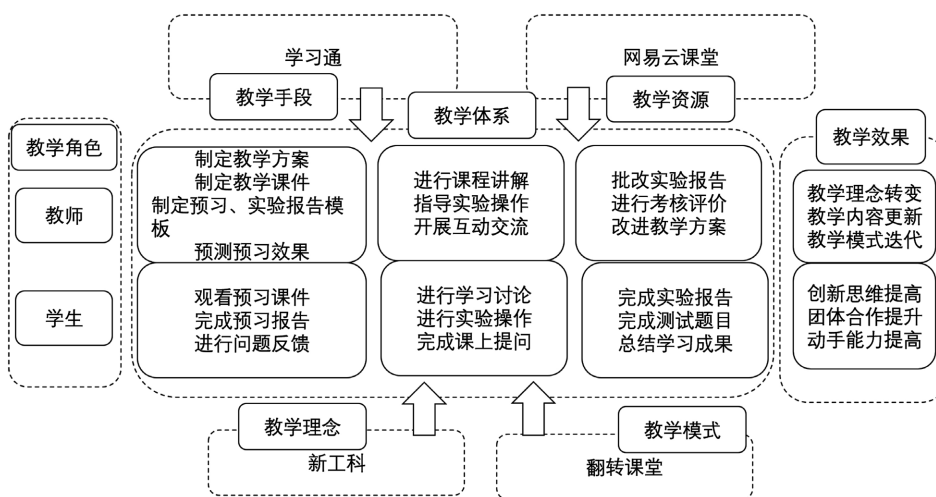


Figure 6. Flow chart of flipped classroom
图 6. 翻转课堂教学流程图

3.1. 课前准备

- 1) 建立课程 QQ 群，以便师生交流。

2) 创建电弧离子镀膜实验课程学习通班级。

3) 教师根据教学大纲和教学理念, 设计完成预习课件, 课件中嵌入电弧离子镀原理以及实验步骤, 让学生对本门实验有一定程度的了解。

4) 由于实验仪器较少, 故只能采取 8~10 人/组的授课方式, 教师需在课前依据班级名单并适当调整每组男女生的比例确定实验分组, 并将实验安排发布到 QQ 群, 要求同学实时掌握实验时间以及小组分配安排。

5) 教师将预习课件在学习通班级内发布和推送, 并开设问题讨论模块。

6) 学生利用课外时间分别在学习通和网易云课堂中提前预习课件内容和观看教学视频, 并进行客观题作答。

7) 要求学生结合预习情况, 撰写预习报告, 并将其带至课堂提交, 教师现场点评批。

3.2. 课中实验

1) 利用学习通进行课前点名和签到, 确保课堂纪律和授课学生无缺席。

2) 教师对学生进行实验分组, 让其提高团队协作意识和实验完成效率, 加深对电弧离子镀原理的理解。

3) 教师通过学习通结合课前预习情况, 着重就疑难问题和重要知识点进行讲解, 对关键实验环节进行仪器操作, 并让学生以小组作为单位汇报实验操作过程及操作重要事项, 提高学生思维能力和团队精神。

3.3. 课后总结

1) 学生通过学习通随时复习和回顾实验内容。

2) 学生根据实验情况, 完成纸质版报告并按时提交。

3) 教师对课前、课中、课后的教学情况进行及时总结和归纳, 以便于在往后的教学过程中能不断完善自我。

3.4. 教学评价

在翻转课堂教学模式下, 电弧离子镀膜实验考核通过过程性评价和结果性评价来实现, 教学评价机制如图 6 所示, 实验总成绩由预习报告(28%)、实验操作(28%)、课堂态度与纪律(14%)和实验报告(30%)等方面组成。在该考核模式下, 促进了学生自主意识以及创新能力。如表 1 所示为电弧离子镀实验考核方式。

Table 1. Evaluation methods and scoring proportion of arc ion plating experiment

表 1. 电弧离子镀实验考核方式与评分比重

考核维度	参考标准	权重	标准分
预习报告 (30%)	预习课件内容和观看教学视频	5%	5
	手写包括实验目的、实验原理、实验内容和主要实验布置	15%	15
	自主设计实验记录表格并记录数据	10%	10
实验操作 (25%)	严格按照实验要求操作实验仪器	15%	15
	记录实验数据	5%	5
课堂态度与纪律(15%)	认真听讲且态度端正	15%	15

Continued

实验报告 (30)	书写规范且实验报告要素完备	5%	5
	数据处理恰当	10%	10
	数据分析合理	10%	10
	总结与思考有个人独特见解	5%	5

4. 教学结果分析

在教学前的检查发现,通过线上和线下结合的课前安排,学生的参与度与以往纯线下的模式相比有了大幅度的提升。通过在课前就先进行细致的分组,明确了学生在课程开始前的分工与责任,提升了学生课前预习的效果。问题讨论模块的设置提高了学生的参与度,拓展了学生的思维与视野。现场点评预习报告为学生的提前预习起到了良好的督促作用,学生的预习率提高到了100%,且预习效果良好。

上课过程中发现,学习通的课前点名和签到环节,比传统的点名节省了更多时间,有效提高了点名效率,也大幅度杜绝了学生想蒙混过关缺席的侥幸心理。在预习环节的合理安排,让学生提前了解了实验的内容,调动了学生的积极性,课上提问明显增加,这也有效提升了师生在上课中的互动性效果。课程中的动手环节也变得更加有序,学生很快进入自己所承担的角色,团体协作效果得到了明显的提升。

课后的实验报告批改发现,通过混合式教学模式和翻转课堂的引入,实验报告的总体成绩较以往有了大幅的提升。实验报告的设计也更加贴合了“新工科”的要求,激发了学生自主意识以及创新能力。

5. 总结

新工科建设以新经济、新产业作为背景,更加强调学科的实用性、交叉性与综合性。“新工科”理念促进了传统工科专业的实验体系的改革升级,从而不断适应经济发展和人才培养需要。本文以涉及工科新兴领域的“阴极电弧离子镀实验”课程为例,开展了“新工科”背景下的教学内容改革和基于“翻转课堂+学习通+网易云课堂”的混合式教学模式创新,实现了“以教师为中心”到“以学生为主体,教师为引导者”的教学理念转化。利用线上优势,在课前细致布置预习任务,有效督促了学生的预习工作,提升了预习效果。在教学中的细致分组,为学生的分工合作提供了温床。课后评价的改革,拓展了学生的发散思维,锻炼了学生的自主学习、团队协作、创新思维以及动手实践能力。总而言之,合理利用“线上”+“线下”的结合模式,契合了“新工科”背景下对教学的要求,提升了学生在课堂中的教学参与度和教学效果。

基金项目

2021年广东省本科高校校企联合实验室-“岭师-江海行”真空技术创新联合实验室(2021-105790023);广东省2021年省一流本科课程-原子物理学,岭南师范学院质量工程项目:真空技术与装备产业学院(2021-105790027)。

参考文献

- [1] 朱琳,吴浩峻,康宝仲,王浩亮,王晓.“新工科”背景下船舶锅炉水位控制综合实验设计及混合式教学研究[J].实验技术与管理,2021,38(10):232-236.
- [2] 乔宏,李灿伦,蔺增,等.电弧离子镀弧斑运动对膜层质量影响分析[J].真空,2022,59(5):32-37.
- [3] 王树正,鄢强,杜鸣皓,等.电弧离子镀弧源的研制进展[J].真空与低温,2022,28(2):180-186.
- [4] 张以忱.真空镀膜技术[M].北京:冶金工业出版社,2009:245-265.
- [5] 张燕,谢卫东.大学物理实验教学考核现状及分析[J].科技风,2021(36):28-30.