《化工传递过程基础》的教改实践：贯通“传递－结构－性能”的教学模式探索

冯东[1,2]，谢于辉[1,2]，吴枫[1,2]，谢德龙[1,2*]

1. 昆明理工大学 化学工程学院，云南 昆明 650500

2. 云南省磷化工节能与新材料重点实验室，云南 昆明 650500

DOI: 10.61369/SDME.2026040038

摘　　要： 《化工传递过程基础》是化工专业的核心课程，传统教学主要关注均一流体在宏观设备中的传递规律，与当前化工学科向功能化、材料化的发展趋势存在脱节。学生普遍反映理论抽象、缺乏前沿应用联系，难以形成运用传递原理设计材料微观结构以实现特定功能的工程思维。基于昆明理工大学的教学实践，本文结合授课教师在材料设计领域的研究积累，提出并实践“传递－结构－性能”一体化的教学模式改革。该模式以材料制备与性能实现中的关键传递问题为案例，反向融入“三传”理论教学，并设计多层次项目探究环节，引导学生从被动学习公式转向主动运用传递原理解决材料设计与工程放大中的实际问题，从而弥合经典理论与现代材料化工前沿之间的差距，提升学生的工程创新能力和学科融合视野。

关 键 词： 传递现象；教学改革；材料设计；项目式学习；跨学科融合

Teaching Reform Practice of "Introduction to Transport Processes": Exploring a Teaching Model that Integrates "Transport-Structure-Performance"

Feng Dong[1,2], Xie Yuhui[1,2], Wu Feng[1,2], Xie Delong[1,2*]

1.Faculty of Chemical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500

2. Yunnan Provincial Key Laboratory of Energy Saving in Phosphorus Chemical Engineering and New Phosphorus Materials, Kunming, Yunnan 650500

Abstract: Fundamentals of Transport Processes in Chemical Engineering is a core chemical engineering course. Traditional teaching focuses on transport phenomena in homogeneous fluids at the macroscopic scale, which is disconnected from the field's shift toward functionalization and materialization. Students often find the theory abstract and struggle to connect it to cutting-edge applications, hindering their ability to apply transport principles to design material microstructures for specific functions. Drawing on teaching practices at Kunming University of Science and Technology and instructors' expertise in material design, this paper proposes a "transport-structure-performance" integrated teaching reform. This approach uses key transport challenges in material preparation and performance as case studies, integrating them with the "three transport processes" theory. Through multi-level project-based inquiry, students shift from passive formula learning to actively applying transport principles to solve real-world problems in material design and process scale-up. This bridges the gap between classical theory and modern material chemical engineering, enhancing students' innovation skills and interdisciplinary perspective.

Keywords: transport phenomena; teaching reform; material design; project-based learning; interdisciplinary integration

引言

化学工程学科正经历向绿色化、精细化与功能化的深刻转型，其核心外延已与新能源、电子信息及先进材料等战略新兴领域深度融合。在此背景下，《化工传递过程基础》作为化工专业核心课程，其教学目标与内容体系亟待革新。传统教学侧重宏观设备尺度下均相流体的“三传”规律，虽体系严谨，却与微观材料设计、多尺度结构调控等前沿课题存在认知隔阂，导致理论与工程实践脱节[1-3]。

本文基于昆明理工大学的教学实践，结合授课教师在高分子可控发泡、磷系阻燃与吸波材料设计、锂/钠电化学储能材料开发等领域的科研积累，探索构建以“传递－结构－性能”关联为主线的教学模式[4-6]。该模式将材料制备中的关键传递问题融入经典理论教学，通过案例重构与项目驱动，引导学生建立从传递原理出发主动设计材料结构与性能的工程思维[7,8]。本文系统阐述该模式的构建理念、实施路径、初步成效与未来展望，以期为破解经典理论课程与材料化工前沿需求脱节的困境，提供具有专业特色的改革方案与实践参考。

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

一、传统教学模式与材料化工前沿脱节的显示困境

当前，《化工传递过程基础》课程教学普遍遵循经典教材体系，内容多围绕传递现象的物理定律、微分方程求解及经典应用展开。这一模式虽有助于夯实学生数理基础，但在对接现代材料化工研究时，仍面临以下三个维度的核心困境：

（一）教学内容与研究对象存在“时空尺度”错位

传统教学聚焦于设备尺度的宏观传递，而功能材料的设计与制备关注的是微米至纳米尺度的传递现象。课程中较少涉及跨尺度传递概念，导致学生难以将理论应用于理解材料形成过程的内在机理。例如，讲授非稳态扩散时，若仅以半无限大介质为例，则显得抽象；但若将其与“锂离子在石墨层间的嵌入 / 脱出动力学”相联系，则定律立刻变得生动且关键。

（二）理论教学与工程应用缺乏“问题导向”的强关联

课程通常按“动量 - 热量 - 质量传递”的模块顺序推进，各模块内部遵循“机理 - 方程 - 求解 - 应用”的逻辑。这种演绎式教学虽逻辑清晰，但容易使学生陷入数学推导，而忽略传递理论作为解决工程问题“钥匙”的本质属性。缺乏真实、前沿的工程问题作为牵引，理论便失去了生命力。

（三）能力培养与创新需求存在“思维范式”鸿沟

传统教学侧重于培养学生分析和计算给定传递问题的能力（分析思维），但在新材料开发中，工程师更需要“设计思维”：即为了获得某种性能，需要什么样的微观结构，进而如何设计和控制制备过程中的传递条件来“生长”出这种结构。这种从性能目标反推传递条件的设计思维，在现有课程训练中严重不足。

二、构建“传递 - 结构 - 性能”一体化教学模式的核心理念

针对上述困境，改革的核心在于打破传统按传递类型划分的模块化教学，构建以“功能材料”为锚点、以“传递 - 结构 - 性能”关系为主线的立体化教学内容体系。其核心是将目标材料性能的实现，解剖为一个或多个核心传递科学问题，并将这些问题的原理与控制作为理论教学的切入点和落脚点[9,10]。

该模式强调从具体的材料性能需求出发，反向追溯其微观结构成因，最终将成因归结为可被传递原理描述和调控的物理化学过程。例如，要获得高弹性的泡沫材料，需要均匀细密的闭孔结构，这依赖于发泡过程中气体溶解与扩散（传质）、泡孔生长时的熔体流变（传质与动量传递）以及冷却定型时的热量移出（传热）的协同控制。通过这种反向解构，传递原理不再是孤立的知识点，而是构成材料“性能 - 结构”基因图谱的关键片段。

三、将前沿研究案例深度融入“三传”理论的内容重构

在教学内容重构上，我们采取“主线贯穿、案例嵌入”的策略。课程主线依然是三大传递的基本原理与方程，但在每一个关键知识点后，系统化地嵌入来自教师科研一线的“材料化”案例模块。

（一）动量传递：聚焦高分子发泡过程中的流变与结构调控

在讲授流体流动内部结构与能量耗散后，引入“高分子发泡过程中的流变与动量传递”案例，重点讨论：聚合物熔体或溶液的非牛顿流变性（剪切变稀）对气泡成长过程中周围流场的影响；剪切力与拉伸流动在控制泡孔形貌（球形 vs 椭球形）、防止并泡中的作用；以及如何利用动量方程分析超临界流体在高压下注入聚合物体系并形成均相体系的动态过程，引导学生理解泡沫的密度、孔径分布和开闭孔率等关键结构参数本质上是由发泡过程中动量传递与流体形变历史所决定的。

（二）热量传递：关联功能复合材料的热管理及工艺控制

超越传统的导热、对流传热计算，突出非稳态传热与复合传热的重要性，设置“功能复合材料制备中的热量传递设计”案例群，例如：在吸波材料设计中，通过调控导热路径（如构建导热网络或引入绝热孔隙）协同管理电磁耗散产生的热量（热管理），这涉及导热与对流的复合；在锂电电极极片涂布后的快速干燥过程中，设计温度场和风速场（对流与导热耦合）以实现溶剂的均匀、快速蒸发，同时避免因表面过早结皮导致的内应力开裂（“鳄鱼皮”现象），这些案例将传热理论与材料的结构稳定性、功能可靠性直接挂钩。

（三）质量传递：贯通多尺度传递在能源与安全材料中的核心作用

这是与材料化工联系最为紧密的模块。我们深度开发了“多尺度质量传递在能源与安全材料中的核心作用”专题。涵盖：1）微观扩散：锂 / 钠离子在电极材料晶体内部的固相扩散（晶格扩散），利用菲克定律分析其与电池倍率性能的本征关系；阻燃剂分子在聚合物基体中的扩散与界面迁移，关联其长效阻燃效率。2）介观传递：电解液中离子在多孔电极内部的传递（孔道扩散与迁移），引入有效扩散系数概念，并讨论孔隙率、曲折度等微结构参数对其影响，直接关联电池的功率密度。3）宏观混合与分布：在制备聚合物 / 阻燃剂 / 吸波剂多相复合材料时，初始的宏观混合均匀性（涉及流体力学）如何影响后续加工与最终性能的均一性。通过这一专题，学生将质量传递从抽象的方程，系统地映射到从原子到设备的多尺度材料工程实践中。

四、实施项目探究与过程性评价改革的方法创新

教学内容的改革需要与之匹配的教学方法与评价体系。我们推行以“探究式项目”为驱动、强化过程性评价的实践模式，将“学”与“用”在课内课外无缝衔接。

（一）构建“课内微探究”与“课外综合设计”双层项目体系

实施 “课内微案例探究”与“课外综合项目设计”相结合的双层项目体系。在课堂上，针对刚讲授的理论点，即时提出导向性的微探究问题。例如，讲完非稳态扩散后，提出问题：“假设我们希望制备一种核壳结构的吸波剂，希望壳层厚度均匀为

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

100nm，请根据扩散控制生长机理，定性讨论核心颗粒半径、反应物浓度、温度等参数对壳层生长均匀性的影响。” 引导学生运用菲克第二定律进行定性推理。在课外，则以小组形式开展贯穿学期的综合设计项目，题目均源于真实科研的简化或预研。例如：“设计一种基于超临界二氧化碳（$scCO_2$）发泡工艺的轻质阻燃聚丙烯泡沫，目标密度0.1g/cm^3，极限氧指数 >26%。请重点分析：a) CO_2在聚合物中的溶解与扩散（质量传递）如何影响泡孔密度；b) 发泡过程中的温度场控制（热量传递）如何影响泡孔结构与晶体形态；c) 阻燃剂颗粒在熔体中的分布（动量传递驱动的混合）如何影响阻燃效能。” 学生需要查阅文献、进行概念设计、运用课程知识进行分析论证，并提交设计报告。

（二）推行以能力为导向的考核评价方式改革

改革考核方式，强化过程评价与能力导向。将期末闭卷考试占比从60% 降至50%，大幅提升过程性评价比例至50%，具体包括：课堂微探究表现（10%）、阶段性案例分析报告（20%）及期末综合项目答辩（20%）。笔试内容同步优化，减少记忆性题目，增加与材料设计相关的分析论述题，例如：“根据多孔电极的 SEM 图像及结构参数，结合传递原理论述如何通过优化电极制备工艺中的‘三传’条件来提升电池快充性能”。

五、实践成效、反思与未来展望

经过2023-2025年三轮教学实践，“传递 - 结构 - 性能”一体化教学模式取得显著成效。学生学习主动性与课堂参与度明显提升，抽象理论通过与发泡材料、电池、隐身涂料等前沿对象结合而变得鲜活，学生提问质量与深度显著提高。课程项目报告中涌现出多份兼具理论深度与创新构思的优秀作品，部分成果对教师科研亦有启发。调查显示，超过85% 的学生认为“课程内容与前沿结合紧密”且“对专业研究有帮助”。更值得关注的是，后续进入毕业设计或研究生阶段的学生反馈，他们在从事材料相关课题时，能更自觉地运用传递过程视角分析与解决问题，体现了课程所培养的思维迁移能力。

反思改革过程，主要面临两大挑战：一是对教师提出更高要求，需持续将科研中的传递科学问题转化为教学案例，备课工作量显著增加；二是需为学生提供充分的文献与数据支持，引导其跨越从理论到自主分析的“第一公里”。未来，我们将系统建设“功能材料传递过程案例库”，探索与《材料科学基础》《化学反应工程》等课程开展联合项目设计，打破课程壁垒，构建完整的“材料化工”课程群。同时，计划引入计算流体动力学（CFD）与分子模拟（MD）的演示教学，帮助学生直观“看见”传递过程，推动教学改革持续深化。。

六、结束语

面向新工科背景下化工与材料深度融合的趋势，《化工传递过程基础》课程改革势在必行。本文提出的“传递 - 结构 - 性能”一体化教学模式，以教师科研前沿为源头，将功能材料设计与制备中的关键传递问题融入理论教学，结合项目探究与过程性评价，成功将这门传统抽象的理论课转变为激发创新思维、连接经典与前沿的活力课堂。这一实践不仅提升了课程教学质量，也为培养具备跨学科视野、善于运用工程原理解决材料设计复杂问题的新型化工人才提供了有效路径。它印证了教学与科研的相辅相成，也为工程教育认证中“以学生为中心、以产出为导向”的理念提供了课程层面的实践范例。

参考文献

[1] 陈涛，张国亮，范晓彬 . 《化工传递过程基础》（第四版），北京：化学工业出版社，2024.

[2] 王昌松 . 《化工传递过程基础》四大基础方程教学小结 [J]. 化工时代，2020，34(1)：42-44.

[3] 王艳丽，裴锐南，张友全，魏光涛 . 课程思政有机融入化工传递过程课程的探索 [J]. 新教育时代电子杂志（教师版），2024(25)：91-93.

[4] 王小荣，马国艳，朱文婷 . 《化工传递过程基础》课程教学探索 [J]. 广东化工，2021，49(17)：162-163.

[5] 任国瑜，任旭，刘晓菊，等 . 化工传递过程基础教学方法的探讨与研究 [J]. 广州化工，2014，42(8)：201-203.

[6] 李诗浩，吴振华，赵展烽，等 . 化工过程中的电子传递、质子传递和分子传递 [J]. 化工学报，2024，75(3)：1052-1064.

[7] 莫文龙，苑君容，马凤云，等 . 化工类研究生专业课融入课程思政加强学习效果的探索与实践——以 " 化工传递过程 " 为例 [J]. 化工时刊，2022，36(11)：37-40.

[8] 赵青山 . 案例导向式教学在化工传递过程课程中的探索与应用 [J]. 科教导刊 - 电子版（上旬），2022(11)：184-185.

[9] 伍鹏 . 项目化学习引领下的化工基础课程教学改革创新与实践 [J]. 化工管理，2025(22)：42-46.

[10] 孙映晖，李艳，武朝军，等 . 化学工程专业传递过程原理研究生课程教学改革探索 [J]. 化纤与纺织技术，2024，53(7)：225-227.

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.