

跨越认知断层：基于学生认知视角的MOFs材料教学问题与重构策略

王阳阳^{1,2*}, 王守玲^{1,2}, 昌杰^{1,2}

¹池州学院“微纳粉体与先进能源材料”安徽省教育厅重点实验室, 安徽 池州

²池州学院材料与环境工程学院, 安徽 池州

收稿日期: 2026年5月22日; 录用日期: 2026年6月23日; 发布日期: 2026年6月30日

摘要

MOFs材料融入本科《材料化学》课程, 对弥补传统教材短板、培养学生“结构-性能-应用”系统思维意义重大。但MOFs的多学科复杂性与学生认知基础之间存在显著矛盾, 教学中普遍出现认知起点错位、抽象概念固化、逻辑链条断裂及实践认知片面等问题。本文基于“感知-理解-应用-迁移”认知规律, 提出锚定认知起点、可视化具象化、问题驱动重构逻辑、虚实结合实践等策略。教学对照实验表明, 实验班在知识掌握、逻辑关联与实践创新方面显著优于对照班, 其中可视化与问题驱动策略对“理解”和“应用”提升尤为显著, 虚实结合实践对“创新”能力的影响相对滞后。该策略为前沿材料融入本科教学提供了基于学生认知视角的可借鉴范式。

关键词

MOFs材料, 认知视角, 教学问题, 优化策略, 结构-性能-应用

Bridging the Cognitive Gap: Problems and Restructuring Strategies in Teaching MOFs from the Perspective of Student Cognition

Yangyang Wang^{1,2*}, Shouling Wang^{1,2}, Jie Chang^{1,2}

¹Key Laboratory of “Micro-Nano Powder and Advanced Energy Material” of Anhui Higher Education Institutes, Chizhou University, Chizhou Anhui

²School of Materials and Environmental Engineering, Chizhou University, Chizhou Anhui

Received: May 22, 2026; accepted: June 23, 2026; published: June 30, 2026

*通讯作者。

文章引用: 王阳阳, 王守玲, 昌杰. 跨越认知断层: 基于学生认知视角的 MOFs 材料教学问题与重构策略[J]. 教育进展, 2026, 16(6): 1713-1718. DOI: 10.12677/ae.2026.1661312

Abstract

Integrating Metal-Organic Frameworks (MOFs) into the undergraduate Materials Chemistry course is of great significance for addressing the limitations of traditional textbooks and cultivating students' "structure-property-application" systems thinking. However, a notable tension exists between the multidisciplinary complexity of MOFs and students' cognitive readiness, leading to common instructional challenges such as misaligned cognitive starting points, reinforcement of abstract concepts, fragmented logical reasoning, and incomplete hands-on understanding. Grounded in the cognitive progression of "perception-comprehension-application-transfer," this paper proposes targeted strategies: anchoring cognitive entry points, visualization and concretization of abstract ideas, problem-driven logical reconstruction, and practice through virtual-real integration. A controlled teaching experiment demonstrates that the experimental class significantly outperformed the control class in knowledge acquisition, logical reasoning, and practical innovation, with visualization and problem-driven strategies contributing most notably to improvements in "comprehension" and "application." The effect of virtual-real integrated practice on "innovation" ability was comparatively delayed. This study provides a student-cognition-based reference paradigm for integrating cutting-edge materials into undergraduate teaching.

Keywords

Metal-Organic Frameworks, Cognitive Perspective, Teaching Problems, Optimization Strategies, Structure-Property-Application

Copyright © 2026 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

金属有机框架(Metal-Organic Frameworks, MOFs)材料因可调多孔结构、高比表面积和灵活功能化修饰,在吸附、催化、储能等领域应用广泛,已成为材料化学研究热点[1]-[6]。将 MOFs 材料引入《材料化学》课程,有助于弥补传统教材前沿案例不足,帮助学生构建“结构-性能-应用”系统思维,契合新工科创新型人才培养目标[7]。然而,MOFs 材料融合配位化学、晶体学、多孔材料等多学科知识,其结构复杂性与学生认知基础之间存在较大差距[8]。教学中,学生常能理解概念却难以应用,能记住案例却理不清逻辑,根源在于认知过程存在障碍。近年来,问题式学习(Problem-Based Learning, PBL)和探究式学习(Inquiry-Based Learning, IBL)被证明能有效促进学生科学思维[9][10]。但多用于经典化学内容。对于 MOFs 这类高度跨学科、空间抽象的前沿材料,直接套用 PBL 或 IBL 面临认知起点低、概念难以具象化等障碍。因此,本文基于“感知-理解-应用-迁移”认知递进规律,剖析 MOFs 教学中的核心问题,并提出符合学生认知发展的重构策略。

2. 基于学生认知视角的 MOFs 材料教学常见问题

学生对 MOFs 材料的认知遵循感知-理解-应用-迁移的递进规律,在各阶段因材料特性和学生认知局限,易产生以下四类核心问题。

(一) 认知起点错位: 基础知识点衔接断裂

MOFs 材料由金属离子/簇与有机配体通过配位键构筑[2][4],学习需要配位化学、晶体结构、化学键

理论等先备知识[11][12]。但多数学生仅掌握简单配合物(如 $\text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{2+}$) 结构, 对多齿配体协同配位、金属簇节点等理解困难[13], 对晶胞参数、空间点阵停留于理论[12], 难以关联 MOFs 多孔结构的形成, 如不理解 UiO-66 面心立方结构与其高稳定性的关系[14]; 跨学科知识整合不足, MOFs 应用涉及吸附热力学、催化动力学等[15][16], 学生难以从材料化学视角构建系统认知。先备知识的缺失或碎片化导致认知断层, 阻碍深度学习。

(二) 抽象概念固化: 具象化认知难以建立

结构-性能关系是 MOFs 教学的核心议题[17], 但“多孔结构”“功能化修饰”等概念高度抽象, 与学生具象认知模式冲突[18]。三维多孔结构难以通过板书或二维图像直观呈现, 如 MOF-5 中 Zn_4O 节点与对苯二甲酸配体组装形成立方笼状孔道[2], 学生多停留在“多孔”表层, 不理解结构对称性与比表面积的关联。动态过程如柔性、客体分子吸附-脱附也难以用静态手段传递, 学生易将多孔结构固化为静态孔洞。抽象与具象脱节, 导致理解滞留于符号记忆。

(三) 逻辑链条断裂: “结构-性能-应用”认知割裂

“结构决定性能, 性能决定应用”是材料学科核心逻辑。但学生常碎片化识记。如能分别说出“MOF-5 高比表面积”[2]与“ZIF-8 高稳定性”[19], 却无法从配体刚性、节点连接方式解释成因; 面对“如何选择 MOFs 用于 CO_2 捕获”等问题, 难以整合孔径、极性、功能基团等要素[4][15]; 对“功能化修饰”等前沿兴趣浓厚, 却不能联系配位键调控等基础原理[20]。逻辑链条断裂限制知识迁移与应用。

(四) 实践认知片面: 理论与实践的认知鸿沟

受限于合成条件(高温高压、有毒试剂), 本科教学多采用虚拟仿真或简化实验[21]。学生难以感知配体溶解速率、温度调控等实际操作效应[8]; 能说出 XRD、BET 原理, 却难以将特征峰强度与晶体纯度关联[17]; 在开放性任务(如“设计 MOFs 用于水质净化”)中, 难以整合污染物特性、功能化修饰与合成工艺[22]。理论与实践脱节, 不利于科研思维培养。

3. 基于学生认知规律的 MOFs 教学优化策略

针对上述问题, 依据感知-理解-应用-迁移规律, 提出以下策略, 形成“认知诊断-障碍化解-逻辑建构-能力迁移”教学闭环。

(一) 锚定认知起点: 构建“先备知识-MOFs 核心内容”的衔接体系

基于奥苏贝尔有意义学习理论, 通过诊断与补学消除认知断层[23][24]。课前实施配位化学与晶体结构在线测试(如“绘制 ZnO_4 四面体配位结构”), 精准识别薄弱环节; 设计微视频(如“多齿配体配位模式”)和互动练习。构建“基础-进阶”阶梯体系: 第一阶段以 $\text{Cu}_2(\text{bdc})_2(\text{bpy})$ 复习配位键; 第二阶段以 MOF-5、ZIF-8 引入节点-配体组装; 第三阶段结合 UiO-66 功能化案例拓展结构调控。分层教学为基础不同学生设计差异化任务, 避免认知“空转”。

(二) 化解抽象障碍: 运用“可视化+具象化”的认知转化工具

基于皮亚杰认知发展理论, 开发多维可视化资源[18]。利用 Blender、SketchUp 构建 3D 模型, 学生可通过旋转、拆解观察节点配位和孔道结构; 引入 VR/AR 技术营造沉浸式体验。课堂融入球棍模型搭建, 分组组装 MOF-5 与 ZIF-8 结构单元。设计具象类比: 将多孔结构类比海绵吸水, 孔径调控类比调整海绵孔径, 用“钥匙与锁”类比气体分离选择性机制。多模态表征帮助学生完成从“知道”到“真正理解”的跃迁。

(三) 重构逻辑框架: 实施“问题驱动+案例拆解”的认知整合教学

以“结构-性能-应用”为主线, 设计阶梯式问题链[25]。围绕 ZIF-8 用于 CO_2 捕获, 从结构层(节点与配体特点)到性能层(孔径与表面化学)再到应用层(为何适合 CO_2 捕获)。采用科研案例教学法: 选取

MOF-5 首次合成、UiO-66 稳定性研究等经典论文，解构成“问题-实验-结果-结论”四个模块，学生以“研究者”视角参与分析。搭建前沿-基础关联桥梁：设计“前沿成果解析表”，要求学生梳理“前沿性能→结构特征→基础原理”链条，如 MOFs@石墨烯复合材料的电子转移机制[26]。通过问题链外显化与案例深度解剖，实现从“理解”到“应用”的能力提升。

(四) 弥合知行鸿沟：构建“虚实结合 + 开放探究”的实践认知体系

以“理论指导实践，实践深化认知”为目标，沿“虚拟仿真→简化实验→开放探究”递进路径。开发虚实互补模块：虚拟仿真模拟高温溶剂热合成、有毒配体处理等环节；实体实验选用室温合成 ZIF-8 等绿色案例，学生完成配体制备、反应操作及 XRD 表征。强化表征数据解读训练：以 BET 数据为例，要求学生分析等温线类型与多孔结构关系、比表面积与结构完整性关联。设计开放探究任务：如“设计去除水中铅离子的 MOFs”，小组完成污染物分析、结构设计、合成方案制定及成果展示。增设“MOFs 文献导读”环节，指导学生高效检索文献。通过自主探究形成“理论-实践-反思”认知闭环，实现从课堂“应用”到科研“迁移”的最终跨越。

4. 教学实践效果与反思

为验证策略有效性，以某高校材料化学专业两个班为样本，实验班(42 人)采用优化策略教学，对照班(40 人)采用传统“理论讲授 + 案例解析”。教学后通过知识测试(量化)、深度访谈(质性)和实践成果综合评价进行多维度评估[27]。

(一) 量化结果的分项分析

知识测试包含三类题型：记忆类(如 MOFs 定义、典型材料名称)、理解类(如解释结构-性能关系)与应用/创新类(如给定应用场景设计 MOFs 方案)。实验班与对照班的得分情况，见表 1。

Table 1. Comparison of score rates of questions at different cognitive levels between experimental class and control class (%)
表 1. 实验班与对照班不同认知层次题型得分率比较(%)

题型类别	实验班(n = 42)	对照班(n = 40)	差值
记忆类	88.2	84.5	+3.7
理解类	79.4	61.3	+18.1
应用/创新类	74.1	56.8	+17.3

从表 1 可见，两组在记忆类题目上差异不大(+3.7%)，说明传统教学也能实现基础知识的有效传递。但在理解类和应用/创新类上，实验班分别高出 18.1 和 17.3 个百分点。这表明可视化与问题驱动策略对“理解”层面促进最显著，虚实结合实践对“创新”能力的提升具有滞后性。质性访谈中，83.3%的实验班学生能准确阐释“MOF-5 结构如何影响比表面积”，对照班仅 35%；实践成果评价中，实验班“MOFs 水质净化方案”在结构合理性和可行性上得分率均超 70%。

(二) 局限性讨论与未来方向

尽管上述结果支持了优化策略的有效性，但本研究存在若干局限性，需审慎解读。首先，样本代表性有限。两个班均来自本校同一年级材料化学专业，学生基础、学习环境及教师风格具有一定同质性，结论能否推广至其他类型院校(如综合性大学、高职院校)或其他专业(如应用化学、环境工程)尚需进一步验证。其次，霍桑效应不可忽视。实验班学生知晓自己参与新教学模式的试验，其学习投入度和动机可能因此高于常规教学环境下的对照班，从而对效果产生正向偏误。本研究未设计双盲对照，因此无法完全排除这一心理效应的影响。第三，教师变量未严格控制。尽管两个班由同一教师授课，但教师在实验

班投入了更多教学准备和情感精力,这种“额外关注”本身也可能是效果差异的来源之一。第四,本研究仅评估了短期教学效果(学期末),未对学生的长期知识保持与迁移能力进行追踪,优化策略是否具有持续性效果尚不明确。

针对上述局限,未来研究可从以下方向深入:其一,开展跨校、跨专业的多元样本研究,检验策略在不同教育情境下的普适性与适应性。其二,引入双盲或单盲准实验设计,同时增加“安慰剂对照”组(如采用同等课时的传统教学但附加额外讨论),以分离教学策略本身与“额外关注”的效应。其三,实施纵向追踪(如毕业后6个月、12个月),通过延迟测试评估学生对MOFs核心概念的长时保持与在科研/工作中的实际迁移能力。其四,结合认知诊断模型(如DINA模型)或眼动追踪等过程性数据,更精细地揭示不同策略对不同认知障碍的干预机制。

5. 结论

基于学生认知视角,MOFs教学的核心问题在于认知起点错位、抽象概念固化、逻辑链条断裂和实践认知片面,根源是MOFs的复杂性与学生认知发展规律之间的矛盾。通过锚定认知起点构建梯度衔接、运用可视化具象化抽象障碍、问题驱动重构逻辑框架、虚实结合弥合知行鸿沟等策略,可契合学生感知-理解-应用-迁移的认知进阶,助其构建系统认知框架,提升知识转化能力与科研素养。该研究为前沿材料融入本科《材料化学》提供了以学生认知为核心的教学范式,也为其他新型材料教学提供了参考。

基金项目

本文系安徽省质量工程项目(2024zygzts133、2024sysx031);安徽省教育厅自然科学基金项目(2025AHGXZK30838,2025AHGXZK10031);安徽省高校中青年教师培养行动项目(JNFX2024071);池州学院质量工程项目(2023XYLJC01);池州学院校级科研项目(CZ2024ZRZ04)的研究成果。

参考文献

- [1] Furukawa, H., Cordova, K.E., O'Keeffe, M. and Yaghi, O.M. (2013) The Chemistry and Applications of Metal-Organic Frameworks. *Science*, **341**, Article 1230444. <https://doi.org/10.1126/science.1230444>
- [2] Li, H., Eddaoudi, M., O'Keeffe, M. and Yaghi, O.M. (1999) Design and Synthesis of an Exceptionally Stable and Highly Porous Metal-Organic Framework. *Nature*, **402**, 276-279. <https://doi.org/10.1038/46248>
- [3] Disegna, S., Epp, K., Heinz, W.R., Kieslich, G. and Fischer, R.A. (2018) Defective Metal-Organic Frameworks. *Advanced Materials*, **30**, Article 1704501. <https://doi.org/10.1002/adma.201704501>
- [4] Kitagawa, S., Kitaura, R. and Noro, S. (2004) Functional Porous Coordination Polymers. *Angewandte Chemie International Edition*, **43**, 2334-2375. <https://doi.org/10.1002/anie.200300610>
- [5] Lee, J., Farha, O.K., Roberts, J., Scheidt, K.A., Nguyen, S.T. and Hupp, J.T. (2009) Metal-Organic Framework Materials as Catalysts. *Chemical Society Reviews*, **38**, 1450-1459. <https://doi.org/10.1039/b807080f>
- [6] Wang, H., Zhu, Q., Zou, R. and Xu, Q. (2017) Metal-Organic Frameworks for Energy Applications. *Chem*, **2**, 52-80. <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2016.12.002>
- [7] 韩爱娟, 刘军枫. 前沿科学研究融入无机化学教学——沉淀溶解平衡与MOFs材料的融合教学[J]. 化学教育(中英文), 2025, 46(8): 13-18.
- [8] Stock, N. and Biswas, S. (2012) Synthesis of Metal-Organic Frameworks (MOFs): Routes to Various MOF Topologies, Morphologies, and Composites. *Chemical Reviews*, **112**, 933-969. <https://doi.org/10.1021/cr200304e>
- [9] 孙天山. 指向“基于问题的学习(PBL)”模式的思考与实践[J]. 教育理论与实践, 2014, 34(26): 53-55.
- [10] 岳慧兰. 知识接受型学习向探究式学习转变路径[J]. 中国高等教育, 2020(20): 47-49.
- [11] 刘又年, 周建良. 配位化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [12] 杨君友, 罗裕波, 李鑫. 晶体学基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2025.
- [13] Zanolli, N.C., Rodrigues, R.V., de Souza, R.F.F., de Campos, S.D. and de Campos, É.A. (2023) From Metal Complexes

- to Biomofs: An Experimental Proposal for Teaching Coordination Chemistry Concepts. *Journal of Chemical Education*, **100**, 844-851. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.2c00849>
- [14] Cavka, J.H., Jakobsen, S., Olsbye, U., Guillou, N., Lamberti, C., Bordiga, S., *et al.* (2008) A New Zirconium Inorganic Building Brick Forming Metal Organic Frameworks with Exceptional Stability. *Journal of the American Chemical Society*, **130**, 13850-13851. <https://doi.org/10.1021/ja8057953>
- [15] Li, J.R., Kuppler, R.J. and Zhou, H.C. (2009) Selective Gas Adsorption and Separation in Metal-Organic Frameworks. *Chemical Society Reviews*, **38**, 1477-1504. <https://doi.org/10.1039/b802426j>
- [16] Yang, Q.H., Xu, Q. and Jiang, H.L. (2017) Metal-Organic Frameworks Meet Metal Nanoparticles: Synergistic Effect for Enhanced Catalysis. *Chemical Society Reviews*, **46**, 4774-4808. <https://doi.org/10.1039/c6cs00724d>
- [17] Bach, K., Loughran, R.P., Johnson, A., Quiroz, E., Lessard, J.M., Smith, K.T., *et al.* (2024) Metal-Organic Frameworks in General Chemistry Laboratory: Toward the Development of Students' Scientific Identities. *Journal of Chemical Education*, **101**, 1016-1023. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.3c00949>
- [18] 皮亚杰. 发生认识论原理[M]. 王宪钊, 译. 北京: 商务印书馆, 1981.
- [19] Park, K.S., Ni, Z., Côté, A.P., Choi, J.Y., Huang, R., Uribe-Romo, F.J., *et al.* (2006) Exceptional Chemical and Thermal Stability of Zeolitic Imidazolate Frameworks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **103**, 10186-10191. <https://doi.org/10.1073/pnas.0602439103>
- [20] Chen, L.F. and Xu, Q. (2017) Converting MOFs into Amination Catalysts. *Science*, **358**, 304-305. <https://doi.org/10.1126/science.aap8004>
- [21] 刘小慧, 苏紫珊, 谢炜桃, 等. 制备金属-有机框架材料的教学实验设计[J]. 化学教育, 2020, 41(4): 69-72.
- [22] Li, P., Chen, Q., Wang, T.C., Vermeulen, N.A., Mehdi, B.L., Dohnalkova, A., *et al.* (2018) Hierarchically Engineered Mesoporous Metal-Organic Frameworks toward Cell-Free Immobilized Enzyme Systems. *Chem*, **4**, 1022-1034. <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2018.03.001>
- [23] 戴维·保罗·奥苏贝尔. 意义学习新论——获得与保持知识的认知观[M]. 毛伟, 译. 杭州: 浙江教育出版社, 2018.
- [24] Novak, J.D. (2002) Meaningful Learning: The Essential Factor for Conceptual Change in Limited or Inappropriate Propositional Hierarchies Leading to Empowerment of Learners. *Science Education*, **86**, 548-571. <https://doi.org/10.1002/sce.10032>
- [25] 安德森·L·W. 学习、教学和评估的分类学[M]. 皮连生, 译. 武汉: 华中科技大学出版社, 2008.
- [26] Kumar, P., Pournara, A., Kim, K., Bansal, V., Rapti, S. and Manos, M.J. (2017) Metal-Organic Frameworks: Challenges and Opportunities for Ion-Exchange/Sorption Applications. *Progress in Materials Science*, **86**, 25-74. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.01.002>
- [27] 刘克峰, 任丹妮, 孙辉, 等. ZIF-8 的合成、表征及正己烷吸附性能[J]. 高等学校化学学报, 2016, 37(10): 1856-1862.