

甘肃省凹凸棒石产业技术创新战略联盟

Strategy Alliance of Attapulgite Industrial Technology Innovation of Gansu Province

联盟专刊

总 20 期

2025年 第1期



甘肃省凹凸棒石产业技术创新战略联盟 主办

■ 联盟动态 ■ 行业动态 ■ 研究进展 ■ 学术交流 ■ 政策法规 ■ 媒体聚焦 ■ 科普天地 ■ 通知公告



01 联盟动态

- 淮安市委书记史志军调研凹凸棒石产业转型升级.....1
- 盱眙县召开凹凸棒石产业转型升级座谈会.....2
- 兰州化物所与甘肃能化集团、航天环保产业基金召开交流座谈会.....4
- 联盟理事单位受邀参加矿物学学科发展战略研讨会.....5
- 王爱勤研究员一行考察临泽凹凸棒石相关企业.....6
- 国家标准《凹凸棒石相含量的测定 X 射线衍射-标准曲线法》批准发布.....7

02 行业动态

- 【洞察】凹凸棒石应用范围广泛 下游市场需求持续增加....8
- 探秘内蒙古杭锦旗：“火星地貌”走红背后的凹凸棒石传奇..9
- 皖北煤电集团明光凹凸棒基新材料项目成功.....10
- 杭锦凹凸棒石黏土博士工作站揭牌成立.....11

03 研究进展

- 玛雅蓝的启示：植物遇上矿物，开启绿色功能材料新未来..12
- 凹凸棒石的结构特征和应用性能对动物营养研究的意义..30
- 双螺杆辅助机械力化学绿色制备低成本铋黄杂化颜料....33
- 光催化 CO₂ 还原及生物质转化的高熵尖晶石/凹凸棒石纳米复合材料的构建.....35
- 用于甲苯高效催化燃烧的凹凸棒石负载钨铈催化剂的设计与制备.....36
- 绿色多孔凹凸棒石容器增强智能涂层的腐蚀防护性能...37

- 基于凹凸棒石-Ce-MOF 杂化颜料的疏水自修复防腐涂层.38
- 双螺杆挤出法制备混维凹凸棒石黏土基钴蓝颜料.....39
- 屏蔽紫外线的 CeO₂/凹凸棒石/木质素复合材料的构建.....42

04 政策法规

- 八大新兴产业之一：中国新材料主要产业、发展现状、政策环境、挑战与对策、经验启示及未来趋势.....44

05 学术交流

- 凹凸棒石生物医用材料交流研讨会.....52
- 全国非金属矿产品及制品标准化技术委员会召开年会暨标准审议研讨会.....53

06 媒体聚焦

- 临泽：“石”力破局 “质”造升级.....57
- 临泽：谱写凹凸棒石产业融合新篇章.....59
- 硅酸盐矿物复合固态电解质：新能源领域高值化应用的重要方向—专访中国科学院兰州化物所副研究员杨燕飞.....60
- 新创客 | 臧焱：以工匠之心激活产业新动能.....62

07 通知公告

- 第五届全国矿物材料学术与技术交流会暨第二十三届全国非金属矿加工利用技术交流会第一轮通知.....67
- 关于申报 2025 年度“非金属矿科学技术奖”的通知.....69
- 第十八届中国非金属矿科技与市场交流大会暨展览会.....70

01

联盟动态
Alliance Dynamics

▶▶ 淮安市委书记史志军调研凹凸棒石产业转型升级

○来源：淮安发布



3月25日，市委书记史志军到盱眙县调研中央生态环保督察反馈问题整改暨凹凸棒石产业转型升级工作。他强调，要深入学习贯彻习近平生态文明思想，坚定决心、动真碰硬、聚力攻坚，持续深入抓好中央生态环境保护督察反馈问题整改，全面提升我市生态环境保护水平，加快推进凹凸棒石产业转型升级，推动科技创新和产业创新深度融合，以新质生产力赋能凹凸棒石产业高质量发展。

江苏神力特生物科技股份有限公司是专门从事凹凸棒石产品研发、生产和

销售的国家级高新技术企业。史志军走进企业，深入了解企业产能、生产加工工艺、原料储存等情况。他强调，要提高政治站位，以案为鉴、举一反三，认真做好中央生态环保督察反馈问题整改工作，确保各类问题切实整改到位。要提档升级前道加工环节，加快改进落实机械化烘干流程，以科技型企业为依托，通过新型制造工艺应用提升产业附加值，推动凹凸棒石产业绿色低碳可持续发展。

在凹凸棒石应用技术研发与成果转化中心、盱眙县鸿源吸附材料有限公司，

史志军详细了解平台建设、技术研发、成果转化、产品门类等情况。史志军指出，凹凸棒石是盱眙的宝贵矿产资源，要强化科技引领带动，聚焦新材料应用和加工技术这两个突破点，加强源头原料管理，搭建好研发公共平台，深化科技创新和本土资本对接，推动科技创新和产业创新深度融合，让稀缺的凹凸棒石资源发挥出最大价值，切实把资源优势转化为产业优势。

调研中，史志军强调，各地各部门要把中央生态环保督察反馈问题整改作

为贯彻习近平生态文明思想的实际行动，进一步强化使命感、责任感、紧迫感，以整改为契机，举一反三、以点带面，深入排查行业性、系统性问题和群众反映强烈的突出问题，推动生态环境质量持续改善，更为精准有效地解决好“环境治理系统性够不够”的问题，以最严纪律形成整改工作闭环，确保问题清零见底、整改经得起检验，不断提升群众的获得感和满意度。

市委常委、市委秘书长徐子佳参加调研。

盱眙县召开凹凸棒石产业转型升级座谈会

○来源：盱眙发布

3月3日，盱眙县召开凹凸棒石产业转型升级座谈会，进一步统一思想、凝聚共识，汇聚政产学研用各方力量，助推凹凸棒石产业高质量发展。县委书记孙志标出席会议并讲话。他强调，要把科技创新摆在核心位置，立足市场需求，

不断提升创新能力和核心竞争力，积极开辟市场新赛道，加快产业转型升级。县领导卓剑、张远涵、陈孝明、张春林，以及相关科研院所在盱负责人、部分企业家代表出席会议。

孙志标强调

要深化思想认识，增强转型升级的紧迫感。推进产业转型升级，既是县委县政府职责所在，也是企业未来所系，关键在以科技创新提高产品附加值、激发产业内生动力，因此离不开各位专家教授的参与支持。特别是当前，在国家鼎力支持企业开展科技创新的背景下，这项工作面临机遇、也至关重要。作为山水绿城、江淮生态经济区的核心地带，

盱眙拥有得天独厚的生态禀赋和自然资源，凹凸棒石储量丰富，被誉为“千用之土、万土之王”。要从思想上真正重视起来，坚持生态优先、绿色发展，以典型案例整改为契机，加快产业转型升级，让“黄金资源”真正释放“黄金效益”。

要坚持系统思维，打好转型升级的组合拳。抓好招商选资，在积极招引链主型龙头项目的同时，也要注重小而精、



小而美的科技型好项目，促进凹凸棒土产业建链强链、延链补链。要加快制定出台凹凸棒石科技园准入标准，鼓励引导园区新上凹凸棒石企业逐步向改性功能材料、生物医药、生态环境修复领域发展。加强服务引导，聚焦凹凸棒石企业转型升级中遇到的用地、用工、金融等各类要素保障问题，更加主动上门送政策、解难题。要按照“三个一批”思路，进一步细化完善“一企一策”方案。强化基础设施保障，加快推进凹凸棒石产业科技孵化园等平台载体建设。促进常态长效，尽早出台促进凹凸棒石产业发展的政策意见，通过加强源头管理、创新科技加持、加大人才引进、嫁接产业基金、完善产业配套等措施，力争逐步实现由初加工向高附加值领域转变延伸。进一步加强校地合作，依托现有科技力量，坚持需求导向，立足市场应用，搭

建沟通平台，促进政产学研紧密结合，推动更多科技成果在盱眙转化落地。要持续改善环境，坚持把“生态环境质量只能更好、不能变坏”作为硬要求。统筹抓好河湖生态治理修复、废弃宕口整治等工作，切实把盱眙好山好水的生态优势转化为发展胜势。

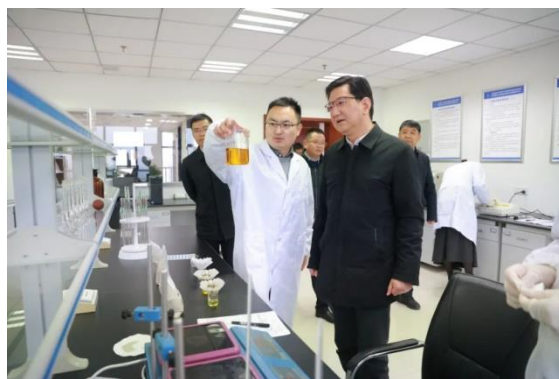
突出齐抓共管，凝聚转型升级的合力。扛牢责任担当，县领导要带头深入分管条线、挂钩镇街督促指导、调度推进。相关镇街部门要坚持“严快紧实”工作标准，主动认领任务，相互支持配合。要认真梳理企业家和专家提出的想法意见，及时吸收反映到今后的工作中去。深化改革创新，变被动为主动，解放思想、大胆创新，认真学习借鉴外地的经验做法，结合盱眙实际加以运用。鼓励引导企业加强科技创新、加大研发投入，加快技术改造和设备更新。守牢



底线红线，生态环境局、资规局等部门要做好执法监管，及时帮助企业发现问题、消除隐患。

会上，与会专家、企业家代表围绕创新合作、成果转化、企业转型升级建言献策，为盱眙凹凸棒石产业转型升级提供新思路、新路径。与会县领导围绕加快推动凹凸棒石产业转型升级提出意见建议。工信局汇报全县面上“三个一批”整改情况。凹管办汇报凹凸棒石产业转型升级工作情况。

会前，孙志标一行来到鸿源吸附材



料和凹凸棒石研发中心，详细了解产业发展、科技创新、成果转化等情况。他强调，要坚定发展信心，坚持与时俱进，加大科技研发，不断提高产品附加值，持续提升核心竞争力。要加强与企业深度嫁接，不断优化产业结构，积极延伸产业链条，努力把凹凸棒石这一特色产业做大做强。要致力政产学研用有机融合，着力打通科技成果转化现实生产力的路径，推动凹凸棒石应用向高端发展、凹凸棒石产业提质增效。

兰州化物所与甘肃能化集团、航天环保产业基金召开交流座谈会

2025年2月18日，中国科学院兰州化学物理研究所分别与甘肃能源化工投资集团有限公司、湖南航天环保产业基金管理有限公司召开“煤气化渣资源化利用”交流座谈会。甘肃能化集团党委副书记、总经理袁崇亮，湖南航天环保产业基金管理有限公司副总经理梁峰、甘肃省黏土矿物重点实验室主任王爱勤研究员、科技合作处及重点实验室相关

来源：甘肃省黏土矿物重点实验室

人员参加了会议。

科技合作处张新瑞处长对双方企业代表团一行到访表示欢迎，介绍了研究所的研究方向、科技成果转化、所地合作情况及其成果转化体制机制。牟斌研究员以“矿物材料视角煤气化渣资源化综合利用研究”为题，介绍了团队从矿物材料视角实现煤气化渣全组分资源化利用取得的阶段性研究成果。

甘肃能化集团投资 30 亿元的煤化工项目将于今年 6 月份正式投产，将产生大量的气化渣固废，迫切需要新技术实现转化利用。袁崇亮对兰州化物所土壤改良大宗规模化利用研发路径表示高度赞赏，期望双方深化对接交流，为推动资源综合利用和绿色低碳发展注入新

动力。梁峰表示双方可加强顶层设计和统筹布局，围绕种养一体化路径，推进煤气化渣资源化高值利用。

会前，企业代表团参观了甘肃省黏土矿物重点实验室和兰州化物所史馆。



联盟理事单位受邀参加矿物学学科发展战略研讨会

2025 年 1 月 24 日，由南京大学、西南科技大学、中国科学院广州地球化学研究所、中国地质大学（北京）联合主办的“矿物学学科发展战略研讨会”在中国地质大学（北京）国际会议中心召开，国家基金委地球科学部和国内从事

矿物学及其矿物功能材料研究的主要科研院所受邀参加了研讨会。

甘肃省黏土矿物重点实验室主任王爱勤研究员作了题为“创新驱动矿物功能材料高质量发展”的邀请报告，介绍了实验室围绕黏土矿物原料开采、关键

共性技术研发和需求导向矿物功能材料构筑的研究成果，从纳米结构矿物到纳米结构矿物功能材料阐释了“学科交叉、协同创新、突破瓶颈、输入产业、输出产品”的研究理念，建议不同学科要着眼于重大现实需求和制约我国黏土矿物产业发展的根本性问题协同攻关，从而实现从基础研究、应用研发与产业化融通创新发展。在交流研讨环节，与会专家和领导嘉宾围绕矿物学人才培养、项目组织、平台建设、学术期刊创建、仪

器设备创制与功能开发等提出了建议和意见。

近年来，从微观矿物结构精确解析到宏观地质过程的深入理解，从极端条件下矿物行为研究到矿物资源综合利用，矿物学领域相关研究取得了长足进展。通过此次战略研讨会，旨在分享矿物学领域最新研究成果和研究进展，探讨人工智能与大数据技术革新对矿物学研究范式的影响以及矿物科学未来发展趋势和重点方向。



王爱勤研究员一行考察临泽凹凸棒石相关企业

2025年2月23日，甘肃省黏土矿物重点实验室主任王爱勤研究员一行赴临泽县工业园区考察凹凸棒石相关企业，在临泽工业园区管委会书记牛伟全等陪同下，先后走访了张掖森续新材料公司、甘肃惠临实业发展有限公司和临泽县奋君矿业有限公司。

走访期间，了解了凹凸棒石生态环保新材料开发、凹凸棒石（石膏）综合开发利用和凹凸棒石生物有机肥生产线和市场产品相关情况，企业负责人介绍

了公司运营发展状况和技术需求，同时针对新建生产线面临的技术问题进行了交流。随后，与临泽工业园区管委会就凹凸棒石产业发展作了交流座谈，共同梳理了产业发展遇到的瓶颈及其未来重点解决的问题。王爱勤研究员还通报了第五届全国矿物材料学术与技术交流会暨第二十三届全国非金属矿加工利用技术交流会筹备情况，欢迎临泽工业园区管委会组织相关企业参会和参展。



国家《凹凸棒石相含量的测定 X 射线衍射-标准曲线法》批准发布

2025 年 3 月 12 日, 由全国非金属矿产品及制品标准化技术委员会归口的国家标准 GB/T 45335-2025《凹凸棒石相含量的测定 X 射线衍射-标准曲线法》经国家标准化委员会批准已发布, 将于 2025 年 9 月 1 日起正式实施。

该标准的主要起草单位有江苏省盱眙凹凸棒石粘土行业协会、中国科学院兰州化学物理研究所和明光市铭垚凹凸棒产业科技有限公司等。中国科学院兰州化学物理研究所王爱勤研究员牵头组织了该标准的制定。

○来源：甘肃省黏土矿物重点实验室

近年来, 我国凹凸棒石行业蓬勃发展, 产品质量和技术水平大幅度提高, 实现了凹凸棒石黏土从矿物材料到功能材料的转变。但随着下游应用和产业规模不断扩大, 对凹凸棒石黏土原矿的品质要求不同, 对矿源进行分类分级开采和应用成为必要环节。其中, 矿物中凹凸棒石相含量的高低直接决定矿物的品级和各项性能。该标准的制定规范了测定方法, 对推动凹凸棒石产业高质量发展具有重要意义。



行业动态

Industry Dynamics

► 【洞察】凹凸棒石应用范围广泛 下游市场需求持续增加

○来源：新视界网

凹凸棒石是一种层链状结构的含水富镁、铝的硅酸盐矿物，也称为坡缕石或坡缕缟石，外观多为白色、灰色、黄色、灰绿色，拥有良好的吸附性、载体性、催化性、流变性，通常分为土状凹凸棒石黏土和纤维状凹凸棒石两大类。

根据新思界产业研究中心发布的《2025-2030 年中国凹凸棒石行业市场深度调研及发展前景预测报告》显示，在实际应用过程中，凹凸棒石通常需经晾晒、破碎、磨粉、筛分等一系列工序被制成凹凸棒石黏土制品，如凹凸棒石黏土吸附脱色剂、粘结剂、干燥剂、复合助留剂、吸附剂、净化剂、粘度增加剂、凝胶剂、增稠剂、悬浮剂、粘结剂等，进而应用于食品、农业、饲料、油脂、水处理、空气净化等领域。

从产业链角度来看，就上游行业而言，凹凸棒石矿产资源遍布全球各地，但多数国家凹凸棒石储量不多，目前实现凹凸棒石工业化开采的国家并不多，主要有中国、澳大利亚、西班牙、美国、意大利等。就下游应用而言，凹凸棒石应用范围广泛，除传统的油脂、饲料和农业领域，目前凹凸棒石还被用在填充材料、水处理、空气净化等领域。2020-2023 年，得益于下游行业持续发展

以及凹凸棒石应用范围扩大，全球凹凸棒石市场规模突破至 33 亿元以上。

从中国市场现状来看，中国凹凸棒石主产地与凹凸棒石矿产资源的地理分布状况高度重合，主要集中在江苏、甘肃和安徽三省。2024 年上半年，上述三省合计贡献了中国凹凸棒石行业 90%以上的产量。其中，代表性的凹凸棒石生产企业有江苏神力特生物科技股份有限公司、盱眙县中材凹凸棒石粘土有限公司、明光市恒鼎凹土有限公司、安徽省明美矿物化工有限公司等。另外，在需求端，中国市场凹凸棒石需求主要来自油脂、农业及饲料行业。2024 年上半年，上述三大领域凹凸棒石需求占比合计超过 75%。

新思界产业分析人士表示，凭借良好的吸附性能、胶体性能、载体性能和补强性能等理化性能，凹凸棒石在国内的应用量持续增加。目前国内凹凸棒石应用需求在百万吨左右，未来随着凹凸棒石深加工技术进步，更多类型的凹凸棒石制品将被开发出来，凹凸棒石制品将能满足更多领域多样化的应用需求，国内凹凸棒石及其制品应用范围将进一步拓宽，与此同时，国内市场对凹凸棒石的需求量也将继续增加。

▶ 探秘内蒙古杭锦旗：“火星地貌”走红背后的凹凸棒石传奇

○来源：鄂尔多斯宣传

内蒙古鄂尔多斯市杭锦旗巴拉贡镇因一片赤色丘陵地貌引发广泛关注。这片由砂质块体构成的“褶皱大地”在荒漠中蜿蜒，形似火星表面，被网友称为“地球上的星际穿越地”。而这一独特景观的成因，与当地一种珍稀矿产资源——杭锦凹凸棒石黏土密切相关。

杭锦凹凸棒石黏土，也叫杭锦2号土，是杭锦旗优质非金属矿产资源之一。1994年至1995年，由中国地质矿业内蒙古公司完成矿产资源地质普查与详查。普查面积281平方公里，普查储量3.4亿+吨，远景储量20亿+吨，储量居全国第二。



2025年1月，杭锦凹凸棒石黏土博士工作站正式揭牌，从“网红地貌”到可持续发展，杭锦旗计划通过博士工作站等打造凹凸棒石黏土全产业链，涵盖深加工、文化创意等领域。让凹凸棒石黏土在碳中和、新能源材料等新兴领域发挥重要意义。



从锦新闻视频号首发的《快来杭锦旗领略“塞北火焰山”的奇绝之姿》小视频被广大网友转发后人民日报客户端、新华社客户端新华社微博、秀我中国抖音号学习强国、奔腾融媒视频号内蒙古自治区文化和旅游厅公众号暖新闻视频号等多家媒体竞相报道。

随着热度的发酵杭锦凹凸棒石黏土的美丽景观#和张艺兴一起看内蒙古丘陵登上新浪微博内蒙古热搜第一网友们在评论区纷纷留言大自然竟能塑造出如此鬼斧神工的奇特地貌

从专业的地质科普到奇特地貌的展示全方位的报道让更多人了解到这片神奇的土地越来越多的游客想要亲眼目睹这独特的地貌奇观对于地质学家和科研人员来说这里更是天然的实验室这片赤色土地正以“火星地貌”为窗口向世界展示资源禀赋与生态智慧融合的可持续发展之路。

▶ 皖北煤电集团明光凹凸棒基新材料项目成功签约

○来源：粉体技术网

近日，安徽滁州市招商引资“春季攻势”行动明光市项目集中开工、签约仪式在明光举行。皖北煤电集团与明光市政府成功签约凹凸棒基新材料产业化项目。

皖北煤电将对该项目将按照“矿、园、廊、港”四位一体、协同开发的原则进行规划布局，积极打造具有鲜明特色的凹凸棒新材料产业基地。

凹凸棒是一种稀缺的非金属矿产资源，全球已探明具有工业开发价值、高品位可利用资源仅 1 亿多吨。我国凹凸棒资源主要分布在安徽明光、江苏盱眙、甘肃临泽等地，其中明光凹凸棒资源约 2400 万吨，是亚洲地区唯一具备三八面体结构的凹凸棒，具有胶体、载体、吸附、补强四大核心功能，广泛应用于环保材料、生物医药、航空航天、石油化工等领域。

皖北煤电集团于 2024 年 8 月成立明光新材料项目工作专班，开展投资并购滁州市兴明矿业有限公司相关工作。皖北煤电集团收购完成后，将掌控明光 80% 以上的凹凸棒以及伴生的 3 亿吨玄武岩及膨润土等其它非金属矿产资源。

凹凸棒是明光市的特色主导产业之一，皖北煤电将以此次签约为新起点，携手地方共同把明光凹凸棒的资源优势、产业优势转变为经济优势、发展优势，加快推动凹凸棒资源科学开采、精深加工利用，全力打造高端化、绿色化、智能化、集群化凹凸棒基新材料产业基地。

安徽省皖北煤电集团有限责任公司是以采掘业为基础，以煤电化、煤炭物流、非金属材料开发为支撑的大型国有能源企业，是中国企业 500 强、安徽省属 12 户重点企业集团之一。



杭锦凹凸棒石黏土博士工作站揭牌成立

○来源：沿途趣览

1月17日，内蒙古鄂尔多斯市杭锦旗凹凸棒石黏土博士工作站揭牌仪式在杭锦旗恒益建工有限责任公司会议室举行。

仪式上，出席领导为杭锦凹凸棒石黏土博士工作站揭牌，随后参观了杭锦凹凸棒石黏土博士工作站，并就工作站的建设情况进行深入了解。

杭锦凹凸棒石黏土，是一种陆相湖盆沉积形成的富含稀土元素的凹凸棒石（坡缕石）、伊利石（水云母）、绿泥石（高岭石）混合型黏土矿藏。富储于杭锦旗巴拉贡镇境内巴音恩格尔丘陵地带



1月17日，杭锦凹凸棒石黏土博士工作站正式揭牌，这是杭锦旗推动人才工作提质增效的重要举措，也是加强与王文波教授团队、恒益建工合作交流的重要平台。

西北缘。探明地质储量 3.7 亿吨，远景储量大于 10 亿吨。

杭锦旗拥有丰富的凹凸棒石矿产资源，在资源开发、应用推广等方面做了大量卓有成效的工作。挂牌成立杭锦凹

凸棒石黏土博士工作站，是杭锦旗推动人才工作提质增效的重要举措，也是加强与王文波教授团队、恒益建工有限责任公司合作交流的重要平台，更是推动凹凸棒石科研成果落地转化的重要手段，必将为凹凸棒石产业化、规模化发展提供坚实保障。

内蒙古大学化学化工学院王文波教授长期从事凹凸棒石黏土方面相关研究，拥有丰硕的科研成果。“目前，我们科研团队有 50 余人，团队成员既有博士，也有硕士，科研经验都非常丰富，对研究凹凸棒石的新用途有着浓厚的兴趣。选择在杭锦旗成立工作站，是因为杭锦旗的矿产资源丰富，有非常大的潜在经济价值，另一方面杭锦旗此前对于凹凸棒石的研究与开发也取得了诸多成果，我们希望发挥团队人才和科技创新优势，能够开发出更多满足高端需求的新产品，为地方经济注入新的活力。”内蒙古大学化学化工学院教授王文波说道。

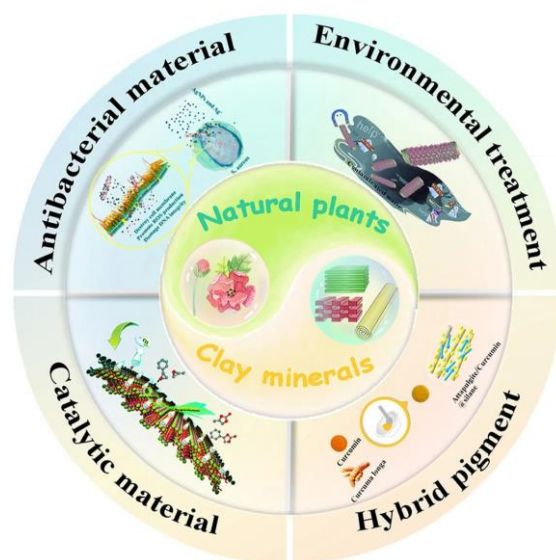


玛雅蓝的启示：植物遇上矿物，开启绿色功能材料新未来

来源：粉体技术网

随着人类活动对生态环境的破坏，绿色可持续发展理念日益被强调，各种生物相容性的天然材料被尝试用来替代有毒、高污染的合成材料。植物是地球上主要的生命形式之一，种类繁多、分布广泛、成分多样，被称为天然试剂库。黏土矿物是地球上地质作用形成的天然产物，因其纳米结构、形貌多样、成本低廉、生物相容性好等特点，被广泛应用于环境、农业、医药、食品、化工等行业。黏土矿物与植物产品结合能生产出哪些创新产品呢？数千年前，古代玛雅人用靛蓝和黏土矿物制备玛雅蓝颜料，在自然条件下暴露几个世纪后，仍然保持着鲜艳的色泽。这一历史实践成为后世利用天然植物和黏土矿物制备功

能材料的灵感源泉。本综述详细描述了黏土矿物和天然植物的特点和分类，总结了基于黏土矿物和天然植物的功能材料绿色制备策略和应用，并提出了该主题的挑战和未来机遇。



关键词：黏土矿物；天然植物；功能材料；绿色清洁；可持续发展

1. 引言

低碳与可持续发展是本世纪以来各国面临的两大课题，碳中和与可持续发展战略被各国反复强调并受到高度重视。近年来，随着人类活动的加剧，生态平衡遭到严重破坏，各类有毒有害化学物质的使用，引发了水污染、土壤污染、空气污染、食品安全等诸多生态问题。面对各种经济发展与环境管理

问题，以牺牲环境为代价的经济发展方式已不再可行。应从根本上考虑和引导长期的可持续发展，在工业活动中尽可能利用天然资源、绿色原料、更清洁的制备方法制备功能材料，实现人类活动与生态环境的和谐。

充分高效利用自然资源是实现可持续发展的重要途径。黏土矿物作为天然

纳米材料,具有管状、纤维状、棒状、层状等多种形态,在医药、食品、农业、颜料、储能、环境、催化、制氢、二氧化碳降解等方面具有重要应用。黏土矿物具有许多特殊性能和广泛的应用范围,被誉为“绿化 21 世纪材料世界”的材料。

探索绿色、无毒、可降解、生物相容性的原料替代有毒有害试剂是各领域的研究热点,越来越多的研究者提倡绿色清洁的生产方式。近年来,许多研究报道呼吁利用天然植物中的有效成分作为“天然试剂”替代合成试剂。与传统合成化学试剂相比,天然试剂具有诸多优势:1)植物是可再生资源,其应用符合绿色化学;2)有效物质易于从植物中提取,某些情况下可能不需要纯化;3)

自然界中的植物多样性为材料设计和功能应用提供了广泛的选择;4)许多植物毒性低,对环境友好;5)植物价格低廉,节省资源。基于天然植物的种种优点,用植物产品替代合成试剂越来越受到人们的关注。

植物是地球上生命的主要形式之一,而黏土矿物是地球地质作用产生的天然产物。黏土矿物与植物的结合为利用绿色化学构建可持续发展的功能材料创造了无限的可能性,从而减轻能源消耗、减少资源浪费。基于此,中国科学院兰州化学物理研究所王爱勤研究员团队综述了近年来利用黏土矿物和天然植物制备功能材料的研究进展,重点介绍了其在抗菌、催化、颜料和环境领域的应用。

2. 纳米结构黏土矿物与功能材料

2.1 纳米结构黏土矿物

黏土矿物是一维或二维的层状硅酸盐,由 Si、O、Al、Mg、Fe、K 等元素组成。黏土矿物与植物一样,由于金属-氧八面体(O)和硅-氧四面体(T)的组合不同,黏土矿物的结构、形貌、理化性质差异很大。黏土矿物根据形态可分为管状、层状、纤维/棒状(图 1)及球状水铝英石等,下面就个别有代表性的粘土矿物的相关结构与物理化学性质进行讨论。

管状黏土矿物是天然存在的纳米管,以埃洛石和伊毛缟石为代表。埃洛石具有多层管壁,长度约为 0.5~2 μm ,

外径为 50~100 nm,内径为 10~30 nm,其外表面由带负电的 T 片和带正电的 O 片组成。而伊毛缟石的外表面为 O 片,内表面为 T 片。伊毛缟石的尺寸比埃洛石小得多,只有单壁,外径约 2~10 nm,内径为 1~5 nm,长度为 1~5 μm 。由于 T 片和 O 片结构和性质的差异,管状黏土矿物的内外表面具有化学独特性,为功能材料的制备提供了更多的设计空间。鉴于内外表面所带电荷及物理化学性质的不同,可以通过一些带相反电荷的离子或分子对内表面或外表面进行修饰,同时独特的管状形貌使其在载药、催化、纳米反应器等领域有广泛的应用。

层状是黏土矿物最常见的形态，通常为层状结构，根据 O 层与 T 层的比例可进一步分为 2:1 (TOT) 和 1:1 (TO) 结构。对于具有层状结构的黏土矿物，插层是主要的改性和控制方法。然而，高岭石的层间缺乏可交换阳离子，层间氢键强。因此，与可膨胀的黏土矿物（如蒙脱石）相比，实现高岭石的有机分子插层或内部表面改性具有挑战性。高岭土矿物中的大分子一般难以打破层间氢键，只有极性较强的有机小分子(如二甲基亚砷、甲酰胺、尿素等)和醇类才能进

行插层反应。对于具有 TOT 结构的黏土矿物，如蒙脱石，由于层间距大，可交换阳离子数量多，阳离子大分子或小分子很容易通过插层或层间阳离子交换进入层间。经过插层改性，黏土矿物由高度有序变为高度层间或完全剥离。具有层状结构的黏土矿物插层材料不仅保留了矿物特有的纳米尺寸、吸附、阻隔、力学性能等性能，而且还具有来自插层分子的功能基团，成为调控黏土矿物性能、制备功能材料的重要手段。

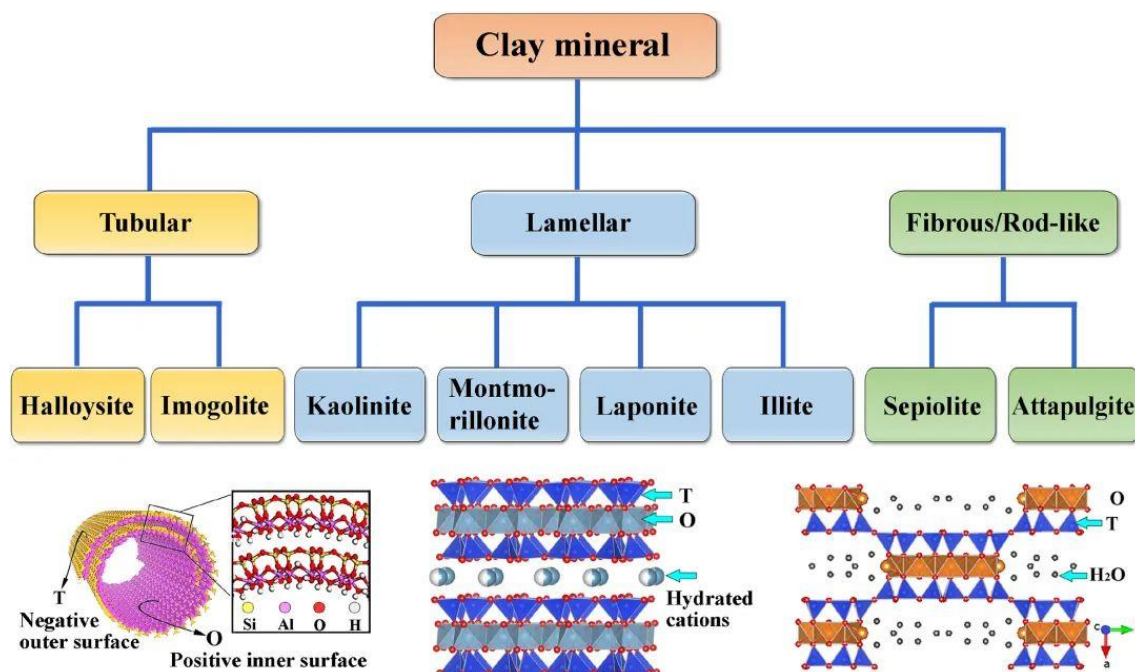


图 1. 黏土矿物参与制备各种功能材料的示意图

纤维状海泡石和棒状凹凸棒石（又称坡缕石）是典型的层链状黏土矿物，其晶体结构由上下交替排列的两条 T 双链和不连续的 O 片层组成。各链上的 T 片层之间通过氧原子不间断地连接在一起，形成互通链。此外，T 片层中的硅原子通过共用顶点氧原子相互连接，与 O

片层中的金属原子配位形成 Si-O-M，但 T 的变化会抑制 O 片层的伸长，产生与 c 轴平行的通道。这种独特的孔隙结构赋予层链状黏土矿物优异的吸附性能和较大的比表面积，在催化、吸附、胶体界面等方面引起了广泛关注。

2.2 纳米结构黏土矿物

基于黏土矿物独特的纳米结构，人们开发出了各种各样的功能材料，用作催化剂、吸附剂、止血材料、载体材料、组织工程材料和抗菌材料等（图 2）。在各类黏土矿物中，管状黏土矿物在功能材料的制备中尤为受欢迎，其独特的管腔和内外表面的电荷差异使其更有利于在纳米管内部负载某些物质。对于具有层状 TOT 结构的黏土矿物，将不同性质的客体材料插层到层状黏土矿物中是制备功能复合材料的常用策略，基于黏土矿物的可调性和组成多样性，人们开发

了大量的功能复合材料。而棒状或纤维状的 2:1 黏土矿物虽然无法实现管腔填充和层间插层，但其较高的比表面积、多孔结构和羟基为制备功能材料提供了良好的接枝和吸附位点。

总之，目前已基于不同形貌的黏土矿物，通过插层、负载、接枝、杂化、酸碱活化等方法开发出各种功能材料，并应用于各种场景。遗憾的是，化学方法和有机试剂在功能材料的制备中仍占主导地位。

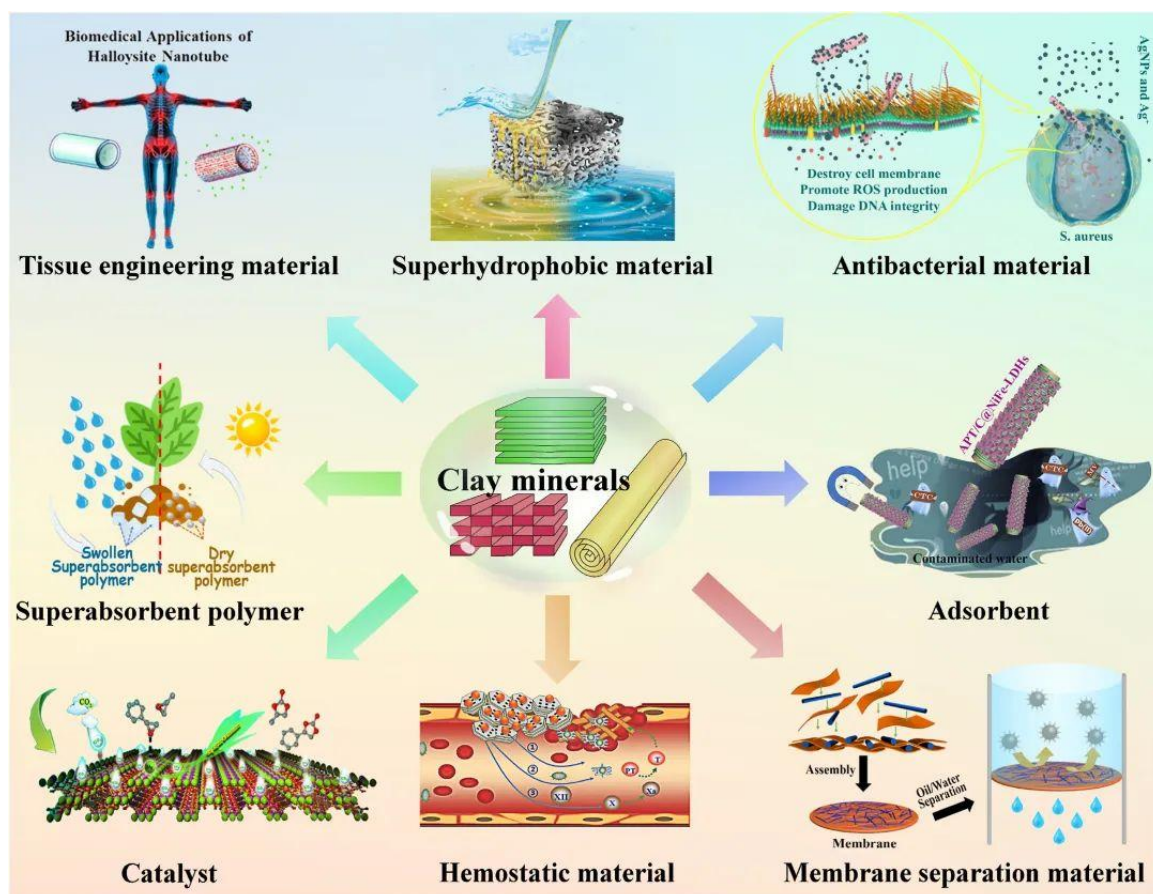


图 2. 黏土矿物参与制备各种功能材料的示意图

3. 植物介导的功能材料合成

近年来，植物介导合成功能纳米粒子的研究日益增多，成为研究热点。本

文从不同生物分子的角度对植物介导合成功能纳米粒子的研究进展进行综述，

旨在阐明植物提取物在功能纳米粒子形成中的作用及其机制。

3.1 多酚类化合物

多酚含有芳香环，上面有一个或多个羟基以及其他取代基，这些取代基与植物提取物的各种生物活性有关，包括抗氧化能力、抗菌活性、抗炎和抗病毒特性，这些特性已在生物医学中得到充分开发和利用。多酚通常具有良好的氧化还原性能和强的金属螯合活性，这主要归因于含有儿茶酚或没食子酚部分的多酚中的邻位二羟基。在金属离子存在下，多酚还可以刺激聚合反应，这些反应都倾向于 pH 依赖性。由于酚类化合物优异的还原性和螯合性能，富含多酚的植物是合成金属基纳米材料的有希望的候选者之一，许多富含多酚的植物已被用于合成金属基纳米粒子，例如 Ag, Pt, Se, ZnO, CuO, CeO₂, TiO₂ 等。

黄酮类化合物是一大类约 4000 种多酚化合物，包括黄酮、异黄酮、花青素、儿茶素、黄酮醇、黄烷酮等。儿茶素、槲皮素和芦丁等黄酮类化合物具有很强的螯合能力，可与多种金属离子形成稳定的复合物。金属结合活性取决于羟基的数量和位置以及黄酮类化合物的结构。黄酮类化合物具有很强的还原性和电子供体能力，在纳米粒子的各向异性生长中起着关键作用。因此，黄酮类化合物分子很容易附着在纳米粒子表面，从而在形成初期抑制聚集。例如，利用富含黄酮类化合物的红景天水提取

物合成的银纳米粒子呈现出规则的球形，尺寸仅为 10 nm，而使用 NaBH₄ 化学合成的银纳米粒子分散性较差且尺寸较大（图 3a-b）。黄酮类化合物等植物化学物质可以与还原过程同步快速附着在纳米粒子表面，这是植物介导的绿色合成过程中产生小尺寸纳米粒子的主要原因。

酚酸是另一组重要的酚类化合物，包括羟基苯甲酸和羟基肉桂酸。羟基苯甲酸包括没食子酸、水杨酸、香草酸，而咖啡酸、阿魏酸和绿原酸是较常见的羟基肉桂酸的例子。酚酸广泛存在于植物中，但其成分在植物和组织之间有所不同。例如，没食子酸大量存在于水果、蔬菜和食用植物中，原儿茶酸存在于茶叶、漆树、葡萄和没食子中，单宁酸在水果、木材和树叶中含量丰富。酚酸具有强的抗氧化活性，这种活性取决于功能团的位置和数量，例如甲氧基和羟基。在利用稻壳提取物制备银纳米粒子中，酚酸被证实是还原和稳定银纳米粒子的主要活性物质，其机理如图 3c 所示。有趣的是，咖啡酸氧化后形成的醌可以与银纳米粒子结合，形成空间屏障并阻止银纳米粒子的聚集。因此，咖啡酸比香豆酸和其他酚酸更能促进小尺寸银纳米粒子的形成。与咖啡酸类似，没食子酸可以将 Au³⁺ 还原为 Au⁰。Au³⁺ 最初与没食子酸形成中间复合物，然后被氧化成醌，附着在金纳米粒子表面，阻止它们聚集（图 3d）。

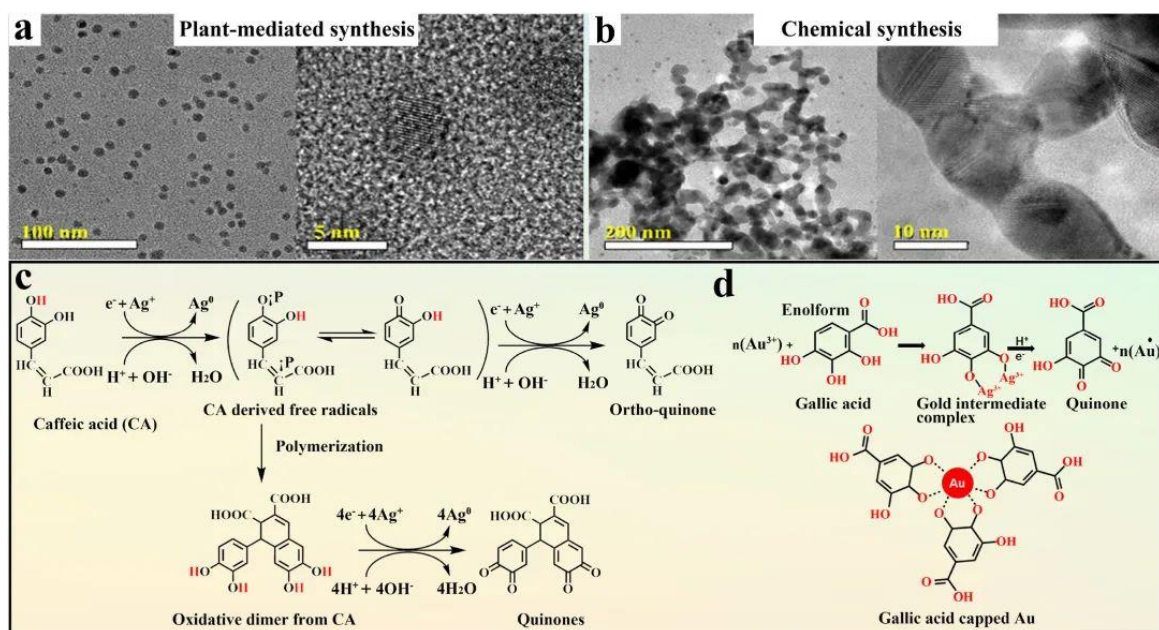


图 3. (a - b) 通过植物介导和化学合成制备的银纳米粒子的 TEM 图像; (c) 使用稻壳提取物中的咖啡酸合成银纳米粒子的机理; (d) 用没食子酸还原 Au^{3+} 的机理

3.2 萜类化合物

萜类化合物是植物中发现的最大一类次级代谢物，以异戊二烯或异戊烷部分为基础。它们在中草药中广泛存在，最近已被证明在金属纳米粒子的生产中发挥着重要作用。通过充当封端剂，它们将纳米粒子的生长限制在 (100) 方向，并通过吸附在纳米粒子表面防止聚集。虽然其机制尚不明确，但萜类化合物能够通过 π 电子或羰基相互作用促进金属纳米粒子的形成和稳定。此外，萜类化合物还可以通过将醛基氧化为羧酸来还原金属离子。

精油是萜类化合物中活性成分最大的部分，植物精油中的单萜和倍半萜对纳米颗粒的形成具有重要作用。在桉树精油诱导合成 ZnO 纳米颗粒的过程中，松香芹醇、桉叶油醇和香芹酚形成锌-苯酚复合物，然后氧化生成 ZnO 纳米颗粒。

值得一提的是，印度楝是一种被广泛研究的植物，因为其提取物精油中含有丰富的萜类化合物，能够比其他植物、微生物或化学试剂更快地还原金属离子。

3.3 还原糖和多糖

糖类广泛存在于生物界，尤其存在于植物中。含有游离醛基或酮基的单糖（如葡萄糖、果糖、半乳糖）和含有游离醛基的双糖（如乳糖、麦芽糖）具有还原性，在金属离子的还原中起着至关重要的作用。葡萄糖可以将金属离子还原为金属纳米粒子，但金属纳米粒子容易发生团聚；而以果糖为原料制备的纳米粒子尺寸更均匀，尽管其还原能力不如葡萄糖。非还原糖蔗糖不能作为还原剂直接诱导金属纳米粒子的合成，需要先将蔗糖水解为葡萄糖和果糖，才能得到具有还原性的糖类。

多糖以纤维素的形式广泛存在于植

物细胞壁中,以淀粉的形式广泛存在于植物果实和根部中。多糖的还原能力相对较弱,但通过与纳米颗粒表面相互作用,对纳米颗粒的稳定作用极佳。因此,由多糖介导的纳米颗粒通常尺寸较小。例如,当使用淀粉作为稳定剂,真菌辅助还原 Ag^+ 时,产生的纳米颗粒平均尺寸为 15 nm,这比微生物合成的纳米颗粒(平均尺寸为 84 nm)小得多。此外,一些多糖还具有还原金属离子的能力。例如,糊精是淀粉的不完全降解产物,不

仅在水溶液中具有一定的溶解性和良好的稳定性,而且由于水解反应,可以以还原糖的形式存在。因此,糊精可以作为还原剂和稳定剂来诱导合成金属纳米粒子(图 4a)。由糊精合成的银纳米粒子和金纳米粒子呈现出均匀的球形形貌和较小的尺寸(图 4b),更重要的是,在一个月后仍然具有稳定性。此外,多糖分子中含有大量极性羟基和醚氧基团,可以降低金属阳离子的活性,使聚合物基质中发生成核。

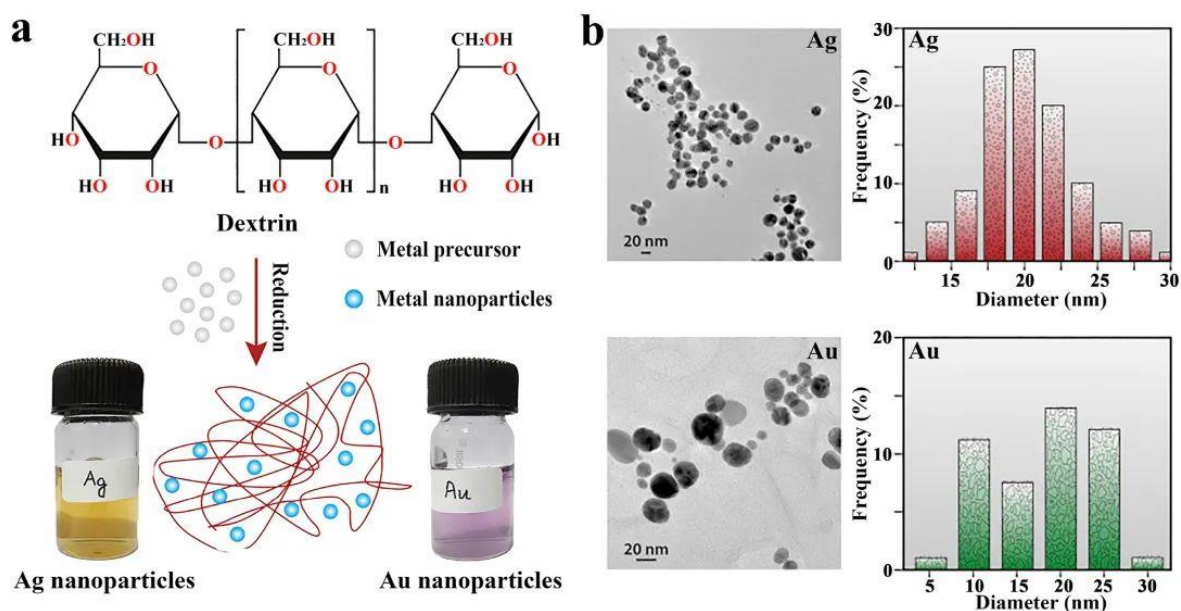


图 4. (a) 糊精诱导合成银和金纳米粒子; (b) 银纳米粒子和金纳米粒子的 TEM 图像和粒度分布

3.4 其他生物分子

生物碱广泛存在于植物的种子、根、花、叶和果实中,被认为是天然产物中最大的活性成分类别。由于其生物活性,天然生物碱已被开发成药物,例如奎宁和小檗碱。同样值得注意的是生物碱能够赋予纳米粒子独特的生物活性。生物碱是大多数植物药中的活性药理成分,用它们制备的纳米粒子通常具有增强的

生物活性和更显著的治疗效果。例如, α -卡茄碱、 α -茄碱和总马铃薯生物碱级分以添加或协同的方式增加了 Ag 纳米粒子的杀菌活性。此外,维生素在功能性纳米粒子诱导合成中的贡献也不容忽视。维生素 B2 可以诱导具有特定形态的功能性纳米粒子的合成,并已用于合成 Ag-Pd 纳米结构,如纳米棒和纳米线。维生素 C (抗坏血酸) 在大多数新鲜水果

和蔬菜中含量丰富, 由于其出色的还原能力, 也是生产纳米粒子的理想天然试剂, 并且在使用小檗果实提取物在还原氧化石墨烯上形成 Pd 纳米粒子方面起着关键作用。

蛋白质是由一条或多条多肽链组成的生物分子, 其氨基酸残基在与金属纳米粒子相互作用时可作为封端配体。因此, 蛋白质在金属纳米粒子形成过程中的稳定化作用通常更为明显。植物提取物也已证实可诱导合成功能性纳米粒

子, 这些纳米粒子可能被蛋白质或氨基酸包围表明, 蛋白质的二级结构参与了 Ag^+ 的还原, 而胺基在蛋白质诱导的辣椒合成银纳米粒子中起稳定剂的作用。因此, 提出了辣椒蛋白质诱导合成银纳米粒子的可能机制, 可以用识别还原限制的成核和生长模型来描述。蛋白质涂层还具有其他生物学益处, 玉米醇溶蛋白诱导的金纳米粒子合成和涂层可以降低溶血活性和毒性。

4. 基于黏土矿物和天然植物绿色构筑矿物功能材料

黏土矿物和植物作为天然材料, 被称为清洁、绿色材料, 人们致力于将它们结合起来, 制备出可用于环境、农业和医学等多个领域的功能材料。

4.1 植物根系和黏土矿物

植物根系富含黄酮、多糖、精油、生物碱、皂苷等成分, 当归、黄芪、党参、甘草等多种富含皂苷的植物的根系均已被用于泡沫模板法制备多孔材料。泡沫模板法是在水相中加入发泡剂/稳定剂, 产生大量气泡, 随后固化, 即可得到多孔材料(图 5a)。传统泡沫模板需要消耗大量合成表面活性剂, 且可能对环境产生不利影响, 严重限制了其应用。当归根制备水相泡沫的尝试由于泡沫模板稳定性低, 得到的多孔材料孔隙结构不规则, 孔隙数量少(图 5b-c)。而引入黏土矿物与植物根系协同稳定泡沫, 得到具有丰富连通孔隙结构的多孔材料(图 5d)。植物与黏土矿物协同稳定泡沫模板

的机理主要可分为两种: 一是植物根系浸出液锚定在气液界面, 黏土矿物颗粒在水相中相互作用形成网状结构; 通过控制黏土矿物含量可控制泡沫的形成, 进而设计多孔材料的结构(图 5e)。另一种机制是通过与植物根系浸出液相互作用对黏土矿物颗粒进行两亲改性(图 5f)。植物改性的黏土矿物直接锚定在气液界面形成“保护壳”, 提高了泡沫的强度, 使多孔材料能够更好地保留泡沫模板的原始形貌。而且, 改性后的黏土矿物可以填补水性泡沫中的空隙, 形成网络结构将泡沫固定化。在利用泡沫模板制备多孔材料的过程中, 利用富含皂苷的植物作为天然绿色表面活性剂, 不仅满足了发泡的必要条件, 而且降低了制备成本和环境污染。此外, 引入黏土矿物可以与植物产生协同效应, 稳定泡沫模板, 用于制备多孔材料, 体现了这些泡沫模板的环境优势, 并弥补了泡沫稳

定性的缺点。

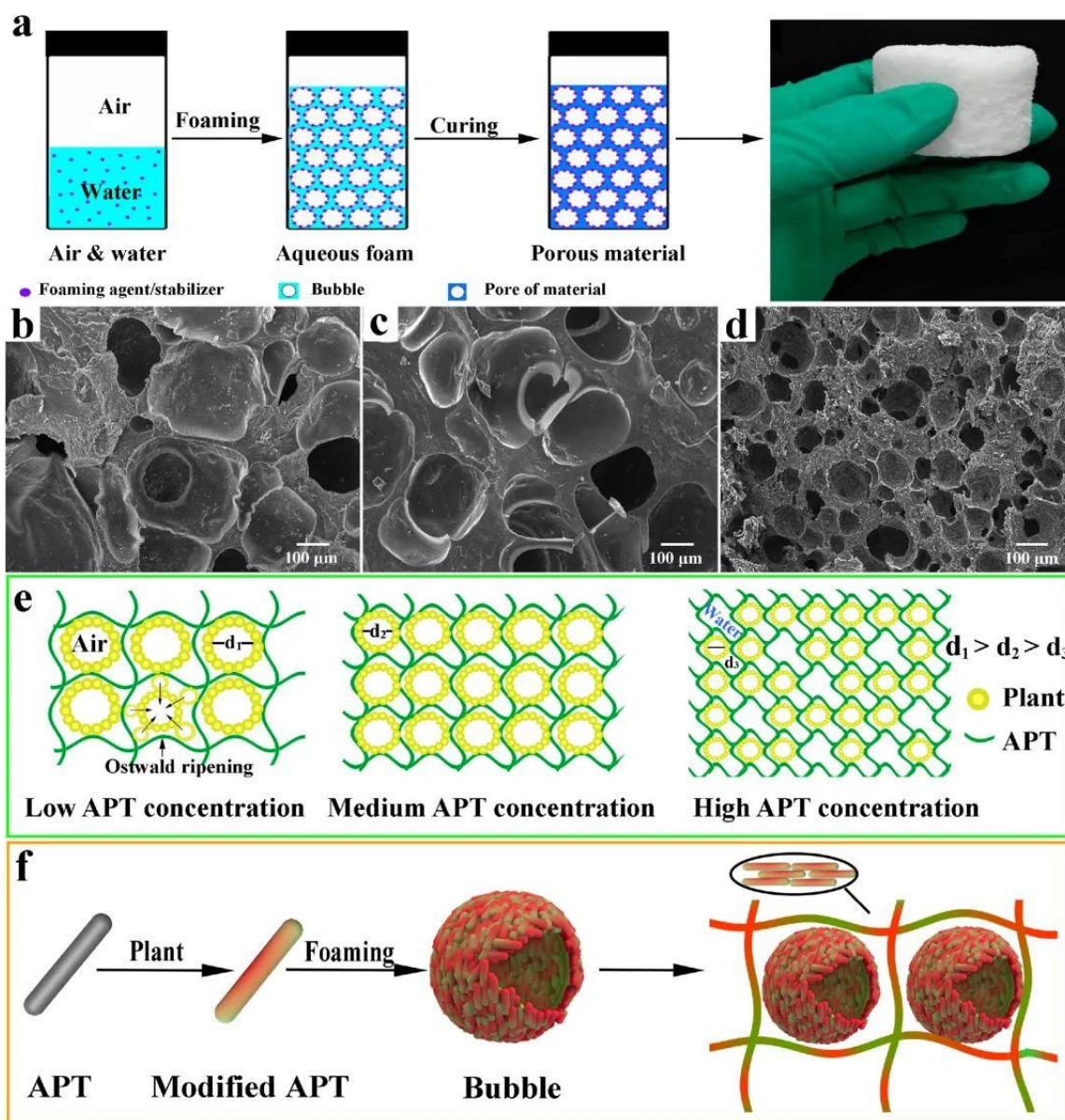


图 5. (a) 多孔材料泡沫模板制备示意图; (b-c) 当归根, (d) 凹凸棒石 (APT) 和植物根稳定的泡沫模板制备多孔材料的 SEM 图像; (e, f) 天然植物和 APT 协同稳定泡沫模板的机理

4.2 植物叶子和黏土矿物

叶片是植物的主要光合作用器官, 结构复杂, 含有酚酸、生物碱、多糖、维生素等成分。过去研究发现一些中药植物的叶片具有增强免疫力、抗炎、抗疲劳等作用, 在中药中被广泛应用。近期, 有报道指出植物叶提取物可替代化学合成剂, 以减少制备功能材料对环境

的影响。例如, 茶叶中含有大量的茶多酚, 可以作为天然的还原剂, 将茶叶与含有多种黏土矿物的油页岩半焦混合, 可发生类 Fenton 反应 (图 6a-b), 油页岩半焦中的 Fe^{3+} 与茶多酚发生反应, 生成半醌自由基, 引发单体聚合, 合成高吸水树脂。

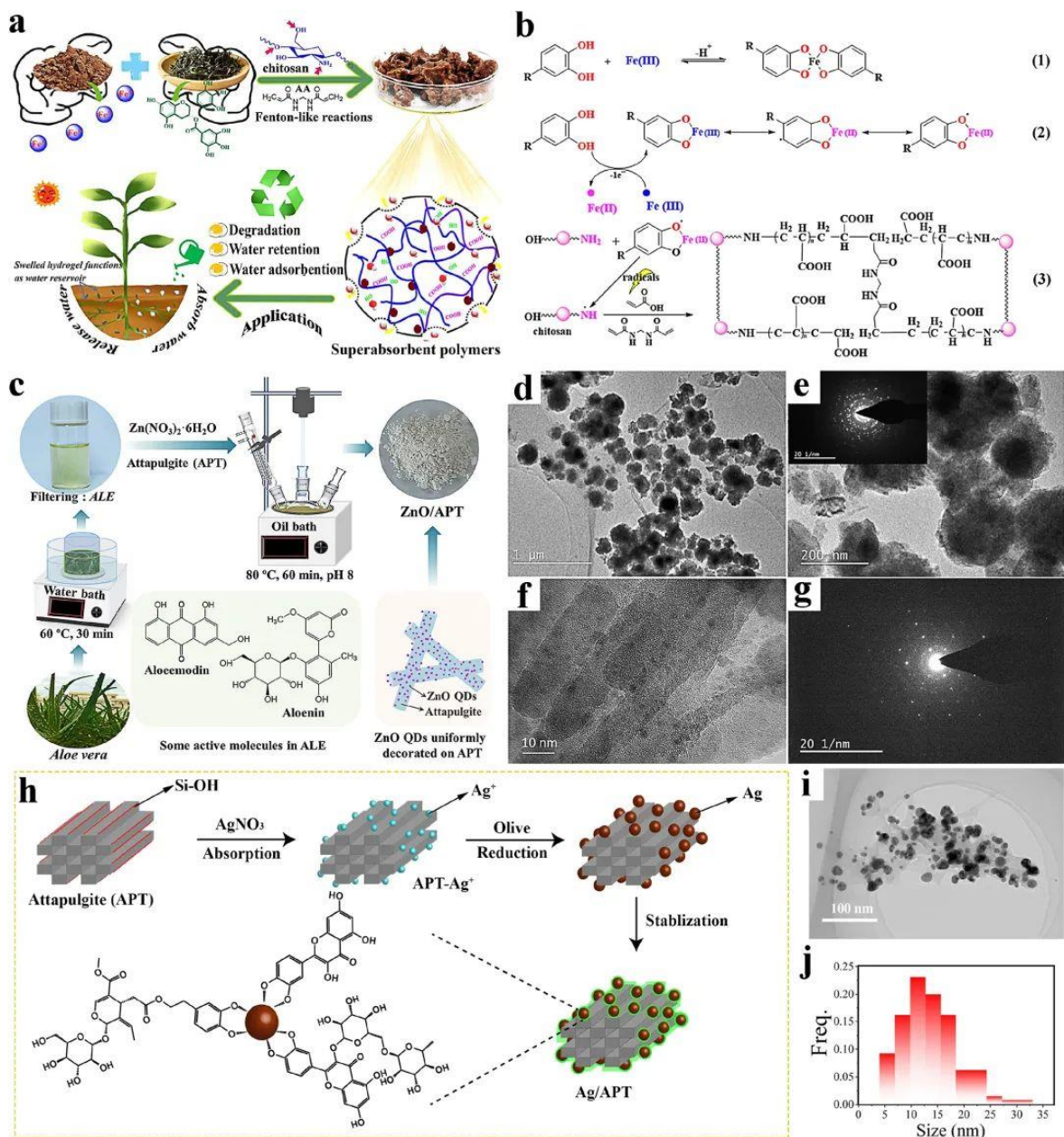


图 6. (a–b) 利用茶叶和油页岩半焦合成高吸水聚合物的示意图；(c) 利用芦荟和凹凸棒石制备的 ZnO/凹凸棒石纳米复合材料的示意图；(d–e) ZnO 纳米粒子和 (f–g) ZnO/凹凸棒石纳米复合材料的 TEM 图像和电子衍射图案；(h) Ag/凹凸棒石纳米复合材料的形成过程示意图；(i) ZnO/凹凸棒石纳米复合材料的 TEM 照片和 (j) 尺寸分布。

近年来，利用天然植物叶提取物作为绿色还原剂合成纳米粒子也引起了人们的极大兴趣。纳米粒子，尤其是金属纳米粒子具有量子效应和小尺寸效应，在催化、传感器、抗菌剂、储能和光伏转换等领域具有巨大的应用潜力。然而，

纳米粒子小尺寸带来的高表面能也导致纳米粒子严重团聚，影响其性能，阻碍其在实际应用中的有效利用。然而，加入适当的聚合物、碳材料、纤维素和黏土矿物载体可以有效克服纳米粒子的聚集问题。在众多载体中，黏土矿物因其

比表面积大、活性位点多、表面带负电荷、孔隙率高、稳定性好等优点,被认为是负载纳米粒子的理想材料。因此,许多研究人员试图将天然植物与黏土矿物结合起来制备高性能功能纳米复合材料,大多数研究证实,这种方法是绿色制造纳米复合材料的可行途径。例如,以芦荟叶为还原剂,合成的 ZnO 纳米粒子尺寸约为 200 nm (图 6d-e),而以一维棒状凹凸棒石为载体 (图 6c),由于尺寸限制及凹凸棒石的 Si-OH 基团,在凹凸

4.3 植物果实和黏土矿物

植物果实中含有丰富的有机化合物,为制备各种功能材料提供了机会。有文献报道了利用植物果实制备功能性海藻酸钠复合膜。从黑果枸杞果实中提取具有酸碱响应性的花青素,通过静电相互作用和插层与蒙脱石制备功能粒子。蒙脱石的加入提高了膜的机械性能

棒石表面均匀生成粒径小于 5 nm 的 ZnO 纳米粒子 (图 6f-g),除表面羟基外,凹凸棒石的表面电荷及多孔结构也增强了吸附性能,可能吸附金属离子,也可能通过植物提取物中的活性成分诱导凹凸棒石表面原位生长小尺寸纳米粒子 (图 6h)。在橄榄叶与凹凸棒石协同作用合成的 Ag/凹凸棒石纳米复合材料中也观察到了类似的结果。在此过程中,Ag 纳米粒子被负载到凹凸棒石表面,尺寸约为 13 nm (图 6i-j)。

并保护花青素免于降解,而花青素为复合膜提供了酸碱响应的变色行为。由于分子结构在黄素离子和醌式碱基之间转变,花青素在酸性环境中呈现红色,在碱性环境中呈现蓝色 (图 7a),而复合膜则随着环境在酸性和碱性之间变化而从粉红色可逆地转变为淡蓝色 (图 7b),可作为食品腐败的视觉检测工具。

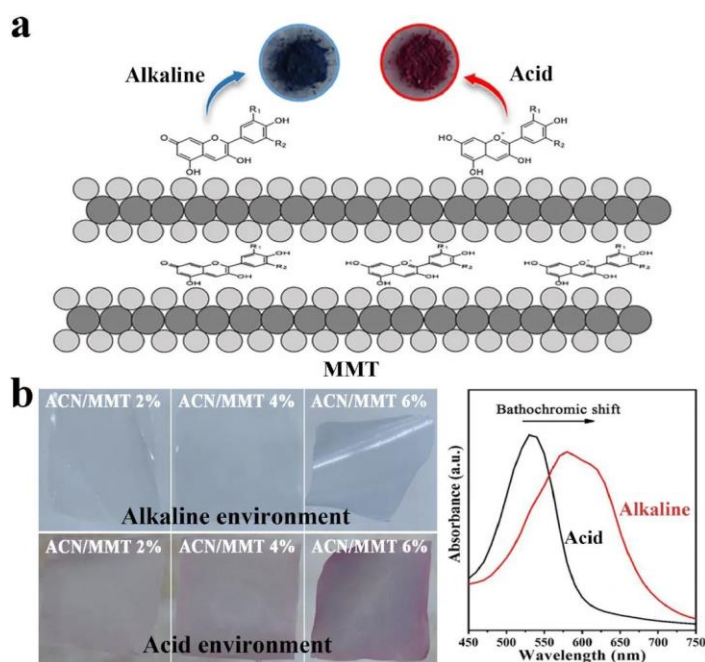


图 7. (a) 花青素/蒙脱石纳米复合材料的酸碱响应机制, 以及 (b) 酸性或碱性环境中复合膜的数字图像和 FTIR 光谱

4.4 植物废弃物和黏土矿物

植物废弃物是植物在生长、收获、生产和加工过程中丢弃的部分,包括木屑、果壳废弃物、秸秆等。这些植物废弃物通过适当的处理或加工,可以转化为各种功能材料(如吸附剂、肥料、动物饲料、纤维产品、生物炭等)。在循环经济和可持续发展的理念下,植物废弃物的资源化利用可以减轻环境负担,提高资源利用效率。

最近,从雪松和稻草中提取的木质素与蒙脱石结合,形成了一种名为“木质素”的功能膜,无需使用任何有机溶剂或石油衍生物。由于木质素中存在酚、酮和其他发色团等紫外线防护功能基团,这种复合膜具有优异的抗紫外线性

能,UVA 透过率仅为 1.2%。虽然蒙脱石的引入提高了复合膜的机械性能、表面润湿性和气体阻隔能力,但木质素来源会影响复合膜的光学和物理性能。同时,在膜加热过程中蒙脱石发生 Hoffman-Klemen 效应,层间离子发生迁移,水化作用减弱,使膜的防水性能增强。另外,木质素的高热稳定性和黏土矿物的低热导率提高了膜材料的热稳定性和阻燃性。利用植物废弃物作为功能材料的基体组分,降低了生产成本,避免了石油消耗,实现了废弃物的可持续利用。因此,从天然原料中挖掘活性物质或功能分子用于功能材料的设计越来越受到人们的青睐,促进了自然资源的合理利用。

5. 应用

5.1. 抗生素

随着抗生素的广泛使用,细菌耐药性已成为限制抗生素疗效的首要因素,并导致缺乏有效药物的令人担忧的局面。因此,迫切需要开发安全、高效且无耐药性的抗菌材料来替代目前的抗生素来控制细菌感染。虽然金属纳米粒子具有很高的抗菌活性、生物相容性和稳定性,但通过将其与黏土矿物结合以植物介导形成,可以增强这些性能。与较大且聚集的游离纳米粒子相比,这种固定化纳米粒子通常较小,比表面积大,分散性好,稳定性好,抗菌活性优异。此外,在植物介导的制备过程中,可以利用具有不同功能团的植物活性成分对

纳米粒子表面进行改性,有效提高纳米粒子的稳定性、活性和生物相容性。与单独的 Ag 纳米粒子相比,植物介导的 Ag/凹凸棒石纳米复合材料对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌表现出协同抗菌活性,其中凹凸棒石的高表面积有利于纳米复合材料与细菌的接触,从而提高其杀菌活性。植物介导的 ZnO/凹凸棒石纳米复合材料也表现出类似的效果,并且可以通过调节 ZnO 纳米粒子的负载来调节其抗菌活性(图 8a)。良好的抗菌能力得益于银纳米粒子良好的分散性和较小的尺寸,这与植物化学功能化和黏土矿物抑制团聚有关。此外,纳米复合材料具有减少金属剂量的优势。例如,负载 5

wt% 银纳米粒子的银/凹凸棒石纳米复合材料表现出与纯银纳米粒子相当的抗菌活性，同时具有低细胞毒性（图 8b）。

芦荟诱导合成的 Se/凹凸棒石纳米复合材料也表现出优异的抗菌性能，且对小鼠成纤维细胞 L-929 无负面影响（图 8c-d）。这些研究结果表明，在植物介导的绿色合成过程中，黏土矿物可以通过分散和锚定纳米粒子来控制粒径，从而有效增强抗菌活性。利用芦荟叶提取物合成的 Se-ZnO/凹凸棒石纳米复合材料

可用于食品保鲜，纳米复合材料由于其良好的抗菌和抗氧化活性而保持了苹果的品质（图 8e）。开发新型、安全、高效的抗菌材料对于缓解抗生素耐药性带来的挑战、保障个人的生命健康具有重要意义。将植物与黏土矿物结合起来代表了生产高性能抗菌纳米材料的有希望的方向，也代表了突破纳米材料制备和在生命系统中功能应用的瓶颈的可行策略。

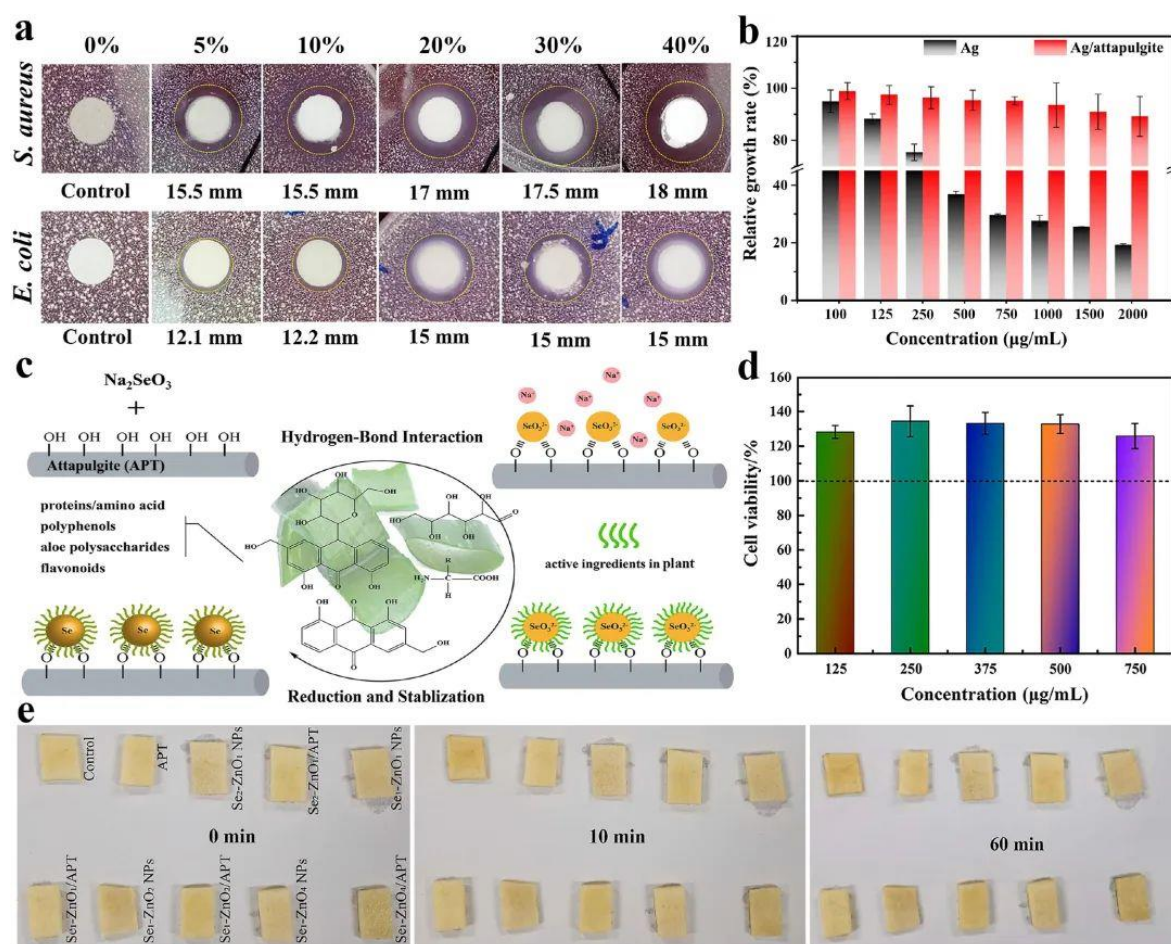


图 8. (a) 不同 ZnO 含量的 ZnO/凹凸棒石纳米复合材料的抗菌性能；(b) Ag 纳米粒子和 Ag/凹凸棒石纳米复合材料对 L-929 细胞的毒性测试；(c) 利用芦荟提取物合成 Se/凹凸棒石纳米复合材料的示意图；(d) Se/凹凸棒石纳米复合材料对 L-929 细胞的毒性测试，(e) Se-ZnO/凹凸棒石纳米复合材料对苹果块的保鲜作用

5.2 催化

通过添加稳定的载体材料可以解决

催化剂回收困难的问题,载体材料在控制催化剂的形貌和尺寸方面起着至关重要的作用,从而影响催化剂的捕光能力和光催化活性。天然黏土矿物是一种很有前途的催化剂载体,广泛应用于有机污染物和大气污染物的催化降解、加氢裂化、二氧化碳还原和氢水解。与其他载体材料相比,黏土矿物具有成本低、环境友好、资源可利用、易于处理和耐化学性等优势。此外,其催化性能在很大程度上取决于活性物质的均匀分布,而黏土矿物可以阻碍活性颗粒的聚集,并有助于光生电子空穴对的分离,从而提高催化活性和效率。

随着绿色化学的发展,可持续催化材料受到越来越多的关注。蒙脱石具有可扩展的层状结构和高阳离子交换容量,已被用作纳米颗粒催化剂的载体。利用葱属植物的水提取物生物合成了Ni/蒙脱石催化剂,其中Ni纳米颗粒均匀地装饰在蒙脱石上,尺寸为12-20 nm,其电化学活性表明它们可用于氧化甲醇。此外,利用荨麻提取物生物合成的掺杂

5.3. 颜料

天然与合成色素在生活的诸多方面发挥着重要作用。天然植物色素主要存在于各类天然植物的花、果、根、叶中,为胡萝卜素、花青素、甜菜碱等,在陶器、壁画中的应用可以追溯到史前时期。这些从植物中提取的天然色素因生物相容性好、色泽鲜艳、价格低廉而受到人们的青睐,但其化学、风化和热稳定性很差。18世纪初,Diesbach发现了第一

有Ag纳米粒子的ZnO/蒙脱石纳米复合材料通过Ag纳米粒子的表面等离子体共振振荡引发Ag/ZnO异质结构的光催化,而蒙脱石的加入促进了催化剂中电子-空穴的复合,基于协同效应提高了催化剂降解亚甲蓝的效率。

与传统合成方法制备的金属催化剂相比,利用植物提取物合成催化剂具有成本低、生物相容性好、催化活性高、稳定性高等显著优势。此外,植物提取物中的植物化学物质作为封端剂,通过静电相互作用增强污染物在催化剂表面的附着。因此,生物合成催化剂在各种应用中引起了广泛关注,特别是在环境修复领域。虽然目前对植物介导的黏土矿物基功能材料的研究并不多,但在植物介导的合成体系中引入黏土矿物可以有效提高纳米催化剂的活性和稳定性,防止团聚,增强协同作用,减少金属纳米粒子的用量。因此从可持续性、成本效益和环境考虑的角度来看,它们具有良好的发展前景。

种化学合成的色素——普鲁士蓝,与从植物中提取的天然色素不同,合成色素经久耐用、色彩鲜艳、着色力强。在20世纪,它们几乎完全取代了天然色素。不幸的是,合成色素在生产过程中会产生持久性有机污染物或致癌物,最终对人类健康和环境产生不利影响。因此,近年来,色素和注意力又回到了天然色素上。

由于天然色素易受紫外线、酸、碱

和温度等外界因素氧化降解,因此开发提高天然色素稳定性的方法非常重要。事实上,一千多年前,古代玛雅人将靛蓝(从木蓝中提取的一种物质)与黏土矿物凹凸棒石相结合,制成了备受推崇和喜爱的玛雅蓝色素(图 9a)。玛雅人自己可能并不知道,玛雅蓝色素在十二个世纪内一直保持稳定,并为后世利用植物和粘土矿物制造有机-无机杂化材料提供了灵感。据报道,凹凸棒石中的纳米

通道和多个羟基(沸石水、配位水和结构羟基)是玛雅蓝色颜料形成和稳定的关键。一方面,靛蓝中的 N-H 和 C=O 键与凹凸棒石中的 -OH 形成氢键,靛蓝中的 N 和 O 可以与凹凸棒石中的 Al^{3+} 和 Mg^{2+} 配位。另一方面,凹凸棒石纳米通道对天然色素的封装可有效保护小有机分子免受外界环境因素的影响并保持长期稳定性。

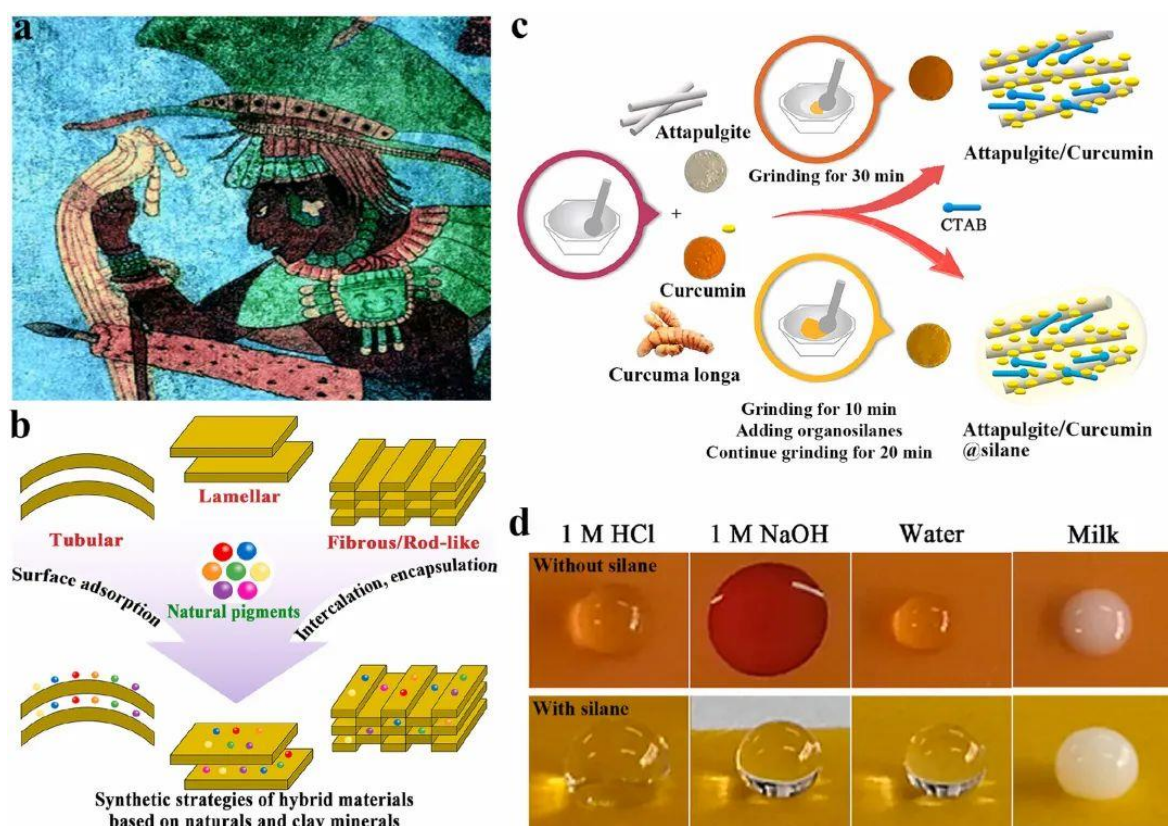


图 9. (a) 用玛雅蓝颜料制作的艺术品; (b) 利用天然颜料和黏土矿物合成有机-无机混合颜料的策略; (c) 利用姜黄素和凹凸棒石制备混合颜料; (d) 硅烷改性前后暴露于不同液滴的颜料涂层的数字图像。

通过天然色素与黏土矿物的吸附、插层、包覆等方法,开发了一系列类似玛雅蓝的色素(图 9b)。例如,从姜黄根中提取的姜黄素是一种天然黄色色素,具有良好的抗炎、抗癌作用,但其较高的生物降解性制约了它的应用。然而,将姜黄素与凹凸棒石结合制备的有机-无机复合色素具有良好的环境稳定性(图 9c)。由于姜黄素与凹凸棒石孔径(0.37×0.64 nm)不匹配,导致姜黄素难以包覆,结合方式主要为氢键和静电吸

附,使姜黄素完全暴露在凹凸棒石的外表面。姜黄素是一种不饱和二酮,在不同 pH 值下在烯醇和酮形式之间转化并导致颜色变化,而硅烷的引入会产生疏水效应,为色素提供一定的保护(图 9d)。

以从硫磺波斯菊、菟丝子、红花油桐和万寿菊中提取的四种天然黄酮为有机客体,以高岭石和凹凸棒石为无机载体,制备了有机-无机杂化颜料“玛雅黄”。基于固态电化学和光谱技术表明,颜料分子只附着在层状高岭石的外表面,而负载在层链状凹凸棒石的外表面和内部孔道中。此外,对黏土矿物基杂化颜料进行热处理可以通过黏土矿物上的催化位点促进颜料分子的异构化和氧化反应。在此过程中,凹凸棒石纳米通道中的颜料分子具有最丰富的氧化还原优化反应。

5.4 环境治理

随着多学科的融合和水处理技术的飞速发展,各种吸附容量大、吸附速率快、选择性好的新型吸附剂的生产取得了很大进展。但大多数吸附剂的研究都集中在吸附性能上,而原材料和制备过程的可持续性往往被忽视。然而,鉴于低碳和可持续经济发展的需求日益增长,人们越来越重视评估吸附剂的环境友好性和优化废弃吸附剂的资源利用。如前所述,基于天然植物和黏土矿物稳定的泡沫模板制备多孔吸附剂是一种更清洁的策略,其中黏土矿物不仅与植物协同稳定泡沫模板,还可以作为水中污染物的吸附剂。

将黏土矿物稳定的泡沫模板与含有 $-\text{COOH}$ 、 $-\text{NH}_4$ 、 $-\text{OH}$ 、 $-\text{SO}_3\text{H}$ 等基团的功能单体相结合,制备的吸附剂对染料、抗生素、重金属等具有优异的吸附能力。除了吸附剂的绿色制备外,废吸附剂的清洁再生也代表着更大的挑战,许多研究都以牺牲环境损害为代价,只注重吸附能力和吸附速率,且多数研究仍基于使用酸/碱、有机溶剂和各种盐溶液对废

吸附剂进行解吸再生。此外,虽然吸附剂经过解吸处理后可以使用多次,但很少考虑解吸液的处理,在实际应用中这种材料最终会成为新的固体废物。

近年来,在缺氧条件下高温热解生物质得到的生物炭在环境治理中得到了广泛的应用。生物炭具有丰富的含氧功能团和较高的环境稳定性,具有良好的污染物吸附性能,通过热解碳化将废吸附剂转化为碳质材料,可持续应用于环境治理,是发展环境友好的方法的可行途径。在前期研究中,以泡沫模板为原料制备多孔吸附剂用于去除水中的有机污染物,将废吸附剂通过热再生转化为矿物生物炭进行回收利用(图 10a-b)。含有有机污染物的废吸附剂中的植物和功能单体作为碳源,黏土矿物提供了额外的吸附位点。矿物生物炭在 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 下煅烧后的再生效果最好,循环使用 5 次后对染料的吸附容量仍在 200 mg/g 以上(图 10c~d)。此外,矿物生物炭富含活性基团和矿物元素(图 10e),还能吸附水中的污染物,调节土壤的酸碱平衡,提高动物肥料的利用率,固定重金属,改善

土壤微生物环境。此外,将废吸附剂制备的矿物生物炭用作土壤改良剂也实现了可持续的自然循环。土壤的阳离子交换容量(CEC)、电导率(EC)、pH值和隔热性等性质均随着矿物生物炭含量的增加而提高(图 10g~i)。同时,在不同矿物生物炭含量的土壤中生长的植物,

直观地展示了矿物生物炭的土壤改良效果,植物的高度随着矿物生物炭含量的增加而增加(图 10f),并说明了采用“天然原料-绿色制备-水处理-清洁再生-土壤改良”模式进行可持续环境管理的有效策略。

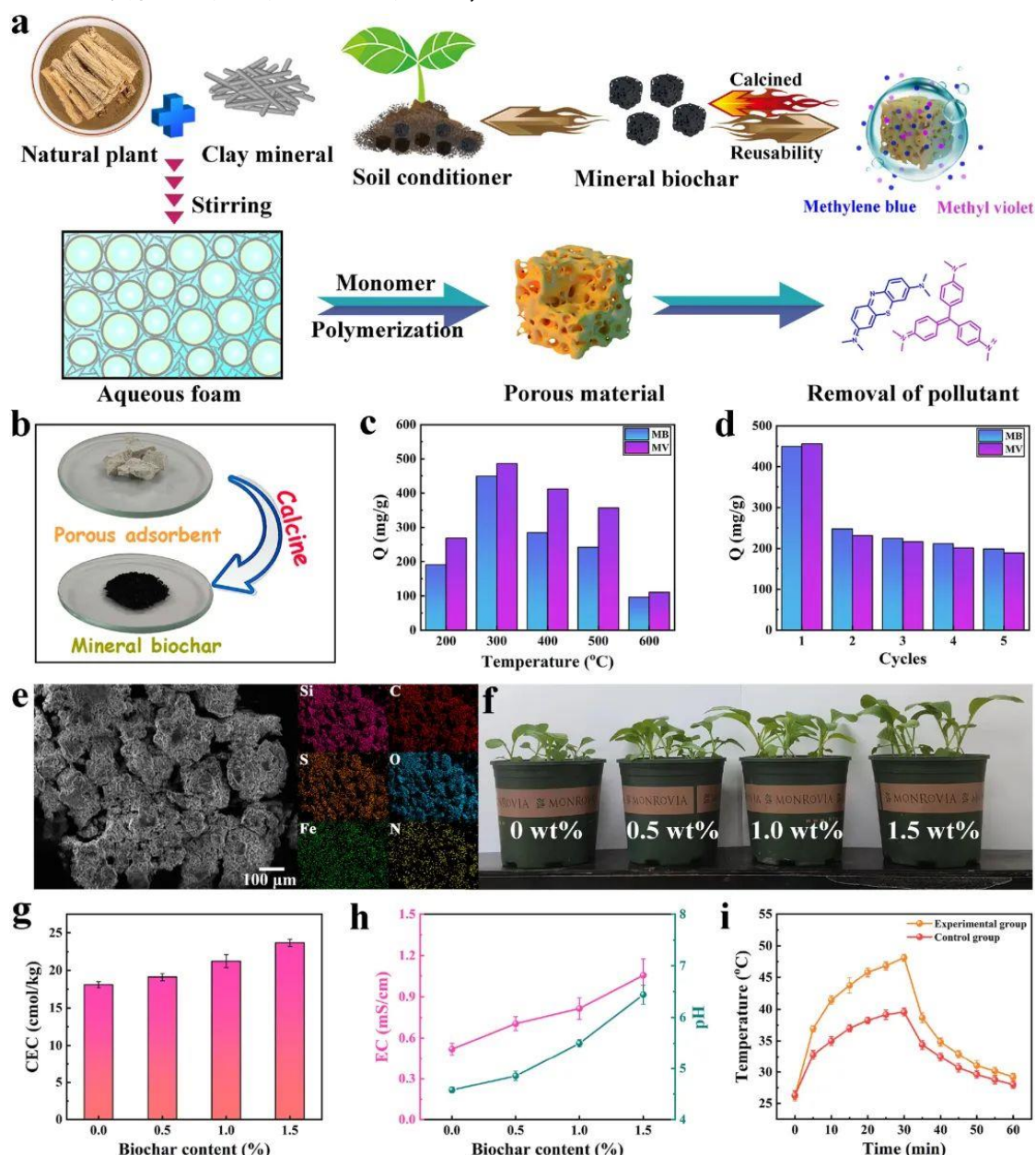


图 10. (a) 基于天然植物和黏土矿物稳定的泡沫模板的多孔吸附剂的制备及其应用; (b) 多孔吸附剂煅烧成矿物生物炭; 不同 (c) 煅烧温度和 (d) 循环次数下矿物生物炭的吸附能力; (e) 矿物生物炭的 SEM 图像和元素映射; (f) 不同生物炭含量土壤中植物的生长情况; (g-i) 不同生物炭含量土壤的 CEC、EC、pH 和隔热效果

6. 结论与展望

随着绿色生产和可持续发展理念的深入人心,人们对利用自然资源的兴趣与日俱增,以黏土矿物和天然植物为原料开发出了多种功能材料,研究人员也在探索如何从黏土矿物和天然植物中获取更大的价值。黏土矿物和天然植物的多样性为功能材料的灵活设计提供了无限可能,合理利用自然资源创造经济价值是可持续发展的新策略。基于此思路,本文介绍了矿物和植物的基本特性,总结了目前的研究进展和相关应用,旨在为结合天然植物和黏土矿物制备和应用功能材料提供新的思路和视角。此外,未来的研究还需考虑以下问题。

(i) **黏土矿物和植物的多样性。**黏土矿物形态的多样性和植物丰富的化学成分为绿色化学的开发和应用提供了基础,但重要的是要考虑黏土矿物或植物的成分或结构差异对合成材料的影响程度。植物的成分因海拔、光照、湿度等不同而不同。同样,黏土矿物的成分、结晶度和相关矿物相也因地质成因不同而不同。因此,某些应用或定量分析可能需要对原材料进行预处理。

(ii) **黏土矿物和植物的充分利用。**黏土矿物除了主要矿物外,还可能伴生有赤铁矿、石英、云母等矿物,这些矿物也可能是宝贵的资源,如果开发出适当的技术,就可以加以利用。植物比黏土矿物更加多样化,成分也更加多变。因

此,可以根据需要提取植物的特定成分作为“天然试剂”,而残渣仍可能有应用价值,而不是被当作“废物”处理掉,开发不同植物成分的高值化利用是未来研究的重要课题。

(iii) **由线性应用向循环应用转变。**一个完整的可持续体系,不仅包括材料的绿色制备和应用,还包括废料的回收和后处理。天然原料的使用在注重绿色可持续应用的同时,也必须考虑产生的废弃物,从而有效避免制备过程中的污染,减少不良副产物的产生,并将废弃物加以利用。一个比较成功的例子是生物炭,它可以以废弃的农副产品、城市垃圾和工业固体废物为原料生产,用于污染物吸附或土壤修复。

(iv) **植物的潜在毒性。**目前对植物毒性的研究尚不全面。一些植物成分可能对人类健康或环境产生不利影响,特别是在大规模应用时。在使用植物制备功能材料时,应进行全面的风险评估和生态评估。了解植物成分对人类健康和环境的潜在影响对于确保产品的安全性和可持续性至关重要。

毫无疑问,人类与自然和谐相处,有效利用绿色、无毒、生物相容的天然资源代替合成的有毒化学品非常重要。希望本综述能为开发基于黏土矿物和天然植物的高性能功能材料的更清洁制备技术提供新的思路和视角。

文章来源: Fangzhi Duan, Fangfang Yang, Bin Mu, Yongfeng Zhu, Aiqin Wang.

Production of functional materials from clay minerals and plants for natural resource utilization and sustainable development[J]. Journal of Cleaner Production, 2024: 143586. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143586>

凹凸棒石的结构特征和应用性能对动物营养研究的意义

黏土矿物具有独特的结构与表面性质，作为动物饲料添加剂已成为研究热点之一。在黏土矿物大家族中，凹凸棒石是一种天然含水富镁铝硅酸盐矿物，具有一维纳米棒状形貌、规整纳米孔道、永久结构负电荷和表面活性基团。近年来，凹凸棒石作为功能性饲料原料，在动物生产中的应用已取得长足进展，但功能应用还有待进一步挖掘。为了促进凹凸棒石在我国畜牧业健康养殖的高效应用，饲料工业特邀中国科学院兰州化学物理研究所王爱勤研究员以“凹凸棒石的结构特征和应用性能对动物营养研究的意义”为题，重点介绍了凹凸棒石的晶体结构和应用性能，阐述了凹凸棒石棒晶束解离和改性的重要性，展望了凹凸棒石在饲料工业中应用的研究重点，以期深入挖掘凹凸棒石的矿物属性，加快新产品创新研制，促进凹凸棒石产

业上下游深度融合。

凹凸棒石是典型的层链状硅酸盐矿物，在矿物学中归属为海泡石族。图 1 为凹凸棒石的晶体结构。由图 1 可见，凹凸棒石基本结构单元由平行于 C 轴的硅氧四面体双链组成，顶点氧原子分别指向 (010) 和 (100) 晶面方向，形成沿 (001) 方向无限延伸的四面体层。各个链间通过氧原子连接，链中硅氧四面体自由氧原子的指向（即硅氧四面体的角顶）每四个一组，上下交替排列。这种排列方式使四面体片在链间被连续地连接，构成具有相互连接的层链状结构。在凹凸棒石的两个 2:1 连续层链单元之间，邻近氧原子基平面的位置处可以形成平行于层链的很多孔道，孔道截面约为 $0.37\text{ nm} \times 0.64\text{ nm}$ 。因此，从基本结构上讲，凹凸棒石具有非常鲜明的孔道特征，在自然界属于稀有非金属矿。

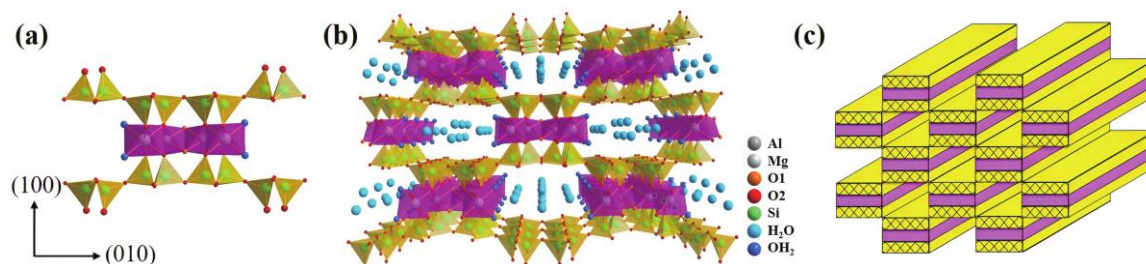


图 1. 凹凸棒石 (a) 晶体结构单元、(b) 晶体结构和 (c) 看到结构示意图

依据凹凸棒石的矿物属性和结构特征，应用性能可从吸附性能、胶体性能、

载体性能和补强性能等 4 个方面进行分类（见图 2）。

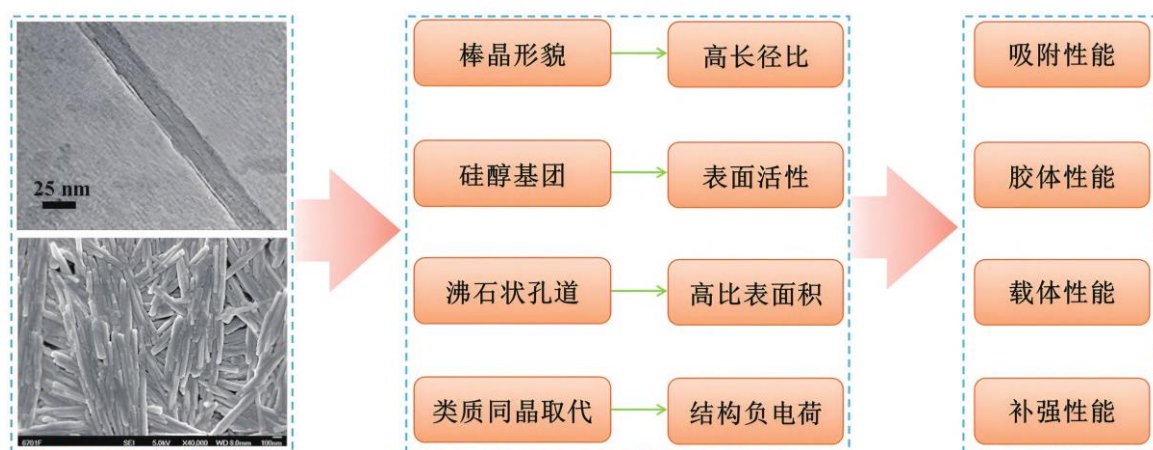


图 2. 凹凸棒石棒状形貌、理化性质和应用性能

凹凸棒石的微观形貌包括棒晶、棒晶束和棒晶束间相互聚集形成的各种聚集体（见图 2）。凹凸棒石虽然是一种纳米材料，但天然产出的凹凸棒石晶体间存在较强的静电引力和氢键作用，棒晶通常以“鸟巢”状或“柴垛”状聚集。如果不解聚棒晶束聚集体，凹凸棒石的比表面积较小，表面活性位点较少，其吸附性、胶体性、分散性和负载性能较差，限制其应用性能的充分发挥。因此，凹凸棒石棒晶束的分散解离已然成为限制其广泛应用的关键共性技术瓶颈。迄今为止，凹凸棒石棒晶束解离的方法有物理法（球磨、挤压、超声和高速剪切等）、化学法（酸处理、溶剂处理和分散改性等）和物理化学一体化工艺。

尽管凹凸棒石独特的棒状形貌、规整孔道和表面活性等赋予了比表面积大、吸附能力强、相容性好和补强性能优等特点，但要实现从矿物材料到功能材料应用，还需要对其进行改性处理，深入挖掘矿物属性，进一步满足不同领

域的现实应用需求。纵观目前文献报道，改性方法主要包括酸碱盐处理、热处理、纳米复合、纳米杂化、结构调控等。

近年来，凹凸棒石及其功能产品在提升动物养殖品质和动物生产性能方面表现出广阔的应用价值，凹凸棒石霉菌毒素吸附剂和替代抗生素抗菌促生长剂获得市场认可，但未来围绕凹凸棒石在动物健康养殖中的应用，应关注以下方面。

一是要关注微观结构，加强学科交叉。凹凸棒石黏土矿多伴生有二维蒙脱石、高岭石和伊利石等矿物。因此，在实际应用过程中，应关注凹凸棒石黏土矿的矿物属性，结合凹凸棒石的微观结构特征，有针对性地开发产品。作者发展了混维凹凸棒石黏土结构性转白关键制备技术，利用凹凸棒石一维棒晶和伴生矿的二维片层混维纳米结构矿物，制备的霉菌毒素吸附剂有更好的吸附效果。从该角度讲，材料学和动物营养学要进一步加强学科交叉融合，通过协同

创新，走通技术应用的“最后一公里”，实现凹凸棒石黏土物尽其用。

二是要重视精准构筑，加强功能应用。凹凸棒石具有独特的孔道结构和一维棒晶，利用孔道结构可有效组装活性成分，利用一维棒晶可进行活性成分负载，构筑具有广谱抗菌活性的二元或多元活性组分复合材料。

同时还可以利用生物大分子表面改性和调控策略，开发具有 pH 敏感特点的凹凸棒石负载植物精油和植物提取物等抗菌、抗炎、抗氧化乳化剂或胶囊制剂，

实现生物活性分子在肠道中定向释放的功能产品，进而高效调节肠道菌群平衡，维持肠道健康。

近年来，矿物材料研究者已贯通凹凸棒石矿物材料、纳米材料和功能材料的技术体系，建立了矿物资源全面利用新方法。实现了伴生矿的高值利用，推动矿物功能材料研究形成“关键技术突破-功能材料构筑-功能材料应用-产品产业化”的良性发展机制，带动了相关学科共同发展的同时促进产业壮大发展，建立的技术体系正在助推资源优势向经

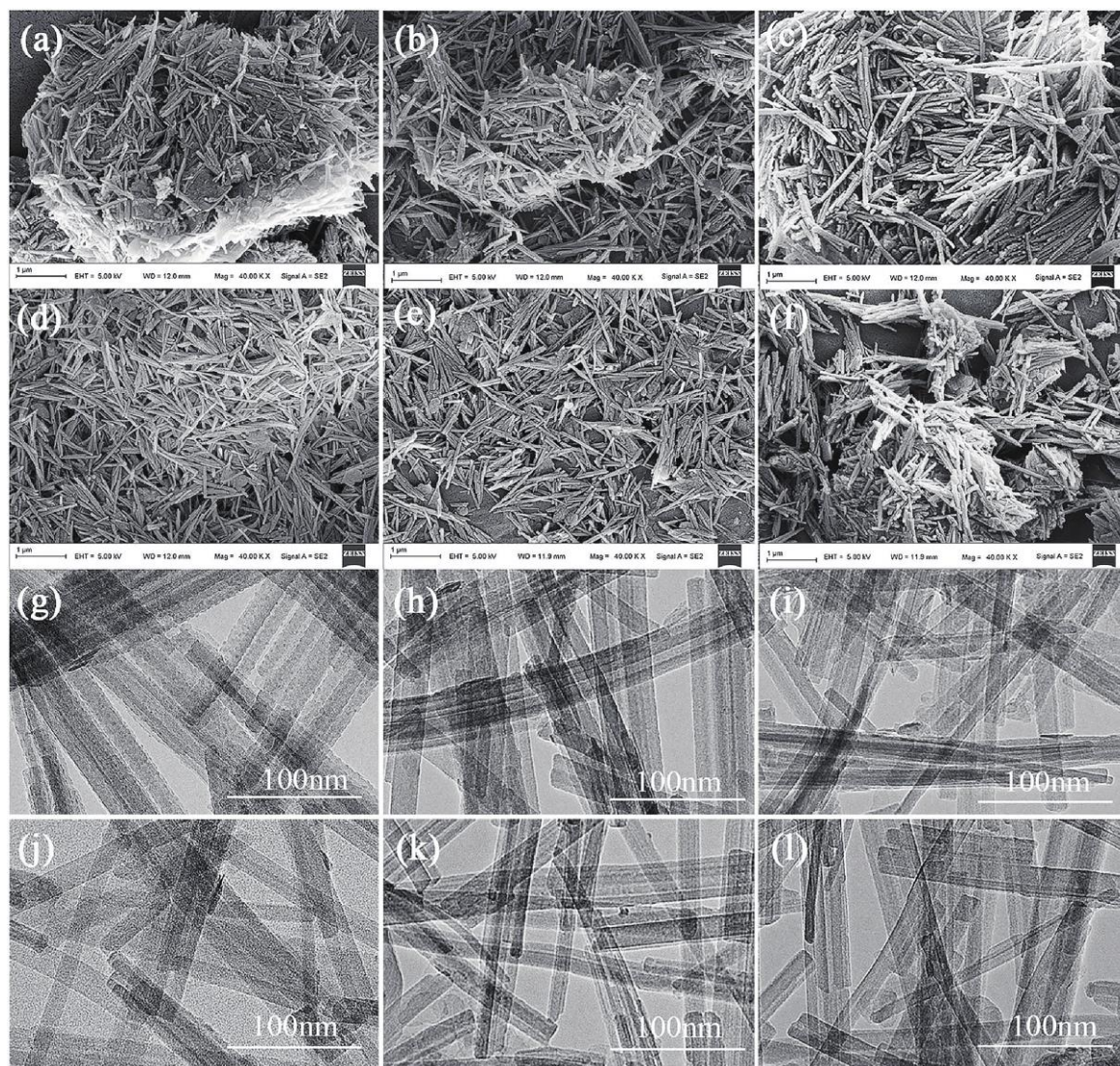


图 3. 凹凸棒石 SEM 和 TEM 图片

济优势的转变。相信通过多学科交叉融合，凹凸棒石在动物健康养殖中会发挥更有效的作用。

论文信息：王爱勤, 卢予沈, 杨芳芳, 惠爱平, 康玉茹, 牟斌. 凹凸棒石的结构特征和应用性能对动物营养研究的意义. 饲料工业, 2025, 46 (5): 1-11.

双螺杆辅助机械力化学绿色制备低成本铋黄杂化颜料

近年来，基于黏土矿物组分掺杂和基体担载协同效应制备杂化颜料受到广泛关注，其制备方法主要包括液相法（化学沉淀法、溶胶-凝胶法、水热或微波辅助水热法）和固相法（高能球磨和振动磨）。

- 液相法在控制无机杂化颜料的纯度、粒度和颜色方面具有明显优势，但制备过程不可避免地会排放大量废水和有机溶剂。
- 固相法具有工艺流程短等优势，但间歇式制备模式存在能耗高等缺陷。

在当前促进经济社会发展全面绿色转型的背景下，亟需发展几乎不产生或

完全不产生废弃物的清洁制备技术。

同时，采用一维棒状凹凸棒石和纤维状海泡石通过表面接枝硅烷偶联剂等，能有效改善聚合物材料的结晶行为和机械性能。二维层状黏土矿物经过适度表面改性、插层或剥离处理后，可在聚合物基体中形成纳米分散体，从而获得性能优异的聚合物纳米复合材料。混维凹凸棒石黏土 (mixed-dimensional attapulgite clay, MDAPT) 主要成分是一维凹凸棒石，还伴生有二维高岭石、伊利石、绿帘石和蒙脱石等矿物，同时引入含一维和二维纳米结构 MDAPT 改善聚合物材料性能的研究还鲜有报道。

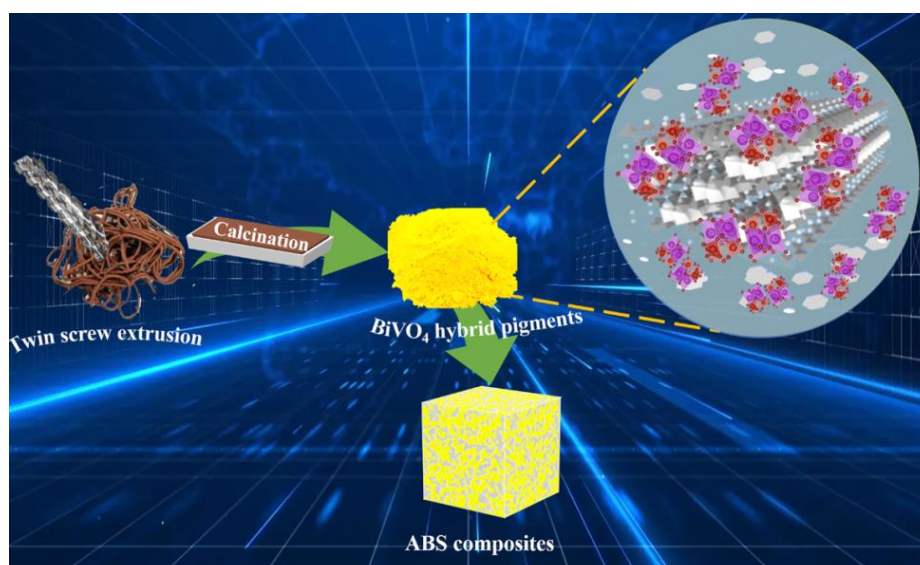


图 1.双螺杆挤出机械化学制备铋黄杂化颜料用于 ABS 着色补强示意图

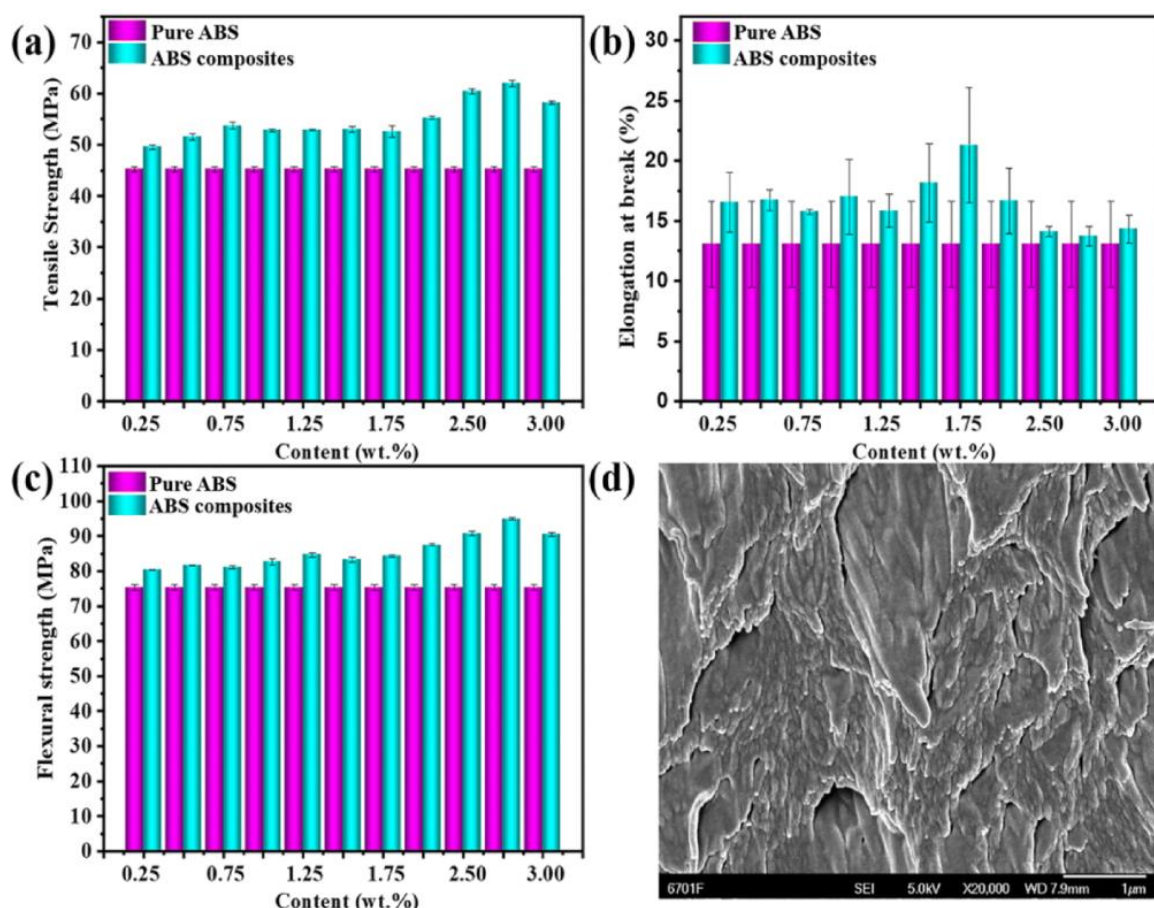


图 2. ABS 复合材料力学性能 (a-c) 和 (d) 截面 SEM 照片。

近日, 中国科学院兰州化学物理研究所王爱勤研究员和牟斌研究员团队, 以 MDAPT 为原料, 采用双螺杆辅助机械力化学法制备低成本铋黄杂化颜料, 用作丙烯腈-丁二烯-苯乙烯 (ABS) 着色和增韧补强功能纳米填料 (图 1)。基于双螺杆挤出过程中产生的剪切和挤压等机械力化学效应, 利用 MDAPT 胶体性质可有效促进前驱体的形成。当 MDAPT 的掺入量为 60 wt% 时, 经 700 °C 焙烧制备的杂化颜料具有最佳的色彩性能 ($L^* = 74.76$, $a^* = 4.24$, $b^* = 80.84$)。研究表明, 引入 MDAPT 可大

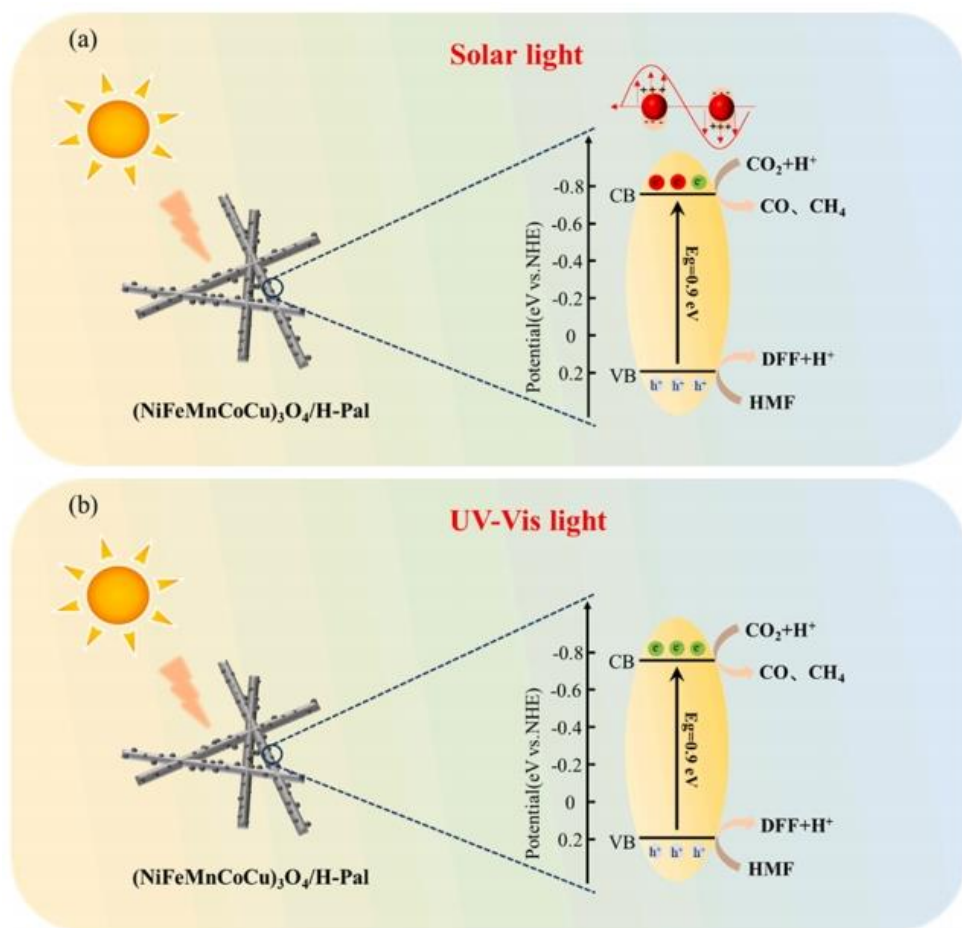
幅降低无机颜料的制备成本, 并精准调控颜料的粒子尺寸和颜色性能。经 KH-570 改性后添加至 ABS 树脂中, 当添加 2.75 wt% 时黄色 ABS 复合材料的拉伸强度和弯曲强度分别比纯 ABS 提高了 36.87% 和 25.96% (图 2)。由于杂化颜料对紫外线和可见光具有更好的吸收和反射性能, 添加杂化颜料有效提升了 ABS 的抗紫外线老化性能。该研究结果不仅为连续机械化学制备低成本黏土矿物基环保无机杂化颜料提供了技术基础, 而且为同时实现聚合物着色和增韧补强发展了新方法。

文章来源: Lei Wu, Bin Mu*, Hao Yang, Zhaoli Wang, Yongfeng Zhu, Hui Dou and Aiqin Wang*, *RSC Mechanochem.*, 2025. <https://doi.org/10.1039/D4MR00117F>.

► 光催化 CO₂ 还原及生物质转化的高熵尖晶石/凹凸棒石纳米复合材料的构建

CO₂排放导致的气候变化问题亟待解决,光催化 CO₂还原是一种有前景的策略。在传统的光催化 CO₂还原系统中,水的反应即析氧反应(OER)在热力学上非常缓慢。为了提高光生载流子和太阳能的利用率,可以采用增值氧化半反应代替 OER。其中,生物质的选择性氧

化,如生物质衍生的 5-羟甲基糠醛(HMF)氧化,可以产生多种高价值的生化产品,是一种理想的替代方法。高熵氧化物(HEOs)因其多元素协同效应和丰富活性位点,在光催化领域展现出潜力,但其在 CO₂还原中的应用仍有限。



基于此, Tao 等人采用溶胶-凝胶法结合高温煅烧制备了具有氧空位诱导的局域表面等离子体共振(LSPR)效应的高熵 (NiFeMnCoCu)₃O₄/H-APT 复合材料。盐酸改性后的天然沸石比表面积增加,

酸性中心增多,有利于 HMF 的氧化。(NiFeMnCoCu)₃O₄ 的掺入使 NiFeMnCoCu 表面产生高浓度的氧空位,引起 LSPR 效应,使吸收范围扩展到近红外光区,并释放出高能热电子。产生的

额外热量局部加热催化剂表面，通过协同光热效应增强 CO_2 还原与HMF还原氧化的光催化活性。在全光谱光照下，主要还原产物 CO 和 CH_4 的生成速率分别为 $153\ \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $78\ \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ，而

HMF转化为DFF的转化率达到 $106\ \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ，转化率约为67.3%，合成的高熵 $(\text{NiFeMnCoCu})_3\text{O}_4/\text{H-SiO}_2$ 复合材料为黏土矿物矿物的高值化利用以及生物质资源转化 CO_2 提供了新的思路。

文章来源: Xiting Tao, Chunyan Zhang, Zhiming Yang, Chao Yao, Xiazhang Li *. *Construction of high-entropy spinel/palygorskite nanocomposite for photocatalytic CO_2 reduction coupled with biomass conversion [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025, 1022, 180165. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.180165>*

► 用于甲苯高效催化燃烧的凹凸棒石负载钯铈催化剂的设计与制备

挥发性有机化合物(VOCs)是大气污染的重要来源，其中甲苯因毒性强、难降解成为治理难点。催化氧化技术因其高效、低能耗的特点被广泛关注，但贵金属催化剂成本高、稳定性不足限制了其实际应用。近年来，凹凸棒石(Pal)因其高比表面积、低成本及优异吸附性能，成为催化载体的理想选择。然而，传统单金属催化剂存在活性组分分散度低、氧空位不足等问题。通过引入铈(Ce)调节钯(Pd)的电子结构并增强氧化物活性，是提升催化性能的有效策略。

基于此，Zhang等人以Pal作为功能支撑物，通过沉淀法合成钯-铈双金属催化剂，有效提升了纳米钯纳米粒子的表面有效性和分散性。Ce的引入减小了钯

粒子的平均尺寸，增加了表面氧空位。当Pd/Ce比为4时，金属态Pd与氧化态Pd之比达到最大值1.75。金属活性组分的精细分散和大量的氧空位提高了催化剂的还原性和催化剂体系的氧活性。所得 $\text{Pd}_8\text{Ce}_2@\text{A-Pal}$ 催化剂对甲苯燃烧表现出最佳的催化性能，50%和90%甲苯转化温度分别为 150°C 和 185°C ，空速分别为 $30,000\ \text{mL/g/h}$ 。原位漫反射傅立叶变换光谱测量证实了 $\text{Pd}_8\text{Ce}_2@\text{A-Pal}$ 上甲苯的降解途径是通过苯甲醇-苯甲酸酯和醛类苯甲酸酯-马来酸酐，最终衰变为 CO_2 和 H_2O 。这些结果与金属钯的高比例、丰富的氧化物种类和氧空位有关。这些结果表明凹凸棒石黏土矿物载体催化剂是一种很有应用前景的环保材料。

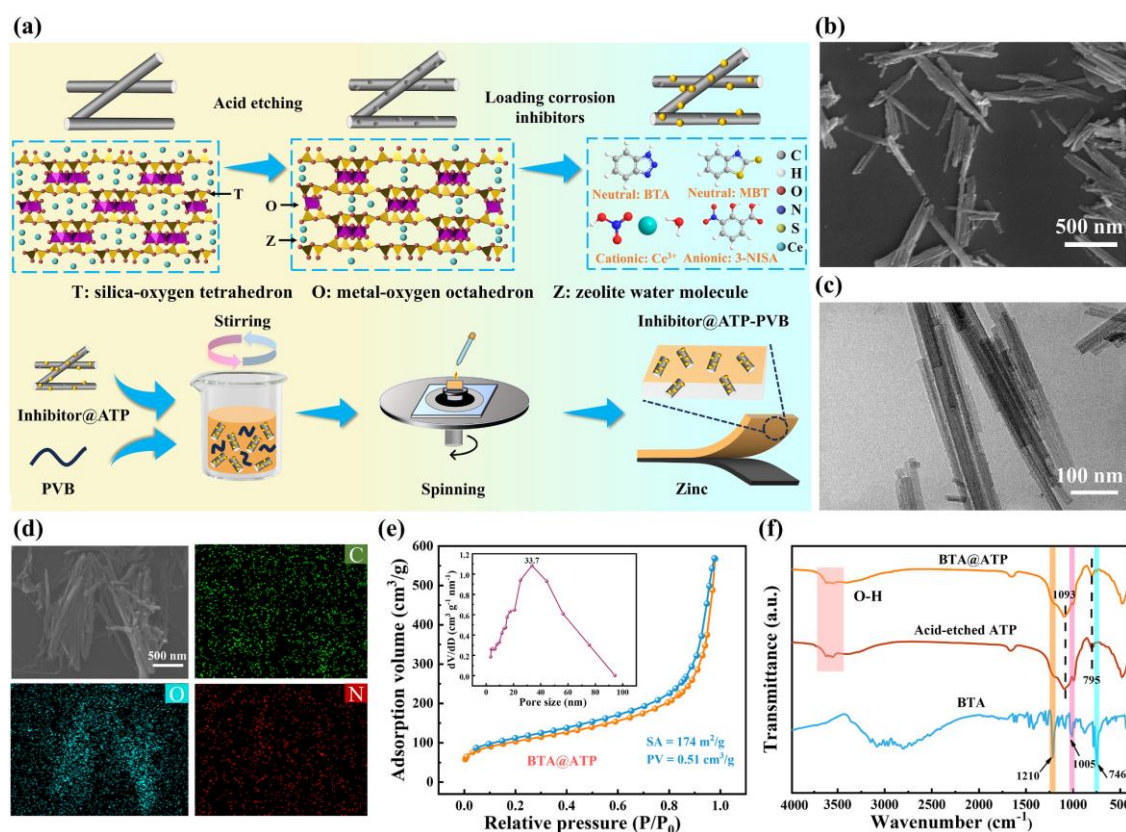
文献来源: Yinmin Zhang, Fengfei Ge, Zhifei Hao, Haoyan Zhang, Yongfeng Zhang *Design and preparation of palygorskite supported bimetallic palladium-cerium*

catalysts for efficient catalytic combustion of toluene[J]. *Applied Clay Science*, 2025, 270: 107744. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2025.107744>

绿色多孔凹凸棒石容器增强智能涂层的腐蚀防护性能

金属结构在工业领域广泛应用，但恶劣环境中的腐蚀问题严重影响了其使用寿命和安全性。传统的有机涂层（如环氧树脂、聚氨酯）虽能提供物理屏障，但由于分子链缠结形成的微孔易被腐蚀介质渗透，导致局部腐蚀和涂层失效。

为解决这一问题，将腐蚀抑制剂封装于微/纳米容器中，构建具有自修复功能的智能防腐涂层成为研究热点。凹凸棒石（ATP）作为一种天然黏土矿物，具有高比表面积和一维纳米棒结构，是理想的腐蚀抑制剂载体。



本研究开发了通过一步水热酸浸法制备高比表面积酸蚀 ATP (351 m²/g)，负载中性、阳离子及阴离子型腐蚀抑制剂（如 BTA、Ce³⁺、3-NISA），构建 Inhibitor@ATP 复合材料。电荷调控机制表明，中性/阳离子抑制剂因与 ATP 表面负电荷的静电作用负载效率更高，而阴

离子抑制剂（3-NISA）虽负载量低，却凭借强钝化能力实现长期稳定防护。添加 0.5 wt% 酸蚀 ATP 的 PVB 涂层在 3.5% NaCl 溶液中浸泡 28 天后，低频阻抗模量 ($|Z|_{0.01\text{Hz}}$) 达 $4.8 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ，是纯 PVB 涂层的 6 倍；BTA@ATP 涂层更提升至 $1.2 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ （纯 PVB 的 16 倍）。此外，

ATP 在碱性环境中降解生成硅酸盐膜，与 Zn^{2+} 形成物理屏障，结合抑制剂释放的主动防护，实现双重抗腐蚀机制。该

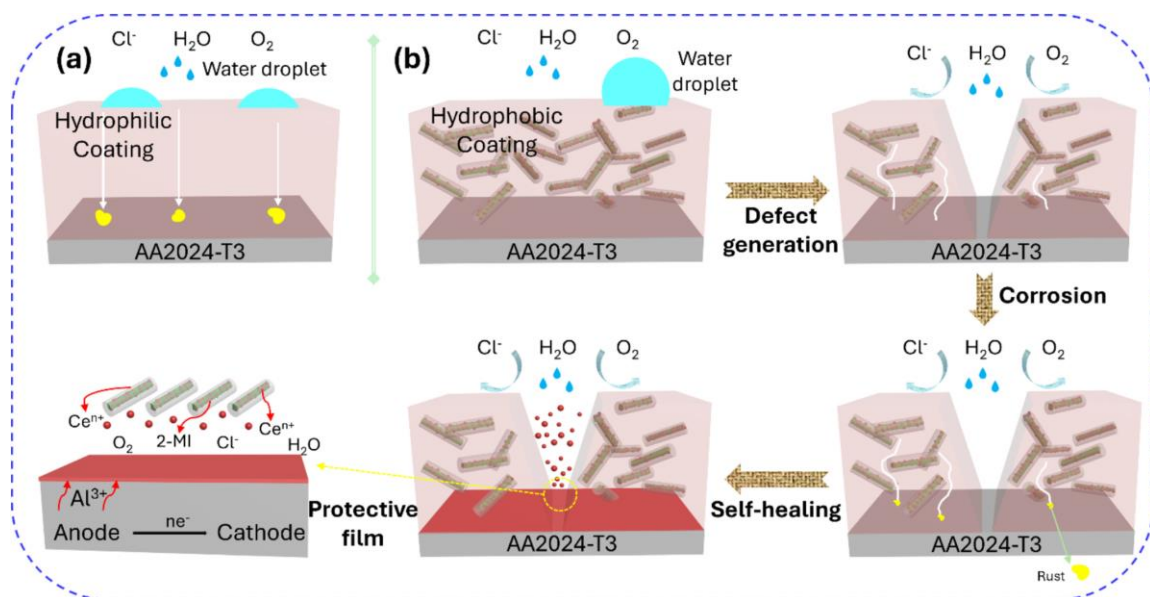
研究为天然黏土矿物的高值化利用及长效智能涂层设计提供了创新思路，适用于海洋、航空航天等苛刻环境。

文章来源: Jie Li, Yue Yin, Lingjing Meng, Hui Qiao, Huan Zhang, Yunfei Cai, Yonglong Zhang, Feiyan Yang, Jinfang Wu, Mei Wu, Jian Liu, Wenbo Wang, Green porous attapulgite containers enhance the corrosion protection of smart coating, Progress in Organic Coatings, Volume 205, 2025, 109285, ISSN 0300-9440, <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2025.109285>.

基于凹凸棒石-Ce-MOF 杂化颜料的疏水自修复防腐涂层

金属腐蚀在工业和日常生活中造成严重的经济损失与安全风险，尤其在潮湿或海洋环境中更为显著。传统有机涂层虽经济实用，但其微孔和裂纹问题限制了长期防护效果。近年来，环保型腐蚀抑制剂（如金属有机框架 MOF）因其可持续性和高效性受到关注。凹凸棒石

（ATP）作为一种低成本、环保的纳米黏土，凭借高比表面积和机械稳定性，被用于负载铈基 MOF（Ce-MOF），形成复合颜料（ACE），并通过聚硅氧烷（POS）疏水改性，开发出兼具自修复与疏水功能的智能防腐涂层，以应对严苛环境下的腐蚀挑战。



基于此，本研究通过活化 ATP 并原位合成 Ce-MOF，制备了 ATP/Ce-MOF 复合物（ACE），进一步通过水解缩合引入 POS 层，形成疏水型 POS@ACE 纳米

复合材料。该材料被引入聚氨酯（PU）涂层后，展现出优异的防腐性能：在 3.5% NaCl 溶液中浸泡 45 天后，10 wt% POS@ACE 涂层的低频阻抗值达 4.89

GΩ cm², 较纯 PU 提升 375%。电化学测试与分子动力学模拟表明, Ce³⁺/Ce⁴⁺的 pH 响应释放可形成钝化膜, 抑制腐蚀扩展。同时, 涂层机械性能显著增强(拉伸强度提升 15.9%), 疏水性(接触角

108°)和附着力(2.02 MPa)亦大幅优化。盐雾实验与微观表征证实, 该涂层通过物理屏障与主动修复机制, 有效延缓腐蚀进程, 为航空航天合金 AA2024-T3 提供了长效保护。

文章来源: Hu Liu, Xiong-Fei Zhang*, Mengjie Li, Mengjie Li, Jianfeng Yao*. *Attapulgit-Reinforced Cellulose Hydrogels with High Conductivity and Antifreezing Property for Flexible Sensors*[J]. *Langmuir*, 2024, 40(40): 20986-20994. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.4c02244>

双螺杆挤出法制备混维凹凸棒石黏土基钴蓝颜料

钴蓝(CoAl₂O₄)颜料因其高温稳定性和优异的呈色性能, 在高端陶瓷、涂料和塑料等领域具有不可替代的作用。然而, 钴资源的稀缺性和高成本限制了其大规模应用。此外, 传统固相法制备的钴蓝颜料存在颗粒尺寸大、易团聚等问题, 影响其性能表现。近年来, 通过引入天然黏土矿物(如凹凸棒石、高岭石等)作为载体, 不仅降低了钴的用量, 还提升了颜料的分散性和稳定性。然而, 现有制备方法(如水热法、溶胶-凝胶法)通常涉及有机溶剂和大量废液排放, 不符合绿色可持续发展要求。此外, 间歇式的球磨机械化学法难以实现工业化生产。因此, 开发一种低成本、高效且环保的连续化制备技术成为当前研究的重点。

混维凹凸棒石黏土(MDPal)具有独特的混合维度纳米结构(一维纤维和二维片层), 其表面丰富的 Si-OH 基团可通过机械力化学作用与金属离子(Co²⁺、

Al³⁺)络合, 形成稳定的前驱体。此外, MDPal 中的 Al³⁺和 Mg²⁺可掺杂到 CoAl₂O₄晶格中, 调控颜料的光学性能。通过草酸梯度酸蚀处理 MDPal, 可选择性去除 Fe 等呈色干扰组分, 进一步优化颜料的蓝色强度。这种基于天然黏土的全组分利用策略, 不仅降低了生产成本, 还符合绿色化学理念。

本研究以天然混合维度凹凸棒石黏土(MDPal)为载体, 通过双螺杆挤出(TSE)技术实现钴蓝纳米复合颜料的连续化制备, 成功合成了 MDPal 负载的钴蓝纳米复合颜料(MDPal/CB)。通过优化酸蚀时间、挤出次数、Co/Al 摩尔比和煅烧温度等参数, 系统研究了 MDPal 的矿物学特性(如化学组成、晶体结构)对颜料性能的影响。结果表明, 草酸酸蚀 4 小时后, MDPal 中的 Fe₂O₃含量显著降低, 颜料蓝色强度(b 值)从-37.47 提升至-45.02; 当 Co/Al 摩尔比为 1:2.7、煅烧温度为 1100°C 时, 颜料表现出最佳呈

色性能 ($b=-48.03$)。XRD 和 FTIR 分析证实 (图 1), 酸蚀后的 MDPal 保留了石英和长石结构, 其表面 Si-OH 基团与金

属离子络合形成前驱体, 煅烧后 CoAl_2O_4 纳米颗粒均匀负载于 MDPal 表面, 且未出现明显团聚。

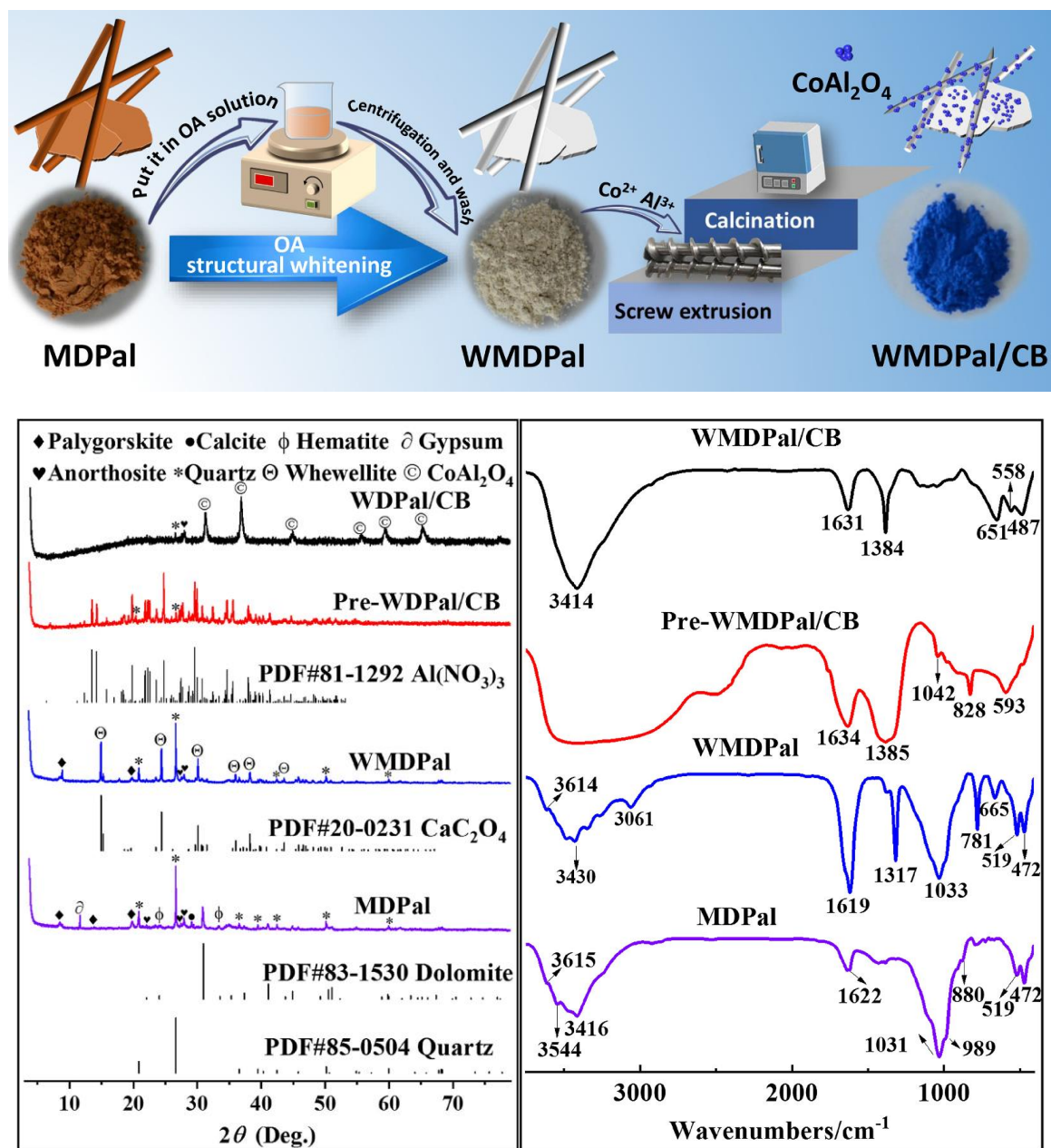


图 1. MDPal 的转白过程示意图及纳米复合颜料的制备过程及 XRD 和 FTIR 表征分析

TEM 和 XPS 表征显示, CoAl_2O_4 纳米颗粒 (20-70 nm) 通过 Si-O-Al 化学键锚定在 MDPal 的混合维度结构上, 显著提升了颜料的分散性和稳定性。此外, MDPal 中的 Ca 物种在高温下形成 CaAl_2O_4 , 进一步增强了颜料的蓝色性

能。应用实验表明 (图 2), 该复合颜料在釉下彩陶瓷中表现出优异的耐高温性和呈色稳定性; 作为 ABS 工程塑料的填料时, 添加 3.5% 的颜料可使弯曲强度和拉伸强度分别提升 18.02 MPa 和 10.03 MPa, 同时赋予材料抗紫外老化性能; 在

防腐涂层中，其电化学性能与商用钴蓝颜料相当，但成本更低。本研究为基于天然黏土矿物的钴蓝颜料绿色规模化制

备提供了可行策略，兼具经济性和多功能性。

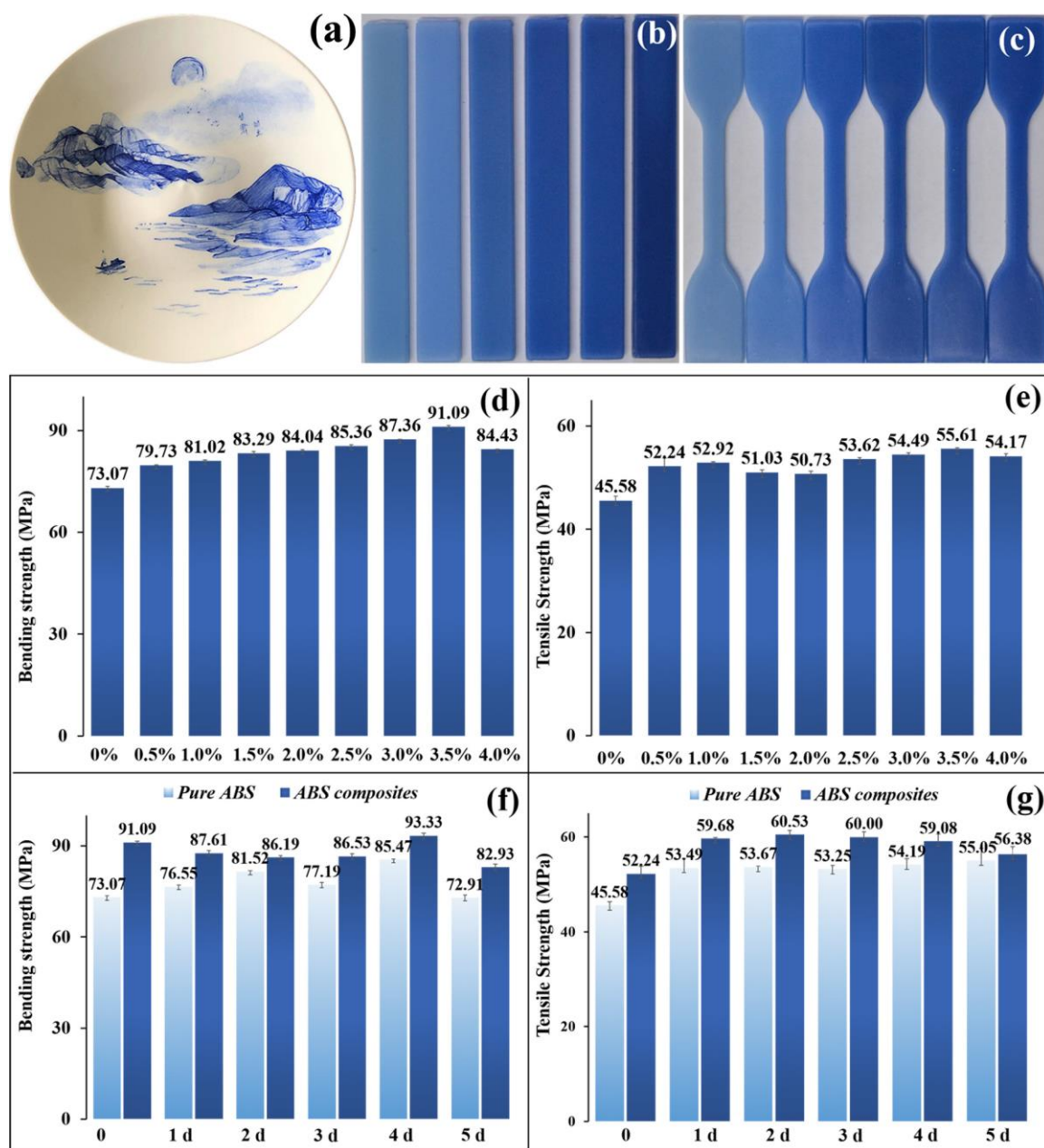


图 2. (a) “中国山水”釉下瓷板数码照，不同时间老化前后含有不同含量 WMDPa/CB 的 ABS 弯曲(b)和拉伸(c)样条的数码照、拉伸强度 (d、f) 和弯曲强度 (e、g)。

文章来源: Hao Yang, Bin Mu*, Lei Wu, Aiqin Wang*. *Facile and scalable extrusion fabrication of multifunctional cobalt blue nanocomposite pigments based on natural mixed-dimensional palygorskite clay* [J]. *Applied Clay Science*, 2025, 265: 107676. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2024.107676>

屏蔽紫外线的 CeO_2 /凹凸棒石/木质素复合材料的构建

紫外线辐射 (UVA 和 UVB) 对人体皮肤具有显著危害, 可能引发晒伤、光老化、DNA 损伤甚至皮肤癌。UVA (320 - 400 nm) 可深入皮肤, 导致光老化和突变, 而 UVB (290 - 320 nm) 则直接诱导 DNA 损伤, 如嘧啶二聚体 (CPD) 的形成。此外, 紫外线还会增加活性氧 (ROS) 的产生, 引发氧化应激、炎症和皮肤早衰。目前, 防晒霜是主要的防护手段, 其成分分为有机和无机两类。有机防晒剂 (如氧苯酮) 因环境残留问题备受争议, 而无机防晒剂 (如二氧化钛和氧化锌) 虽具有光稳定性和广谱防护优势, 但易团聚, 影响分散性和透明度。因此, 开发高效、稳定且环保的新型紫外线防护材料成为研究热点。

木质素 (DL) 作为一种天然芳香族聚合物, 凭借其酚羟基和芳香结构, 展现出良好的紫外线吸收和抗氧化性能, 但其防晒系数 (SPF 3-8) 较低, 难以单独使用。氧化铈 (CeO_2) 纳米颗粒因独特的紫外吸收特性和低毒性, 在抗紫外领域具有潜力, 但易团聚影响性能。凹凸棒石 (ATP) 作为一种天然层状硅酸盐, 可通过散射和反射增强紫外线屏蔽效果。近期研究提出将 CeO_2 、ATP 和 DL 复合, 以结合三者的优势: 木质素提供抗氧化和紫外吸收能力, CeO_2 增强广谱防护, 而 ATP 改善分散性和流变性能。这种仿生复合材料有望克服传统防晒剂的局限性, 为高效、稳定且环境友好的紫外线防护材料开发提供新思路。

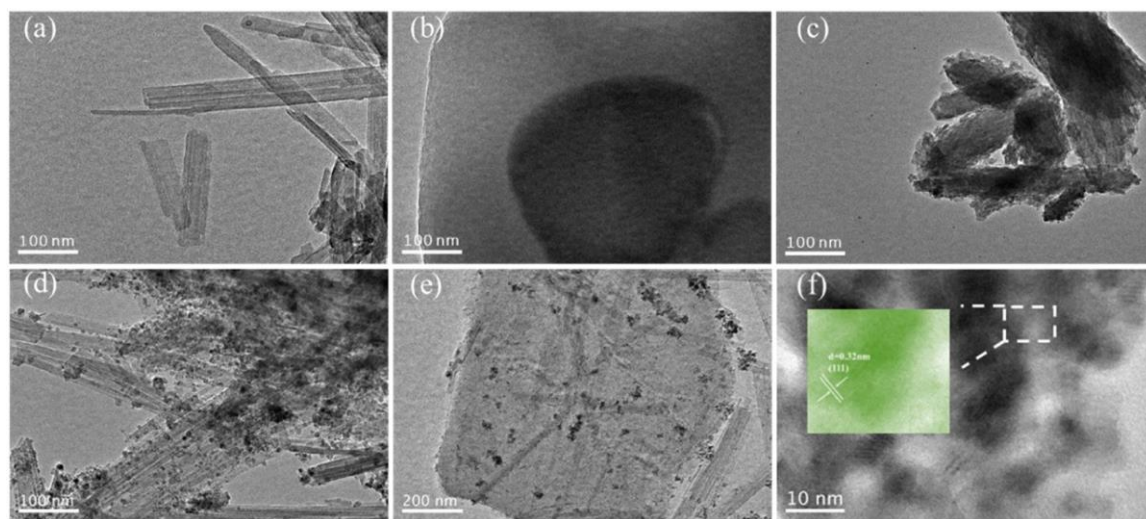


图 1. (a) ATP、(b) DL、(c) CeO_2 /DL、(d) CeO_2 /ATP、(e) CeO_2 /ATP/DL 和 (f) CeO_2 /ATP/DL 的 HRTEM 图像。

本研究以植物叶片的紫外线屏蔽机制为灵感, 采用微波水热法制备了叶状 CeO_2 /ATP/DL 三元纳米复合材料。通过

将凹凸棒石 (ATP) 的吸附特性和骨架稳定性与二氧化铈 (CeO_2) 和木质素 (DL) 相结合, 构建了仿生结构 (图 1)。XRD

分析表明, CeO_2 呈现面心立方结构 (JCPDS 75-0120), ATP 的 (110) 晶面峰因 CeO_2 的掺入向高角度偏移, 表明氧空位增加。FT-IR 证实了复合材料中 Si-O-Ce 键和木质素特征基团的存在。TEM 显示 ATP 呈 20-40 nm 的棒状结构,

CeO_2 纳米颗粒 (5-10 nm) 均匀负载在 ATP 表面, 与 DL 片层形成类叶状组装体, HRTEM 观察到 0.32 nm 的 CeO_2 (111) 晶面间距。XPS 进一步揭示了 $\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$ 混合价态及 Si-O-Ce 键的形成, 证实了界面化学相互作用。

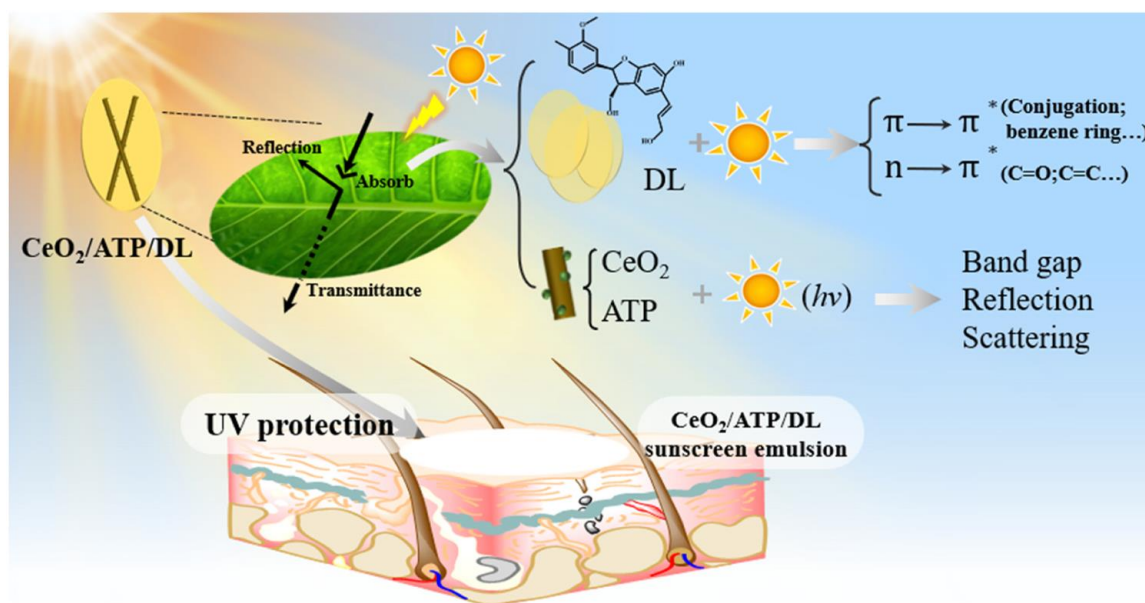


图 2. $\text{CeO}_2/\text{ATP}/\text{DL}$ 展现出优异的紫外屏蔽性能

该复合材料展现出优异的紫外屏蔽性能 (图 2)。UV-Vis 测试表明, 三元复合材料在 200-400 nm 波段具有协同增强效应, CeO_2 的带间电子跃迁与 DL 的广谱吸收共同拓宽了屏蔽范围, 反射率测试显示 ATP 的加入提升了体系光反射能力。光稳定性实验证实材料在 250 W 汞灯照射 2 小时后透光率仍保持稳定。流变学测试显示, $\text{CeO}_2/\text{ATP}/\text{DL}$ 防晒乳液的储能模量 (G') 显著高于二元体系,

线性黏弹区达 0.002% 应变, Arrhenius 方程计算得到的黏流活化能 (12.49 kJ/mol) 表明其具备良好的温度稳定性。SPF 测试显示三元复合材料的防晒指数达 23, 是 CeO_2/DL 的 2.1 倍, 细胞实验证实其能有效清除 CeO_2 产生的 ROS, 降低光毒性。这种仿生设计通过 ATP 骨架稳定 CeO_2 分散、DL 拓宽吸收谱域, 同时优化乳液流变性能, 为安全高效防晒剂开发提供了新思路。

文章来源: Haixia Liu, Chunyan Zhang, Leyan Wei, Chao Yao*, Construction of $\text{CeO}_2/\text{attapulgite}/\text{lignin}$ composites for UV shielding application: Mimicking the block mechanism of plant leaf [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2025, 715: 136665. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2025.136665>

04

政策法规

Policies and Regulations

► 八大新兴产业之一：中国新材料主要产业、发展现状、政策环境、挑战与对策、经验启示及未来趋势

来源：新华国研经济学研究院

（一）新材料产业概述

新材料是指新近发展的或正在研发的、性能超群的一些材料，具有比传统材料更为优异的性能。这些材料在高新技术、国防建设及传统产业的转型升级中发挥着重要作用，成为国家经济发展的基石。新材料按材料性能可分为结构材料和功能材料两大类。结构材料主要利用材料的力学和理化性能，以满足高强度、高刚度、高硬度、耐高温、耐磨、耐蚀、抗辐照等性能要求；功能材料则主要利用材料的电、磁、声、光热等效应，以实现某种功能，如半导体材料、磁性材料、光敏材料、热敏材料、隐身材料和制造原子弹、氢弹的核材料等。

近年来，在国家政策的大力扶持和业内企业的不断努力下，新材料产业持续良好发展势头，市场规模持续扩张，经济效益显著。根据相关数据，中国新材料产业总产值已从 2012 年的约 1 万亿元增加到 2022 年的 6.8 万亿元，年均增速达 20%，在原材料工业中占比达 15%，

形成了全球规模最大、门类最齐全的材料产业体系。新材料产业的快速发展，不仅提升了中国的国际竞争力，也为全球新材料市场注入了强劲的发展动力。

新材料产业在国民经济中的地位日益重要。首先，新材料是高新技术产业的基础，其发展直接关系到新一代信息技术、新能源、高端装备制造等战略性新兴产业的发展。其次，新材料在传统产业的转型升级中也发挥着关键作用，通过提供高性能材料和解决方案，推动传统产业向高端化、智能化、绿色化方向发展。此外，新材料产业的发展还带动了相关产业链的协同发展，促进了就业和经济增长。

新材料产业作为国家战略性新兴产业的重要组成部分，其发展不仅关乎科技进步和产业升级，也对国民经济和社会发展具有深远影响。随着技术的不断进步和市场需求的持续增长，新材料产业将迎来更加广阔的发展前景。

（二）新材料主要产业发展现状

1. 高性能结构材料

高性能结构材料是现代工业和科技

发展的基石，主要包括碳纤维复合材料、高温合金和先进陶瓷等。这些材料因其优异的力学性能和耐环境性能，广泛应用于航空航天、汽车制造与高端设备等领域。

碳纤维复合材料近年来发展迅猛，其强度高、重量轻、耐腐蚀等特性使其成为航空航天领域的首选材料。根据最新数据，全球碳纤维市场需求在 2023 年达到了 10 万吨，预计到 2025 年将增长至 12 万吨。中国在碳纤维领域的研发和生产能力也在不断提升，国产碳纤维在航空航天、风电叶片、体育器材等领域的应用逐渐扩大。

高温合金是航空发动机和燃气轮机的关键材料，其耐高温、抗氧化和抗腐蚀性能使其在极端环境下表现出色。近年来，中国在高温合金的研发和生产方面取得了显著进展，国产高温合金在航空发动机中的应用比例逐年提高，市场规模预计到 2025 年将达到 500 亿元。

先进陶瓷材料以其高硬度、耐磨损、耐高温等特性，在机械、电子、化工等领域有着广泛应用。特别是在高端装备制造中，先进陶瓷材料的应用显著提升了设备的性能和寿命。例如，氧化锆陶瓷在刀具和轴承中的应用，极大地提高了产品的耐磨性和使用寿命。

2. 先进功能材料

先进功能材料主要包括超导材料和纳米材料，这些材料因其独特的电、磁、光、热等性能，在电子信息、新能源与医疗领域展现出巨大的应用潜力。

超导材料在电力传输、磁悬浮列车和医疗设备等领域有着重要应用。近年来，高温超导材料的研发取得了突破性进展，超导电缆和超导磁体在电力系统和医疗设备中的应用逐渐普及。例如，超导电缆在长距离电力传输中的应用，可以大幅减少电力损耗，提高传输效率。

纳米材料因其独特的物理和化学性质，在电子信息、新能源和医疗领域展现出广阔的应用前景。例如，纳米材料在太阳能电池中的应用，可以显著提高光电转换效率；在药物递送系统中的应用，可以实现药物的精准释放，提高治疗效果。根据市场研究数据，全球纳米材料市场规模预计到 2025 年将达到 1000 亿美元。

3. 生物医用材料

生物医用材料主要包括生物相容性材料和药物控释材料，这些材料在医疗器械与生物工程领域有着重要应用。生物相容性材料如聚乳酸、聚己内酯等，因其良好的生物相容性和可降解性，在组织工程和医疗器械中有着广泛应用。例如，聚乳酸在骨科植入物和手术缝合线中的应用，可以减少术后并发症，促进组织愈合。

药物控释材料通过控制药物的释放速率，实现药物的持续稳定释放，提高了治疗效果。例如，药物控释系统在癌症治疗中的应用，可以减少药物的副作用，提高治疗效果。根据相关数据，全球生物医用材料市场规模预计到 2025 年将达到 1500 亿美元。

4. 智能制造材料

智能制造材料主要包括 3D 打印材料和智能仿生材料，这些材料在智能制造领域有着重要应用。3D 打印材料如金属粉末、聚合物和陶瓷材料，因其可定制性和高效性，在航空航天、汽车制造和医疗领域有着广泛应用。例如，3D 打印技术在航空航天领域的应用，可以实现复杂结构件的快速制造，提高生产效率。

智能仿生材料通过模拟生物体的结构和功能，实现材料的智能化。例如，

智能仿生材料在机器人领域中的应用，可以实现机器人的感知和响应功能，提高机器人的智能化水平。根据市场研究数据，全球智能制造材料市场规模预计到 2025 年将达到 500 亿美元。

高性能结构材料、先进功能材料、生物医用材料和智能制造材料作为新材料产业的重要组成部分，其发展现状和应用前景广阔。随着技术的不断进步和市场需求的持续增长，这些材料将在更多领域展现出巨大的应用潜力。

（三）新材料产业政策环境

1. 国家政策支持

近年来，国家高度重视新材料产业的发展，出台了一系列政策文件，为产业发展提供了强有力的支持。2015 年，《新材料产业发展指南》发布，明确了

2021 年，中共中央、国务院印发了《国家标准化发展纲要》，强调加强关键技术领域标准研究，推动新材料等应用前景广阔的技术领域实现技术研发、标准研制与产业推广的同步发展。同年，工业和信息化部联合科学技术部、自然资源部印发了《“十四五”原材料工业发展规划》，提出到 2025 年，新材料产业规模持续提升，占原材料工业比重明显提高，初步形成更高质量、更好效益、更优布局、更加绿色、更为安全的产业发展格局。

这些政策的出台，不仅为新材料产业的发展指明了方向，还通过资金投入、

新材料产业发展的目标和任务，提出了重点发展领域和方向。随后，《国家新材料生产应用示范平台建设方案》出台，旨在通过建设示范平台，推动新材料的应用和产业化进程。

税收优惠等措施，激发了企业的创新活力，推动了产业的快速发展。例如，国家通过设立新材料产业基金，支持了一批关键技术的研发和产业化项目，加速了新材料产品的市场应用。

2. 地方政策响应

在国家政策的引导下，各地方政府也纷纷出台相关政策和措施，积极推动本地新材料产业的发展。这些政策主要包括税收优惠、资金扶持、人才引进等方面。例如，江苏省出台了《江苏省新材料产业发展行动计划》，明确了到 2025 年新材料产业规模达到 2 万亿元的目标，并提出了具体的支持措施，包括设立新

材料产业发展专项资金、支持企业技术创新和产业化项目等。广东省则通过《广东省加快新材料产业发展的若干政策措施》，对新材料企业给予税收减免、贷款贴息等优惠政策，并积极引进国内外高层次人才，推动新材料产业的集聚发展。

地方政府的这些政策措施，不仅为本地新材料企业提供了良好的发展环境，还吸引了大量社会资本和人才资源，促进了产业快速发展。例如，江苏省和广东省的新材料产业规模在全国名列前茅，成为推动区域经济发展的重要力量。

3. 法规标准建设

随着新材料产业的快速发展，国家加强了对新材料产业的法规标准建设，以确保产业的健康有序发展。近年来，国家陆续出台了一系列法规和标准，涉及新材料的生产、应用、检测等多个方

面。例如，工业和信息化部发布了《新材料产业标准化工作指南》，明确了新材料产业标准化工作的目标和任务，提出了重点领域和关键技术的标准化要求。环境保护部则出台了《新材料环境保护管理办法》，对新材料生产过程中的环境保护提出了具体要求，确保新材料产业的绿色发展。

这些法规和标准的出台，不仅规范了新材料产业的生产和应用，还提高了产品的质量和安全性，促进了产业的可持续发展。例如，通过标准化建设，新材料产品的质量得到了有效提升，市场竞争力显著增强。国家和地方政府的政策支持以及法规标准建设，为新材料产业的发展提供了良好的环境和保障。随着政策的不断完善和落实，新材料产业将迎来更加广阔的发展前景。

（四）新材料产业发展挑战与对策

1. 发展挑战

尽管中国新材料产业在过去几年中取得了显著进展，但仍面临诸多挑战。

（1）技术创新能力不足是制约产业发展的关键因素。尽管中国在新材料领域投入了大量研发资源，但在核心技术和关键材料方面仍存在较大差距。例如，高性能碳纤维、高温合金等高端材料的自主研发和生产能力仍需提升，导致部分高端产品依赖进口。

（2）高端产品供给不足也是当前面临的重要问题。尽管中国新材料产业规模庞大，但在高端产品领域，如半导体

材料、生物医用材料等，国产化率仍然较低。这不仅限制了国内相关产业的发展，也增加了对国外市场的依赖。

（3）产业集中度较低也是制约新材料产业发展的重要因素。中国新材料企业数量众多，但规模普遍较小，缺乏具有国际竞争力的龙头企业。这导致产业资源分散，难以形成规模效应和协同效应，限制了产业的整体竞争力。

国际贸易环境的不确定性也带来了新的挑战。近年来，全球贸易保护主义抬头，贸易摩擦频发，对中国新材料产业的出口和国际化发展带来了不利影

响。例如，某些国家对关键材料的出口限制，增加了中国企业的采购成本和供应链风险。

市场竞争激烈也是不容忽视的挑战。随着全球新材料产业的快速发展，各国纷纷加大研发投入，市场竞争日益激烈。中国新材料企业不仅要面对国内市场的竞争，还要应对来自国际巨头的挑战。这要求企业在技术创新、产品品质和市场拓展等方面不断提升竞争力。

2. 发展对策

面对上述挑战，中国新材料产业需要采取一系列对策，以实现可持续发展。首先，建立和完善相关体系标准是当务之急。通过制定和实施统一的标准，可以规范新材料的生产和应用，提高产品质量和安全性。例如，制定新材料的环境保护标准，可以推动产业的绿色发展，减少对环境的影响。其次，加速新材料产业结构调整是提升产业竞争力的关键。通过优化产业结构，培育一批具有国际竞争力的龙头企业，可以形成规模效应和协同效应。例如，支持企业通过并购重组、战略合作等方式，实现资源

整合和优势互补，提升整体竞争力。

加强技术创新及技术改造是推动产业升级的重要手段。通过加大研发投入，支持关键技术的研发和产业化，可以提升自主创新能力。例如，设立新材料产业基金，支持企业开展技术创新和产业化项目，可以加速新材料的研发和应用。推进新材料产业升级也是重要策略之一。通过推动传统材料向高性能化、多功能化、绿色化方向发展，可以提升产品的附加值和市场竞争力。例如，鼓励企业采用先进制造技术，提高生产效率和产品质量，推动产业向高端化方向发展。加强国际合作也是应对挑战的重要策略。通过与国际先进企业、研究机构开展合作，可以引进国外先进技术和管理经验，提升国内企业的竞争力。例如，参与国际新材料领域的合作项目，可以促进技术交流和资源共享，推动产业的国际化发展。

中国新材料产业在面对诸多挑战的同时，也迎来了新的发展机遇。通过采取有效对策，可以推动产业的可持续发展，实现从材料大国向材料强国的转变。

（五）新材料产业发展经验启示

1. 国内外发展经验

美国、日本和欧洲等国家在新材料领域的发展经验对中国具有重要的借鉴意义。这些国家通过长期的技术积累和政策支持，在新材料领域取得了显著成就。

美国：美国在新材料领域的发展得

益于其强大的科研实力和创新能力。美国政府通过《国家纳米技术计划》和《材料基因组计划》等一系列国家级计划，大力支持新材料的基础研究和应用开发。此外，美国企业对新材料的研发投入巨大，许多跨国公司在新材料领域拥有核心技术。例如，特斯拉在电动汽车

电池材料方面的创新，推动了全球新能源汽车产业的发展。

日本：日本在新材料领域的发展主要依靠其强大的制造业基础和精细化管理能力。日本政府通过《第五期科学技术基本计划》等政策文件，明确了新材料产业的发展方向，并提供了大量资金支持。日本企业在材料研发和生产方面具有世界领先的技术水平，例如，东丽公司在碳纤维材料领域的研发和生产能力，使其成为全球碳纤维市场的领导者。

欧洲：欧洲国家在新材料领域的发展得益于其强大的科研合作和产业联盟。欧盟通过《地平线 2020 计划》等项目，支持新材料的基础研究和产业化应用。欧洲企业通过跨国合作和产业联盟，实现了资源共享和技术互补。例如，空客公司在航空航天材料方面的研发和应用，推动了欧洲航空航天产业的发展。

中国经验：中国在新材料领域的发展经验主要体现在政策支持和产业集聚方面。近年来，中国政府通过一系列政策文件和资金支持，大力推动新材料产业的发展。例如，《新材料产业发展指南》和《国家新材料生产应用示范平台建设方案》等政策的出台，为产业发展提供了明确的方向和有利的支持。此外，中国通过产业集聚和园区建设，形成了多个新材料产业基地，如江苏常州、浙江宁波等地的产业园区，吸引了大量企业和人才，推动了产业的快速发展。

然而，中国在新材料产业发展中也面临一些挑战，如技术创新能力不足、

高端产品供给不足等。通过借鉴国外经验，中国可以进一步加强基础研究，提升自主创新能力，推动新材料产业的可持续发展。

2. 成功案例分析

中材科技：中材科技是中国新材料领域的领军企业之一，主要从事高性能纤维材料、复合材料和新能源材料的研究和生产。中材科技通过持续的研发投入和技术创新，在碳纤维复合材料领域取得了显著成就。其产品广泛应用于航空航天、风电叶片、体育器材等领域，市场竞争力不断提升。中材科技的成功经验在于其强大的研发能力和市场拓展能力，通过不断推出高性能产品，满足市场需求，实现了快速发展。

金发科技：金发科技是中国领先的改性塑料生产企业，主要从事高性能改性塑料、生物降解材料和特种工程塑料的研究和生产。金发科技通过技术创新和产品升级，在汽车、家电、电子等领域取得了显著成就。其产品具有优异的性能和环保特性，深受客户青睐。金发科技的成功经验在于其强大的技术创新能力和市场适应能力，通过不断推出高性能、环保型产品，满足了市场对绿色环保材料的需求。

万华化学：万华化学是中国新材料领域的龙头企业之一，主要从事聚氨酯材料、精细化工材料和特种材料的研究和生产。万华化学通过持续的研发投入和技术创新，在聚氨酯材料领域取得了世界领先的技术水平。其产品广泛应用

于建筑、家电、汽车等领域，市场竞争力不断提升。万华化学的成功经验在于其强大的研发能力和国际化战略，通过不断推出高性能产品，拓展国际市场，实现了快速发展。

启示：这些企业的成功经验对其他企业具有重要的启示。首先，持续的研发投入和技术创新是提升企业竞争力的关键。通过不断推出高性能产品，满足市场需求，可以实现快速发展。其次，

市场拓展能力也是企业成功的关键因素。通过不断拓展市场，扩大市场份额，可以实现企业的可持续发展。此外，国际化战略也是企业发展的重要方向。通过拓展国际市场，提升国际竞争力，可以实现企业的长远发展。

中国新材料产业的发展需要借鉴国内外成功经验，通过加强技术创新、提升产品质量、拓展市场空间，推动产业的可持续发展。

（六）新材料产业未来发展趋势

1. 技术创新趋势

随着科技的不断进步，新材料技术正朝着高性能化、多功能化、智能化、绿色化等方向发展。高性能化是材料科学永恒的追求目标，新型碳纤维、纳米

多功能化是未来材料发展的重要趋势。通过材料设计实现多种功能的集成，如自修复材料、形状记忆合金等，这些材料不仅具备传统材料的力学性能，还具有自我修复、形状记忆等特殊功能，极大地拓展了材料的应用范围。

智能化是材料科学的前沿领域。通过引入传感器、驱动器等智能元件，材料能够感知环境变化并做出相应反应。例如，智能纺织品可以根据体温变化调节透气性，智能建筑材料可以自动调节光线透过率。

绿色化是可持续发展的必然要求。生物基材料、可降解材料等环保型材料正逐渐取代传统石化基材料。例如，聚乳酸（PLA）等生物降解材料在包装、医

材料、超导材料等高性能材料不断涌现，其强度、韧性、耐温性等关键性能指标持续提升。例如，石墨烯材料的发现和应用，为高性能电子器件和能源存储设备带来了革命性突破。

疗等领域得到了广泛应用，有效减少了环境污染。

跨学科、跨领域的融合创新正在加速新材料技术的发展。材料科学与生物技术、信息技术、纳米技术等领域的交叉融合，催生了众多新兴研究方向。例如，生物医用材料与纳米技术的结合，产生了纳米药物载体、纳米生物传感器等创新产品；材料科学与信息技术的融合，推动了智能材料的发展。

2. 市场需求趋势

新能源汽车、消费电子、半导体等下游行业的快速发展，正在推动新材料需求的持续增长。新能源汽车对轻量化材料、高性能电池材料的需求日益旺盛。例如，碳纤维复合材料在车身结构中的

应用，可以显著降低整车重量，提高续航里程；高性能锂电池材料的发展，直接关系到电动汽车的性能提升。

消费电子行业对新型显示材料、特种玻璃、先进陶瓷等材料的需求也在不断增加。柔性显示技术、3D 显示技术等新兴技术的应用，催生了新型显示材料的市场需求。例如，OLED 显示材料凭借其优异的显示效果和低能耗特性，正在逐步取代传统 LCD 显示技术。

半导体行业对高纯度化学品、硅片、先进封装材料等新材料的需求持续增长。随着 5G、人工智能等新兴技术的快速发展，半导体产业对高性能材料的需求将进一步扩大。例如，碳化硅（SiC）和氮化镓（GaN）等第三代半导体材料，凭借其优异的性能，正成为功率器件和射频器件的主流选择。绿色环保和智能制造正在成为新材料市场的主流趋势。

消费者对环保产品的需求不断增加，推动了生物基材料、可降解材料等环保型材料的发展。例如，生物基聚乙烯（PE）、聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）等材料在包装领域的应用，正在逐步取代传统石化基材料。智能制造技术的应用，正在推动新材料产业的转型升级。例如，3D 打印技术的快速发展，为新材料的设计和制造提供了新的可能性。通过 3D 打印技术，可以实现复杂结构件的一体化制造，提高生产效率和材料利用率。

3. 产业链整合趋势

新材料产业链的整合正在加速进行，呈现出产业集群化、专业化、国际化等发展趋势。产业集群化是提升产业竞争力的重要途径。通过产业集聚，可以实现资源共享、技术互补，降低生产成本，提高生产效率。例如，江苏常州、浙江宁波等地的产业集群，吸引了大量新材料企业，形成了完整的产业链条。

专业化是未来新材料产业发展的重要方向。通过专业化分工，可以提高生产效率和产品质量。例如，专注于某一类材料研发和生产的企業，可以集中资源进行技术创新和产品升级，形成核心竞争力。

国际化是推动新材料产业发展的重要趋势。通过国际合作，可以引进国外先进技术和管理经验，提升国内企业的竞争力。例如，中国企业与国外企业开展技术合作，共同开发新产品，开拓国际市场。产业链上下游的整合也是未来发展的重要趋势。通过产业链整合，可以实现资源优化配置，提高产业整体竞争力。例如，上游原材料企业与中游新材料制造企业开展战略合作，可以确保原材料供应的稳定性和质量，降低生产成本。

新材料产业在技术创新、市场需求和产业链整合等方面呈现出强劲的发展趋势。随着科技的不断进步和市场的持续增长，新材料产业将迎来更加广阔的发展前景，为经济社会发展做出更大贡献。

凹凸棒石生物医用材料交流研讨会

○来源：甘肃省黏土矿物重点实验室

2025年3月19日，中国科学院兰州化学物理研究所与甘肃省中心医院举办了凹凸棒石生物医用材料交流研讨会。甘肃省黏土矿物重点实验室杨芳芳、王晓梅助理研究员分别作了题为“凹凸棒石纳米复合材料绿色构筑及抗菌应用”和“凹凸棒石止血材料研究进展”的交流报告，介绍了团队在植物介导绿色合成凹凸棒石基矿物复合纳米酶与抗菌应用和凹凸棒石止血材料与机制研究方面的阶段性进展。甘肃省中心医院科研中心二部赵红斌主任作了题为“创新发展

合作共赢”的交流报告，介绍了中心科研二部的组织架构、人才队伍、实验平台建设和重点研究方向。

随后，与会人员围绕凹凸棒石生物医用材料构筑与应用研究中的关键科学问题，从材料学与临床医学视角展开研讨，进一步明确了后续研究内容和双方合作方向。通过交流，双方表示充分发挥各自研究优势，深化学科交叉、平台联动和协同创新合作机制，共同推进凹凸棒石生物医用材料向特色化和产业化方向发展。



全国非金属矿产品及制品标准化技术委员会召开年会暨标准审议研讨会

○来源：中国硅酸盐学会

2025年3月5日至7日，由全国非金属矿产品及制品标准化技术委员会，摩擦材料、鳞片石墨、微晶石墨、人造石墨、黏土与黏土矿物分技术委员会主办，咸阳非金属矿研究设计院有限公司承办，中国摩擦密封材料协会、黄山菲英汽车零部件有限公司、布鲁克（北京）科技有限公司、合肥安晶龙电子股份有限公司、四川普瑞晟科技有限公司、浙江沃斐立生物科技有限公司、丹东浩元仪器有限公司等协办的“全国非金属矿产品及制品标准化技术委员会年会暨标准审议研讨会”在安徽合肥顺利召开。本次会议的主题为“强化标准引领 促进高质量发展”，旨在贯彻党的二十大和二十届三中全会精神，全面落实中共中央、国务院《国家标准化发展纲要》等文件要求，进一步强化标准化在推进新质生产力发展，建设现代化产业体系的基础保障和技术引领作用，系统总结2024年度标委会工作内容，并对下一阶段重点工作进行部署。会议由中国建筑材料联合会特别副会长、中国摩擦密封材料协会荣誉会长、全国非金属矿产品及制品标准化技术委员会副主任委员、摩擦材料分技术委员会主任委员王耀主持。中国建筑材料联合会特别副会长、中国非金属矿工业协会会长、全国非金属矿产品及制品标准化技术委员会主任委员潘

东晖作了题为《深化非金属矿产品及制品领域标准化改革 为推进中国式现代化做出更大贡献》的重要讲话，咸阳非金属矿研究设计院有限公司副总经理、全国非金属矿产品及制品标准化技术委员会秘书长侯立兵作了题为《坚定标准化引领步伐 奋力谱写非金属矿行业高质量发展新篇章》的工作报告。



潘东晖以“以科技创新为引领，强化行业研发实力”、“以技术装备升级为导向，提升行业智能化水平”、“以高质量标准为载体，支撑行业高质量发展”三方面为主题进行分享。他提出，“十五五”期间非金属矿行业的科技创新应围绕以下几个方面展开：一是以全球非金属矿基础科学和未来产业为牵引，凝聚一批重大科学、技术问题并加强基础理论和应用技术开发研究；二是以国家重大战略需求为牵引，研发特种高性能矿物功能新材料；三是以资源绿色生态为牵引，研发新一代非金属矿开采技术；四是以国家战略性矿产和非金属矿重点矿产为



牵引，研发选矿及材料制备等先进技术与装备；五是以高端生物医药需求为牵引，研发纳米矿物精深加工技术；六是以支撑现代农业为牵引，研发土壤改良与治理、新型矿物肥料用矿物功能材料；七是以满足国家重大工程建设需求为牵引，研发环境治理等矿物功能材料；八是以保障人民安全健康为牵引，研发新型黏土矿物基复合材料和多功能复合阻燃材料。“十五五”发展期间，非金属行业要结合自身的发展特点，一方面要围绕“集约化转型、精细化转型、数字化转型、绿色化转型”的任务，为未来产业和战略性新兴产业发展提供更多更优的矿物功能材料支撑；另一方面要重视信息技术对传统非金属矿工业的赋能加持，对产业各环节进行充分的信息化、数字化、智能化及智慧化改造，建立覆盖整条生产线的成套集中控制系统，推动产业获得新的竞争优势和发展模式。标委会要加强提升标准质量水平，释放

标准倒逼和引领的效能，不断提升标准体系的开放融合水平。同时，加快制修订能源资源消耗、污染物排放、碳足迹、循环利用、数字化转型等重点标准，打通行业优化升级的质量基础链条。

侯立兵从“抓好标准制修订工作，提升标准质量水平”、“深化标委会建设管理，发挥平台赋能效应”、“推行标准化会议活动，加强业内人士交流”、“查找标准化工作问题，创新标准工作模式”、“明确标准化目标任务，谱写标准化新篇章”五部分展示了2024年标委会及各分技术委员会完成的工作，对标准制修订工作各个阶段的成果、标准化科研、秘书处管理及分委会管理、标准化活动等工作内容进行了深入介绍，对标准化工作问题进行反思及总结，并就下一步标准化工作目标作出部署。

会上，对安徽飞鹰汽车零部件股份有限公司等10家标准化工作先进单位、黄志强等9名标准化工作先进个人进行



了表彰。先进单位及先进个人为行业树立了卓越标杆，鼓励行业内更多企业和个人投身非金属矿产品及制品标准化建设，为推动非金属矿产品及制品标准化的高质量发展注入源源不断的动力。全国非金属矿产品及制品标准化技术委员会第四届摩擦材料分技术委员会、第二届鳞片石墨分技术委员会、第二届人造石墨分技术委员会、第二届微晶石墨分技术委员会成立大会上分别审议了各分技术委员会章程、秘书处工作细则。新成立分技术委员会主任委员代表、全国非金属矿产品及制品标准化技术委员会

第二届鳞片石墨分技术委员会主任委员、咸阳非金属矿研究设计院有限公司标准研发中心主任张红林代表分标委会作了题为《构建标准新格局 引领非金属矿产业高质量发展》的讲话。从“顶层设计，建立新型标准体系，打造产业标准化全链条布局”、“深耕细作，加强科技创新，促进标准化工作深度发展”、“锚定需求，组织标准宣贯，提升标准工作社会影响力”、“科学严谨，提升标准质量，打造高水平专业队伍”、“深化协作，提升国际标准化工作能力，引领全球规则共建”五个方面对分委会接下来的标准化工作进行规划，并代表分标委会表态，要充分发挥引领和协调作用，广泛凝聚各方智慧与力量，在大标委会的指导下，积极推动分技术委员会各项工作高效开展，努力在非金属矿产品及制品产业发展中作好标准支撑与引领，为推进产业高值、高质发展不断努力。



中国科学院兰州化学物理研究所研究员王爱勤、成都俊马密封科技股份有限公司技术总监高冠英、清华大学核能与新能源技术研究院副研究员周湘文、上汽大众底盘制动系统集成试验团队负责人李东、西南科技大学教授孙红娟、合肥大学教授秦广超、矿冶科技集团选矿研究设计所首席专家申士富、四川厚全集团营养总监何国茹、中科院上海应用物理研究所研究员曾广礼、珠海格莱利摩擦材料股份有限公司技术副总监易汉辉、齐鲁工业大学教授/博士生导师刘世权、丹东浩元仪器有限公司销售经理乔志伟分别以：《开拓混维凹凸棒石黏土功能应用新途径》、《密封材料性能测试的回顾与前瞻》、《高温气冷堆中的石墨材料》、《乘用车摩擦材料在长下坡山路工况的整车测试验证》、《光伏坩埚用高纯石英原料判别方法及提纯工艺》、《非金属矿物材料高质量发展与标准化建设探讨》、《石墨选矿工艺及装备进展》、《非金属矿在饲料行业中的应用》、《石墨气体渗透率测量方法》、《摩擦材料 MPU 探究》、《硅酸盐类无机非金属矿物及尾矿和固体废弃物在玻璃中的应用》、

《XRD-Rietveld 法测定蒙脱石中杂质相的定量分析方法》为题作技术交流，专家们从专业视角对行业前沿技术提供了深度的解读与指导。技术交流环节，代表们踊跃发言，气氛热烈。此次交流将进一步促进资源共享与协同创新，为构建更加完善、先进的非金属矿产品及制品行业标准化生态奠定坚实基础。

本次会议分组审议了《石墨和萤石中有害元素限量要求》等 17 项国家标准、建材行业标准、CSTM 团体标准；研讨了《石墨和萤石单位产品能源消耗限额》等 13 项国家标准、建材行业标准。审议研讨会中，各方代表针对标准中的技术指标、操作规范、适用范围等关键内容，进行了探讨交流，极大地提升了标准的科学性与实用性，使其能够更好地发挥引领行业发展、规范市场秩序的重要作用。

郴州市市场监督管理局、中国建筑材料联合会、中国非金属矿工业协会、中国摩擦密封材料协会、咸阳非金属矿设计研究院有限公司等单位领导及行业内知名专家出席了本次会议，参会专家、代表共 300 余名。



06

媒体聚焦
Media Focus

临泽：“石”力破局 “质”造升级

○来源：甘肃经济日报

在河西走廊腹地，临泽县这座戈壁小城因占据全球 63% 的凹凸棒石储量而备受关注。曾经受困于提纯技术和应用局限的“红石头”，如今正通过科技赋能，走出一条从资源开发到高值利用的转型之路。

记者在甘肃惠临实业发展有限公司年产 10 万吨凹凸棒石选矿生产线车间看到，工人将凹凸棒石原矿送入生产线进料口，经过粉碎研磨、分筛、重磨等一系列加工工艺流程，就变成了品质高、卖相好的凹凸棒石粉。

“我们依托凹凸棒石矿产资源，以开发和深加工为主攻方向，推动企业创新发展。目前已拥有肥料、饲料添加剂、污水处理剂等多条生产线，生产 6 大类产品。2024 年底，与北京科技大学、兰州理工大学合作开发实施的中低温 SCR 脱硝催化剂模块项目，经过科研团队的研究、中试，现在进入项目科研初步设计阶段，今年将作为公司的主打产品推向市场。”甘肃惠临实业发展有限公司总经理张建虎说。

2017 年以来，临泽县将凹凸棒石产业作为全县战略性新兴产业、工业经济的主攻方向和县域经济新的增长点，通

过科研院所技术支撑、园区建设筑巢引凤、招商引资重点突破、优质服务创新驱动，全力推进凹凸棒石产业做大做强。临泽县委、县政府先后投资 4 亿元，建成 3.95 平方公里的凹凸棒石初级加工园区和 6.75 平方公里的科技创新园区，不断完善水、电、路、供暖、排污等基础设施。



同时，深化与中国科学院兰州化学物理研究所、中国矿业大学等 40 余所科研院所合作，柔性引进 40 多所科研院校的 80 多位科研人员，实施开放性课题研究 29 项，申报专利 114 项，转化科研成果 17 项，批复设立省级科研平台 5 家，发布《土壤调理材料用凹凸棒石团体标准》《凹凸棒石基生物有机肥团体标准》。

随着一项项科研成果的落地转化，一家家企业的相继落户，临泽的凹凸棒石正实现从“红石头”向“白金粉”的

价值裂变。



据介绍，在临泽县 61 万亩耕地中，盐碱地曾占耕地面积的 24.56%。过去，农民开荒盐碱地，主要利用“高抬田、深挖沟”排碱模式改良土壤，导致农田沟壑纵横、土地细碎化。这几年，临泽县会同中国科学院兰州化物所、西北师大、河西学院等 40 多个科研团队持续开展研究，研发出凹凸棒石基新材料、退化土壤修复材料、肥料、饲料等 40 多个系列产品。凹凸棒石基生物有机肥、土壤调理剂等提升耕地质量、调节土壤酸碱度、保墒抗旱、改善连作障碍、补充土壤有机质、增加中微量元素、抑制病虫害等方面具有得天独厚的优势，可有效提升耕地质量。

“以前我们这一片地盐碱化程度很重，这几年使用凹凸棒石基肥料，玉米



明显长得好了，出苗率也高了。再加上现在都是水肥一体化，配方科学，玉米产量明显提高。”鸭暖镇古寨村村民党兴虎说。

借助科技的东风，临泽县聚焦打造国家级凹凸棒石新材料产业集群，围绕“六料”发展方向，坚持“五专”机制推进，扶持引导企业抢抓政策机遇，加快设备更新和产品升级改造，持续扩大市场占有率，不断增强市场竞争力。



2025 年，临泽县计划推进 10 个重点项目，同步支持奋君、鼎丰源、惠临等 5 家企业实施智能化、绿色化、高端化改造，培育“高成长、高技术、高产值”企业集群。同时，紧盯华润、中建材等行业龙头，重点引进环保材料、纳米功能性材料等项目，力争年内新增 3 家延链补链企业，申报市县科技项目 3 项以上，推动沙性土壤改良剂、养殖水体净化剂等 5 项新产品落地。同步引导惠临、科之洁等企业升规入库、申报高新技术企业，构建“产供销”一体化生态，确保凹凸棒石产值有更大突破。

临泽：谱写凹凸棒石产业融合新篇章

○来源：临泽县融媒体中心

近年来，临泽县多措并举引导凹凸棒石产业发展，全力推动产业扩张与强化。作为一种具有层状结构的含水镁铝硅酸盐黏土矿物，凹凸棒石因其卓越的胶体性质、吸附能力、载体功能及增强补强特性，在众多领域得到广泛应用。临泽县的凹凸棒石矿床主要集中于板桥镇北部山区及阳台洼地区，覆盖面积达300平方公里，该矿床由湖泊沉积形成，为混合维度凹凸棒石黏土矿，含有蒙脱石、伊利石、石英、高岭石等二维纳米黏土矿物，并富含锌、硒、硼、锶等20余种微量元素，具备开采容易、交通便捷、开发成本低等优势。

科学规划引领高质量发展。已完成《凹凸棒石产业集中区发展规划》等系列规划文件的编制，包括《特色产业发展规划》《科技创新园区控制性详规》《初级加工园区控制性详规》以及《张掖市产业发展规划（2023—2030年）》。采矿权与探矿权的设置分别为4个和2个，面积总计11.29平方公里，年开采能力14.5万吨。

园区建设夯实发展基础。总计投资4亿元，建设了4平方公里初级加工区和6.75平方公里科技创新区，完善了水电气等基础设施。日处理能力2000立方米的污水处理设施及29兆瓦热源厂等关键项目已投入运营，提升了园区的基础设施和承载能力。

科技创新驱动产业升级。与中科院兰化所等40多家科研机构开展战略合作，成立了甘肃省产业创新战略联盟，投入资金900万元进行29项课题研究，申请专利114项，已有13项成果实现或正实现产业化，3家企业被认定为高新技术企业，5家省级研发平台获得批准。

产业集群初具规模。吸引西安森绿、科之洁等14家企业投资建厂，惠临公司等项目的投产标志着全产业链的初步形成，涵盖了高值化综合利用、有机肥生产、高分子木塑板材、低温脱硫脱硝模块及伴生石膏综合利用等多个环节。

开放合作拓展发展空间。与江苏盱眙、安徽明光建立友好关系，共建“双飞地”园区，构建产业发展战略联盟，推动区域协同发展。定期举办高层论坛、学术研讨会、产业交流会和专题招商活动，提升了临泽凹凸棒石产业的知名度与影响力。



硅酸盐矿物复合固态电解质：新能源领域高值化应用的重要方向——专访中国科学院兰州化物所副研究员杨燕飞

来源：中国硅酸盐学会



2025年3月18日到19日，由中国粉体网主办的2025全国固态电池技术交流大会暨第一届干法电极技术研讨会在安徽蚌埠隆重召开，会议期间，我们邀请到了业内专家、学者，优秀企业家代表做客对话栏目，进行访谈交流。本期为您分享的是中国粉体网对中国科学院兰州化学物理研究所副研究员杨燕飞的专访。

中国粉体网：杨老师，请您简单介绍一下你们课题组，以及近年来在固态电池领域的研究成果。

杨老师：我们团队硅基功能材料组隶属于中科院兰州化学物理研究所资源

能源中心，由张俊平研究员领衔，主要聚焦硅酸盐黏土与有机硅润湿性涂层的应用基础研究，涵盖仿生超疏液涂层、锂电池隔膜/固态电解质、太阳能界面蒸发材料等方向。

在固态电池研究方面，我们结合黏土矿物特色资源，围绕国家能源重大需求，开展了一系列创新研究。前期，我们开发了一系列黏土矿物功能化锂电池隔膜，揭示了纳米结构、表面化学特性及其对锂电池性能的调控机制（Angew Chem Int Ed、Adv Energy Mater等）。在此基础上，我们系统研究了五种不同微观结构的黏土矿物对聚合物复合固态电

解质性能的影响，发现纳米片状蒙脱石因其边缘正电荷可促进锂盐解离，形成快速锂离子传输通道。通过丁二腈-锂盐插层改性蒙脱石，我们成功制备了高效锂离子导体材料，大幅提升 PEO 基复合固态电解质的综合性能，并阐明了其锂离子捕获及界面稳定化机理（Angew. Chem. Int. Ed.、Nano Lett.等）。

为突破传统纳米填料难以形成连续锂离子传输通道的瓶颈，我们受神经元结构启发，创新性地在蒙脱石表面原位它具有哪些优势？

杨老师：硅酸盐黏土复合固态电解质是以硅酸盐黏土为主体，通过聚合物基体及功能化纳米材料复合构建的新型电解质体系，在固态电池领域展现出独特优势：(i) 高离子导电性：独特的纳米片状结构可构建丰富的 Li^+ 传输通道，显著提升电解质离子电导率；(ii) 优异力学性能：通过合理设计，实现刚柔并济，有效适应电池充放电过程中的体积变化，提升循环稳定性；(iii) 界面稳定性：良好的聚合物-无机材料相容性，有助于形成稳定的界面相，提高电化学稳定性。与传统无机填料相比，硅酸盐黏土纳米材料具有以下独特优势：(i) 表面丰富的氧活性位点可通过路易斯酸碱相互作用促进锂盐解离，增加自由 Li^+ 浓度；(ii) 天然纳米结构可同时增强材料的机械性能；(iii) 具有来源广泛、成本低廉、环境友好等特点，符合可持续发展理念。这些特性使硅酸盐黏土成为制备高性能复合固态电解质的理想选择，为下一代

生长有机硅纳米线，构建 SNFs@蒙脱石超疏水复合材料。该材料显著提高了 PEO 基固态电解质的离子电导率、迁移数及氧化稳定性。研究表明，蒙脱石作为锂离子富集枢纽，而 SNFs-PEO 界面形成的长程连续通道提供了高效传输路径。进一步在 SNFs 表面引入电负性官能团，增强了氢键网络稳定性，为高性能固态电解质提供了新思路。

中国粉体网：杨老师，请您介绍一下什么是硅酸盐黏土复合固态电解质？

固态电池的发展提供了新的材料体系。

中国粉体网：杨老师，您团队通过有机硅纳米线@蒙脱石超疏水纳米填料与聚合物电解质复合形成硅酸盐黏土复合固态电解质，它的构筑机理是什么？

杨老师：在固态电解质中，构建长程连续 Li^+ 传输通道是实现高效离子输运的核心挑战。传统无机填料，如蒙脱石，难以形成稳定的传输网络。我们受神经元结构及信号传导机制的启发，创新性地在构筑超疏水 SNFs@蒙脱石纳米填料，形成高效的离子传输体系。

仿生神经元结构：通过甲基三氯硅烷在蒙脱石表面可控水解缩合，成功制备有机硅纳米线@蒙脱石，其分支结构在 PEO 基复合固态电解质中构建三维连续离子通道，实现多向高效 Li^+ 传输。

化学增强机制：丰富的表面活性位点增强锂盐与聚合物的 Lewis 酸-碱相互作用，促进锂盐解离，提高自由 Li^+ 浓度；SNFs-PEO 界面构筑长程连续通道，确保稳定的锂离子输运；SNFs 表面接枝电负

性官能团，构建稳定的氢键网络，提升界面稳定性与长循环耐受性。

力学强化作用：SNFs 的复杂分支结构增强了电解质的补强效果，显著提升机械稳定性与循环寿命。

这种仿生设计策略突破了传统填料难以形成稳定连续 Li^+ 通道的瓶颈，为宽温域适用的高性能固态锂金属电池提供了全新材料体系。

中国粉体网：杨老师，这种硅酸盐黏土复合固态电解质应用前景如何？

研究及界面修饰技术，以充分挖掘其在储能领域的潜力。随着技术突破，该材料有望成为新能源领域高值化应用的重要方向，为固态电池的产业化提供关键支撑。

中国粉体网：杨老师，你如何看待目前固态电池的发展形势？商业化还需要多久？

杨老师：固态电池正处于从实验室研发向产业化的关键阶段。近年来，在材料开发、界面优化、规模化制备等方面的突破，为其商业化奠定了基础。

杨老师：硅酸盐黏土凭借其层状结构与丰富资源，在固态电解质领域展现出广阔的应用潜力。其天然纳米通道可显著提升锂离子传输效率，同时，其优异的热稳定性与机械强度可满足高安全性固态电池的需求。在下一代高能量密度电池、柔性电子器件、高温储能系统等领域，硅酸盐黏土复合固态电解质具备独特的优势。

然而，推动该材料的商业化应用仍需进一步优化制备工艺、结构性能关系。目前，高离子电导率固态电解质、界面工程优化、低成本制造工艺的进展正加速固态电池的成熟。

预计在未来 5-10 年内，固态电池将逐步进入商业化阶段，首先应用于高端消费电子与特种领域，随后扩展至电动汽车和大规模储能市场。尽管商业化仍面临成本、工艺、供应链等挑战，但其在安全性、能量密度、循环寿命方面的优势，使其成为下一代电池技术的重点方向。随着技术进步和产业链完善，固态电池的商业化进程将持续加速。

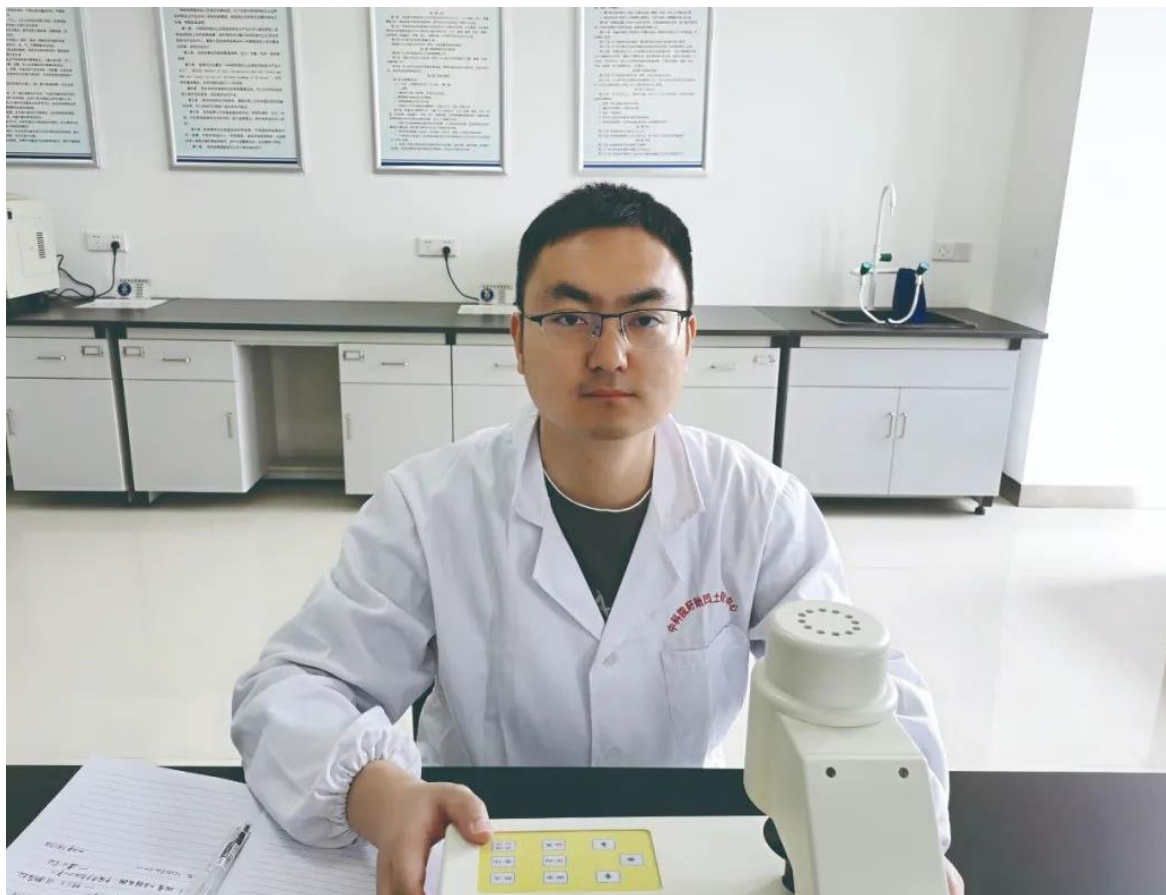
► 新创客 | 臧焱：以工匠之心激活产业新动能

○来源：风流一代

提到江苏盱眙，相信很多人会一秒想到“龙虾”。其实，盱眙县还有一个金字招牌——“中国凹土之都”。凹土，全称凹凸棒石黏土，是一种稀缺性非金属矿产资源，建材、化工、环保、医药、航空等多个领域都离不开它，因此也被

誉为“千种用土、万土之王”。盱眙凹凸棒石资源接近世界已探明储量的一半，多年来，盱眙县委、县政府一直把凹凸棒石产业作为地方特色产业予以重点支持。

盱眙县凹土应用技术研发与成果转



化中心（下文简称“盱眙县凹土研发中心”）副主任臧焱在研究生毕业后，即扎根家乡凹凸棒石特色产业，坚持创新，在产品质量检测、企业技术服务、应用

技术研发、科技成果转化、行业标准制定等方面积极探索，以工匠之心为产业发展贡献青春力量。

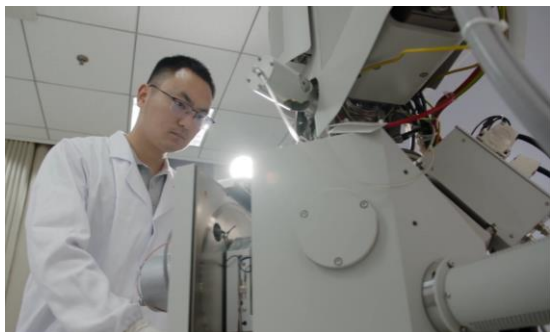
——青春返乡，这里有“用武之地”——

臧焱出生于1991年，是土生土长的盱眙人。他的女朋友也是盱眙人，本科毕业后回到家乡的一所小学任教。“那时我还在南京理工大学读材料学专业的研究生，毕业时，就有了回家找工作的想法，也好和女友团聚。”臧焱说。

彼时，盱眙县凹土研发中心为了获得检验检测机构资质认定，创建了省级重点实验室，正在招聘人才。臧焱一打听，专业正好对口，于是第一时间投递

简历，顺利成为盱眙县凹土研发中心团队的专业技术骨干人员。



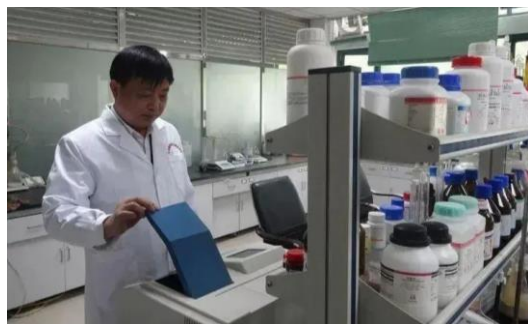


进入工作岗位，臧焱对凹凸棒石有了更多更深的认识。凹凸棒石是一种具有棒状晶体结构的含水富镁的铝硅酸盐矿物。1862年，俄国学者隆夫钦科夫首次在乌拉尔地区发现了这种矿产。它是一种天然的一维纳米材料，有许多特殊的物理化学性质，在农牧业、建材、石油、冶金、食品、化妆品等10多个领域有着广泛应用。比如，在生产色拉油的过程中，要在原油中加入凹凸棒石，过滤掉黄曲霉素等有害成分和杂质；医院在制氧中，需要加入凹凸棒石，吸附氮氧分离时产生的水汽；凹凸棒石还能够吸附去除肠道病原菌，为动物健康养殖提供技术支撑。

世界上率先开发利用凹凸棒石的国家是美国，始于1931年。很长一段时间，由于科技水平跟不上，我国只有三家厂商生产凹凸棒石产品，产量全部加起来还不到1万吨。生产的初级产品，每吨价格只有20元左右。当时，美国把我国凹凸棒石原料或初级产品精加工后又销往中国，每吨价格达到数万元甚至十几万元人民币。

盱眙凹凸棒石产业的开发始于20世纪80年代初。臧焱的师父、盱眙县凹凸棒石研发中心创始人郑茂松正是当地凹凸棒石产业的开拓者。1988年，他带领团队进行凹凸棒石无毒涂料研究，做了一款凹凸棒石涂料产品，慢慢为凹凸棒石产品打开了销路。正是靠着“能吃苦、不服输”的精神，郑茂松带领团队攻克了一个又一个技术难题，成功实现了凹凸棒石从矿物材料到纳米材料的华丽转身，提升了凹凸棒石材料的效能。原来售价200元/吨的凹凸棒石原矿，经过纳米化提纯，蝶变成为每吨售价高达80万元的“精品”。这一“点土成金”的科研成果，让郑茂松团队获得了江苏省科学技术一等奖。

郑茂松是臧焱职场上的第一个导师，臧焱从郑老师身上学到了很多。首先是工匠精神，在这个又脏又累看起来并不高大上的行业，郑茂松扎根40多年，一辈子只想干好研究凹凸棒石这件事；其次是“活到老，学到老”的求学精神。



郑茂松在实验室对凹凸棒石原矿进行检测

——制定标准，为产业“立规矩”——

臧焱是盱眙县凹土研发中心引进的第一个专业对口的硕士学历人才，所以郑茂松很看重臧焱，从技术研发到会议的组织、文字材料的撰写，事无巨细，悉心指导。

臧焱成长也很快，刚参加工作的時候，实验室新进了一批大型仪器设备。当时无人会使用，他便每天埋头实验室，边查资料边摸索，经过3个多月的学习，他掌握了所有仪器设备的使用和数十种检测方法，帮助实验室顺利通过专家评审。从此，盱眙县凹土研发中心成为全国最专业的从事凹凸棒石材料及产品检测的第三方权威机构。

有了这次创建省级重点实验室的成功经验，臧焱在材料检测技术研究上有自己的心得，基于专业能力和实际操作，每年为企业和科研单位提供逾1200样次的分析检测服务，同时为企业提供专业技术咨询。

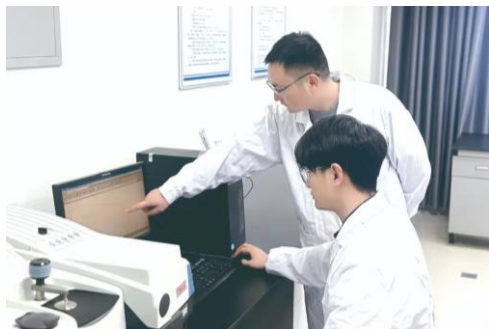
实际工作中，针对未知矿物的鉴定和评价，臧焱总结出一套检测项目和表征手段的标准流程，开发了内标法X射线衍射测定黏土矿物中凹凸棒石含量等多种检测方法，为凹凸棒石黏土的品级评价和综合利用提供了重要技术指导。

凹凸棒石开发利用是一个新兴领域，从1980年盱眙的凹凸棒石原矿被发现，到开启凹凸棒石工业化生产，在产业发展初期并没有关于凹凸棒石产品的国家标准和行业标准，这使得凹凸棒石产品在许多领域都没有“准入证”。同时，不同企业生产出的同类产品

质量上不统一，产品质量也难以控制，市场处于无序状态。“2011年，凹凸棒石主要应用领域锁定在食品添加剂行业，但因为没有凹凸棒石食品添加剂的国家标准，也就无法被列入食品添加剂目录，导致企业无法生产。这个问题给凹凸棒石产业发展造成了巨大阻碍。”臧焱说。

在郑茂松的带领下，团队联合20多位行业专家成立了“全国非金属矿产品及制品标准化技术委员会凹土工作组”，制定了系列凹凸棒石产品标准，既为凹凸棒石企业解决了市场准入的问题，又提升了盱眙县凹凸棒石行业的竞争力。

郑茂松退休后，为行业制定标准成为臧焱工作的重心之一。目前，臧焱已参与起草制定2项国家标准、2项国家行业标准、1项江苏省地方标准、11项团体标准，相关成果获得2021年度江苏省硅酸盐学会科学技术二等奖。他还担任全国非金属矿产品及制品标准化技术委员会黏土分技术委员会委员、中国非金属矿行业团体标准工作委员会委员、江苏省标准化协会理事等专业技术职务，积极与行业标委会沟通，争取申报更多的标准制定计划，完善凹凸棒石产业标准化体系，巩固盱眙在全国凹凸棒石产业的引领地位。



——面向市场，激活产业新动——

为盱眙县凹凸棒石企业提供技术指导，助力凹凸棒石产业做大做强，是臧垚的日常性工作。目前，盱眙凹土科技产业园已集聚凹凸棒石加工企业 64 家，产品类型有 60 多种。在国内市场，盱眙凹凸棒石食用油脱色剂占有率达 75%以上、中空玻璃干燥剂占有率达 80%以上、高粘剂占有率达 60%以上、抗盐粘土占有率达 60%以上。

盱眙凹凸棒石产业在橡胶、工程塑料、生物医药、日用化工、环境工程、纳米功能材料等应用领域取得重大进展与突破，尤其是盱眙凹土科技园承担的“车间制动气路干燥剂 BT-C”项目被列入国家重点新产品计划。其中，“高效环保型凹土预混合饲料添加剂开发”等 10 个项目被列入国家星火计划。

“凹土有很强的吸附性、保水性，由于在养殖、环保、医药等行业的广泛应用，逐渐成为引领乡村振兴的‘黄金钥匙’。”在古桑街道龙潭村“泥土课堂”上，一场别开生面的科普直播课正在进行，主讲人臧垚说：“随着网络入村、电商下乡，如今家乡面貌焕然一新，真的

很高兴能通过直播平台让更多的人认识凹凸棒石、熟悉凹凸棒石，吸引更多人才为家乡发展作贡献。”

臧垚面向大众，积极参与基层科普、公益科普系列活动，开展“泥土课堂——凹凸棒石产业直播讲堂”“党建赋能产业——广场答疑”“党课进车间，服务到一线”等一系列活动，将凹凸棒石专业知识带到基层，让技术服务走进车间一线。

盱眙县凹土研发中心的大楼有大半用于产学研合作。丰富的凹凸棒石矿藏资源以及新兴产业良好的发展前景，吸引了国内外大批高精尖人才来此入驻。中国科学院兰州化物所、中国科学院宁波材料所、中国科学院广州能源所、生态环境部南京环境科学研究所等科研单位先后入驻，成为助力盱眙凹凸棒石产业变革及学术研究发展的智囊。

臧垚始终记得郑茂松老师说过的那句话：“任何科研成果都应该面向市场，如果科研工作离开了产业，离开了市场的需求，那是不成功的科研。”





通知公告

Notice & Announcements

第五届全国矿物材料学术与技术交流会暨第二十三届全国非金属矿加工利用技术交流会第一轮通知

○来源：中国硅酸盐学会

第五届全国矿物材料学术与技术交流会暨第二十三届全国非金属矿加工利用技术交流会计划于 2025 年 8 月 7 日-9 日在甘肃张掖召开。此次会议由中国硅酸盐学会矿物材料分会、中国科学院兰州化学物理研究所、河西学院共同主办。会议拟围绕“科技赋能、绿色创新、协同发展、产业升级”为主题，以硅酸盐矿物材料和非金属矿深加工科学进展和技术创新、矿物材料应用开发和产学研融合为重点，在国家因地制宜发展新质生产力背景下，针对当前矿物功能材料学科领域的热点问题，从矿物材料应用和供给角度开展硅酸盐矿物材料科学研究与非金属矿深加工技术成果交流，以促进硅酸盐矿物材料科学技术创新发展、非金属矿深加工技术进步和产业升级，推动矿物功能材料及非金属深加工产业高质量发展。

会议时间及地点

- 1、会议时间：2025 年 8 月 7 日-9 日，7 日全天报到。
- 2、会议地点：甘肃省张掖市张掖宾馆。

会议主要议题

- (1) 零维矿物材料结构、性能与功能应用
- (2) 一维矿物材料结构、性能与功能应用
- (3) 二维矿物材料结构、性能与功能应用
- (4) 混维矿物材料结构、性能与功能应用
- (5) 凹凸棒石产业高质量发展专题研讨
- (6) 碳酸钙高性能矿物功能材料专题研讨
- (7) 非金属矿深加工技术与产业发展趋势
- (8) 矿物材料与非金属矿深加工工艺与装备
- (9) 矿物材料与非金属矿深加工产品质量检测、表征与性能评价

会议形式

- (1) 大会邀请报告：拟邀请国内外矿物材料与非金属矿深加工领域著名专家学

者以及近年来获得国家 and 省部级科技奖的主要完成人做大会报告。

(2) 分会邀请报告：拟邀请国内矿物材料与非金属矿深加工领域取得重要研究进展的专家以及近年来在研究领域取得标志性成果的学者做专题报告。

(3) 专题分论坛：由部分青年理事作为专题会议召集人组织。邀请有意向申报矿物材料领域中国硅酸盐学会青年科技奖、中国科协青年人才托举工程的青年学者进行学术报告，作为分会向硅酸盐学会推荐依据。会议还将面向青年博士、博士后和研究生，设置优秀口头报告、优秀墙报。

(4) 会议论文集和技术成果集：向《Journal of Materiomics》、《Applied Clay Science》、《硅酸盐学报》、《矿业科学学报》、《中国粉体技术》、《非金属矿》、《矿产保护与利用》、《化工矿物与加工》、《金属矿山》等期刊推荐优秀论文优先发表。

(5) 会议展示：组织技术开发成果和加工工艺、装备、检测仪器仪表展示、企业技术需求发布和产学研合作对接等活动。

征文要求

会议拟出版《会议论文集》(含摘要与技术成果)。论文和技术成果要求围绕会议主题和主要议题，内容有创新、文字精炼，不超过 1500 字(含图表)。论文和技术成果提交截止日期为 2025 年 7 月 15 日。投稿时请注明作者姓名、单位名称、通讯地址及电话、电子邮箱等联络方式。论文以电子格式投递至以下邮箱：mmc2025@126.com。论文格式请参照《硅酸盐学报》期刊要求(模板与范例见学报官网)。

征文范围：

◇各类硅酸盐矿物功能材料及钙质矿物材料的制备、结构、性能与应用基础及技术开发研究。

◇粉体表面改性与复合、破碎磨矿、选矿提纯、粉碎分级、超细粉碎与精细分级、颗粒球化与造粒以及过滤分离、干燥、包装、除尘、输送等非金属矿深加工工艺、设备及其应用。

◇生产过程智能化控制及硅酸盐矿物材料与非金属深加工产品或制品质检技术与装备。

注册费用

普通代表(提前缴费) 1800 元/人

普通代表(现场缴费) 2000 元/人

学生代表(凭学生证) 1200 元/人

会务联系

联系地址：北京市海淀区学院路丁 11 号逸夫楼 610

邮编：100083

联系人：李春全、牟斌、石彦龙、袁方、杨芳芳

联系电话：010-62339880, 18813151556, 13919177500, 15652885799, 15193101937

电子邮件：mmc2025@126.com（投稿）

特别提醒：会期宾馆房间紧张，请参会者提前预定行程。

主办单位：

中国硅酸盐学会矿物材料分会

中国科学院兰州化学物理研究所

河西学院

2025 年 2 月 26 日

关于申报 2025 年度“非金属矿科学技术奖”的通知

来源：中国非金属矿工业协会

中国非金属矿工业协会文件

中非协字（2025）第 003 号

关于申报 2025 年度“非金属矿科学技术奖”的通知

为了深入贯彻落实国家创新驱动发展战略，推动非金属矿行业科技进步与创新，表彰在非金属矿科学技术领域做出突出贡献的单位和个人，根据《非金属矿科学技术奖奖励章程》的相关规定，现将 2025 年“非金属矿科学技术奖”申报的有关事项通知如下：

一、奖项类别

非金属矿科学技术奖分设基础研究类、技术发明类、科技进步类、科技公益类、青年科技创新类五类奖项。

二、申报要求

《非金属矿科学技术奖申报书》（以下简称《申报书》）应按填写说明的要求认真填写。申报项目的内容应在《非金属矿科学技术奖奖励章程》规定范围内。拟申报项目应依据项目内容，在基础研究类、技术发明类、科技进步类、科技公益类、青年科技创新类中选择其一，不得重复申报。

第十八届中国非金属矿科技与市场交流大会暨展览会

○来源：中国非金属矿工业协会

5月23-25日 | 湖北 宜昌

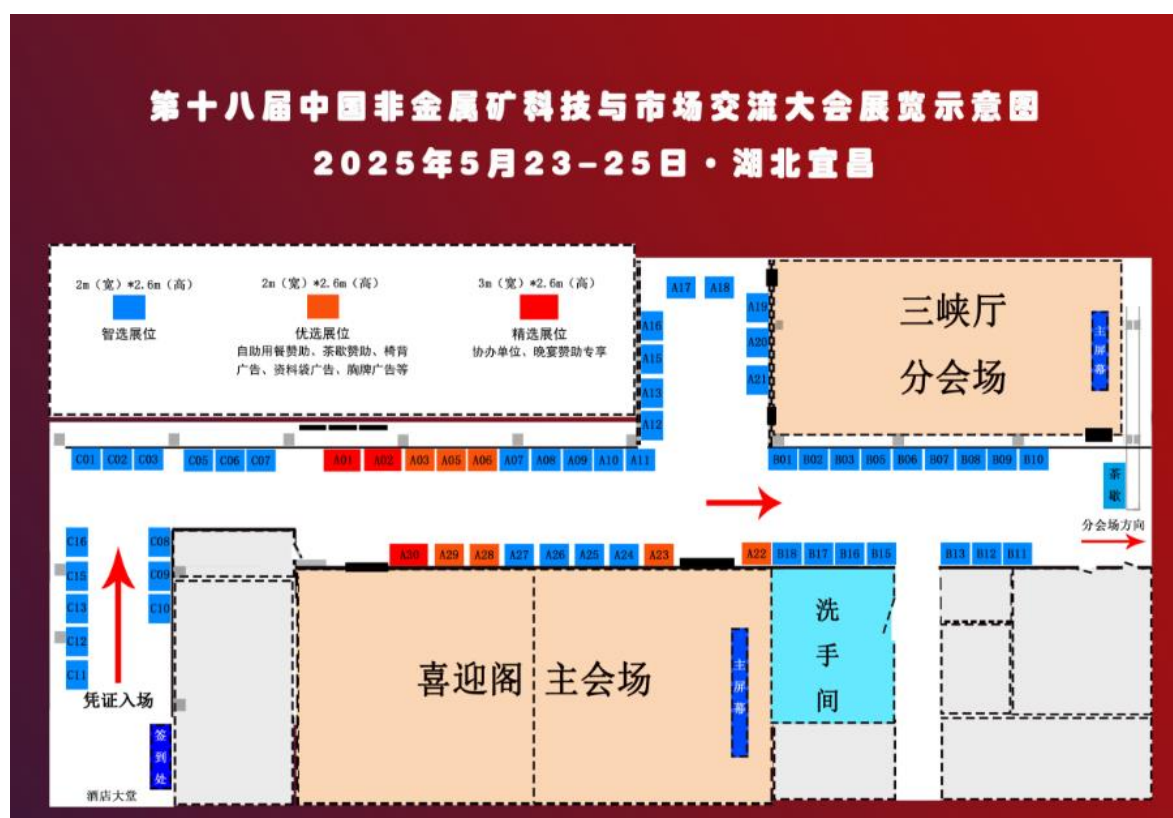
本次大会同期召开 5 大论坛，内容涵盖石英及石英材料、黏土矿物及矿物材料、碳酸钙、滑石、硅灰石等粉体材料。此次新增化工矿产及石墨论坛，将萤石、磷矿、重晶石、石墨等矿种列入研讨范围，内容更加丰富！

- 1 石英及石英材料论坛
- 2 黏土矿物及矿物材料论坛
- 3 功能粉体生产与应用论坛
- 4 化工矿产高效开发利用论坛
- 5 石墨产业技术创新发展论坛

本次展览设计展位 60+, 展览规模扩大，展览范围涵盖磨矿、磁选、色选、

筛分、分级、粉体改性、检测等装备及各类非金属矿粉体。

中国非金属矿科技与市场交流大会始于 2005 年，现已走过了十七年的辉煌历程，见证了我国非金属矿行业的进步与发展。现已发展成为非金属矿行业规模最大、影响力最大的品牌会议。近年来会议规模达 600+, 吸引了来自国内外的科研机构、专家学者，以及企业代表的积极参与。





甘肃省凹凸棒石产业技术创新战略联盟专刊

Strategy Alliance of Attapulgite Industrial Technology Innovation of Gansu Province

理 事 长：王爱勤 研究员

责任编辑：杨芳芳 助理研究员

联系电话：0931-4968183

通讯地址：甘肃省兰州市天水中路18号

网 址：<http://www.emec.licp.cas.cn/zllm/>