



清华大学未来实验室
The Future Laboratory, Tsinghua University

NEWS LETTER

FUTURE LABORATORY

刊首语

“科普视界”

“未来对话”

“科研·合作·交流”

总第2期 2026年5月

刊首语 | EDITOR'S NOTE

探索未来的无限可能

在当今知识迅速更新与社会需求不断演变的背景下，跨学科交叉与设计创新的融合，正成为推动知识进步和社会发展的重要动力。清华大学未来实验室自 2017 年成立以来，始终坚持探索与实践，致力于构建一个促进跨学科合作与思想碰撞的平台，见证学科交叉如何孕育新的思维和解决方案。每一项研究都在探索如何更好地适应社会需求，提升人类生活质量。

本期刊物汇集了多位专家的思考与实践，涵盖了高温气 / 固化学界面调控研究、触觉图形显示器与数字化盲文教科书设计、碳纤维如何为未来产业提质增效、“双碳”背景下相变储能技术实现新质调温的绿色生活探索，以及通用嗅觉计算的未来趋势展望。这些主题不仅反映了学术界对现实问题的深刻思考，更体现了学科交叉所带来的无限可能。

本期刊物不仅展示了最新的科研成果与合作项目，更邀请您聆听来自学界和业界的思想碰撞。我们邀请到国内外知名学者，共同探讨材料界面科学、触觉人机交互、先进复合材料、相变储能技术以及嗅觉计算等前沿领域的最新发展。这些对话既是知识的交流，也是思想的碰撞，激发着我们对未来的想象。同时，我们也诚挚地分享校友们的成长故事——他们在科研与社会实践中发光发热，承载着对未来的希望与梦想。

愿每位读者在这里找到启发，勇敢追求自己的理想与信念。

《NEWS LETTER》编辑部



主办 Produced by



总顾问 General Counsel

徐迎庆、乐恢榕、Jeung Jihong、唐克扬、
宋诗宇

执行编辑 Executive Editors

王琰琦

视觉设计 Visual Design

于小岚

编辑部 Editorial Board

陈迪、刘鹏、焦阳、路奇、李彦辰

内部刊物声明

本刊物为内部刊物，旨在分享实验室最新动态、员工风采、科研成果及相关信息。本刊物所刊登的所有内容，包括但不限于文章、图片、图表等，均为本刊物及其作者的原创或授权作品。

本刊所提供的信息仅供参考，不构成任何建议或承诺。对于刊物中所述观点和意见，仅代表作者个人观点，并不代表本刊的立场。

「目录 CONTENTS」

01. “科普视界”

高温气 / 固电化学界面调控研究 01

能源存储与转换技术是当前全球关注的焦点。近年来，随着计算材料学、原位表征技术及跨学科融合的快速发展，高温气 / 固界面研究迎来新机遇。

触觉图形显示器研究： 07

数字化盲文教科书设计

据世界卫生组织统计，全球视力受损患者约有 2.53 亿，包含 3600 万盲人。盲人学生在学校学习的知识与明眼人学生是一样的，但是缺少了大量的图形图像信息作为学习辅助。随着电子化图形触觉显示设备及相关领域的发展，盲人朋友拥有了更好的学习和理解图形信息的工具。

碳纤维如何为未来产业提质增效？ 13

本文立足于团队在碳纤维复合材料设计与制造工艺领域的最新研究，深入探讨其在轻量化设计、绿色制造和高端设备中的应用价值，并展望其在未来制造业和尖端科技中的广阔前景。

“双碳”背景下的绿色生活： 21

相变储能技术如何实现新质调温？

全球约 50% 的能源用于获取热能，主要用于工业和建筑供暖。在热能调控领域，人类正致力于逐步淘汰化石燃料，以实现能源的可持续利用。

通用嗅觉计算未来趋势展望 27

嗅觉计算（Olfactory Computing）是通过融合化学传感、数据科学与人工智能技术，构建能够模拟生物嗅觉功能的智能感知系统，实现从气味分子、数字化信息到智能应用的全链路转化。

02. “科研 · 合作 · 交流” 31

展示和分享未来实验室最新的科研成果、合作项目和学术交流活动，促进知识的传播与合作的深化。介绍我们最新的研究进展、创新发现和学术论文，分享国内外科研机构、企业和高校之间的合作，通过学术会议、论坛和研讨会交流学术思想，激发创新灵感。

03. “校友风采” 37

在设计与材料的交界处重构可能

— 李彦辰

我将铭记徐老师的教诲，踏踏实实做好未来的教育工作，未来实验室“天马行空想问题，脚踏实地做事情”的创新氛围和攻关精神永远是我前路的航标。感谢实验室的老师 and 同学们的陪伴，与诸君同行，无上光荣。

科普世界

Science Popularization

通过科普的方式，向广大读者介绍实验室研究的方向和意义。通过
这个栏目，我们希望为读者提供一个了解实验室研究动态、理
解科学探索意义的平台。

高温气 / 固电化学 界面调控研究

文 / 刘鹏、陈迪

引言

能源存储与转换技术是当前全球关注的焦点。高温气 / 固电化学体系凭借其在高效能源利用、新型储能等方面的巨大潜力，逐渐崭露头角。然而，高温环境下界面结构的动态演化、材料退化及反应动力学耦合等问题，长期制约着技术的规模化应用。在“双碳”目标驱动下，高温气 / 固界面反应的高效调控成为实现清洁能源转化、工业过程低碳化的关键技术挑战。近年来，随着计算材料学、原位表征技术及跨学科融合的快速发展，高温气 / 固界面研究迎来新机遇。

1. 高温气 / 固电化学界面介绍

1.1 界面的构成与特性

高温气 / 固电化学界面是一个复杂的区域，涉及气体、固体电极材料以及电解质之间的相互作用。在这个界面上，气体分子（如氧气、氢气、二氧化碳等）与固体电极表面发生吸附、解离等过程，同时伴随着电荷转移和离子传输。以固体氧化物燃料电池（SOFC）为例，在高温环境下（通常为 600 - 1000℃），氧气在阴极表面吸附并获得电子，形成氧离子，氧离子通过电解质迁移到阳极，与燃料（如氢气、甲烷）发生反应产生电能。此外，固体氧化物电解池（SOEC）也涉及到复杂的高温气 / 固电化学界面反应。SOFC/SOEC 是一种用于将电能转化为化学能并实现高效电解反应的装置，其工作原理主要基于固体氧化物电解质的离子传导特性以及在电极上发生的电化学反应（图 1）^[1]。高温气 / 固电化学界面具有高度的动态性和复杂性，其特性受到多种因素影响，包括电极材料的晶体结构、表面形貌、气体组成以及温度等。例如，电极材料的表面粗糙度会影响气体的吸附位点和电荷转移效率；不同的气体分压会改变界面反应的热力学和动力学平衡。高温环境下的界面反应动力学复杂、材料稳定性差等问题，严重制约了技术的大规模应用。理解这些特性是实现界面有效调控的基础。

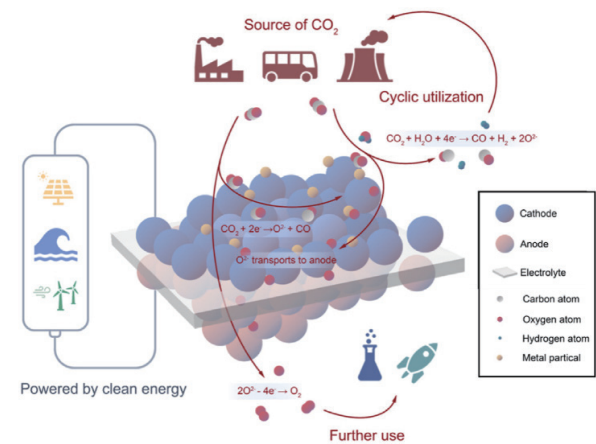


图 1 固体氧化物燃料电池（SOFC）（左）与固体氧化物电解池（SOEC）（右）工作原理

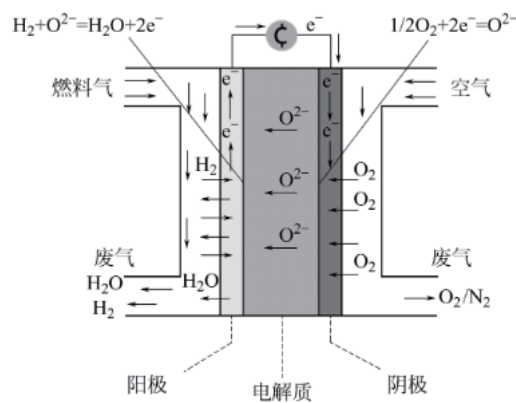
1.2 对能源技术的重要意义

高温气 / 固电化学界面的调控对于能源存储与转换技术的发展至关重要。在固体氧化物燃料电池领域，优化界面可以提高电池的性能和稳定性，降低成本，从而推动其商业化应用。高效的界面设计能够降低电极极化电阻，提高燃料利用率，延长电池寿命。在金属空气电池中，合理调控气 / 固界面有助于提高氧气的还原反应速率，提升电池的能量密度。此外，在电解水制氢、二氧化碳电化学转化等新兴能源技术中，高温气 / 固电化学界面的研究也为实现高效、可持续的能源转换提供了关键途径。

2. 研究思路

2.1 新型电极材料模型体系

通过引入新型的钙钛矿型氧化物作为固体氧化物燃料电池的阴极材料，显著提高了电极的氧还原反应活性。这种材料具有独特的晶体结构，其中 A 位和 B 位离子的协同作用促进了氧气的吸附和解离过程。研究人员通过对 A 位和 B 位离子进行元素掺杂，精确调控材料的电子结构和离子扩散系数，优化电极的性能。此外，通过优化电极材料的结构设计，可以显著改善材料的电化学性能。固气界面研究的



材料体系经历了从疏松多孔电极到金属图案电极、氧化物薄膜电极以及现在的原子级平整表面的演化过程（图 2）^[2] 以及各阶段的特性（表 1）。

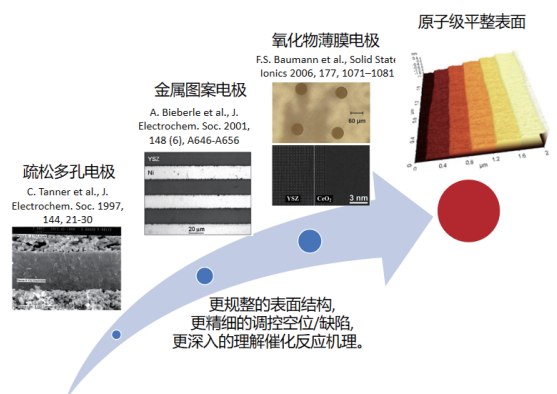


图 2 固气界面研究的材料体系研究的演化过程。原子级平整表面的每个台阶为一个晶胞层。

表 1 固气界面研究的材料体系研究的演化过程及其特性

电极类型	核心目标	技术特征	问题	意义
疏松多孔电极	构建高效三相界面 (TPB)，实现气 - 固 - 离子传导的协同	通过粉末冶金工艺制备 Ni - YSZ 多孔骨架，依赖随机分布的孔隙与颗粒接触形成 TPB	结构非均匀性导致活性位点分布不可控，极化损失（尤其是浓度极化）显著	验证了高温电化学体系可行性，推动 SOFC/ SOEC 早期商业化应用
金属图案电极	解耦界面几何参数与材料本征活性，建立量化动力学模型	采用光刻 / 溅射技术制备周期性 Pt/Ni 微结构，精确调控 TPB 长度与空间分布	金属电极高温失稳（氧化、挥发）限制实际应用，无法模拟多孔体系的传质特性	揭示活化极化与欧姆损耗的线性关系，为多物理场耦合建模提供实验基准
氧化物薄膜电极	解决金属电极稳定性瓶颈，探索离子 - 电子混合导体 (MIEC) 的界面优化	利用 PLD/ALD 制备纳米级 LSCF、LSM 薄膜，通过异质界面（如 La _{0.8} Sr _{0.2} CoO ₃ /Ce _{0.9} Gd _{0.1} O ₂ ）调控氧空位传输	薄膜低比表面积导致传质受限，表面重构（如 Sr 偏析）降低氧交换速率	阐明氧空位扩散能垒与表面吸附动力学的关联，指导钙钛矿材料理性设计
原子级平整表面	消除缺陷干扰，揭示本征表面反应机制与量子尺度效应	单晶基底外延生长超薄氧化物（如单层 LaNiO ₃ ），结合原位 AP - XPS/STEM 观测氧化物种动态行为	超薄材料热力学稳定性差，应变工程（如压缩应变增强 ORR 活性）的极限尺度未知	发现表面氧空位拓扑序与催化活性的非线性关系，开启单原子催化位点精准构筑

2.2 界面修饰技术的创新

为了进一步优化高温气 / 固电化学界面，团队运用多种界面修饰技术，如脉冲激光沉积系统及原位表征平台以及超清洁高温基片处理平台和超清洁高温电化学测量系统来系统研究高温气 / 固电化学界面反应（图 3）^[3]。其中，脉冲激光沉积（PLD）技术被用于在电极表面沉积超薄的功能层。通过精确控制 PLD 的沉积参数，在阴极表面生长了一层具有高离子传导性和催化活性的氧化物薄膜。这层薄膜不仅能够促进氧气的吸附和电荷转移，还能有效阻挡电解质与电极之间的有害化学反应，提高了电池的稳定性。



图 3 超清洁高温电化学测量系统 a: 脉冲激光沉积系统及原位表征平台, b: 超清洁高温基片处理平台, c: 超清洁高温电化学测量系统

为了深入理解高温气 / 固电化学界面的反应机制，团队积极应用原位表征技术。利用高温拉曼光谱和原位 X 射线光电子能谱等手段，实时监测界面在反应过程中的结构和化学变化。通过高温拉曼光谱，研究人员观察到在固体氧化物燃料电池运行过程中，电极材料晶格振动模式的变化，从而推断出氧离子在电极中的扩散路径和动力学过程。原位 X 射线光电子能谱则提供了界面元素化学状态的信息，揭示了电荷转移和化学反应的发生机制。这些原位表征结果为理论模型的建立提供了重要的实验依据，帮助团队进一步优化界面调控策略。根据原位表征发现的氧离子扩散瓶颈，团队针对性地调整了电极材料的微观结构，提高了氧离子的扩散速率，从而提升了电池的性能。

3. 主要进展

3.1 界面反应动力学理论的完善

在研究过程中，团队对高温气 / 固电化学界面反应动力学理论进行了深入研究。研究中考虑了气体扩散、电荷转移、化学反应等多个过程之间的耦合作用，建立了更加准确的动力学模型。该模型能够定量描述界面反应速率与温度、气体分压、电极材料性质等因素之间的关系，为预测和优化界面性能提供了有力的理论工具。通过理论计算与实验结果的对比分析，团队发现传统动力学模型在描述高温下的界面反应时存在一定偏差。新模型引入了表面缺陷对反应速率的影响，更加准确地反映了实际情况。基于这一理论进展，团队能够更加精准地设计电极材料和反应条件，提高了研究的效率和成功率。

相关成果于近期发表于国际知名期刊 Journal of the American Chemical Society^[4] 和 Nature Catalysis^[5]。

3.2 多尺度模拟技术的发展

为了从原子尺度到宏观尺度全面理解高温气 / 固电化学反应界面，团队利用了多尺度模拟技术。利用第一性原理计算，研究人员探究了气体分子在电极表面的吸附能、电荷转移过程以及电子结构变化，揭示了界面反应的微观机制。分子动力学模拟则用于研究气体分子在电极表面的扩散行为和与周围原子的相互作用，为理解宏观实验现象提供了微观视角。在宏观尺度上，团队运用有限元方法对电池的整体性能进行模拟，考虑了传热、传质、电化学反应等多个物理过程的相互影响。通过多尺度模拟，团队能够将微观结构与宏观性能联系起来，为材料设计和电池优化提供了全面的指导。例如，在设计新型电池结构时，多尺度模拟预测了不同结构下的电流分布和温度场，帮助选择最优的设计方案，提高了电池的性能和可靠性。

4. 跨学科团队的组建与协作

未来实验室为电化学材料实验室团队开展高温气 / 固电化学反应界面调控研究提供了良好的平台。实验室汇聚了来自材料科学、化学、物理学、电气工程等多个学科的研究人员，形成了跨学科的研究团队，使得研究工作能够从多个角度深入开展。

5. 结语与展望

随着能源需求的不断增长和对可持续能源技术的迫切需求，高温气 / 固电化学反应界面调控研究将面临更多的机遇和挑战。电化学材料实验室团队将继续深入研究，探索更加高效的界面调控策略，开发新型的能源存储与转换技术。

6. 陈迪研究员及团队研究背景

陈迪，清华大学未来实验室研究员。研究专注于电子陶瓷，高温电化学和能源转换系统，包括固体氧化物燃料电池和电解电池。主持国家重点研发计划青年科学家项目、国家重点研发计划政府间国际科技创新合作项目、国家自然科学基金等纵向和数项产学研横向课题。电化学材料实验室团队汇聚了来自材料科学、化学、物理学等多个学科的研究人员，形成了跨学科的研究团队，团队成员有明确分工与合作，研究聚焦界面原子级设计、多尺度模拟与先进制造工艺以及高温电催化剂开发、界面稳定性提升及设备集成领域。

参考文献

- [1]. 苏虹阳, 陈迪. 高温气 / 固电化学界面调控研究进展 [J]. 科技导报, 2023, 41(8): 120-131.
- [2]. Xu M, Cao R, Qin H, et al. Exsolved materials for reduction in high-temperature electrolysis cells[J]. Materials Reports: Energy, 2023, 3: 100198
- [3]. 陈迪, 赵云, 许建兵, 苏虹阳, 刘鹏. 环境 PLD 生长及电化学性能测试系统、方法及用途 :ZL 2022 1 0651353.2
- [4]. Hongyang Su †, Jing Chai †, Zixuan Guan, Hendrik Bluhm, Ziyun Zhang, Yidan Cao, Zhi Liu*, Yuan-Hua Lin*, William C. Chueh*, Liang Zhang*, Di Chen*, Tuning f band for Enhanced Surface Redox in Strained Rare Earth Oxides, Journal of the American Chemical Society, 147, 40196 – 40204 (2025).
- [5]. Hongyang Su †, Jie Zheng †, Wenxiang Mu †, Zixuan Guan, Pei Wang, Ziyun Zhang, Fanqi Meng, Xiaoying Yan, Peng Liu, Guiping Ji, Tianxiang Nan, Hui Zhang, Yidan Cao, Zhi Liu, Yuan-Hua Lin, Wei-Xue Li, William C. Chueh*, Sulei Hu*, Di Chen*, Atomically precise layer-by-layer titration of perovskite oxides reveals the termination-specific reactivity in oxygen electrocatalysis, Nature Catalysis, accepted.



触觉图形显示器研究：数字化盲文教科书设计

文 / 焦阳

摘要

据世界卫生组织统计，全球视力受损患者约有 2.53 亿，包含 3600 万盲人。盲人学生在学习的知识与明眼人学生是一样的，但是缺少了大量的图形图像信息作为学习辅助。随着电子化图形触觉显示设备及相关领域的发展，盲人朋友拥有了更好的学习和理解图形信息的工具。本文基于这类大幅面触觉图形显示器，设计开发了面向小学语文数学的数字化盲文教科书。不仅保留了纸质教科书原有的盲文文本，还还原了相关的触觉图形和插图，盲人学生可以图文并茂的阅读。本文研究了盲文教科书的图文设计原则，并展示了五个设计案例。我们邀请 12 名小学生对这五节课程进行体验，大部分都给予了积极的回应。我们的研究结果为盲文教科书的设计与未来改善触觉界面设计的用户体验开拓了道路。

关键字

视障人士

触觉图形显示器

数字盲文教科书

设计指南

1. 背景介绍

根据世界卫生组织 (WHO) 2020 年发布的《世界视觉报告》，全球中重度视力受损 (Visually impaired) 患者共有 2.53 亿，包括 3600 万全盲患者。我国 2012 年残疾人联合会残疾人概况报告显示，2010 年末中国视力残疾人数为 1263 万。同时根据中国教育部 2019 年年鉴数据，大约 4 万视力残疾儿童涵盖在国家教育系统中，能够进入各地盲人学校和其它院校就读。可能很多人并不知道，视障儿童在盲人学校所学习的很多知识内容和明眼人几乎是一样的，无论是语文、数学、还是物理、化学。通过对比研究盲文版教科书和标准教科书，盲文教科书基本由标准教科书删除了所有插图，并几乎保留了所有文字内容而成。盲人学生缺少大量图形图像信息作为学习的辅助，又需要和明眼人一样理解同样知识内容的文字信息，这给广大盲人学生全面的知识学习带来了严峻的挑战。

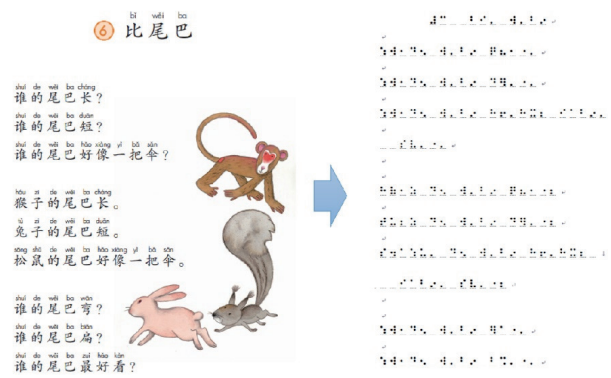


图1 语文课文《比尾巴》标准教科书版本与盲文教科书版本对比，均节选自人教版小学一年级语文教科书

另一方面，盲人除了通过盲文学习文字表达的内容，也可以使用读屏器等语音辅助软件通过声音进行交流；但是目前在实际应用中仍极度缺乏帮助盲人有效学习和理解图形信息的工具和设备。传统方式是使用特殊纸张制作触觉图形，比如压印、盲文触点打印、热塑等方式。然而它们的制作过程复杂、体积较大、且不易长时间保存，无法满足信息时代盲人学习的需求。因此，面向盲人图形学习的设备的缺乏和教科书中大量图形内容的缺位，它们互为

因果，制约了盲人全面的学习与发展。

有鉴于此，针对广大盲人朋友对图形学习的需求，由触点代替像素点、可实时刷新的触觉屏幕极大地有利于盲人获取信息。近年来数字化触觉（图形）显示设备的研究得到了快速发展，比如德国 Metec AG 公司、美国盲人出版社和 Orbit Research 等制造的触觉图形显示器。同时。我们历时十年设计并开发了面向盲人的大幅面触觉图形显示设备 [6]。与传统的显示屏幕不同，触觉显示设备的表面由可以凸起和收回的点阵组成。通过内置的计算系统控制这些点阵的变化，可以把传统的图片变成可以触摸的图形。盲人用户通过触摸这些凸起点阵所组成的盲文或触觉图形来阅读文字和认知图片（图 2）。



图2 触觉图形显示器原型，能够显示触觉文字或图像

因此，在数字化触觉图形显示设备不断发展的当下，为盲人提供更多图文并茂的学习内容正逢其时，特别是针对中小盲人学生的盲文教科书。因此，我们致力于在将盲文教科书数字化的同时，试图保留标准教科书中的插图并还原至盲文教科书中。如此，盲人学生可以结合图片阅读文字。“一图胜千言”，数字化、图文并茂的教科书可以提高年轻盲人学生获取信息的能力。

基于以上目标，本文首先介绍了该领域的相关研究，然后提出了一系列盲文教科书数字化的设计

原则和方法，以提高该教科书的学习体验，并基于这些原则设计了一系列语文和数学教科书的数字化课文案例。随后，我们邀请了 12 名盲人学生对这些数字化课文进行学习体验，被试的使用感受良好。最后总结了数字版盲文教科书的设计研究工作。

2. 相关研究

关于触觉显示设备的开发以及盲文和触觉图像设计作为视障人士的辅助技术的研究历史悠久，并一直持续到今天。盲文被广泛用于为盲人传达文本信息。一个盲文“点方”中包含三行两列共六个点。点方中相邻点之间的距离为 2.5mm，而相邻的点方的距离为 3.5~4mm，以便区分每个点方。这种点和点方之间的不同间距标准在纸质盲文书籍和盲文电子显示器中均有效。然而，大多数盲文显示器只能显示一行盲文（通常为 20 或 40 个点方），因此盲人一次只能阅读一行文字，影响了阅读效率。

在触觉图像方面，盲人迫切需要对空间信息的学习理解。受限於人体触觉感受机制，触觉通道的认知窗口明显小于视觉（与明眼人相比），但在帮助盲人学习图形和二维空间信息方面仍取得了多项进展：在触觉图像设计方面总结了影响触觉图像识别的几个因素，包括图像几何特征、图像对称性、图像大小和透视，并制定了一系列多级编码和量化方案准则 [7] 来评估触觉图像识别性能。

在结合盲文文本和触觉图像的触觉界面设计中，一种常见的方法是保留传统的交互范式：图形用户界面（GUI）中的窗口 - 图标 - 菜单 - 指针（WIMP）。通过这种方式，有相关研究开发了一种从矢量图像转换为触觉图像的网页浏览器，为盲人浏览网页开辟了一条新途径。在触觉界面的用户体验和可用性研究中。定义了四个区域，将触觉界面分割为标题、正文、结构和细节区域，而提出了六个矩形区域，允许用户以不同的呈现模式和缩放级别感知给定的内容。

以上工作为本文设计更好的图文并茂的数字盲文教科书奠定了基础，指导我们从用户体验的角度

探索数字盲文教科书的触觉界面设计。

3. 教科书数字化设计中的用户体验研究

为了实现数字盲文教科书学习的良好用户体验，我们将设计分为三个部分：符合盲人同学触摸习惯的排版设计、从标准教科书的普通图像到触觉图像的迁移设计，以及图文并茂与上下文关联的知识学习设计。图 3 展示了触觉界面设计的三个部分。

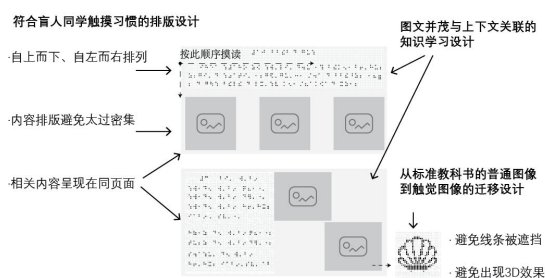


图 3 数字盲文教科书触觉界面设计的三个部分

3.1 符合盲人同学触摸习惯的排版设计

目前我国盲人教育使用的盲文教科书与传统文字图书的排版基本一致，皆为自上而下与自左至右的顺序，在盲人计算机上进行盲文显示时，首先应考虑遵循这样的排版习惯。显示内容的排列不应过于密集。这是由于触觉通道所接受和感知信息的容量比视觉通道小的多，且触觉感知缓慢且不连续造成的。任何盲人辅助设备都应符合盲人用户的心理图示、范畴和概念，在具体的设计过程中，可结合格式塔心理学的相关原理，尽量减少触觉图像中复杂线条的出现与多个区域的叠加，以求降低摸读难度、提高信息表达准确度，避免导致盲人学生感知困难以及理解有误等。

其次，在排版过程中，需要同时摸读的相关内容应呈现在同一页面上。触觉感知的断续特点影响着盲人的触摸阅读习惯，分隔呈现的相关内容会带来强烈的打断感，不便阅读，且影响盲人用户对信息的获取与联想处理。以第四节案例中的语文课文

《比尾巴》为例，在该篇课文的盲文版本设计中，将松鼠、兔子的图像与相对应的文字排布在同一版面中，剩余动物与对应的文字一起安排至下一版面，即是针对这一问题进行特别设计的案例，保证了图文内容的一致性，方便盲人用户的联想与理解。

最后，同明眼人一样，盲人的认知过程也会受到情感的影响，符合盲人触摸习惯的排版设计也能够引导盲人学生轻松、合理地获取正确信息，增强学习信心，改善学习效果。

3.2 从标准教科书的普通图像到触觉图像的迁移设计

在针对标准教科书内的普通图像进行触觉化再设计的过程中，应当遵循触觉图像设计的相关原则与方法，以保证图像具备良好的可辨认性与易理解性。

由文献综述，触觉图像具备的几个特征，会从多方面影响触觉识别的效果，这些特征分别是“因遮挡省略的线条”、“3D 透视”、对称性问题、“可操作性”和“长条形”，以及“刚性”和“柔性”。其中，后三个特征关注了物体和表现方式对称性、外形与操作性联想记忆以及外形可形变度与触摸识别难易度的相关问题。但这些特征描述的是图片中物体本身的特征，受限于此，难以从设计层面对触觉图像的呈现效果进行改善。

“因遮挡而省略的线条”、“3D 透视”两个特征是关于触觉图像表达方式的特征，可以用于改善触摸效果，触觉图像可以着重针对这两方面进行设计。由于触觉图像大多是平面的，盲人在触摸过程中往往难以区分“前景”与“背景”，如果图像存在遮挡关系，容易对图像的可识别度造成影响。盲人，尤其是先天盲人的生活习惯导致他们不能很好地理解物体的透视关系，因此具有透视感的图片同样会对盲人的触觉认知造成极大的障碍。

基于上述两特征，我们针对触觉图像的设计建议为：

①避免在图片中让物体的重要轮廓、细节互相遮挡，应该将主要轮廓保留完整，并且将重要的细节充分地展示在空白区域，避免前景背景混淆。第四节案

例《认识 1-5》在此基础上将标准教科书上动物前后遮挡关系较多的图片，调整为动物之间互不相交、分散展示的图片样式，避免理解错误。

②避免使用近大远小，同时呈现多个面等明显 3D 透视效果，尽量使用平行透视或者使用物体的某一或者某几个截面来表达立体图形。第四节的案例《赵州桥》、《上下前后》都基于这一原则，对标准教科书内的三维图像进行了调整，采用物体的单个面来进行表现，方便理解。

3.3 图文并茂与上下文关联的知识学习设计

认知心理学研究成果表明，文字和图像的内容可以互相补充，帮助学习者在心理上整合图像及语言的表征，从而促进学习者的良好理解或有意义学习的产生 [4]。换言之，图文结合的内容呈现方式，对于教学效果具有一定正向作用。于盲人学生而言，图文并茂的教科书比仅有文字的教科书更加易读、易懂，学习过程也能更加轻松。

图文的先后顺序对于学习效果的提升各有益处，但教科书在进行图文结合编排的同时，还需要考虑教学内容上下文的具体联系，来合理安排图文顺序。借助精致教学理论中由简单到复杂的观点，图文的顺序应当针对具体的学习资料进行不同的设计，结合上下文的内容关联以及图文信息量、复杂度等因素，遵循由浅入深、循序渐进的原则进行合理的设计。图片在前，能够帮助盲人学生不熟悉或不易读懂的文字内容提前进行熟悉，构建心理模型以促进理解；文字在前，便于引导盲人学生关注后续复杂图片中的重点信息。

简言之，在触觉图像中应当充分联系上下文，首先呈现较为简单的图文信息，更有利于盲文学习者对盲文教科书内容的理解。例如第四节案例《“贝”的故事》，首先展示了简单易懂的文字说明，对下方更加抽象的文字形态演变图做出了解释，帮助盲人学生更好地理解图片内容。案例《赵州桥》也有

这样的设计目的,先展示了简单易懂的赵州桥正面形态示意图,再通过文字向盲人学生解释更为复杂的结构原理、作用等内容,循序渐进地学习。

4. 数字化盲文教科书案例研究

4.1 语文课文案例《赵州桥》(人教版语文三年级下册)



图4 语文课文《赵州桥》标准教科书版本与盲文教科书版本对比

图中课文介绍了赵州桥的形态与设计原理等内容。标准版本教科书在文字上方展示了赵州桥在三维空间中的真实照片,整体形态、空洞位置、与水面的关系等信息一览无遗。配合课文中的介绍,学生能够轻松理解赵州桥的巧妙设计。

盲校教材仅仅保留了对赵州桥的文字描述,赵州桥建造复杂,盲人学生的空间想象能力难以发挥,仅凭盲文教科书中的文字描述不易理解其中的结构。

触觉显示器可以让学生直观地感受到桥体的样子,通过再现桥体轮廓的平面图像,本课内容的数字化设计如下:

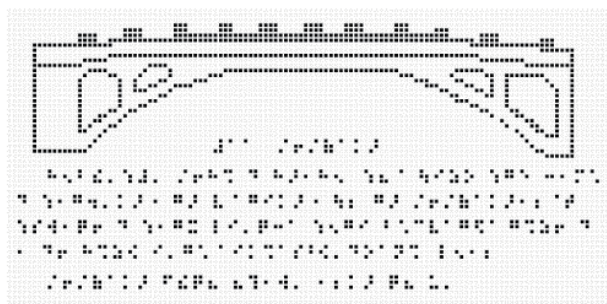


图5 语文课文《赵州桥》数字版盲文课文

本设计在已有的文字内容之外,增加了赵州桥的平面形态图像,遵循了触觉图像的对称性、无遮挡原则,在保证图像容易理解的基础上,清晰直观地展示桥的形态,让课文中描述的赵州桥外形、结

构等抽象概念更易理解。

4.2 数学课文案例《1~5的认识和加减法》

(人教版数学一年级上册)

如图所示是数学课本中关于数字1-5的教学内容。标准版本的课本中通过一张生活化的、无规律的图片引导学生进行数字1-5的认识与分辨,学生通过观察图片来学会数字的应用、加深对数字的理解,兼具发散思维的培养。



图6 数学课文《1-5的认识和加减法》标准教科书版本与盲文教科书版本对比

在盲校教材中,教科书文字内容与标准教材基本一致,但将图片替换成了抽象的、规律的图形,趣味性和引导性都不够,盲人学生的学习过程枯燥,且缺少发散思维的培养。

本触觉图形显示器能够弥补图像的缺失,可以为盲人学生提供图文并茂、引导思考的数学学习,本课内容的数字化设计如下:

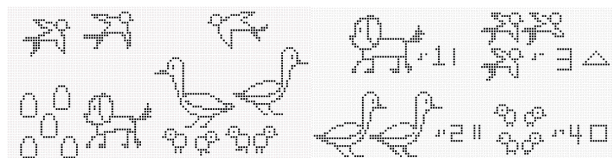


图7 数学课文《1-5的认识和加减法》数字版盲文课文

本设计在已有的文字内容之外,补充了具有趣味性的图像内容,通过图文结合的教学方式,合理引导盲人学生对数字进行思考与探索,避免过于抽象和枯燥的学习过程。

4.3 其他数字化盲文教科书案例

在不同科目的学习中,触觉图像均能够引导盲人

学生进行联想与拓展,帮助其理解抽象概念、认知世界。

例如,改编自人教版语文二年级下册的课文《“贝”的故事》,触觉图像课本增加了文字演变的触觉图像,盲人学生能够通过触摸来感受文字的形态变化,并结合课文内容展开联想学习。同理,人教版语文一年级上册的课文《比尾巴》中,增加动物的触觉图像,也是一种图文并茂的联想学习,对于激发盲人学生的想象力、提高学习兴趣、改善学习效果有极大的帮助。

针对数学学习,触觉图像也可以帮助盲人学生认识空间位置、理解生活场景。如选自人教版数学一年级上册的数学课文《上、下、前、后》,触觉显示器可以在二维空间内再现教学场景图片,增加图文联系,避免过于抽象的想象,有助于盲人学生对空间和位置的理解,更透彻地学习数学知识、顺利培养数学思维。

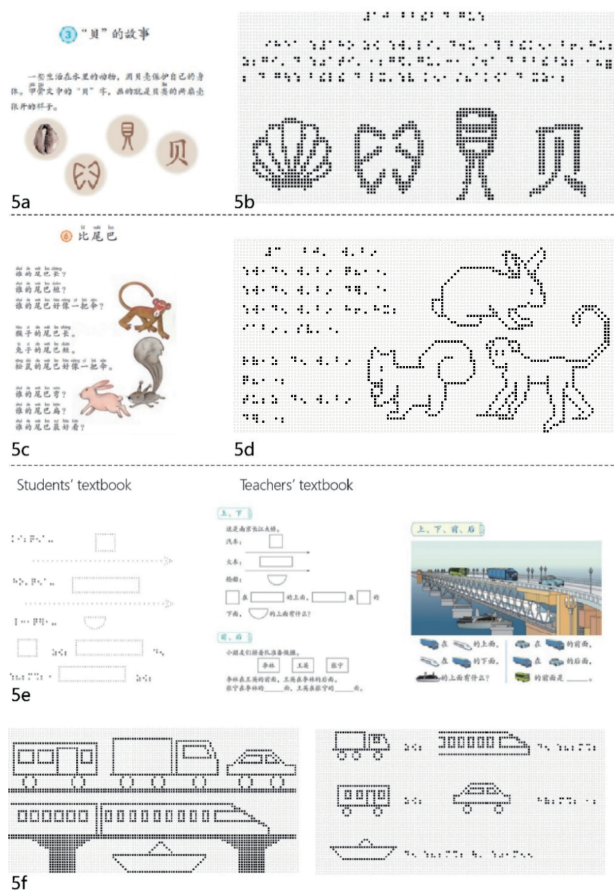


图 8a 语文课文《“贝”的故事》标准教科书版本;图 8b 语文课文《“贝”的故事》数字盲文教科书版本;图 8c 语文课文《比尾巴》标准教科书版本;图 8d 语文课文《比尾巴》数字盲文教科书版本;图 8e 数学课文《上、下、前、后》标准教科书版本;图 8f 数学课文《上、下、前、后》数字盲文教科书版本

5. 评估与讨论

为测试数字盲文教科书的可用性,我们邀请一所盲人小学的 12 名盲人学生进行了用户体验实验。我们将第四节中提到的五节数字版盲文教科书课程案例,包括三节语文课文(《赵州桥》《贝的故事》和《比尾巴》)以及两节数学课文(《认识 1-5, 加减法》和《上、下、前、后》),分别用触觉图形显示器展示给被试,并为被试提供了相同课文内容的纸质版盲文教科书。每位被试需要大约五分钟时间来摸读一篇数字版或纸质盲文课文,然后再花五分钟时间在另一版教科书中完成相同的任务,依此完成全部五篇课文的学习。学习完所有课文后,被试回答李克特量表(Likert scale) 1 至 7 分的主观问题。问题包括数字教科书学习是否有障碍,是否更容易阅读和理解、是否传达更多知识、容易理解,以及被试是否愿意用该方式学习其它学科,和是否愿意推荐该学习工具。

大多数被试都表达了他们的兴趣,并对数字化盲文教科书的应用给出了积极的反馈。他们认为触觉图像能够包含更多信息,对盲文文本来说是一个很好的补充。此外,很多被试提到盲文文本是抽象的,而触觉图像是具体的,二者在学习过程中能够互为补充,更有利于知识的学习。他们希望能够使用数字教科书进行更多的学习。

本实验仅针对与图形信息相关的五个典型课程案例。对于其他课程,如何增加触觉图像仍需要仔细斟酌。我们建议,在进行盲文教科书数字化的过程中,应将课程中的盲文文本充分保留,同时将触觉图像作为额外的补充。我们相信,数字化触觉显示设备和数字版盲文教科书将更好的帮助盲人的学习。

我们希望在未来继续设计和提升更丰富的数字版盲文教科书,及其触觉交互的用户体验。借助更多的数字化触觉图像显示设备,我们希望盲人能够更轻松地阅读文字和图像,拓宽他们的知识体系,帮助他们的学习、工作与生活。

碳纤维如何为未来产业提质增效？

文 / 乐恢榕

引言

2024 年 6 月，中国嫦娥六号探测器在月球背面成功展示了一面由玄武岩纤维编织的五星红旗。这一壮举不仅象征着中国航天技术的再次飞跃，也突显了纤维材料在新材料领域的战略地位。在众多纤维复合材料中，碳纤维以其“轻质高强”的独特优势，以及卓越的耐腐蚀性和热稳定性，被誉为“新材料之王”。2022 年，中国石化等单位在 6K、12K、24K 和 48K 湿法高强中模碳纤维产业化技术上实现重大突破，为碳纤维的国产化奠定了坚实基础，同时显著降低了碳纤维原丝的成本。进入 2024 年，“新质生产力”概念的提出进一步推动了碳纤维复合材料在新能源、低空经济等领域的需求快速增长。本文立足于团队在碳纤维复合材料设计与制造工艺领域的最新研究，深入探讨其在轻量化设计、绿色制造和高端设备中的应用价值，并展望其在未来制造业和尖端科技中的广阔前景。

1. 什么是碳纤维？

1.1 碳纤维的简介与分类

碳纤维是一种含碳量在 90% 以上的高性能纤维材料，通过将高含碳量聚合物（如腈纶）进行高温碳化处理，形成直径 5 至 8 微米的无机纤维原丝。根据形态与基材的不同，碳纤维主要分为短切纤维和连续纤维两种。短切纤维因成本低、加工性强，常用于热塑性增强基材；而连续纤维以其高强度闻名，是热固性增强基材的理想选择，广泛应用于航空航天等高端领域。

按原材料来源分类，碳纤维主要包括聚丙烯腈（PAN）基、沥青基和粘胶基三大类型。其中，PAN 基碳纤维以高强度和成熟工艺占据主流地位，产量比例超过 90%。根据丝束规格的不同，碳纤维可分为小丝束和大丝束，其中 1K 表示每束碳纤维包含 1000 根单丝。小丝束碳纤维的生产工艺复杂但性能优异，多用于军工与航空航天领域；而 48K 及以上的大丝束碳纤维则以成本低、性价比高的特点，成为工业领域的首选材料。

1.2 关键特性与优势

碳纤维的材料优越性能使其成为现代制造不可替代的材料。轻量化是碳纤维最显著的特性，其密度仅为钢的五分之一，是铝的五分之三，使其成为轻量化设计的理想材料。同时，碳纤维的抗拉强度极高，在耐疲劳性能上显著优于传统金属材料。其低热膨胀系数带来的热稳定性，保证了在极端温差条件下的尺寸稳定性。与此同时，碳纤维还表现出极强的抗腐蚀性与良好的电导性能，使其在严苛环境下的应用潜力巨大。

1.3 应用领域

碳纤维历经百余年发展，从无到有，逐步成为

民用消费品和工业领域的关键材料。在民用消费领域，碳纤维广泛应用于高端运动器材和生活用品，如自行车车架、高尔夫球杆、旅行箱和头盔等。这些产品因碳纤维的引入，不仅性能显著提升，还契合市场对高品质与个性化设计的需求。

在工业领域，碳纤维的作用尤为重要，特别是在航空航天、新能源以及电动汽车等高端制造行业。其在航空航天中的应用范围涵盖飞机机身、卫星和火箭结构等，通过减轻重量显著提高燃油效率。在风电领域，碳纤维用于制造风电叶片，大幅提升叶片的耐用性并优化发电效率。



图 1 碳纤维在汽车及轨道交通中的应用（图片来源保时捷官网、青岛地铁 1 号线）

然而，正如李仲平院士在《如何认识神奇的碳纤维》中提到，碳纤维在实际应用中仍面临“用不起”和“不会用”的困境。尤其是在工业领域，碳纤维复合材料的大规模应用受到生产成本高和难以实现全自动化制造的限制。在新能源和低空经济的东风下，如何研发颠覆性的低成本、自动化碳纤维复合材料制造技术，成为当前亟需攻克的技术瓶颈。

1.4 碳纤维的产业化方向

碳纤维产业的快速发展得益于国家政策的持续支持和技术的不断突破。实现碳纤维产业的升级，关键在于降低成本、增强自主创新能力、拓宽应用领域，实现“用得起、用得好”的目标。这样才能推动碳纤维产业实现质的飞跃，为制造业的高质量发展注入新的活力。当前，碳纤维的产业化方向主要集中在新能源汽车、机器人、飞行汽车等风口行业。每个行业的背后都隐藏着巨大的市场需求，以新能源汽车为例，预计 2025 年，中国汽车产量将达到 3000 万辆。如果碳纤维能够实现规模化工业应用，市场需求将达到万吨级规模。

2. 未来材料与设计研究团队与碳纤维

未来材料与设计研究团队致力于打破学科边界，专注于跨领域创新与推动产业跨越式发展。在碳纤维复合材料领域，该团队开展了全链条研究，从热塑性碳纤维的材料设计到表面处理与复杂加工工艺，再到连续长碳纤维的数字化制造。通过这一体系化布局，团队实现了从基础材料研发到产业化应用的跨越式发展，并持续推动技术的前沿突破。

2.1 热塑性碳纤维的材料设计

研究主要集中于以热塑性塑料为基体的碳纤维复合材料。相较于传统热固性复合材料，热塑性复合材料因其加工性和回收性更具优势，这与我国推进的“双碳”战略高度契合，为可持续发展提供了材料支持。其基材能够通过热压成型实现在工业上高效批量化生产，同时支持二次焊接加工，使其在复杂精密结构件的制造中表现尤为突出，这对于其在汽车及工业机器人的产业化落地至关重要。

在材料设计方面，通过优化表面处理技术与纳米颗粒改性工艺，大幅提升了碳纤维与基体的结合强度，从而显著增强复合材料的力学性能和热稳定性。在成型工艺上，采用高温高压环境下的热压成型技术，使材料均匀结合，确保其优异的抗拉强度和耐疲劳性能，以满足严苛的工业应用需求。在与金属材料的连接上，引入了碳纤维布复合铺层、金属网铺层以及金属套筒嵌入技术，并对传统螺栓连接方式进行了改进。从材料设计到成型工艺，再到连接技术的优化，这些研究为实现碳纤维复杂构件的制造奠定了坚实基础。

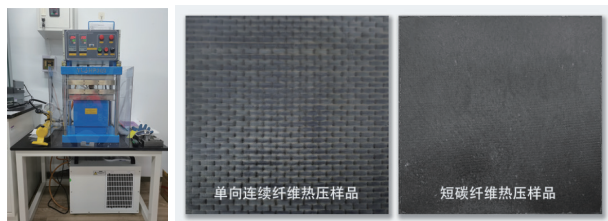


图 2 热塑性碳纤维高温高压成型设备及样品



连续工作35h后，发生螺丝断裂失效



采用镶嵌黄铜套筒，耐久性大幅提高

图 3 碳纤维与金属材料连接优化对比

同时在碳纤维复合材料的理论计算上，团队建立了基于经典力学的性能预测模型，能够比较精确描述复合材料的非线性力学行为。该模型显著提高了性能预测的准确性，同时为材料在航空航天、汽车制造及电子设备等领域的定制化设计提供了科学依据。通过调节材料成分和加工参数，能够优化其在轻量化、耐久性、导热性等方面的性能，拓宽其工业应用前景。

2.2 碳纤维的数字化制造

当前的 3D 打印技术已能够实现热塑性短碳纤维复合材料的制造，但在连续长碳纤维复合材料制造方面仍面临显著挑战。为了提高碳纤维复合材料的力学性能，团队研发了一种基于自主路径规划和双机械臂协作的连续长碳纤维 3D 打印工艺。通过精确设计碳纤维的增强路径，并利用多轴机械臂实现高精度碳纤维缠绕，打印头能够在复杂曲面上精准运动，从而提升异形结构件的整体强度。这一技术特别适用于机器人、无人机和机械臂等高性能结构的制造。与传统依赖手工铺层的制造工艺相比，该方法通过机械臂实现自动化打印，在复杂异形件的制造中展现出显著优势。

2.3 未来的研究方向

未来将聚焦于通过数字建模优化碳纤维复合材料的表面结构优化，以解决碳纤维与异种材料结合的技术难题，从而拓展其在复杂结构中的应用潜力。在产业化方面，团队计划深入探索热塑性碳纤维的批量加工工艺，如热压成型、超声波焊接、摩擦焊接。这些技术可提高生产效率并确保大规模生产的一致性，进一步降低成本，为工业应用提供可靠支持。同时，团队还将加强碳纤维在机械臂、无人机和飞行汽车等领域的应用研究，通过其轻量化和高强度特性推动技术突破，扩展材料在更多前沿领域的实际应用，为未来制造业提供更多创新解决方案。

3. 结语与展望

碳纤维的独特特性与多功能性赋予其在新兴产业和未来产业的无限可能。从航空航天到新能源，从机器人到飞行汽车，碳纤维的产业升级也为新兴产业和未来产业提质增效。作为跨学科交叉研究实验室，团队将继续发挥创新优势，推动碳纤维材料在基础学科培养与产业转型中的关键作用，为科技进步和高质量发展贡献力量。

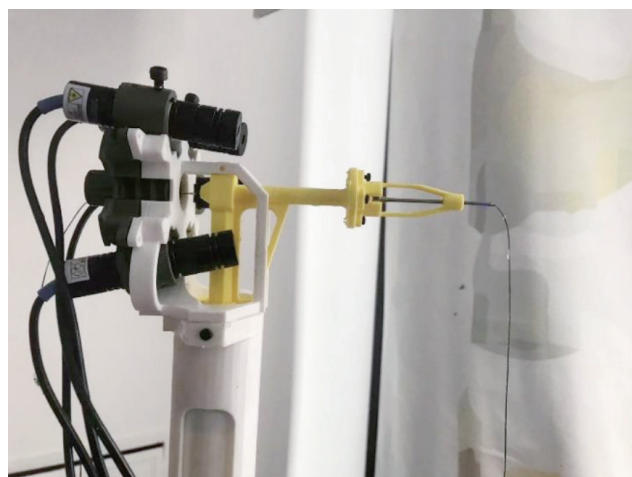
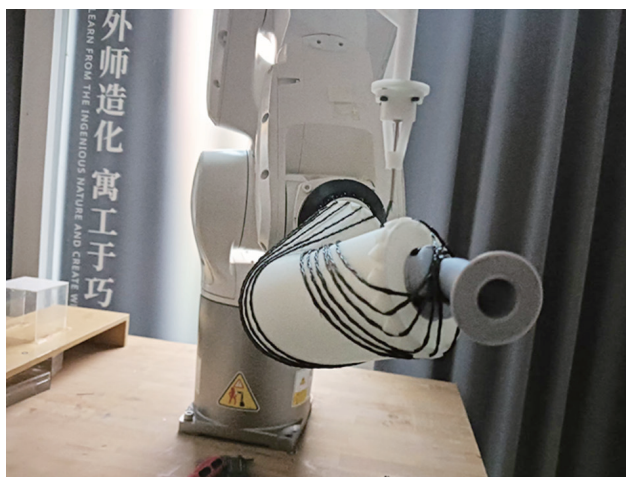


图 4 连续长碳纤维打印头及长碳纤维缠绕增强过程

4. 乐恢榕教授团队的研究背景

乐恢榕教授是清华大学未来实验室的首席研究员，未来材料与设计研究中心主任，长期致力于纳米复合材料、多功能表面复合涂层、轻量化纤维增强复合材料等方面的研究。乐教授及其团队拥有丰富的国际科研经验，积极参与多项欧盟和英国的科研项目，为新型复合材料的研发和应用做出了突出贡献。

乐教授自 1989 年毕业于清华大学材料科学与工程系无机非金属材料专业，获得工学学士学位，并于 1994 年初获工学博士学位。回归清华大学之前，曾于 1996 年前往英国萨里大学、剑桥大学工程系从事博士后研究工作。2000 年在剑桥大学晋升为资深研究员；2005 年起先后在英国邓迪大学、普利茅斯大学等高校任讲师、副教授、教授。主持或参与过近 20 多项欧盟区域发展基金、英国工程与物理科学基金会、英国创新署支持的研究项目，发表学术论文 120 余篇。

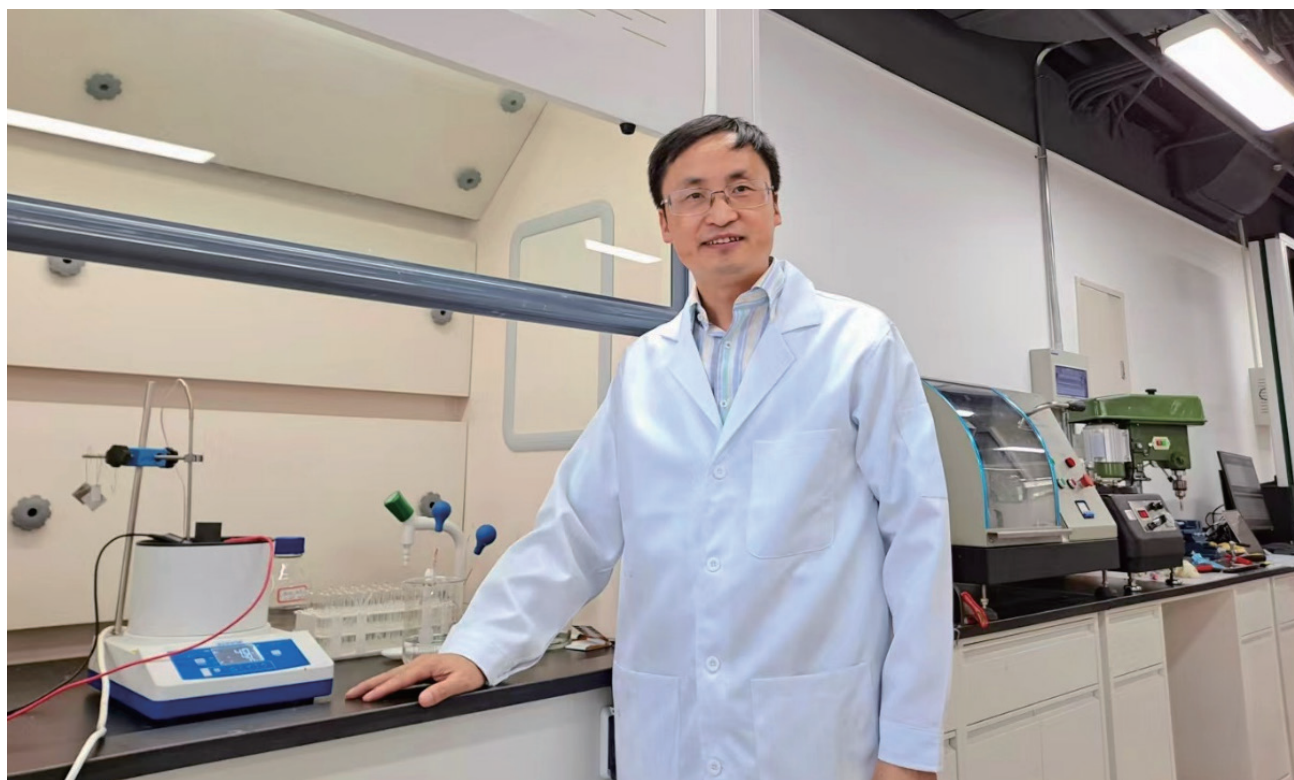
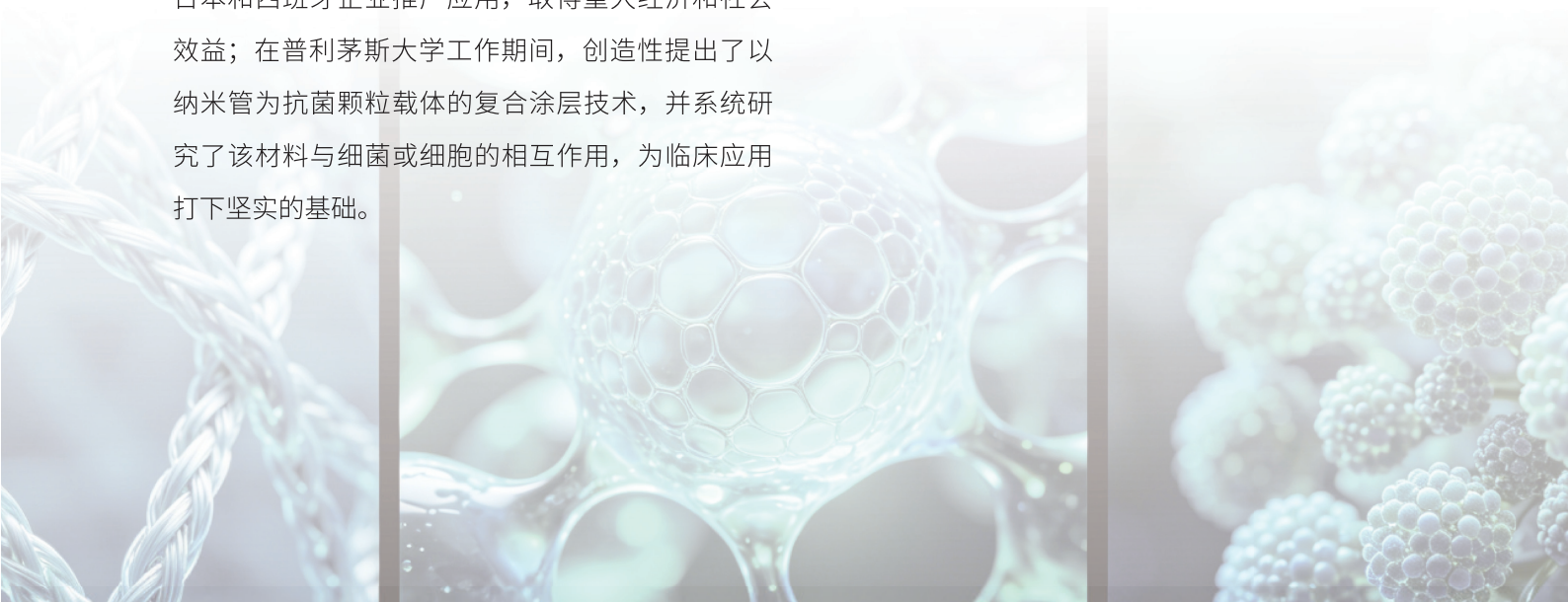


图 5 乐恢榕教授在未来材料设计与制造实验室



图6 乐恢榕教授与部分团队成员合影

乐教授的研究方向涵盖了多个领域，包括纳米材料、复合材料、绿色环保材料等。其在剑桥大学期间，将金属成型的研究边界推向纳米尺度，建立了在冷轧过程中表面氧化物开裂和金属挤出的微观力学模型，广泛应用于金属塑性成型、金属基复合材料等领域；在邓迪大学工作期间，致力于海洋石油天然气管道接口的新型涂层材料的研究，发展了具有自润滑功能的纳米复合涂层技术，研究成果被英国、日本和西班牙企业推广应用，取得重大经济和社会效益；在普利茅斯大学工作期间，创造性提出了以纳米管为抗菌颗粒载体的复合涂层技术，并系统研究了该材料与细菌或细胞的相互作用，为临床应用打下坚实的基础。



参考文献

- [1]. Yang Liu, Kaibao Wang*, Zhilong Chang, Huirong Le*. Interfacial Modification on the Thermal and Mechanical Properties of CF-PEEK Composites. *Composite Structures*, 389 (2026) 120434.
- [2]. Kaibao Wang, Yang Liu, Jiacheng Bai, Hao Wang, Zhilong Chang, Huirong Le*. Biomimetic design and modelling of hybrid short and long carbon fibres reinforced PPS/PES composites. *Composites Structures* 385, 2026, paper no. 120234.
- [3]. Yang Liu, Kaibao Wang*, Huirong Le*. Interfacial strengthening of CF/PEEK by electrodeposition of β -TCP coating and RVE based simulation for elastic modulus prediction. *Composite Structures*, 2025, paper no. 119024.
- [4]. Yanhong Jia, Yanzhen Wu, Yao Chen*, Huirong Le*. Characterization and Modelling of Carbon Black Nanocomposite Strain Sensor on Pneumatic Driven Flexible Catheter for Pulmonary Surgery Robots. *Materials & Design*, 2024, paper no. 113512.
- [5]. Kaibao Wang, Yang Liu, Yao Chen, Hongwei Chen, Huirong Le. Mechanical Behaviour of 3D Printed Carbon Fibre Reinforced Composite Metastructure with Various Filling Rates. *Composite Structures*. Volume 347, 1 November 2024, 118421
- [6]. Yuan Yao, Kaibao Wang, Hongwei Chen, Huirong Le*. Modelling of Nonlinear Mechanical Behaviour of 3D Printed Short Carbon Fibre Reinforced Nylon Composites. *Composite Part C*, vol.14, July 2024, 100455.
- [7]. Marzena Pawlik, Huirong Le, Paul Wood, Yiling Lu. Prediction of carbon nanotubes reinforced interphase properties in fuzzy fibre reinforced polymer via inverse analysis and optimisation. *Computational Materials Science*. Vol 231, 5 January 2024, 112548.
- [8]. Marzena Pawlik, Lyddia Yi Yu Cheah, Urvashi Gunpath, Huirong Le*, Paul Wood, Yiling Lu*. Surface engineering of carbon fibre/epoxy composites with woven steel mesh for adhesion strength enhancement, *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 114, paper no. 103105, 2022.
- [9]. Marzena Pawlik, Huirong Le, Yiling Lu*. Effects of the graphene nanoplatelets reinforced interphase on mechanical properties of carbon fibre reinforced polymer – a multiscale modelling study. *Composite Part B: Engineering*, 177 (2019), paper no. 107097.
- [10]. M Meng, MJ Rizvi, HR Le*, SM Grove. Multi-scale modelling of moisture diffusion coupled with stress distribution in CFRP laminated composites. *Composite Structures* 138(2016) 295-304.
- [11]. M Meng, M.J. Rizvi, S.M. Grove, H.R. Le*. Effects of hygrothermal stress on the failure of CFRP composites. *Composite Structures* 133(2015) 1024-1035.

参考专利

- [1]. LE HUIRONG; 韦庆昕：一种莫来石纤维增强地质聚合物复合材料及其制备方法，ZL202111555476.8，授权日期 2022.11.11。
- [2]. LE HUIRONG; 韦庆昕：一种利用磷酸基地质聚合物固定重金属的方法，ZL202210870425.2，授权日期：2023.04.19。

- [3]. LE HUIRONG; 贾艳红; 吴彦臻: 气动医疗手术导管测试平台, ZL202410198653.9, 授权日期 2024.05.24。

[3]. 2022 年 5 月, 轻量化服务机器人, 荣获第 16 届北京市发明创新大赛入围奖
- [4]. LE HUIRONG; 何伟伟; 刘娅静: 抗菌铝合金及其制备方法 (ZL202211091358.0)。授权日期 2025.11.25

[4]. 2021 年 12 月, 基于复合材料机械臂的移动服务机器人平台, 荣获二十五届全国发明博览会银奖
- [5]. LE HUIRONG; 王凯宝: 短碳纤维增强热塑性复合材料及其制备方法和用途 (ZL202510694944.1), 授权日期 2025.08.26。
- [6]. LE HUIRONG; 贾艳红; 邵泽敏; 刘可歆: 基于碳纤维增强多分支基体的三维打印路径规划方法、三维打印方法和系统 (ZL202510694940.3), 授权日期 2025.08.26。
- [7]. LE HUIRONG; 贾艳红; 吴彦臻; 邵泽敏; 刘可歆: 连续碳纤维复合材料的光固化 3D 打印头及打印方法 (ZL202510694942.2), 授权日期 2025.08.26。
- [8]. LE HUIRONG; 贾艳红; 邵泽敏; 吴彦臻; 刘可歆: 基于碳纤维增强基体的三维打印路径规划方法、三维打印方法及电子设备 (ZL202510694945.6), 授权日期 2025.08.26。
- [9]. LE HUIRONG; 刘杨; 王凯宝: 短碳纤维增强聚醚醚酮复合材料及其制备方法和应用 (ZL202510694943.7), 授权日期 2025.12.02
- [10]. LE HUIRONG; 陈宏伟; 杜润鸣; 陈新: 三维打印碳纤维复合材料表面覆膜技术 (ZL202310186404.3), 授权日期 2025.12.02

获奖展示

- [1]. 2024 年 5 月, 地质地质聚合物在处理工业废酸以及固沙上的应用, 荣获二十七届全国发明博览会银奖、全国发明创业奖项目奖三等奖
- [2]. 2023 年 5 月, 新型地质聚合物及其复合材料, 荣获第 17 届北京发明创新大赛银奖

“双碳”背景下的绿色生活： 相变储能技术如何实现新质调温？

文 / 李彦辰

引言

全球约 50% 的能源用于获取热能，主要用于工业和建筑供暖。在热能调控领域，人类正致力于逐步淘汰化石燃料，以实现能源的可持续利用。我们迫切需要一种高效、经济且可持续的温度调节解决方案。相变储能材料（Phase change material, PCM）是新一代绿色节能材料，可广泛应用于航空、军事、医疗、纺织等领域。PCM 利用物相变化从环境中吸收或释放热量，从而达到能量存储和转化的目的。其低碳环保、绿色节能、可降解的优点符合工业和信息化部等单位发布的《关于加快推动制造业绿色化发展的指导意见》中有关“谋划布局氢能、储能、生物制造、碳捕集利用与封存等未来能源和未来制造产业发展”的要求。近年来，本团队致力于 PCM 的开发与应用，尤其是 PCM 与生物质材料的复合工艺，成功开发出具备相变温度适宜、不易变形、光热转化效率高等特点的相变储能木材，并探索其在家居调温和削峰填谷等方面的应用潜力。



1.PCM 概述

1.1 PCM 的简介与分类

热能储存包括显热储能、化学储能和相变储能，其中，相变储能具有更高的储能密度，并且具有更加安全、环保的优良品质^[1]。PCM 按储能形式分类通常可分为固-固型、固-液型、液-气型和固-气型等（图 1）。其中，液-气型和固-气型在相变过程中体积变化过大。固-固型的相变温度高且相变潜热低，且容易出现过冷现象，可应用的范围较窄^[2]。固-液型 PCM 具有较低的成本，且具有较大的相变潜热和较广的相变范围，同时其相变过程可逆并具有较高的热能转化率，在相变过程中温度相对恒定，是应用最为广泛的一类 PCM。

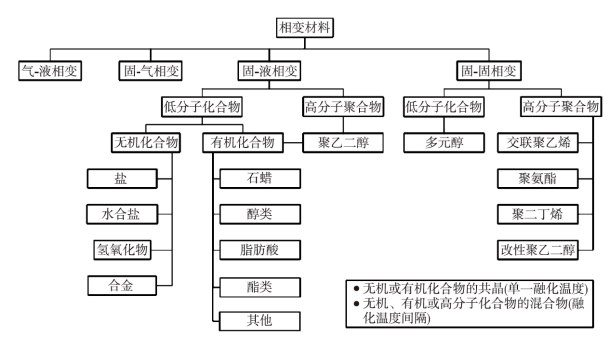


图 1 PCM 的分类

1.2 PCM 的改性方法

具有相变功能的材料一般很难直接实际应用，多数情况下需要将其封装、共混、或者改性之后才可以加以利用。常见的处理方法有：（1）机械方法，采用一种容器将 PCM 装入其中，制成一定规模形状的储热调温装置^[3]，这种方法多用于无机类 PCM；（2）物理方法，将 PCM 与主体材料相混合，以主体材料作为载体，如掺入某种纳米或微米级的 PCM 制备纺织纤维，或者将 PCM 与某种支撑材料共混，借助物理作用，使二者之间比较牢固地结合在一起，制备成定形 PCM 或者形状稳定的 PCM^[4]；（3）微胶囊方法，采用某些聚合物材

料作为壳材，将 PCM 作为芯材制备成微胶囊，避免 PCM 与外界环境直接接触；（4）化学方法，在保持材料相变储能特性前提下，通过化学方法将其改性，转变成新型化合物，使其满足应用要求^[5]。

1.3 应用领域

PCM 的应用领域广泛，尤其是随着绿色经济的发展，PCM 因其绿色调温功能逐渐受到人们的青睐。例如，在太阳能利用上，PCM 可以直接进行潜热集热，还可以将光伏板上多余的热量吸收转化为相变潜热，作为备用能源成为光热利用的一环。在燃料电池领域，PCM 可以优化电池热管理，将其集成到电池组中，辅以智能化调控系统，提高电池的寿命和性能。在建筑行业，PCM 在建筑工程中的应用可以有效改善建筑热环境。目前，PCM 已经被应用于屋顶隔热、墙体保温和玻璃暖房等领域。在冷链物流上，PCM 恒温的特点也有利于食品保鲜。在电力系统中，PCM 可应用于削峰填谷技术，在强电负荷需求较高时，材料以低谷电价时段吸收电网过剩的电，将其转化为潜热储存起来。此外，PCM 在调温服装、农业大棚、航空航天等领域也有着广阔的应用前景（图 2）。



图 2 PCM 的部分应用

1.4 PCM 的产业化及存在的问题

PCM 的市场规模在过去几年中持续增长，并有望在未来几年继续扩展。根据市场研究报告，预计相变储能市场在 2024 至 2028 年的年复合增长率为 15%，到 2028 年市场规模可能达到 50 亿美元。建

筑和建筑节能、冷链物流、可再生能源存储、汽车、电子设备热管理等领域是主要的应用市场。当前，北美地区和欧洲地区是 PCM 的主要消费市场。在亚太地区，随着中国、印度等国经济的快速增长，亚太地区已成为相变储能市场增长最快的地区。中国在建筑节能和冷链物流方面的需求正在不断增长。但是，目前仍有三个问题限制相变储能市场的发展，首先是 PCM 的生产成本较高，虽然在逐步下降，但仍可能限制一些小型企业和低收入国家的应用。然后是材料长期循环使用后的性能衰减仍然是技术难题之一，特别是在高温环境下的稳定性和热导率问题。最后，PCM 作为一种新型的储能材料，市场的认知度相对较低，需要进一步的市场教育和推广。

2. 相变储能木材的开发

全球经济合作与发展组织（OECD）预计，到 2030 年，全球将有大约 35% 的化学品和其他工业产品来自生物制造，生物质材料迎来历史性发展机遇。木材作为四大原材料（木材、钢铁、水泥、塑料）之一，与其它三种来自矿产、石油化工等的材料相比，是唯一可再生的生物质材料。生产同等质量的建筑材料，水泥所消耗的能源总量约是木材的 3 ~ 4 倍，而钢铁所消耗的能源总量约是木材的 50 ~ 60 倍^[6]。如果能将木材加工与相变调温技术相结合，则对减少化石材料的消耗，建设低碳环保型社会具有重要意义。本团队近年来的主要的研究重点如下：

2.1 相变储能木材的合成

（1）固 - 液型 PCM 的改性及其与木材的结合

从木材本身的性质考虑，木材组分主要的活性基团是羟基，易与羟基发生反应的基团主要有环氧基、异氰酸根、环酐、酰氯、醛基等。其中，环氧基和环酐基团因反应条件温和、所在分子多无毒性，被视为符合功能性单体基本条件要求的优选基团。基于这一思路，本团队合成了一种凝胶态的 PEG 基

相变储能材料 PGMA。然后利用高温高压浸渍法将 PGMA 浸渍到马来酸酐改性脱木素木材骨架内（图 3a）。PGMA 可以和木材发生酯化反应形成互穿网络结构，所制备的相变储能木材的相变温度在 23~29 °C 之间，属于人体舒适温度范围。熔融焓和凝固焓高达 119.30 J/g 和 118.5 J/g，相变储能木材在高温下没有出现明显的渗漏和变形现象。由该材料浸渍的木材所制备的房屋呈现出良好的调温功能（图 3b）。在白天，相变储能木材可以将太阳光和电器废热转化为内能储存。在夜晚，当环境温度低于 25 °C 后，白天储存的内能可以转化为热能释放^[7]，从而达到自主调温的目的（图 3c）。



图 3 (a) 相变储能木材 (b) 相变储能木屋与天然木屋调温效果对比 (c) 相变储能木材在室内的调温过程

（2）在提高相变储能木材导热效率方面

天然木材和 PCM 的导热系数较低，为了提高相变储能木材的导热效率，本团队利用纳米导热粒子对相变储能木材进行浸渍处理以提高光热转换效率。以炭黑（CB）为例，本申请人报道了一种由十八烷基异氰酸酯修饰的具有超疏水性的烷基化炭黑（aCB）的合成方法（图 4）。CB 与十八烷基异氰酸酯反应

2.2 相变储能木材的产业化方向

在木基储能材料领域，将相变储能技术与木材相结合是实现建筑节能的有效途径，既解决了树木在采伐加工成木材后，能量的转化和存储功能终止的问题，同时还能解决了目前能源消耗大、木质产品缺乏国际市场竞争力等问题。本课题将有助于实现木质材料的多样化和功能化，扩大其应用领域，增强科技木材的国际市场竞争力。此外，随着国家节能减排力度的不断加强、循环经济发展势头正劲，具有原料资源化、产品可塑化、环保可再生等优势の木基 PCM 产业顺应了可持续发展的大趋势，凸显出越来越大的发展潜力。

3. 结语与展望

本团队未来将在本研究的基础上进一步拓展相变储能木材的调温灵活性和人 - 物 - 环境之间的交互关系，提高相变储能木材应用于建筑建材、智能家居以及航空航天等领域的潜力。通过本研究可以看出天然生物质材料在改善人类生活上的优越性，对天然材料的开发利用将有利于解决当前的环境危机问题，希望本研究可以启发更多的研究人员为人与自然的和谐发展贡献智慧。

4. 作者介绍

/// 基本信息

李彦辰，清华大学水木学者，清华未来实验室博士后研究员。

/// 主要研究领域

生物质复合材料、高分子复合技术、低碳技术、绿色设计等，具有设计学和工学交叉背景。近年来，发表 SCI/EI 等核心论文 20 余篇，授权发明专利十余项。主持“中国博士后创新人才支持计划”、“北京市自然科学基金”、“林业工程优秀博士论文培育计划”等多项省部级以上课题。当前正在开展“低碳新材料合成及设计应用”研究方向，致力于生物质材料、可降解高分子材料、自然能、回收废料等的高净值开发利用，并使其可以应用于建筑建材、交通工具、智能穿戴、日用产品、生态修复等领域，相关成果获得北京市发明创新大赛优秀奖。

参考文献

- [1]. Yang Z, Deng Y, Li J. Preparation of porous carbonized woods impregnated with lauric acid as shape-stable composite phase change materials. *APPL THERM ENG*. 2019;150:967-976.
- [2]. Ma L, Wang Q, Li L. Delignified wood/capric acid-palmitic acid mixture stable-form phase change material for thermal storage. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 2019;194:215-221.
- [3]. Chang Z, Wang K, Wu X, et al. Review on the preparation and performance of paraffin-based phase change microcapsules for heat storage. *J ENERGY STORAGE*. 2022;46:103840.
- [4]. Ghahremannezhad A, Xu H, Salimpour MR, Wang P, Vafai K. Thermal Performance Analysis of Phase Change Materials (PCMs) Embedded in Gradient Porous Metal Foams. *APPL THERM ENG*. 2020;179:115731.
- [5]. Li Y, Li X, Liu D, et al. Fabrication and properties of polyethylene glycol- modified wood composite for energy storage and conversion. *BioRes*. 2018;11:7790-7802.
- [6]. 李坚 . 木材的生态学属性——木材是绿色环境人体健康的贡献者 [J]. *东北林业大学学报* , 2010, 38 (05): 1-8.
- [7]. Li Y, Wang B, Zhang W, et al. Processing wood into a phase change material with high solar-thermal conversion efficiency by introducing stable polyethylene glycol-based energy storage polymer. *Energy*. 2022; 254: 124206.
- [8]. Li Y, Zhang W, Zhao J, et al. A route of alkylated carbon black with hydrophobicity, high dispersibility and efficient thermal conductivity. *APPL SURF SCI*. 2021;538:147858.
- [9]. Li Y, Wang H, Zhang W, et al. A photo-to-thermal energy conversion and heat regulation wood supported by alkylated carbon black for thermal conductive filler. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 2023;251: 112165.

通用嗅觉计算 未来趋势展望

文 / 路奇

1. 什么是嗅觉计算？

1.1 通用嗅觉计算概念内涵与创新性

嗅觉计算（Olfactory Computing）是通过融合化学传感、数据科学与人工智能技术，构建能够模拟生物嗅觉功能的智能感知系统，实现从气味分子、数字化信息到智能应用的全链路转化。其核心在于突破传统化学分析方法的局限，通过软硬件协同设计，将复杂的气味分子混合体（Multi-Component Mixtures, MCM）转化为可量化的高维时空特征图谱，并基于此建立跨场景、跨硬件的通用计算模型。

/// 多模态感知融合：

不同于单一传感器对特定分子的响应，通用嗅觉计

算通过集成化学传感器阵列（如金属氧化物、导电聚合物）、微型谱学设备（如片上红外光谱仪、质谱芯片）以及生物传感单元（如固定化嗅觉受体蛋白），构建多维度数据采集系统。

/// 化学信息的数学建模：

气味感知源于分子与嗅觉受体的特异性结合，并形成高维动态信号。嗅觉计算通过引入图神经网络（GNN）和张量分解算法，将分子结构（如官能团、极性）、物理属性（如蒸汽压、扩散系数）与传感器响应特征关联，构建可解释的“分子 - 信号”映射模型。例如，在果蔬新鲜度检测中，通过分析标志性气体的浓度变化与传感器动态响应曲线，可建立果蔬腐败程度的预测模型。

/// 跨场景泛化能力：

通用性的核心挑战在于解决环境干扰（温湿度、背景气体）与硬件异质性（传感器漂移、批次差异）带来的数据偏差。团队提出域自适应迁移学习框架，通过嵌入环境参数（如温湿度传感器数据）与硬件指纹（如传感器基线电流），将不同场景下的嗅觉数据映射到统一特征空间。

1.2 研究意义

嗅觉计算的研究意义深远，其科学价值在于揭示生物嗅觉系统的编码机制。生物如何通过有限的嗅觉受体识别成千上万种气味分子，并形成精确的感知与记忆，这一过程至今未被完全破译。理解嗅觉的分子 - 神经编码规律，不仅能够推动神经科学的发展，还将为类脑计算与仿生感知提供理论基石。在技术层面，传统化学分析仪器如气相色谱 - 质谱联用仪虽精度高，但存在体积庞大、操作复杂、成本高昂等问题，难以满足实时监测与便携化需求。嗅觉计算通过微型化传感器阵列与智能算法的结合，有望突破这些瓶颈，实现低成本、高效率的气味感知。从产业视角看，嗅觉感知能力的机器化将重塑多个行业——从食品安全检测到环境污染预警，从医疗无创诊断到危险品快速识别，嗅觉计算技术能够填补现有感知手段的空白，成为物联网与人工智能时代的基础设施之一。

1.3 应用领域

在智能家居领域，嗅觉计算可实时监测室内空气质量，识别有害气体泄漏或火灾隐患，并结合智能控制系统自动启动新风或报警装置。医疗健康是另一重要方向，通过分析人体呼出气体中的挥发性有机物，嗅觉计算系统能够辅助肺癌、糖尿病等疾病的早期筛查，为个性化健康管理提供新工具。工业与农业场景中，嗅觉技术可用于化工生产过程中的泄漏监测、仓储环境的异常气味预警，以及果蔬采摘

后的品质分级与保鲜期预测。此外，虚拟现实与元宇宙的沉浸式体验也离不开嗅觉计算，通过动态气味渲染技术，用户可在数字世界中获得多感官融合的交互体验。

1.4 产业化方向

嗅觉计算的产业化需从硬件、数据与多模态融合三方面协同推进。硬件标准化是首要任务，开发低成本、高稳定性的传感器阵列，并制定统一的性能评价标准，才能实现大规模量产与跨平台兼容。数据服务是核心驱动力，构建覆盖广泛气味类别、标注完善的气味指纹数据库，将为算法训练与行业应用提供燃料。与此同时，多模态融合技术不可或缺，嗅觉数据需与视觉、听觉、触觉等信息联动，通过跨模态学习提升系统在复杂环境中的鲁棒性。例如，智能家居设备可同时分析室内气体成分与摄像头画面，区分烹饪油烟与真实火灾；农产品分拣线结合嗅觉与视觉数据，精准判断果蔬品质。这些方向的突破将推动嗅觉计算从实验室走向千家万户，成为未来智能社会的关键使能技术。

2. 通用嗅觉计算的核心研究方向

2.1 高一致性气敏传感器设计

高一致性气敏传感器的研发是嗅觉计算的基础，但现有技术普遍面临稳定性差、选择性低和环境干扰敏感等挑战。近年来，人工智能技术为材料设计与传感器优化提供了新思路。通过机器学习算法对金属氧化物半导体（MOS）、导电聚合物等材料的能带结构、表面活性位点进行高通量筛选，可加速高性能敏感材料的发现。例如，基于生成对抗网络（GAN）的虚拟材料生成技术，已能预测新型气敏材料的响应特性，大幅缩短实验验证周期。在仿生设计领域，AI驱动的生物受体蛋白模拟技术，可指导合成具有类嗅觉受体特性的仿生传感器，显著提

升对复杂混合气体的特异性识别能力。团队研发的“嗅豆”电子鼻平台，通过集成多模态传感单元（如MEMS红外光谱芯片与电化学传感器），结合动态环境补偿算法，在工业场景中实现了对排放、泄露气体的高精度感测，为硬件设计提供了跨学科融合范例。

2.2 仿生电子鼻系统设计

仿生电子鼻的核心在于模拟生物嗅觉系统的动态适应性与鲁棒性。通过借鉴生物嗅觉器官的组成、空间分布规律，构建高效能传感器阵列，设计气路结构，并结合自适应校准算法补偿硬件漂移。

2.3 嗅觉数据采集基础设施构建

大规模嗅觉数据库的建立是嗅觉计算落地的关键。当前研究正通过自动化采集平台与标准化协议，构建覆盖食品、化工、医疗等场景的气味指纹库。例如，通过标准化采样流程记录数千种样品在不同状态下的挥发性有机物（VOCs）特征，可为算法提供高质量训练数据。然而，气味数据的标注仍依赖专业感官评价与化学分析，成本较高。未来需进一步开发众包标注工具与半监督学习框架，降低数据构建门槛，推动开源社区协作。

2.4 嗅觉数据分析与算法研发

嗅觉数据的复杂性要求算法具备小样本学习、跨硬件迁移与动态环境适应能力。图神经网络（GNN）通过建模分子结构与传感器响应的关联，可揭示气味分子的官能团与传感器活性位点的相互作用规律，提升模型的可解释性。在跨硬件泛化方面，域自适应技术通过提取传感器信号的共性特征，使同一算法可适配不同厂商的电子鼻设备。

2.5 未来研究方向

嗅觉计算的未来将深度融入人工智能与神经科学的前沿领域。神经形态计算通过模拟生物嗅觉通路的脉冲编码机制，可开发超低功耗的类脑嗅觉芯片。其次，生成式AI技术（如扩散模型）可合成带环境噪声的虚拟数据，解决医疗、家居等领域的数据隐私与稀缺问题，为小样本学习提供新范式。另一方面，多模态融合技术通过整合视觉、触觉与嗅觉数据，将推动具身智能体的环境感知能力升级。在危险环境探测中，搭载多模态传感器的机器人可通过嗅觉-视觉联合建模，实时解析化工泄漏气体的扩散路径与浓度分布，为应急决策提供立体信息支持。这些方向的技术突破，将推动嗅觉计算从单一感知工具向智能决策系统演进，成为下一代人工智能的核心组件之一。

3. 结语与展望

嗅觉计算作为人工智能与材料化学、电子信息深度交叉的前沿领域，正经历从生物机理解析到工程化落地的范式跃迁。随着生成式AI、神经拟态计算等技术的突破，嗅觉感知的“高保真数字化”与“全息感知重构”将成为可能——通过构建分子结构-气味感知-语义描述的多级映射模型，人类有望解锁气味的“原子级编码密码”，并将其无缝融入数字孪生、元宇宙等下一代人机交互体系。

面向未来，嗅觉计算将不再局限于环境监测或工业检测等传统场景，而是深度嵌入具身交互（如家居护理、服务）、中医诊断（使得“闻诊”得到AI技术加持）、智慧农业（如作物病害状态嗅觉预警）乃至深空探测（如地外环境嗅觉识别）等战略领域，成为人类拓展感知维度的核心引擎。这一进程不仅依赖跨学科协同创新，更需构建全球化的开源气味数据库与算法评测标准，以伦理规范与技术普惠为基石，最终实现“气味互联”的终极愿景——让机器理解嗅觉，让人工智能拥有“呼吸”的能力。

4. 徐迎庆、路奇、杨佳伟及团队研究背景

徐迎庆，清华大学长聘教授，未来实验室主任，教育部长江学者特聘教授，兼任清华大学终身学习实验室主任。在计算机图形学、气味检测与嗅觉计算、智能硬件设计等学科交叉与融合创新领域开展深入工作。作为负责人主持或参与国家重点基础研究发展计划（973 计划）、国家重点研发计划、国家自然科学基金项目等 50 余项科研课题，包括国家 973 计划“雕塑、壁画类文化遗产的虚拟修复”、国家重点研发计划“大幅面高分辨触控设备”、国家自然科学基金项目“自然人机交互基础理论和方法研究”等。在国际会议和学术期刊上发表 100 多篇学术论文，申请 100 多项国内外专利，其中有多项研究成果被应用于实际产品中。获中国发明协会年度发明创业奖创新奖一等奖、中国计算机图形学大会杰出奖、北京工业设计促进专项杰出设计人才、ICACHI 领军奖等。曾获得清华大学先进工作者、清华教书育人先进个人等称号。

路奇，清华大学未来实验室助理研究员，研究方向为嗅觉感知计算、多模态人机交互。本、硕、博毕业于清华大学，北京市优秀博士毕业生，具有电子工程与设计双学科背景。作为课题 / 子课题负责人、核心骨干参与多项国家重点研发计划、国家自然科学基金项目、人因工程全国重点实验室基金、等纵向课题和多项校企合作项目。研究成果在 CCF A 类期刊、人机交互领域顶级会议（CHI、UIST、DIS、TEI、IEEE VR 等）发表，一作或通讯作者论文 14 篇，申请发明专利 12 项，其中 7 项已授权。荣获最佳论文提名奖 1 次，各类竞赛奖项 3 项。

杨佳伟，清华大学未来实验室助理研究员，清华大学化学系博士。自加入清华大学未来实验室以来，基于对多相催化的认识，独立开发了一系列具备可稳定量产的半导体基气敏材料，其气敏性能与国内外商品化气体传感器性能相比，具有明显优势

（如 VOCs 类传感器，同等测试条件下，自研传感器对甲苯的灵敏度是瑞士某品牌传感器灵敏度的三十余倍，且具备良好的选择性）。基于质量敏感型谐振式微悬臂梁系统，开发了全氟有机化合物修饰的介孔功能材料，使其可以检测气相中 TNT 的存在，灵敏度高于 5 ppb，且具备一定的抗干扰能力。形成了以批量化控制合成功能材料（无机、有机）为主轴，结合原位 / 非原位表征技术（如：大科学装置、TEM、红外、拉曼等）为特色的研究模式，探索了先进传感材料、催化材料和高效快速检测方法。以第一作者 / 共同第一作者，通讯作者身份在相关领域发表多篇论文，获得授权专利多项，相关工作入选上海光源建成论文集，用户最佳墙报奖等。

未来实验室嗅觉计算组，目前已建立较为完整的人工嗅觉及气味识别算法研究相关基础设施，配备独立实验室 2 个，研发总投入超过 2000 万元。团队目前有教授 / 首席研究员 1 人、助理研究员 2 人、博士后 2 人、科研助理 4 人、博士生 4 人；团队具有计算机、材料、电子、化学、创新设计工程等多学科交叉学术背景。在以下领域中积累了丰富研究经验：电子鼻与气体传感器研制、嗅觉多模态数据分析与大模型嵌入、嗅觉人机交互、建筑防火材料检测、智能家居嗅觉感知、易燃易爆物检测等。

科研 · 合作 · 交流

Research ·

Cooperation · Communication

展示和分享未来实验室最新的科研成果、合作项目和学术交流活动，促进知识的传播与合作的深化。介绍我们最新的研究进展、创新发现和学术论文，分享国内外科研机构、企业和高校之间的合作，通过学术会议、论坛和研讨会交流学术思想，激发创新灵感。

2025 年 3 月

清华大学未来实验室及其合作伙伴共有 21 篇科研成果被国际顶级学术会议 ACM CHI 2025 录用。



ACM CHI (ACM Conference on Human Factors in Computing Systems) 是人机交互领域最具影响力的国际会议，本次大会共收到来自全球顶尖研究机构和高校的投稿 5014 篇，其中共接收了 1249 篇论文，论文投稿类别的总体录取率为 24.9%。此次被录用的 21 篇论文涵盖了清华大学未来实验室及其合作伙伴在虚拟现实 (VR)、增强现实 (AR)、用户体验设计、交互技术等多个前沿方向的部分研究成果。

2025 年 5 月 22 日

清华大学未来实验室气味检测与嗅觉计算研究团队在电子鼻技术研究中取得突破性进展。



2025 年 6 月 1 日

清华大学未来实验室、清华大学终身学习实验室主办，乐高集团、乐高教育支持的“国际玩乐日·家庭一起玩”亲子活动，45 个家庭的 53 个孩子欢聚一堂，共同庆祝国际玩乐日。清华大学校务委员会副主任杨斌教授出席开幕式并致辞。



相关成果以《An electronic nose device with rapid and universal odor detection capability》为题，发表于传感器领域国际权威期刊《Sensors and Actuators B: Chemical》。

2025 年 6 月 28 日

清华大学未来实验室、清华大学终身学习实验室主办的“面向科学教育与可持续发展的创新学习体验设计”研讨会和实践工作坊在双清综合楼 21 层清华大学未来实验室报告厅举行。

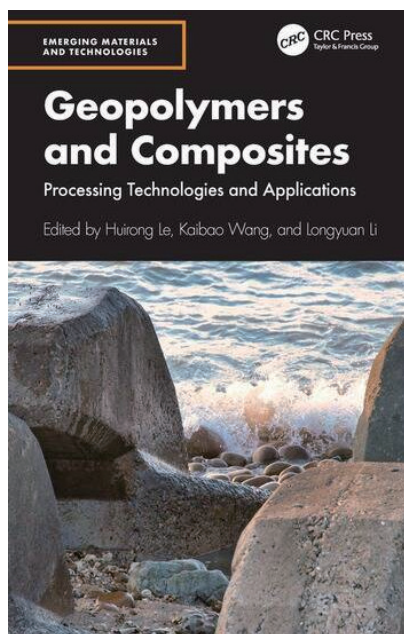
上午的研讨会邀请到教育部课程教材研究所原副所长莫景祺研究员、乐高教育全球教育影响力负责人 Bo Stjerne Thomsen 博士、北京师范大学教育技术学院董艳教授、清华大学心理与认知科学系副系主任、清华大学终身学习实验室研究主管伍珍副教授等嘉宾，围绕科学教育、跨学科课程设计、学习体验创新等核心议题发表演讲，带来来自政策研究、国际趋势、教育心理与教学实践的多元视角。



2025 年 6 月 30 日

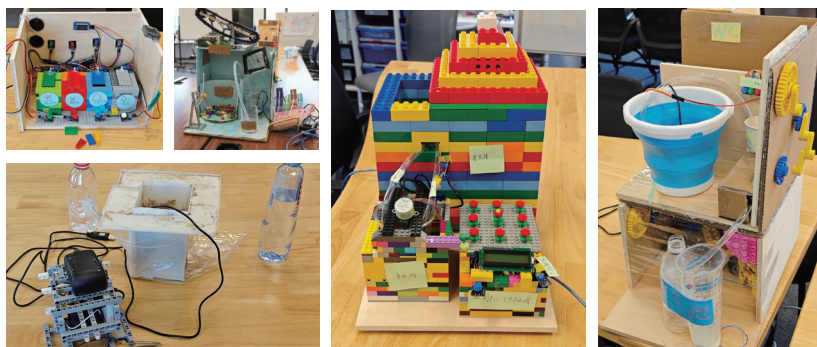
清华大学未来实验室未来材料设计研究中心在固废、废酸处理领域取得突破性进展，相关成果以

‘Geopolymers and Composites: Processing Technologies and Applications’ 为书名，由 CRC Press 出版。



2025 年 7 月 7 日

“低碳行动 创造未来”创新学习体验活动启动仪式在清华大学未来实验室（双清综合楼 A 座 21 层）举行，欧美同学基金会秘书长梁文美女士、欧美同学基金会综合部副主任张梦琪女士等出席。清华大学未来实验室国际合作办公室主任、清华大学终身学习实验室负责人张亦萌老师致欢迎词，并作活动介绍。



2025 年 8 月 17 日

全球首个以人形机器人为参赛主体的综合性体育盛会 - 2025 世界人形机器人运动会闭幕，在 5V5 足球赛赛场，清华大学未来实验室博士后龚佳乐带队的普瓦智能队，凭借高灵敏感知能力和时空触觉差分解析算法，展现了出色的临场应变和高效的响应能力，结合赛事经验优势和体育专业战术优势，以 6:0 的比分战胜对手猎豹队，跻身 5V5 足球赛的全球八强。



2025 年 10 月 27 日

清华大学未来实验室、燃烧能源中心、车辆与运载学院、材料学院，上海科技大学，美国斯坦福大学、伯克利国家实验室先进光源和德国马普所等跨学科团队，在稀土氧化物催化材料的电子结构调控与表面反应动力学研究中取得进展。



Tuning the f Band for Enhanced Surface Redox in Strained Rare Earth Oxides

Hongyang Su,[#] Jing Chai,[#] Zixuan Guan, Hendrik Bluhm, Ziyun Zhang, Yidan Cao, Zhi Liu,^{*} Yuan-Hua Lin,^{*} William C. Chueh,^{*} Liang Zhang,^{*} and Di Chen^{*}

Cite This: <https://doi.org/10.1021/jacs.5c08872>

Read Online

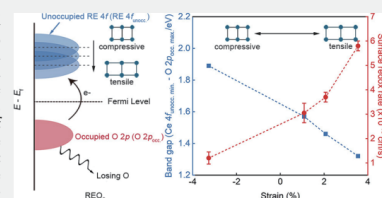
ACCESS |

Metrics & More

Article Recommendations

Supporting Information

ABSTRACT: Reducible rare earth oxides (REO_{2-x}) are essential in catalysis due to their 4f band-governed surface redox properties, which influence crucial reactions such as hydrogen dissociation and water formation. However, correlating the 4f band structure with catalytic activity has been a long-standing challenge due to the complexities of manipulating and characterizing 4f electrons. Here, we demonstrate that tensile strain effectively modulates the 4f electronic structure, narrowing the band gap and activating surface oxygen, leading to enhanced redox activity. Using atomically flat ceria ultrathin films under up to a 7% biaxial strain range, we observed a five-fold increase in surface reaction kinetics via time-resolved ambient-pressure X-ray photoelectron spectroscopy. Complementary density functional theory calculations reveal that the tensile strain reduces energy barriers for key catalytic steps by narrowing the 4f–2p band gap. These findings highlight the RE 4f electronic structure as a critical descriptor for catalysis and demonstrate the utility of atomically flat model systems.



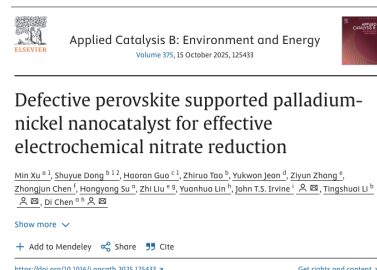
研究成果以《Tuning f band for Enhanced Surface Redox in Strained Rare Earth Oxides》为题，发表于化学领域 TOP 期刊《Journal of the American Chemical Society》。

2025 年 9 月 4 日

我单位助理研究员夏乾臣申请的《月面人机联合探测多模态反馈式增强交互方法研究》项目、博士后徐民申请的《钙钛矿阳极负载高熵合金的溶出机制及其氨电氧化性能研究》项目入选国家自然科学基金青年基金项目。

2025 年 10 月 20 日

清华大学未来实验室陈迪团队 - 电化学材料设计课题组的研究成果，近日发表于催化和环境领域的 TOP 期刊《Applied Catalysis B: Environmental and Energy》(IF=21.1, 中科院/JCR 一区 TOP 刊)。



2025 年 11 月 4 日

中国石油集团工程股份有限公司副总经理、工程技术研究院总院长孙柏铭和中石油集团下属企业共 16 位领导到访清华大学未来实验室进行会议交流及参观。未来实验室首席研究员乐恢榕教授主持并与各中心研究人员共同参与了此次会议。



2025 年 11 月 7 日

在第八届中国国际进口博览会上，清华大学终身学习实验室（依托于清华大学未来实验室）与北京一零一中教育集团及乐高®教育签署三方合作备忘录。此次合作标志着三方将建立长期、紧密的战略合作机制，共同打造富有前瞻性与启发性的教育生态系统，进一步支持中国学生面向未来的核心素养发展。



2025 年 12 月 15 日

12 月 15 日是清华大学未来实验室成立八周年纪念日，实验室的全体师生及校友们，在双清综合楼 21 层举办了周年庆典，共同庆祝这个具有意义的日子。



2025 年 12 月 31 日

清华大学未来实验室 2023 级博士生张铮同学获评“2025 年清华大学学生年度人物”，并于 2026 年清华大学新年联欢晚会颁奖仪式中接受现场表彰。



2026 年 1 月 12-14 日、22 日

清华大学未来实验室空间与媒体组围绕“AI 时代民艺非遗活态展示”这一主题，组织开展了集中研讨、创作实践与提交验收，并在后期持续推进方案深化与完善。



2026 年 1 月 31 日

由欧美同学基金会、清华大学未来实验室、清华大学终身学习实验室联合主办，由北京市援藏指挥部和西藏拉萨市教育局支持的“低碳行动 创造未来”创新学习体验活动在京正式拉开帷幕。



欧美同学基金会“拔尖创新人才项目”与“京藏融合公益项目”的学生代表，共同踏上一场融汇科技创新、生态理念与文化交融的深度学习之旅，通过京藏青少年结对学习、协同实践，生动诠释民族团结进步与区域协同发展的时代内涵。

2026 年 3 月 9 日

以“乐龄生活 + 学术工作坊”为主题的智慧养老新模式会议在香港科技大学（广州）举行。本次工作坊由广东省老龄产业协会，启新颐年智能科技（深圳）有限公司和清华大学未来实验室老龄用户体验及服务系统设计研究中心联合主办，由“跨界思辨”、“科技赋能”与“康养共建”三大版块组成，汇集了来自清华大学、香港科技大学、广州美术学院、南京艺术学院等高校的研究者，就科技与设计介入老年生活的路径进行了多维探讨。



2026 年 3 月 27 日

清华大学未来实验室 2026 年第 1 期未来 · 校友分享讲座在双清综合楼举行。

本期活动邀请到了清华大学未来实验室校友、香港理工大学设计学院助理教授卢秋宇，带来题为“过程生发智能：材料、结构、能量与时间中的智能生成（When Processes Become Intelligent: Process Intelligence in Materials, Structures, Energy, and Time）”的深度分享。



2026 年 3 月 20 日

清华大学未来实验室 2026 年第 1 期未来 · 学术 | 交叉学科大讲堂在双清综合楼举行。本期活动荣幸邀请到了新加坡国立大学健康创新与技术研究所林水德教授带来题为“AI 驱动的医疗健康元宇宙技术 (AI-Enabled Metaverse Technologies for Healthcare)”的深度分享。



2026 年 4 月 13 日

ACM CHI 2026 将于 2026 年 4 月 13 日在西班牙巴塞罗那召开，清华大学未来实验室及其合作伙伴共有 26 项研究成果将在会议上发表，包含 14 篇长文、12 篇短文，其中 1 篇获得 Best Paper Award。此次发表的论文聚焦智能人机交互，涵盖触觉与物理交互、虚拟与混合现实、生成式 AI 与用户体验、情境感知与系统设计等前沿方向。



2026 年 4 月 19 日

清华大学终身学习实验室（TULLL）十周年庆祝活动在清华大学未来实验室顺利举行。

本次活动以“智能时代的人才培养：跨学科、玩中学、创未来”为主题，以一场简短而深入的学术交流，回望十年耕耘、致谢一路相伴，共话未来教育创新之路。来自驻华使馆、国际组织、海外相关机构及国内高校、中小学、教育单位与行业企业的 60 余名与会者齐聚一堂，共同见证这一重要里程碑。活动由清华大学终身学习实验室负责人张亦萌主持。



2026 年 4 月 22 日

清华大学未来实验室 2026 年第 2 期未来·学术 | 交叉学科大讲堂在双清综合楼举行。本期活动荣幸邀请到了华威大学教授深度分享聚焦可持续聚合物与智能复合材料讲座。

校友风采 Alumni Profiles

展示实验室校友们在各自领域中的卓越表现与独特经历，记录他们从校园走向社会的成长历程，分享他们在事业、学术和生活中的点滴感悟与经验。在创业、科研、文化传播等社会工作中，校友们在不同的舞台上展现着他们的风采。

本期校友——李彦辰 在设计与材料的交界处重构可能

文 / 李彦辰



北京交通大学 讲师
清华大学未来实验室博士后

低碳材料合成与设计

绿色储能技术

可持续设计

李彦辰博士，于2022年10月加入清华大学未来实验室从事博士后研究工作，2025年10月博士后出站后入职北京交通大学建筑与艺术学院从事教学与研究工作，担任艺术与科学专业讲师。李彦辰博士拥有设计学与工学交叉研究背景，近年来以第一作者身份发表高水平期刊二十余篇，授权多项发明专利，多次在国内外学术会议上发言。

研究方向 - 主要研究领域

近年来，重点围绕设计学与工学的交叉融合开展相关研究工作，主要聚焦的研究领域如下：

（1）低碳新材料合成及设计应用

利用木材、竹材、农林废料等合成可持续功能材料，并探索其在建筑建材、家具、陈设等方面的设计应用。

（2）空间与智慧场景

基于未来的‘好房子’要求，开发具有热响应、气味响应、光响应、辐射制冷等功能的建筑新材料，提升空间装饰材料的智能化水平，实现艺术性和功能性的统一。

（3）智慧出行设计

面向新能源汽车、高铁等未来交通场景，研究与之匹配的空间形态、服务设施及材料界面。探索AI、人机物融合技术在智慧出行方向的综合利用。

2018年，我跨专业考取了工学博士，开始从事绿色材料研发相关工作，在此之前我曾学习了多年的设计学（环境设计方向），在从事设计实践的过程中，我经常遇到一些材料选择的问题，例如，在一些智能家居空间里，空间效果的体现非常依赖材料的赋能，但有时候会遇到市面产品无法表达设计思想的问题。此外，在设计调研过程中，也经常遇到一些农林废弃物、食物残渣或者固体废料的处理问题，我常常思考，如果可以通过技术手段将这些材料变成集审美性与功能性相结合的科技产品，再利用设计手段探索其在家具、陈设、空间中的应用，则将提升设计更新的效率，更加积极的推进绿色设计发展。

在清华大学未来实验室的博士后时光，是我学术生涯中至关重要的转折点。这里没有传统学科的严格界限，有的是对“未来”这一概念的开放性探索。进站的时候，我的导师徐迎庆教授给了我很大的学术信心，鼓励我大胆探索，发挥自身的跨学科特点寻求突破。设计学教会我以人为中心的思维方式，关注需求、体验与意义；而材料科学则赋予我理解物质本质的能力，掌握从微观结构到宏观性能的转化规律。当这两种能力在我身上交汇时，我发现了一个崭新的创造空间：以材料为媒介的设计创新，和以设计为导向的材料研发。

我首先将研究兴趣聚焦到智能调温领域。当前，我国正在推进“双碳”政策，发展绿色能源已成为工业界的重要课题。在热能调控领域，人类正致力于逐步淘汰化石燃料，以实现能源的可持续利用。相变储能材料（Phase change material, PCM）是新一代绿色节能材料，利用物相变化从环境中吸收或释放热量，从而达到能量存储和转化的目的。在这项研究中，我们将PCM与木材这一环保材料结合（图1a），使木材实现了相变调温功能，并可以加工成为地板、墙板、家具等用于室内智慧调温（图

1b）。相比于传统保温材料，相变储能木材不再仅仅依赖比热容进行显热储热，而是拥有了能量“吞吐”的强大能力。以相变温度点设定在22-26℃（人体舒适温度区间）的相变储能木材为例：白天吸热周期：当室内温度因太阳辐射、人体或设备散热而升至相变点以上时，材料开始熔化，高效吸收环境中的过剩热量，如同一个“热海绵”，有效抑制室温飙升。夜间放热周期：当夜晚或阴雨天室温下降至相变点以下时，材料凝固结晶，将储存的潜热平稳地释放到室内空间，补偿热损失（图1c）。该项目获得了中国博士后创新人才支持计划、北京市自然科学基金和清华大学珠三角研究院设计创新专项资助。

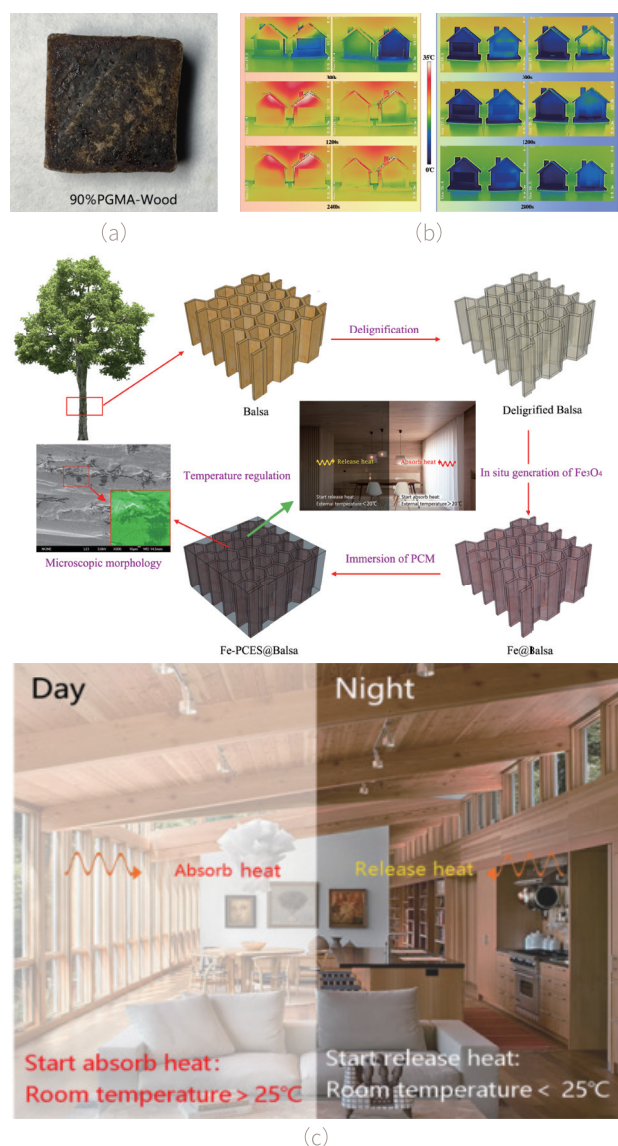


图1 (a) 相变储能木材; (b) 相变储能木屋与天然木屋调温效果对比; (c) 相变储能木材在室内的调温过程

在研究智能调温之余，我们团队也开始关注食品或者农林废料的再利用问题。其中一个关注点便是废弃咖啡渣的处理。咖啡是世界上最有价值、贸易和消费最广泛的饮料之一。当前，全世界每天消费 30 亿杯咖啡，只有大约 30% 的咖啡豆质量可以被喝掉，但会产生 1114 万吨废咖啡渣，不当的咖啡废料处理方式可能引起致突变性，从而对环境和生态系统带来不利影响。但天然咖啡渣具有良好的抗菌性能，基于这一特性，我们利用化学改性手段进一步强化了咖啡渣的抗菌和吸附功能，开发出咖啡渣基抗菌薄膜与咖啡渣基抗菌丝线两类终端产品形态（图 2）。这不仅将咖啡渣从环境负担转化为高价值原材料，更创造出一种兼具“绿色、安全、高效抗菌”三重优势的全新材料平台。



图 2 本团队开发的咖啡渣基抗菌薄膜和纺丝

我们在做咖啡渣实验的过程中，发现咖啡渣在进行脱木素处理并放大数千倍后，其微观肌理呈现出独特的构成美感，通过 AI 对肌理曲线进行参数化处理并建模后，利用 3D 打印方法将微观形貌进行宏观呈现，旨在表达一种“小中见大”的美学思想（图 3a）。基于天然材料的设计升级思路，我们继续在此基础上探索了食物残渣、果渣、木质素等天然材料的改性及设计应用（图 3b），这种绿色材质所呈现的天然美感带给人一种健康的生活体验，将可持续

材料进行功能化升级并探索其在家具、陈设、建筑、景观中的应用也将是我未来的一个重点研究方向。



图 3 (a) 咖啡渣肌理 3D 打印陈设；(b) 生物质材料研发及设计应用

综上，本人前期的研究核心在于构建并实践一种“设计 - 材料”一体化的创新范式。整个研究工作围绕理论框架构建、材料技术创新与设计应用实践三个层面逐层展开。未来，本人将以“物质创新驱动设计变革”为核心理念，聚焦材料特性与设计语言的深度交互，构建“性

能探索—功能转化—美学表达”三位一体的知识框架。

谈及感悟，人生最大的挑战还是在于不断走出舒适圈，回顾自己过去的学术旅程，每一步跃迁都是在于探索新的未知领域，并逐步将新的知识与旧的知识在碰撞中融合发展。在这个过程中犹豫过、迷茫过、失败过、消极过，但从未想过放弃，人只有不忘初心，才能方得始终。现在，我也成为了北京交通大学的一名青年教师，这又是一个新的起点，也将面对新的挑战，身上也多了一份传道授业的责任。我也将铭记徐老师的教诲，踏踏实实做好未来的教育工作，未来实验室“天马行空想问题，脚踏实地做事情”的创新氛围和攻关精神永远是我前路的航标。最后，感谢实验室的老师 and 同学们的陪伴，与诸君同行，无上光荣。





从 0 到 1 寻突破，1 到 100 求完美

先完成、再完美

Done Is Better Than Perfect

天马行空想问题 脚踏实地做事情

追求的不是“结果的平等”

而是“机会的平等”



声明

本册只用于学术交流及宣传使用，而非商业用途。

研究课题及相关内容所版权归清华大学未来实验室所有，最终解释权归清华大学未来实验室所有。



清华大学未来实验室
The Future Laboratory, Tsinghua University



公众号



官网

邮箱 :futurelab@mail.tsinghua.edu.cn
电话 :+86 10-62785127
地址 :北京市海淀区双清综合楼 A 座