

基于混合式教学法的计算材料学系列课程教改实践

郁亚娟, 郭兴明, 陈人杰

(北京理工大学材料学院, 北京 100081)

摘要: 计算材料学系列课程是高校材料专业的主要课程之一, 是介绍关于材料组成、结构及性质的计算机模拟与设计的课程。通过此课程的学习, 可使学习者了解和掌握材料计算和模拟的基础知识, 进而具备利用计算模拟方法进行材料科学研究的能力。然而, 计算材料学课程内容中包含大量的理论性概念知识, 复杂的数学公式、算法和高阶的理论推导, 采用传统的单向授课方法, 学习思考难度大、理解存在偏差, 影响学习积极性和主动性, 导致整体教学效果差强人意。基于此, 开展了基于混合式教学法的计算材料学系列课程教学改革的探索和实践。通过引入混合式教学理念, 在实际教学过程中采用线上线下混合教学、多媒体教学和虚拟现实技术等多种方式, 不但强调了教师的“传授知识”功能, 而且实现了学生作为学习主体的角色定位, 并将研究性教学模式引入课堂, 引导学生结合科研项目去理解、掌握计算材料学的知识点。实践证明, 这一系列的教改探索取得了初步效果, 它有效地把学习者的学习由浅到深地引向深度学习, 为高校相关专业课堂教学改革提供了借鉴和参考。

关键词: 混合式教学; 计算材料学; 课程改革; 研究性教学

中图分类号: N41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2021)12-1015-08

Teaching Reform Practice in Series of Courses on Computational Materials Science Based on Hybrid Teaching Method

YU Yajuan, GUO Xingming, CHEN Renjie

(School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Computational material science is one of the main courses of material majors in college, in which computer simulation and design of materials composition, structure, characteristics are introduced. Through the course, students can understand and master the basic knowledge of material calculation and simulation, and then have the ability to conduct material science research with the aid of computational simulation method. However, the content of computational materials science courses contains a large number of theoretical concepts, complex mathematical formula algorithm and high-order theoretical derivation, traditional teaching method is difficult to grasp the students' attention for a long time, which would lead to difficulties in learning process and finally cause students' enthusiasm decline. The overall effect of teaching and learning would also be unsatisfactory. In order to solve the problem, this paper carries out the exploration and practice of the teaching reform on a series of courses of computational materials science with a hybrid teaching method. By introducing hybrid teaching concept, online and offline hybrid teaching, multimedia teaching, virtual reality technology and various ways are combined in the process of practical teaching, and research-oriented teaching mode is introduced in the classroom, guiding the students to digest and apply the knowledge of computational materials science in scientific research project. The students in class can pay more attention on deep learning, and show more emphasis in learning process. Practice has proved that this series of educational reform exploration has achieved initial results. The teaching reform practice can provide a reference for relevant majors in universities.

Key words: hybrid teaching; computational materials science; curriculum reform; research-based teaching

收稿日期: 2020-06-18 **修回日期:** 2020-08-11

基金项目: 北京高校卓越青年科学家计划项目(BJJWZYJH01201910007023); 北京理工大学“研究生教育实践类改革重点项目”(2020SJG002)

第一作者: 郁亚娟, 女, 1978 年生, 副教授, 硕士生导师

郭兴明, 男, 1973 年生, 讲师, 硕士生导师

通讯作者: 陈人杰, 男, 1976 年生, 教授, 博士生导师,

Email: chenrj@bit.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202006020

1 前言

面对全球性的新型冠状病毒肺炎疫情和国际局势动荡及挑战, 中国人民切身体会到, 唯有紧密团结在党中央周围, 自力更生, 依靠自己的医疗、科技和工业实力, 才能实现社会主义现代化强国建设, 这也对人才培养提

出了更加紧迫的需求。材料科学与工程专业面临着激烈的国际竞争,迫切需要进行教育教学改革,以达到“具备国际化水平和本土化技术”的人才培养目标。

实验、理论和计算是现代材料科学研究的三大手段,其中计算模拟方法在未来的材料研究中将显示出越来越大的应用潜力。可把计算材料学(computational materials science)理解为用计算机模拟、预测来做材料科学实验,其优点是安全、节约、高效^[1]。了解和掌握材料计算和模拟的基本知识已成为现代材料研究人员必备的技能之一^[2]。计算材料学一系列课程,在北京理工大学材料学院对应的本科课程是《计算材料学》,硕士研究生课程是《新能源材料多尺度模拟与计算》,博士生课程是《能源及环境材料设计计算与建模》。

新工科(Emerging Engineering Education)的内涵是以立德树人为引领,以应对变化、塑造未来为建设理念,以继承与创新、交叉与融合、协调与共享为主要途径,培养未来多元化、创新型卓越工程人才,具有战略性、创新性、系统化、开放式的特征^[3]。显然,计算材料学领域的人才培养符合新工科的培养目标。在我国现有条件下,如何发展和掌握这类科学计算的新技术,对国家的经济建设有很大的意义^[4]。同时,培养计算材料学的相关人才,也有利于促进我国材料工业生产水平,促进效率提升和成本降低^[5]。

2011年底,美国提出了材料基因组计划(Materials Genome Initiative, MGI),目标是把新材料研发周期减半并降低研发成本,以期增强美国的国际竞争力。我国于同年底在北京召开了主题为“材料科学系统工程”的香山科学会议,会议决定选择锂离子电池材料作为代表性示范材料之一,计划将材料基因工程手段应用于锂离子电池研发^[6]。北京理工大学材料学院的新能源材料方向研究处于国内领先水平,尤其是对锂离子电池等储能材料的研发开展较为深入。针对新能源材料开发领域的国家战略需求,我们开设的计算材料学课程将新能源材料的模拟和计算作为课程教学实践的重点之一。

2019年,美国能源部宣布,将调整“利用高性能计算促进能源创新”计划,为美国在能源、计算和工业领域的研发水平领跑全球助力^[7]。面对这样激烈的国际行业竞争,我国材料工业绝不能坐以待毙,应该积极行动,从培养人才入手,在各大高校的新能源材料研究方面积蓄力量。具体到计算材料学课程教学而言,就是要全面加速培养新能源材料模拟计算方面的人才,使我国的新能源材料研发迎头赶上国际先进水平,进一步立足于世界材料工业竞争之列。

传统的计算材料学课程,包含大量的理论性概念知

识、复杂的数学公式和高阶的理论推导。如果采用单纯面对面授课方法和传统课件传递形式,很难长久抓住学生的注意力,反而会导致学生在学习过程中感到吃力、学习积极性下降,无法达到预期教学目标^[8],极大限制了学科发展和人才培养。因此,对计算材料学课程的教学内容和教学模式的改革势在必行。

“混合式教学法”,是具有中国特色的一种教学方法,特指教师经过教学设计,使得学生发生了混合式学习行为^[9]。混合式教学将线上的数字化在线教育与线下的课堂教学相结合,强调以学生为中心,充分发挥学生作为学习主体的积极性、主动性、创造性,并借助在线教育资源与信息技术促进课程教学,以达到更加有效的学习效果^[10]。在计算材料学系列课程教学中采用混合式教学法,是该课程改革的重要导向,有利于提高学生学习效率,增强学习效果。

2 计算材料学系列课程改革的目标

计算材料学涉及材料、物理、化学、数学以及计算机等学科,相关的基础理论和算法内容丰富,特别是要具备量子力学、固体物理及密度泛函理论等相关知识^[11]。计算材料学主要包括两方面内容:一是对现有材料的计算模拟,即从实验到模型;二是对未来材料进行计算机设计并用实验来验证,即从模型到实验。无论是走哪条路径,都要求掌握充分的理论和实验知识,也就是要实现“两条腿走路”。

计算材料学系列课程改革的目标,就是要培养兼顾材料理论与计算设计两方面能力的复合型人才,通过人才竞争去争夺新材料领域各个学科方向的领先地位和知识产权^[12]。为了突出计算材料学的培养优势,我们主要强调在该系列课程教学中重点完成以下两个教学改革目标:

(1) 教学目标

通过在课前、课中和课后进行计算材料学的混合式教学,完成计算材料学有关的理论教学和实践教学目标。针对能源与环境材料的微结构特征和系统模型,讲述相关的材料设计理论、模型构建及评价方法,帮助学生了解能源与环境材料设计计算与建模方面的基础理论、基本方法和发展前沿,掌握建模的相关方法和软件工具,并获得一定的实际运用和操作实践能力,最后,学生能进行初步的能源及环境材料设计计算与建模的实践应用。

(2) 学科人才培养目标

为高技术所需新材料的研制培养人才,希冀此类人才能够熟练掌握和应用计算材料学的理论基础和技术手段,能在未来新型材料与新技术发明方面,发挥前瞻性

价值,为我国社会经济发展和国防建设做出重要贡献。

3 采用混合式教学法的实践

3.1 课程模块设计:传统模块、线上模块、研究性模块

针对计算材料学系列课程改革的主要课程模块设计如图 1 所示,主要包括 3 个模块:一是传统教学模块,就是基于传统的教学楼/教室内的教师-学生面对面的教学形式,这是一种最基本的传统教学模式,作为教师和学生直接沟通的渠道予以保留;二是线上学习模块,是

通过乐学平台、雨课堂、企业微信群等各类线上平台,便于教师和学生分享学习资料、视频、课件,也便于师生随时就学习问题进行讨论和沟通;三是研究性教学模块,是基于计算材料学系列课程具有的突出科学研究特色,而新增的一个教学模块,通过这一模块,可以帮助学生深入有关计算材料学方向的科研项目(虚拟项目或实际项目),从科研项目中适应性学习,从而达到锻炼学生实际工作能力的目标。

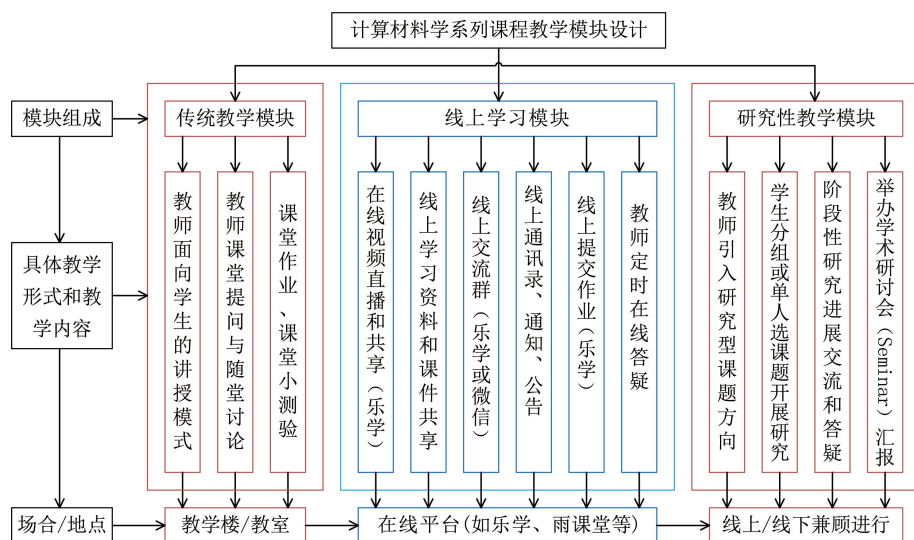


图 1 计算材料学系列课程的教学模块组成设计

Fig. 1 The design and function of the teaching modules for series of courses on computational materials science

3.2 课程设计:线上线下混合式教学法

混合式教学法是具有中国特色的教学模式。在混合式教学法实施过程中,教师与学生的职责和角色都发生了重大变化,不但强调教师的“传授知识”功能,而且更加强调学生作为学习主体的角色定位。混合式教学模式中,教师主要作为教学的组织者、课堂的引导者及学习的协助者,帮助学生探究问题、构建知识体系;学生作为学习活动的主要实践者,在教师的指导下完成课堂任务的学习,反馈学习的体验。利用学生的反馈信息,教师能够及时调整具体的教学方法和教学进度,避免出现教师单一灌输、学生被动接受的消极教学效果。这样的教学模式,显然是优于传统的“填鸭式”教学效果的,但也不是单纯的“学生中心”论,而是把教师和学生有机地联系起来,达到“教学相长”的目标。

混合式教学法强调的是线上线下教学有序地混合,“教师主导、学生主体”是其最重要的形式^[13]。我们针对计算材料学系列课程设计了混合式教学模式,其所谓“混合式教学”,主要体现在以下 4 个方面:第一,线上线下教学方式的混合;第二,传统教学和翻转课堂式教学方

式的混合;第三,理论教学和科研实践之间的混合运用;第四,教学课件和虚拟现实(virtual reality, VR)技术等多媒体教学形式的混合。

实际教学中,要求学生在线上预先学习,让学生预先通过移动学习媒介(例如雨课堂、慕课、乐学平台等)学习老师提前发布的学习任务、辅助性资料和引导性案例等,促进学生对课程内容具备初步理解,对知识点进行消化和吸收,同时把预习中产生的问题带来教室,以便有针对性地听老师讲解^[14]。各类线上平台是移动环境下交互教学全新时代的移动教学助手,它们能为混合式教学提供很好的网络教学平台^[15]。

为了加强学习效果,教师会对预习内容在课堂上做一个小测验,以便巩固预习效果。在课程教学过程中,教师会尽量融汇最新的教学设计理念,给出较新的教学设计方案^[16],教学内容包括国际上最新的材料设计方向、最先进的材料计算软件等。在课堂上还将针对学生学术水平特点,给出几个大方向的科研任务,鼓励学生基于教学内容进一步开发科研、创新创业课题,并在课程后期提交一个研究报告,这是延长

课程、进行科研实践教学的良好途径。通过基于混合式教学法的课程学习,学生可以熟悉计算材料学的有关理论、算法、软件、算例等,为后续参与新能源材料的模拟和计算研究夯实基础。

此外,教师还会采用一些新技术来加强教学效果。比如,通过采集图像、制作动画、制作 VR 影像等,来展现材料的立体特征、物化特性等,由此可以提高学生对材料的深刻理解。在部分课程教学过程中,采用了 VR 技术,如在讲述物质的尺度问题时,选用了 VR 技术来展现从宇宙宏观到纳米甚至更小量级的尺度。在展示材料微观结构时,VR 技术可以让学生置身其中,感觉好像真地看到了分子结构一样^[17],这对于激发学生学习兴趣起到了很好的作用。

3.3 研究性教学模式

计算材料学也是材料科学研究的热点领域,适合于进行研究性教学^[18]。传统的材料研制方法以试错法为主,即利用现有材料相关的理论与知识经验,通过调整材料成分和制备工艺,对数量巨大的样品进行制备、表征、测试和检验等流程,最终找到满足需求的材料。

材料基因工程技术将传统的实验筛选方法与高通量计算和大数据技术相结合,通过物理模型、数学计算和材料学原理等方法预测材料的组成、结构和性质,使新材料研发从完全经验型向理论预测型转变,是材料研发模式的一次革命性突破^[19]。美国于 2011 年启动材料基因组计划,中国于 2015 年启动国家重点研发计划材料基因工程专项。

材料模拟和设计是材料基因工程的重要组成部分,其目标是通过理论模拟和计算完成先进材料的“按需设计”并实现数字化制造,包括材料计算软件研发、材料结构和性能的预测和优化、新材料的分子设计等研究内容^[20]。在计算材料学系列课程的教学过程中,引入基于科研的研究性教学模式,通过科研项目把课程关联起来,引导学生主动学习、参与科研。在钻研科研项目算例和案例的过程中,学生自主性驱动自我学习过程,同时参与团队合作,与教师讨论问题,通过从科研项目选题到完成的全过程,培养学生的素质、知识和技能。

我国材料基因组计划的目标是变革材料研发理念和模式,实现新材料研发的“理论预测+实验验证”新模式,突破关键材料核心技术,为实现“中国制造 2025”做出贡献^[21]。因此,计算材料学系列课程改革也应该面向这一目标,加强对新材料的理论计算和模拟、预测功能。

以锂离子电池无机固体电解质材料的研发为例,其科研目标是提高锂离子电池的安全性和能量密度。在科研探索中,我们引导学生利用材料基因组的思想将计算、

数据库与实验结合,提高无机固体电解质材料的研发和优化速度,设计优化目标包括高的电导率、良好的机械性能、对环境以及电池正负极的稳定性等。

我们选择课题组在材料基因工程方面的最新研究成果作为研究性教学的范例。例如,课题组针对新型缺陷结构的 $\text{Co}_{0.85}\text{Se}$ 纳米片电极,应用一种基于密度泛函方法的从头算量子力学程序 CASTEP 模块,计算揭示了缺陷作用下的空位传输机理和电子能带结构演化,剖析了电子能带结构变化对其电子电导率提升的重要影响,并阐明了 Na^+ 在缺陷结构中的传输能垒降低与局部电子结构变化的对应关系,如图 2 所示,为可控缺陷形成及其作用机制的研究提供了重要的理论依据^[22]。此范例可为学生提供 CASTEP 软件模块的体验学习。

此外,课题组针对新设计的聚多巴胺修饰功能隔膜,应用 DMol3 模块研究了聚多巴胺材料对于各种多硫化物的捕获能力;阐明了基于电荷的不对称分布引起强静电作用力的“捕硫机制”,提出了含有孤对电子的杂原子强化“捕硫能力”的新概念;结合经典的分子力学动力学模块 Forcite Plus 计算证明了强聚合物链间相互作用可以有效抑制多硫化物穿梭的内在机制^[23],如图 3 所示。此范例可为学生提供 DMol3 模块的体验学习。

4 课前、课中和课后应用形式

混合式教学模式是中国特色高等教育的一个创新和特色,它并不是彻底地把课堂迁移到网上从而简化教师工作,更不是“线上”与“线下”的简单机械相加,而是通过课前导学、线上自主学习、课堂重点难点讲解、课后线上线下深度讨论等方式,建立以学生为学习主体的“学生自主模式”,培养学生独立思考、自主学习的能力,从而取得最好的学习效果。针对计算材料学系列课程,基于混合式教学法,设计了课程的课前、课中、课后学习流程,如图 4 所示。

第一阶段:课前

在课前阶段,教师的任务是首先组织教学团队,完成教学目标和大纲的设计,提交教学内容和教学日历。随后,制作视频课件,将知识点的重点、难点、疑点等,通过文字、图像、声音、动画等多种媒体手段,进行生动、形象、准确地讲授。同时,探索网络教学模式,提高信息传输量,强化教学内容的深度与广度^[24]。采用混合式教学法,在课前阶段需要教师付出大量的时间进行教学准备,尤其是教学视频的录制和后期加工,需要教师和教研组人员尽量根据学生学习需要,做好课程教学资源库的建设工作,要用丰富的教学资源,吸引学生主动学习、提前学习,以便加强学习效果。

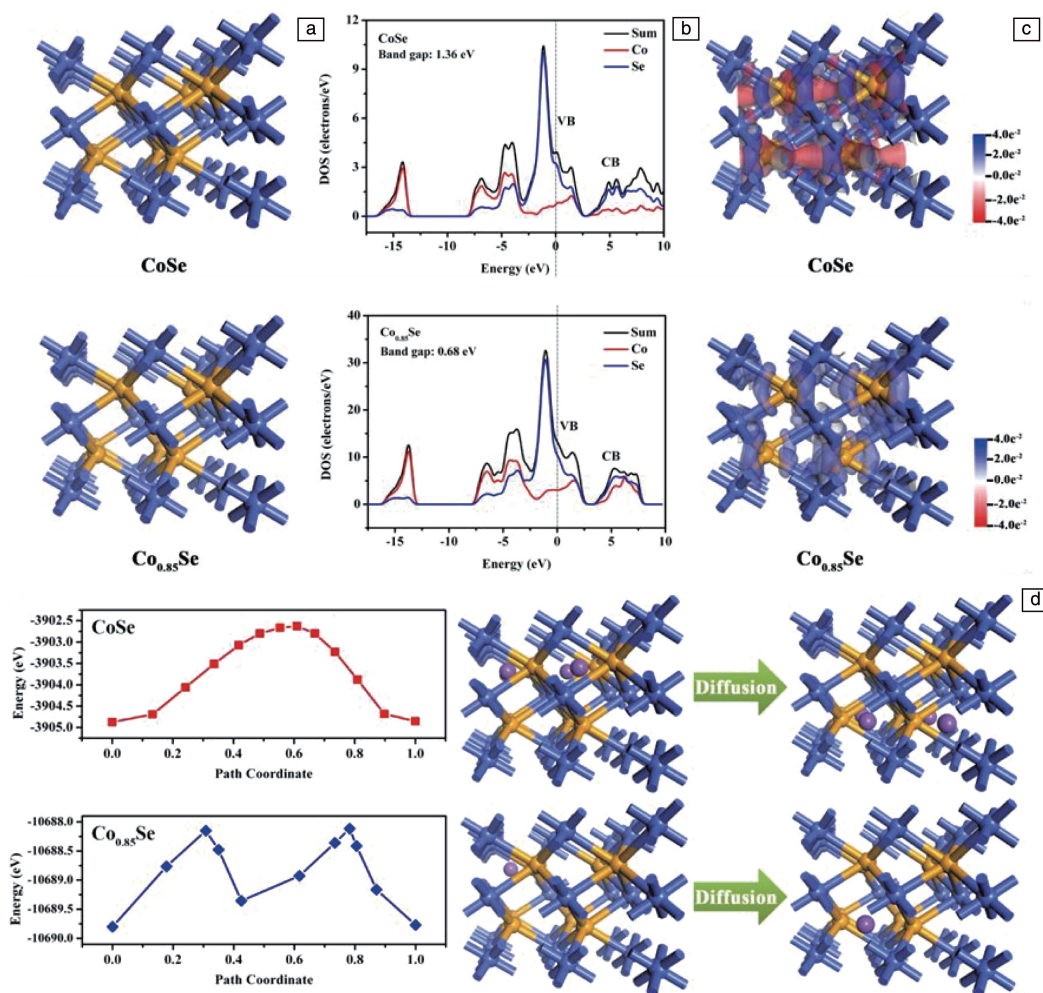


图2 CoSe 和 Co_{0.85}Se 的晶体结构(a)、总态密度(density of states, DOS)和分态密度(partial density of states, PDOS)谱(b)、电子密度分布(electron density distribution, EDD)图(c);在拟定传输路径中单个 Na⁺ 的迁移能垒和 Na⁺ 在 CoSe 和 Co_{0.85}Se 中沿空位路径的迁移轨迹(d)^[22]

Fig. 2 Crystal structures (a), DOS and PDOS spectra (b), EDD diagrams (c) of CoSe and Co_{0.85}Se; the calculated migration energy barriers of the single Na⁺ ions along the described paths and schematic illustration of possible Na⁺ ion diffusion trajectories in CoSe and Co_{0.85}Se through the vacancy site (d)^[22]

第二阶段：课中

因为学生已经在线上平台预习了课程知识，因此到了课中阶段，也就是在课堂上，教师不必再重复理论知识点，只需要把学生遇到的问题解答清楚，并根据课堂小测验的结果，重点强化一下学生们知识掌握的弱点部分即可^[25]。教师根据学习反馈的具体情况，可以在课中进行点评与指导，从而帮助学生巩固知识要点。教师还可以针对当前计算材料学的前沿问题，准备一些拓展知识点和热点新闻，例如当前国际储能领域的最新研究进展，与学生分享和讨论，加深学生对学科知识的理解与记忆。在课程的后半阶段，要求学生参与研究性教学，并进行 Seminar 汇报。此处 Seminar 可以理解为“研讨会”的意思，学生在教师的指导下，从事开创性课题

研究或深入课题学习，教师和学生课堂上面对面地讨论学生的研究报告和研究进展。此时的 Seminar 应该是比 workshop 所进行的科普类探讨更深层次的研究性讨论形式，即在课中，利用后半部分的课堂教学时间，学生根据自己分配到的科研任务，到讲台上分享他们进行的科学研究(包括材料模拟和计算、软件应用探索等)，且分享形式可多样化，PPT、视频、动画、直接演讲均可。

第三阶段：课后

授课结束后，教师根据课堂讨论效果在乐学平台或者其它线上平台，提交课程评价结构，并继续通过师生共同在线讨论的方式来解决学生的疑问^[26]。课后，继续利用线上教学环节，教师随时给学生答疑，并且引导学

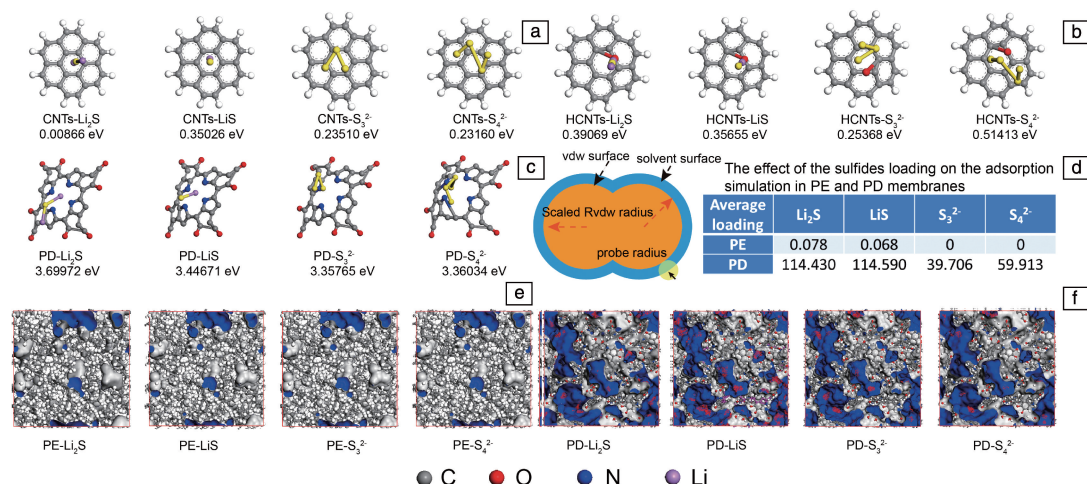


图 3 多硫化物与不同隔膜之间的化学作用力和物理吸附量动力学模拟：表面分别吸附 Li_2S 、 LiS 、 S_3^{2-} 与 S_4^{2-} 时的碳纳米管 (carbon nanotubes, CNTs) (a)、羟基化碳纳米管(hydroxylated carbon nanotubes, HCNTs) (b) 和聚多巴胺 (polydopamine, PD) (c) 的结构俯视图, 图中下方为计算得到的相应结合能; 聚乙烯 (polyethylene, PE) 和 PD 隔膜的自体积示意图和硫化物负载量(d); PE (e) 与 PD (f) 隔膜的硫化物吸附模拟^[23]

Fig. 3 The molecularly chemical binding and physical adsorption of polysulfides on different separators by the dynamic simulation; structure top view of Li_2S , LiS , S_3^{2-} , and S_4^{2-} on CNTs (a), HCNTs (b), and PD (c) surfaces, the calculated corresponding binding energy is also shown; schematic diagram for calculating free volume and the average loading of sulfides of PE and PD separators (d); simulation of the sulfides absorption in PE (e) and PD (f) separators^[23]

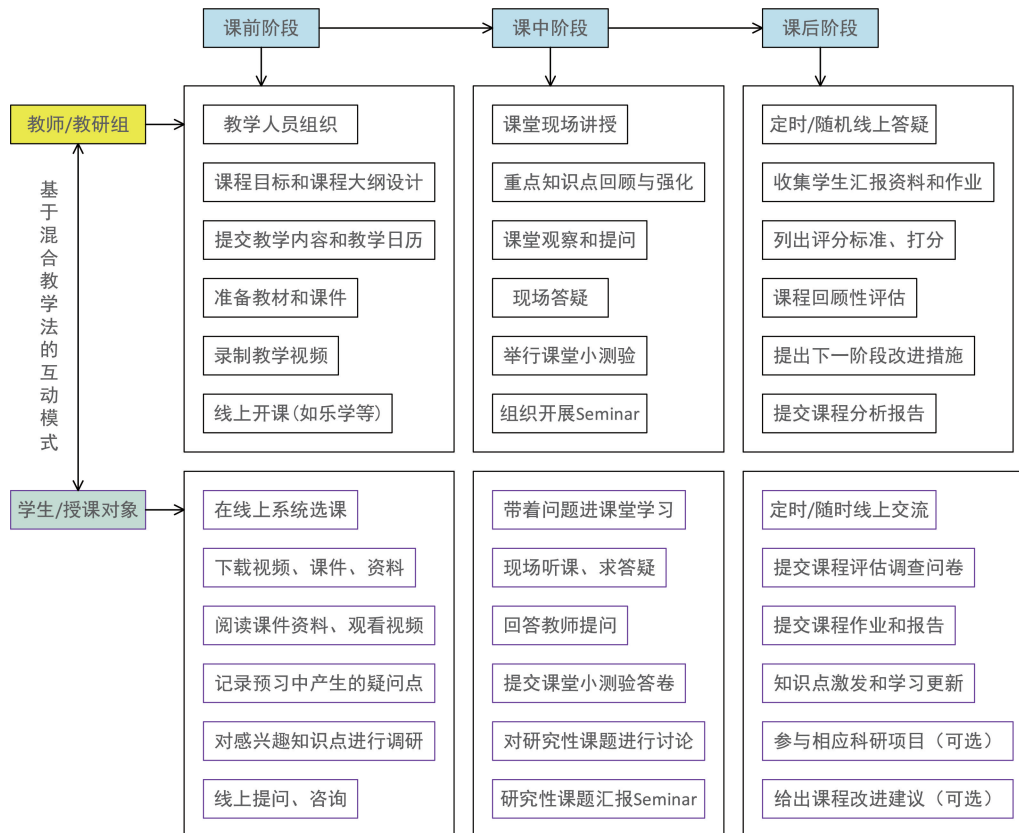


图 4 计算材料学系列课程的教学流程图

Fig. 4 The teaching flow chart of series of courses on computational materials science

生就自己感兴趣的知识点继续学习,并以丰富的教学资源通过线上教学环节让学生继续保持研究兴趣,做到“停课不停学”,增加学生的科研兴趣,满足不同学生的学习需求。通过课后学习的总结,教师可以检查学生学习效果,发现学生学习过程中的共性问题,在下次开课时,可以对重点和难点知识讲解得更充分,使得学生对知识的掌握更透彻^[27]。

5 课程考核方式和考核标准

考核的目的是检验学生对知识的掌握和能力的提高程度,以便考察教学效果,为将来的教改提供依据。为了更好地评价学生在课程学习、研究性教学过程中的完成效果以及能力增长情况,计算材料学系列课程建立了一种双向考核模式:一方面是学生评价课程方式,即学生在线提交对课程的评价,提出改进建议,完成自我评价;另一方面是教师评价学生方式,教师在线提交对学生课程作业的评分,完成教师自评。教师对学生的考核结合课堂出勤率、课堂 Seminar 汇报以及论文报告方面的表现完成情况,其中,课堂出勤率占 10%,课堂 Seminar 汇报占 30%,对课堂 Seminar 汇报的论文总结占 60%。

教师评价是整个评价中权重最重的部分,为事后评价。评分系统的建立应努力使结果评价在公正的基础上更加科学,也能够为实验课程及其开放模式的发展提供方向^[28]。平时成绩由任课教师根据上课出勤、课堂讨论发言积极性及课后作业综合给出。通过课程考核方式的不断改革,可使学生改进学习方法,全面提高学生能力和素质,激发学生创新思维,使学生理论联系实践,解决计算材料学中的实际问题;同时也促使教师不断总结、探索创新,以考试改革理念为“指挥棒”,进一步改进教学方法,提高教学质量,全面培养学生的综合能力、实践能力^[29]。

6 结 论

世界范围内的新能源材料研发竞争激烈,对我国材料科学与工程专业的培养提出了更高要求,我国材料界高校和研究院所应加速培养能够运用计算机和人工智能开发新材料的各类人才^[30]。在混合式教学法的实践尝试中,我们采用线上线下混合教学、多媒体教学和虚拟现实技术混合等多种教学方式的组合,不仅要求教师向学生传授知识,还要求学生作为学习主体,以主动参与科学研究作为一种学习形式。混合式教学法可以实现以学生为主体的教学,使学生独立思考和解决问题的能力得到显著增强,教学效果得以有效提高,为当今社会培养应用型人才提供保障。采用混合式教学法,结合研

究性教学内容,有利于培养学生的自主学习能力,实现人才培养目标;有利于提高教师的专业水平和教学能力;有利于提升材料专业的整体教学质量和办学水平。

参考文献 References

- [1] 冯聪. 教育教学论坛[J], 2018(20): 116-117.
FENG C. Education Teaching Forum [J], 2018(20): 116-117.
- [2] 刘建军,尹新国,张金锋,等. 淮北师范大学学报(自然科学版)[J], 2013, 34(1): 83-86.
LIU J J, YIN X G, ZHANG J F, et al. Journal of Huaibei Normal University(Natural Science Edition)[J], 2013, 34(1): 83-86.
- [3] 钟登华. 高等工程教育研究[J], 2017, 3: 1-6.
ZHONG D H. Research in Higher Education of Engineering [J], 2017, 3: 1-6.
- [4] 杜强. 信息科学与微电子技术:中国科协第三届青年学术年会论文集[C]. 北京:中国科学技术协会,1998:171-173.
DU Q. Information Science and Microelectronics: Proceedings of the Third Annual Youth Academic Conference of China Association for Science and Technology[C]. Beijing: China Association for Science and Technology, 1998: 171-173.
- [5] 郭永春,杨忠,梁艳峰,等. 铸造技术[J], 2017, 38(8): 1978-1981.
GUO Y C, YANG Z, LIANG Y F, et al. Foundry Technology[J], 2017, 38(8): 1978-1981.
- [6] 万勇,冯瑞华,王桂芳. 科技管理研究[J], 2014, 34(23): 69-72.
WAN Y, FENG R H, WANG G F. Science and Technology Management Research[J], 2014, 34(23): 69-72.
- [7] 陈济彬. 美国能源部“利用高性能计算促进能源创新”战略计划解析[N]. 中国航空报, 2019-06-04(008).
CHEN J H. Analysis of the U. S. Department Energy's Strategic Plan of "Promote Energy Innovation through High-Performance Computing" [N]. China Aviation News, 2019-06-04(008).
- [8] 陈逸凡,陆潇晓,鲍亮,等. 黑龙江生态工程职业学院学报[J], 2020, 33(1): 126-128.
CHEN Y F, LU X X, BAO L, et al. Journal of Heilongjiang Vocational Institute of Ecological Engineering[J], 2020, 33(1): 126-128.
- [9] 于敬杰. 中国大学教学[J], 2019(5): 14-18.
YU X J. China University Teaching[J], 2019(5): 14-18.
- [10] 董亚洁,裴亚南,王鑫. 中国现代教育装备[J], 2019(325): 34-37.
DONG Y J, PEI Y N, WANG X. China Modern Educational Equipment[J], 2019(325): 34-37.
- [11] 吴南,于宜博,王家佳,等. 中国教育信息化[J], 2019(24): 86-89.
WU N, YU Y B, WANG J J, et al. The Chinese Journal of ICT in Education[J], 2019(24): 86-89.
- [12] 冯瑞华,姜山. 科技管理研究[J], 2014, 34(3): 34-39.

- FENG R H, JIANG S. Science and Technology Management Research [J], 2014, 34(3): 34-39.
- [13] 金晨. 高教学刊[J], 2019(25): 130-132.
JIN C. Journal of Higher Education[J], 2019(25): 130-132.
- [14] 艾建平, 胡丽玲, 李文魁, 等. 山东化工[J], 2019, 48(22): 204.
AI J P, HU L L, LI W K, *et al.* Shandong Chemical Industry[J], 2019, 48(22): 204.
- [15] 张福兰, 刘艳, 袁斌芳, 等. 课程教育研究[J], 2019(44): 39-40.
ZHANG F L, LIU Y, YUAN B F, *et al.* Course Education Research[J], 2019(44): 39-40.
- [16] 张海连, 李东旭, 陈宏伟, 等. 广州化工[J], 2019, 47(24): 178-180.
ZHANG H L, LI D X, CHEN H W, *et al.* Guangzhou Chemical Industry[J], 2019, 47(24): 178-180.
- [17] 郭玉花, 计宏伟, 乔志霞. 包装工程[J], 2004(3): 204-205.
GUO Y H, JI H W, QIAO Z X. Packaging Engineering[J], 2004(3): 204-205.
- [18] 刘艳侠, 孙嘉兴, 邱巍, 等. 辽宁大学学报(自然科学版)[J], 2015, 42(4): 330-337.
LIU Y X, SUN J X, QIU W, *et al.* Journal of Liaoning University (Natural Sciences Edition)[J], 2015, 42(4): 330-337.
- [19] 杨明理, 崔颖琦, 马兴涛, 等. 第六届全国计算原子与分子物理学术会议论文集[C]. 新乡: 计算原子与分子物理专业委员会, 2016: 156.
YANG M L, CUI Y Q, MA X T, *et al.* Proceedings of the Sixth National Conference on Computational Atomic and Molecular Physics [C]. Xinxiang: Professional Committee on Computational Atomic and Molecular Physics, 2016: 156.
- [20] 李天听, 周北海, 宋存义, 等. 高等理科教育[J], 2011(4): 92-94.
LI T X, ZHOU B H, SONG C Y, *et al.* Higher Education of Sciences[J], 2011(4): 92-94.
- [21] 高鸿, 何端鹏, 董礼. 航天器环境工程[J], 2019, 36(3): 205-210.
GAO H, HE D P, DONG L. Spacecraft Environment Engineering [J], 2019, 36(3): 205-210.
- [22] HUANG Y X, WANG Z H, JIANG Y, *et al.* Nano Energy[J], 2018, 53: 524-535.
- [23] WU F, YE Y S, CHEN R J, *et al.* Nano Letters[J], 2015, 15(11): 7431-7439.
- [24] 李长荣, 郭翠萍, 徐呈亮, 等. 中国冶金教育[J], 2018(1): 52-53.
LI C R, GUO C P, XU C L, *et al.* China Metallurgical Education [J], 2018(1): 52-53.
- [25] 姜慧莹. 南方农机[J], 2019, 50(23): 195.
JIANG H Y. China Southern Agricultural Machinery[J], 2019, 50(23): 195.
- [26] 钟海艺, 李培源. 山东化工[J], 2019, 48(24): 156-157.
ZHONG H Y, LI P Y. Shandong Chemical Industry[J], 2019, 48(24): 156-157.
- [27] 王皓, 林海燕. 智库时代[J], 2019(50): 201-202.
WANG H, LIN H Y. Think Tank Era[J], 2019(50): 201-202.
- [28] 盖登宇. 中国现代教育装备[J], 2017(259): 63-66.
GAI D Y. China Modern Educational Equipment[J], 2017(259): 63-66.
- [29] 王彦芳, 石志强, 曹宁, 等. 中国现代教育装备[J], 2016(235): 65-67.
WANG Y F, SHI Z Q, CAO N, *et al.* China Modern Educational Equipment[J], 2016(235): 65-67.
- [30] 陈济桁. 第八届中国航空学会青年科技论坛论文集[C]. 江门: 中国航空学会, 2018: 1333-1336.
CHEN J H. Proceedings of the 8th CSAA Science and Technology Youth Forum[C]. Jiangmen: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2018: 1333-1336.

(编辑 惠 琼)