



化学通讯

CHEMICAL NEWSLETTER

No.13

2025年07月15日



图片来源: www.freepik.com



CHINESE
CHEMICAL
SOCIETY



中国化学会 主办
中国科学院长春应用化学研究所



03 ▲

资讯汇集

76 位会员新晋级为高级会员 01
来源：中国化学会官网

单位会员资讯 | 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所 2026 年研究生招生宣传手册——聚“纳”英才，研梦成“苏” 03
来源：中国化学会官网

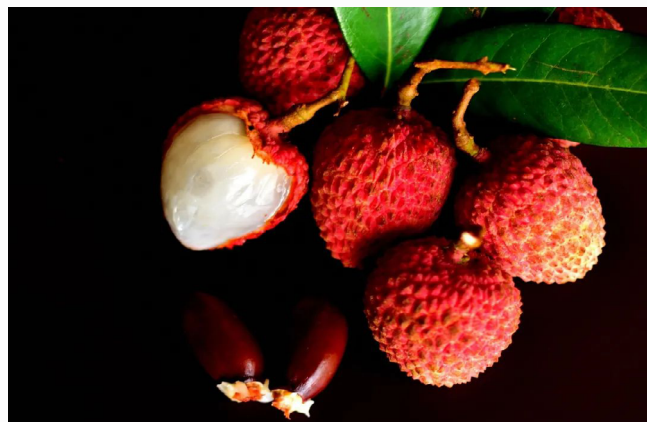
科技新闻

2025 十大前沿科学问题发布 08
来源：中国科协之声微信公众号

家人们谁懂啊！荔枝摘下来就烂？试了 11
108 种方法，这 3 招最实用
来源：人民网科普公众号

刚果的钴困境 15
来源：chemistryworld

对部分西方企业而言：中国是二氧化碳利用的理想之地 19
来源：cen



11 ▲

科普大赛

- ※ 珐琅——古老技艺的永恒魅力与不褪色之谜 23
作者：李文波
- ※ 小药筒，大能量 28
作者：吴孟德，刘超，刘彤彤，杨庭，万炜涵，郭浩然
- ※ 预防龋齿？选它们就是了 39
作者：星落



24 ▲



37 ▲

全国爱牙日

1989年，世界卫生组织、联合国儿童基金会、国际牙科协会等联合倡议，确定每年的9月20日为《中国》爱牙日。每年的爱牙日都有主题。



43 ▲

科研进展

中国科学院长春应化所，最新 Science 45
来源：高分子科学前沿公众号

主办单位：中国化学会 中国科学院长春应用化学研究所

刊 期：半月刊

主 编：杨小牛（中国科学院长春应用化学研究所）

副 主 编：刘正平（北京师范大学）

编辑部主任：王重洋

总 编 辑：孙智权

副 总 编 辑：余婉宁

编 辑：陈雨婷、朱真逸

版 面 设 计：许 霞

联 系 电 话：0431-85262016

电 子 邮 箱：hxtx@ciac.ac.cn

公 众 号：Chemical Newsletter

投 稿 网 址：<https://www.scicloudcenter.com/CN/>

电子版网址：<https://www.chemsoc.org.cn/library/newsletters/>

中国化学会秘书处

地 址：北京市中关村北一街 2 号

联 系 人：郝江涛、王亚茹

联 系 电 话：010-82449177

76 位会员新晋级为高级会员

- 2025 年 7 月，中国化学会新晋级高级会员 76 位。目前，中国化学会现有高级会员共 3084 位。
- 中国化学会高级会员均享有专属会员主页，并可即时自主更新主页，变更信息或添加代表性论文等。



登录网址

<http://www.chemsoc.org.cn/member/senior/> (点击阅读原文)，可查询、浏览每位高级会员个人主页。

新晋级高级会员名单

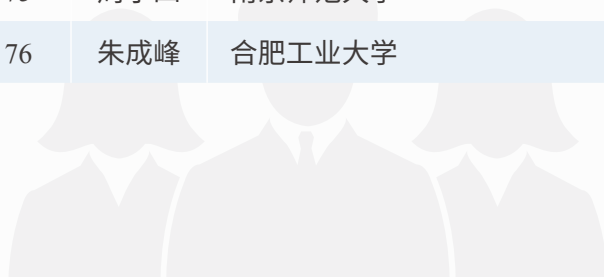
序号	姓名	单位
1	包 宇	广州大学
2	蔡 平	桂林电子科技大学
3	曹 峥	常州大学
4	陈 军	江西理工大学
5	陈令允	重庆大学
6	陈志敏	上海交通大学
7	程建华	中国科学院长春应用化学研究所
8	邓积光	北京工业大学
9	邓 理	中国科学院兰州化学物理研究所
10	丁益宏	温州大学
11	杜健军	大连理工大学
12	杜振霞	北京化工大学
13	冯 涛	中南民族大学
14	郭 帅	首都师范大学

序号	姓名	单位
15	郝俊杰	深圳技术大学
16	花伟杰	南京理工大学
17	江 俊	中国科学技术大学
18	姜秀娥	中国科学院长春应用化学研究所
19	蒋先兴	中山大学
20	李家柱	烟台大学
21	李巧红	中国科学院福建物质结构研究所
22	李延伟	桂林理工大学
23	李永乐	上海大学
24	李有桂	五邑大学
25	李允伍	聊城大学
26	刘成辉	陕西师范大学
27	刘建群	江西中医药大学
28	刘 凯	清华大学

▶【续表】

序号	姓名	单位
29	刘 睿	同济大学
30	刘予宇	上海大学
31	刘岳峰	中国科学院大连化学物理研究所
32	芦 逵	天津科技大学
33	罗其全	安徽大学
34	罗佗平	北京大学
35	罗 稳	河南大学
36	吕向菲	长安大学
37	茅璎波	中国科学技术大学
38	裴玉新	西北农林科技大学
39	裴志超	西北农林科技大学
40	彭 谦	南开大学
41	钱 昆	上海交通大学
42	钱 宇	中山大学
43	乔锦丽	东华大学
44	余 萍	吉林大学
45	沈悦海	昆明理工大学
46	宋春元	南京邮电大学
47	苏荣葵	中南林业科技大学
48	谭海军	桂林理工大学
49	田宇阳	东北师范大学
50	王 康	北京科技大学
51	王 颇	江苏师范大学
52	王天利	四川大学

序号	姓名	单位
53	王颖莉	山西中医药大学
54	魏 炜	南京大学
55	文 锐	中国科学院化学研究所
56	吴爱平	黑龙江大学
57	吴天敏	福建师范大学
58	吴 祥	合肥工业大学
59	吴钰周	华中科技大学
60	徐石海	暨南大学
61	徐章润	东北大学
62	许兆青	兰州大学
63	颜 梅	济南大学
64	燕云峰	浙江工业大学
65	杨海朋	深圳大学
66	姚钟平	香港理工大学
67	喻青松	北京化工大学
68	曾克武	北京大学
69	张 华	中南民族大学
70	张诺诺	三峡大学
71	张兆威	武汉纺织大学
72	赵文辉	宁波大学
73	赵彦兵	华中科技大学
74	赵 阳	公安部禁毒情报技术中心
75	周小四	南京师范大学
76	朱成峰	合肥工业大学



单位会员资讯 |

中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所 2026 年研究生招生宣传手册

—— 聚“纳”英才，研梦成“苏” ——



一、研究所简介

中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所（简称中国科学院苏州纳米所）由中国科学院与江苏省人民政府、苏州市人民政府和苏州工业园区于2006年共同创建，位于风景秀丽的苏州工业园区独墅湖科教

创新区内。以“致力纳米科技创新，引领新兴产业发展”为宗旨，定位于纳米技术的应用基础研究和产业化，在相关领域开展基础性、战略性、前瞻性创新研究。

前瞻布局了**电子信息、生物**

医学、功能材料等重点研究领域，整合优势力量，凝练学科方向。积极承担国家重大科技任务，开展相关领域前沿科学研究与关键核心技术攻关，建立了一支包括院士、国家杰青等国家重点人才的科技创新队伍，产出了一批原创性科技成果，自主研发了一

系列仪器设备，形成了具有自身特点的科研体系，努力成为纳米科技领域的国家战略科技力量。

二、研究所优势

1. 师资力量雄厚

建立了一支包括院士、国家杰青等国家重点人才的导师队伍，90%以上为海外归国人员，具有**高水平、有特色、多学科交叉的特点**。其中，博士生导师86人，硕士生导师58人。

2. 学术交叉融合

定位于纳米技术的应用基础研究和产业化，聚焦电子信息、生物医学和功能材料三大研究领域，鼓励多学科交叉融合，发挥优势学科特色，依托科教融合、产教融合办学模式，共同促进交叉学科建立。通过交叉集成平台、实践基地等，不断增强学科交叉融合创新引领能力，推进了高层次复合型人才培养模式。

3. 培养特色鲜明

强调多学科‘的交叉碰撞，既从事“顶天”的基础研究，形成原创性成果；也注重“立地”的应用研究，促进成果转化，营造出活跃的学术与创新氛围。此外，研究所关注培养和提高研究生科研、管理和活动等综合能力，为学生提供参与各类学术、文体



活动的机会，强调培养符合社会发展趋势的科技应用型人才。

4. 重大科研平台

围绕重点攻关领域，建设了半导体显示材料与芯片重点实验室、中国科学院纳米器件与应用重点实验室、中国科学院纳米生物-界面重点实验室、中国科学院多功能材料与轻巧系统重点实验室、江苏省纳米器件重点实验室、江苏省类器官创制与精准医疗重点实验室等重点实验室。

打造了**纳米真空互联实验站 (NANO-X)** 这一世界首个按国家重大科技基础设施标准在建的，集材料生长、器件加工、测试分析为一体的纳米领域重大科学装置；并建设了**纳米加工平台**（拥有超净实验室 10000 余平米和大型微纳加工设备 300 余台套，已成为中国最具特色的纳米加工平台）、**测试分析平台**（拥有 30 多台套国际先进大型研发设备，拥有一系列具有自主知识产权的引领性的国际先进测试分析技术）、**纳米生化平台**（拥有上万平米实验空间，包括生物实验室、合成实验室、分析仪器实验室以及 GMP 级细胞间等设施）等集研发与服务于一体的支撑体系。平台完全对外开放服务，**鼓励学生通过培训，自行上机操作，掌握各种加工、测试技能，提升个人能力与素质。**

三、研究生教育概况

2016 年，研究所与中国科大共建中国科大纳米技术与纳米仿生学院，录取研究生取得中国科大学籍。硕士研究生课程学习在中国科大本部完成，论文工作在研究所完成。

毕业研究生就业去向多为企事业单位、科研单位、国内重点高校、出国深造等，就业率达到 100%，在长三角地区就业的研究生约占 80%。

企业：华为、比亚迪、阿里巴巴、小米、百度、中芯国际、英特尔、长江存储、长鑫存储、中国电科、中国航天、中航工业、中国兵器、中国商飞、中国重汽、中烟工业、海康威视、京东方、华星光电、维信诺、宁德时代、博世、格力、上汽大众、苏州信达生物科技、先声药业等。

科研院所、高校：中国科学院研究所、苏州实验室、合肥综合性国家科学中心、南京鼓楼医院、军事科学院、清华大学、北京大学、中国科学院大学、中国科学技术大学、复旦大学、上海交通大学、浙江大学、南京大学、耶鲁大学、哥伦比亚大学、加州大学、新加坡国立大学、新加坡南洋理工大学、瑞典皇家理工学院、日本东北大学、法国斯特拉

斯堡大学、天普大学、普渡大学、犹他大学等。

机关事业单位：国家知识产权局、中国国家博物馆、公安部、省市组织部、教育局、环境监测中心、疾控中心、生态环境局、市场监督管理局、药品安全检测中心、国资发展促进中心等。

四、奖助学金

学业奖学金：100% 覆盖，博士生 15600~18000 元，硕士生 10800~12000 元。

基本补助：在进入课题组开展科研工作后，博士生最低 4150 元/月，硕士生最低 2500 元/月。

新生奖学金：为推免至本单位的优秀新生设立了奖学金额度最高达 50000 元的“纳米新星”奖学金。

学术奖学金：每年 5 月举行的“五四青年学术交流会”，为研究生特设“所长奖”，其中最高奖金额度达到 5000 元。

企业奖学金：多家企业在研究所设立企业奖学金，最高可达 50000 元。

其他：课题奖励、冠名奖学金。

各类奖学金

奖学金类别	奖学金名称	奖励金额（元）
国家	国家奖学金	博士生 30000，硕士生 20000
中国科学院	院长特别奖	10000
	院长优秀奖	5000
南京分院	院长特别奖	5000
	院长优秀奖	2000
	伍宜孙冠名奖	1000
中国科大	郭永怀奖学金	20000
	牛津仪器奖学金	5000
	江淮蔚来奖学金	5000
	国仪工匠奖学金	最高 20000
	科教融合优秀奖	5000
苏州纳米所	纳米新星奖学金	最高 50000
	纳米加工平台奖学金	5000
	所长奖	最高 5000
	企业奖学金	最高 50000

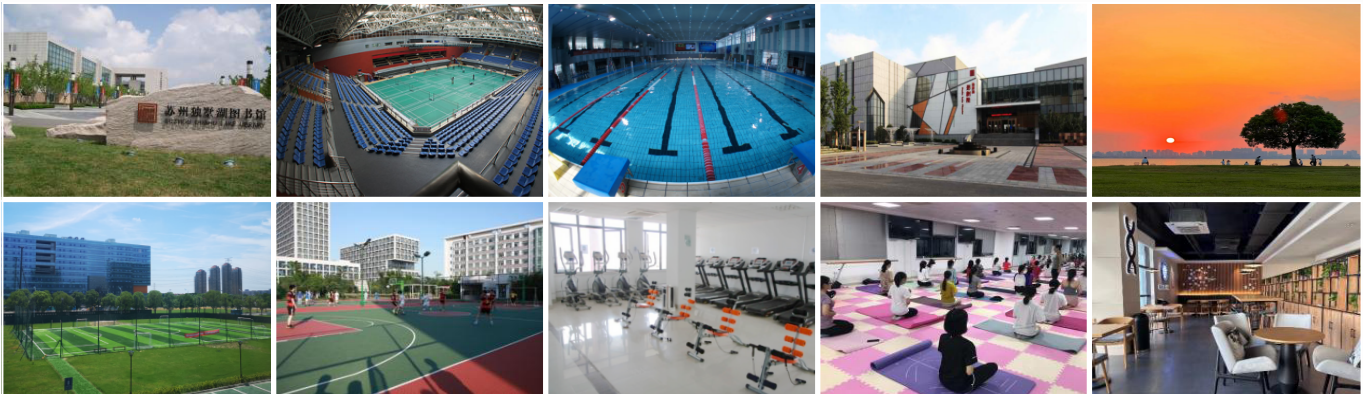
五、学习环境

研究生统一入住条件优越的学生公寓，周边配套了完备的各类公共设施，如体育馆、篮球场、足球场、网球场、游

泳馆、攀岩馆、影剧院和独墅湖公园等；研究所建有灯光篮球场、足球场、健身房、舞蹈房和咖啡吧，为研究生的学习和课外生活提供优质的

环境。

热忱欢迎有志于从事国家纳米科技事业的青年学子报考我所研究生！



六、招生信息

招生专业			
序号	招生专业	招生层次	类型
1	化学	硕士、博士	学术型
2	材料科学与工程	硕士、博士	
3	电子科学与技术	硕士、博士	
4	生物学	硕士、博士	
5	材料与化工	硕士、博士	专业型
6	电子信息	硕士、博士	
7	生物与医药	硕士、博士	

招生单位：中国科学技术大学

招生学院：纳米技术与纳米仿生学院（苏州纳米所）

招生代码：173

招考方式：推荐免试，国家统一考试

七、联系方式

单位：中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所

邮编：215123

地址：江苏省苏州市工业园区若水路 398 号

电话：0512-62872676/2682

招生 QQ 群：1041301294

E-mail: yjsb@sinano.ac.cn

网址：<http://www.sinano.cas.cn/>



研究所网站



教育处微信公众号



招生QQ群

本信息有效期至 2025 年 12 月 31 日

信息来源：中国化学会理事单位——中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所 供稿

编者按：为提升会员服务水平，充分发挥桥梁纽带作用，中国化学会将通过官方宣传渠道（包括但不限于官方微信号等）不定期地推广单位会员招聘 / 招生信息，以期帮助单位会员解决人才短缺、招聘 / 招生渠道窄等难题，并为个人会员提供获取相关信息的新通道。欢迎大家关注！

2025十大前沿科学问题发布

来源：中国科协之声微信公众号；原文链接：https://mp.weixin.qq.com/s/i4Ka9_6Go9VAMffHxnBWgA



第二十七届中国科协年会主论坛7月6日在北京举行。主论坛上，发布了2025重大科学问题、工程技术难题和产业技术问题。

中国科协自2018年开始，持续组织开展重大科技问题难题征集发布活动。2025年活动，从前沿性、引领性、创新性、战略性四个方面严格把关，经过严谨规范的审读、评议、投票等程序，最终选出10个前沿科学问题、10个工程技术难题和10个产业技术问题，为持续性产出原创性、颠覆性科技成果树立“风向标”。



一起来看 2025 十大前沿科学问题有哪些

01. 流形的拓扑和几何分类

流形的分类问题是数学研究领域的一个核心问题，长期以来也是基础数学研究的驱动力。流形是我们一般空间的数学表述，如球面，环面等。它在局部上类似于欧几里得空间，在数学、物理、工程学等领域都有广泛应用。研究流形的拓扑和几何分类问题意味对不同类型的空间进行全面、系统的了解，理解其内在结构和性质。这类问题的任何重要进展不仅可以为物理学中的广义相对论、量子力学等理论，以及其他科学分支提供新的数学基础，深化我们对空间、物质结构等的深入理解，也可为数学中的拓扑学、几何学，以及其他重要问题提供新的视角和工具。

02. 希格斯粒子性质和质量起源

CEPC（环形正负电子对撞机）项目瞄准标准模型的核心，对质量起源以及超出标准模型的新物理信号进行高精度、多方位的探索。CEPC 建成后，将无可争议地成为国际高能粒子物理实验的最前沿阵地，很有可能取得国际瞩目的重大突破。CEPC 及其升级项目将在半个世纪的时间尺度上，使我国在高能物理实验领域处于世界领跑者地位。

CEPC 对技术发展将起到不可估量的引领和推动作用。CEPC 将在低温、超导、高频、微波功率源、电子学与自动控制等一批关键技术领域大幅提升自主创新能力，对工艺新技术的发展、大规模工业制造将起到巨大的推动作用。

CEPC 也将给我们带来一个国际化的科研中心，会对我国的科技体制改革、创新能力的提高以及人才培养等产生重大影响，会提高我们作为一个

大国的硬实力、软实力和国际地位。

03. 准金属替代过渡金属用于精准合成与催化反应的可行性研究

准金属替代过渡金属实现精准化学合成，将重塑科学认知边界，打破传统过渡金属催化的思维定式，开辟化学合成新理论与方法体系。社会层面，它驱动绿色化学发展，降低环境污染与资源依赖。科技上，带动多学科交叉创新；经济上，大幅削减生产成本，催生新兴产业，创造巨大经济价值。这一突破将推动药物研发、材料革新，改善医疗与生活质量，助力可持续发展，对推动科学进步与社会发展具有里程碑意义，引领化学合成迈向更高效、绿色、智能的新时代。

04. 台风路径异常与强度突变

台风生成及生成之后的强度、结构和路径之间的相互作用机制是台风研究的热点，也是全球台风研究和预报长期存在的难点和挑战。本问题突破后，科学上将深化对台风生成、台风强度、结构变化和异常路径的多尺度物理机制的理解，建立台风预报的理论及方法；技术上将提高台风异常路径的预报能力，改进台风强度变化的预测准确度，强化台风精细结构的预报水平，提升气候变化背景下台风活动的预测能力。这些突破将提高全球沿海和内陆地区应对台风灾害的能力，支撑我国防灾减灾的重大需求和应对气候变化的战略部署，对提升海洋极端灾害的预警能力，保障我国远洋航运贸易及海洋国防安全具有重要意义。

05. 宏观生态系统空间格局形成机理与系统间相互作用机制

宏观生态系统空间格局形成机理与系统间相互作用机制的理论研究，有助于准确理解生态空间结构的区域性、完整性、连续性和层级性特征；科学建立生态空间退化格局识别、生态状况动态与风险预警、生态多功能性权衡协调、多目标协同的时空耦合范式；有效解决区域生态多目标统筹、可持续性、多尺度级联、生态功能与空间布局优化的技术难题，是建立全域生态空间结构调整和空间布局优化系统解决方案，保护重要生态空间及促进区域可持续发展的重要基础。

06. 基于密码学视角的人工智能安全新理论和防护体系

人工智能领域面临统筹发展和安全的难题。2025年4月25日，习近平总书记在中共中央政治局第二十次集体学习时指出“确保人工智能安全、可靠、可控”。基于密码学的人工智能安全新理论不仅解决人工智能安全的数学可解释性，实现人工智能安全体系化测评与评估，而且推动人工智能安全从经验性防御向数学可验证安全范式跃迁，实现人工智能高安全水平下的高质量发展。

07. 多维度、可重构超分子机器组装

该问题的突破将在科学层面构建可逆、可重构的组装体系，从“分子合成导向”转向“功能组装导向”，形成超分子机器专用表征体系；在技术革新层面，微/纳机器人的集群行为控制为分子机器提供设计范式，使得超分子机器有望成为继芯片、人工智能后的下一代技术制高点，推动社会向智能化、可持续化方向深度转型。

08. 暗能量与哈勃常数危机

哈勃常数危机的解决与暗能量动力学本质的揭示，必将引发对宇宙起源、演化以及基础物理定律

的全新认知与深入反思，有望在物理学与天文学交叉领域催生突破性理论变革，重塑科学范式。推动该问题的研究突破将带动我国大规模巡天望远镜技术、精密测量仪器与高性能计算平台的自主创新发展，极大提升基础科学研究能力，并显著促进相关技术在遥感测绘、精密光学制造、数据科学等关键产业领域的广泛应用，产生可观的经济社会效益。

09. 作物野生近缘种在提升栽培种抗逆特性的育种潜力

野生近缘种在改良栽培种抗逆性方面的成功利用，将显著推动对作物进化、基因功能与复杂性状调控机制的科学认知，深化对自然选择与驯化过程的理解。在实践层面，这将提升作物在逆境条件下的稳定性与产量，为应对气候变化、保障粮食安全提供核心科技支撑。经济上，可减少农药、灌溉等投入，降低生产成本，提高农业效益。社会上，有助于推动绿色农业发展、改善生态环境、促进可持续农业转型，提升国家在全球农业科技领域的话语权，具有深远的科技、经济和社会影响。

10. 人体微生态与宿主的交互调控机制

人体微生态与宿主的交互调控研究正在重塑生命科学的基础认知框架。这一领域揭示了生物体与共生微生物之间复杂的协同进化关系，为理解生命系统的组织原则提供了全新视角。研究发现，宿主与微生物群落通过多层次的分子对话形成动态平衡网络，这种跨物种互作机制展现了生命调控的复杂性和精巧性。在基础理论层面，该研究不仅拓展了传统生理学的认知边界，更推动了系统生物学、进化生物学等基础学科的发展。社会效益上，基于微生物组的个体化营养干预和精准治疗策略可显著降低慢性病医疗负担，提升公共卫生防控水平，为应对全球性健康挑战提供创新解决方案。

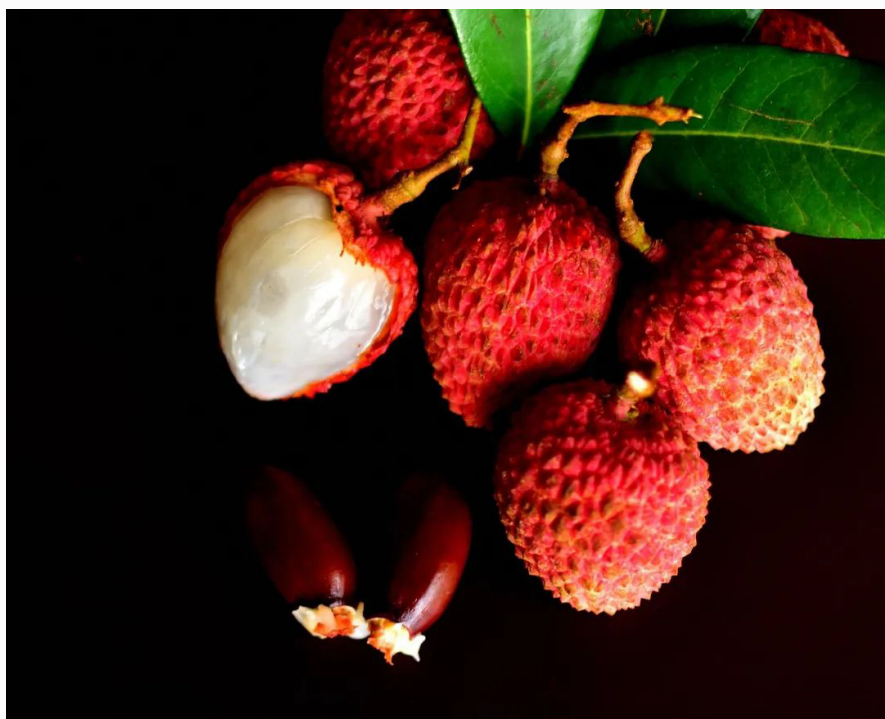
家人们谁懂啊！ 荔枝摘下来就烂？ 试了108种方法，这3招最实用

来源：人民网科普公众号；编辑有修改；原文链接：<https://mp.weixin.qq.com/s/PqBNf76Fzn1tM3UsuxKqQQ>

唐代诗人杜牧在《过华清宫绝句》中写道：“一骑红尘妃子笑，无人知是荔枝来”，道尽了古人对荔枝的痴迷，而现在一般认为，那时送往长安的荔枝，并非来自遥远的岭南，而是来自更近一些的巴蜀地区，这些荔枝3~7天就可以送到长安。

而荔枝保鲜，有相当的难度，它可不像苹果那般耐储运，也不像柑橘那样能放易保存。即使在现代冷链条件下，荔枝仍常被视为最难保鲜的水果之一。

如果不采取措施，采摘一天后，荔枝果皮就开始褐变，两三天后风味剧烈衰退，四五天便基



图源：微信公共图片库

本色香味俱失。这么看来，当年即使快马加鞭，加冰保鲜，贵妃

能品尝到的荔枝，只怕稍有耽搁风味就要打点折扣。

那么，为何荔枝如此脆弱呢？是因为细菌吗？其实，这不只是简单的果实腐败，而是一个从断枝那一刻就开始的过程——包含水分流失、酶促褐变、呼吸加速、乙烯释放等多因素联动的果实“自毁链”，接下来咱们就看看这个过程，以及人类是怎么战胜“荔枝自毁”的。

自毁程序 1——脱枝即失水

荔枝的果皮看似是硬硬的，实则是最先崩溃的防线。从采摘那一刻起，它便开始不可逆的水分流失过程。

荔枝的果皮结构特殊，由三层组织构成：外果皮含花青素苷的栅状组织细胞，组织孔隙极多，中果皮是细胞间隙极大的海绵状组织，极易透水，而内果皮则主要由薄壁细胞组成，缺乏坚实的屏障作用。更关键的是，荔枝果肉其实并非生物学意义上的“果肉”，而是种子表面的假种皮，仅通过果柄与果皮相连，这意味着一旦采摘，果皮与果肉之间几乎无法再进行有效的水分传导^[1]。

这使得荔枝果皮在采后极度缺乏“自我补水”的能力，水分从表层迅速蒸发，而果肉无能为力，不能给果皮补水。研究显



示，果皮失水会导致细胞膜通透性增强、膜脂结构破坏，诱发氧化反应，最终使原本鲜红的荔枝褪色、发褐，从吹弹可破变得皱皱巴巴。这其实就是荔枝果皮的早期“程序性死亡”^[1]。

自毁程序 2——呼吸急促加速代谢

如果说水分的流失让荔枝不再鲜红，那么呼吸作用的失控，则会加快它的崩溃速度。

与人类一样，植物的果实也会呼吸——以消耗糖类、释放二氧化碳的方式维持生命活动。但不同的是，荔枝相较其它水果呼吸得更快。荔枝一旦脱离枝头，其呼吸速率不减反增，代谢速度增加。

这意味着什么呢？代谢需要消耗能量，能量来自营养物质，这意味着荔枝果肉中的糖类、可溶性固形物和维生素 C，会在短时间内被迅速分解、氧化。短短两三天内，风味物质显著减少，抗氧化能力迅速下降。与此同时，呼吸过程中还会产生一定量的醇类和醛类等异味挥发物，使原本清甜的果香变得寡淡甚至酒味扑鼻。

更糟糕的是，这一过程会引发“氧化风暴”。呼吸作用释放的活性氧如过氧化氢（ H_2O_2 ）和超氧阴离子自由基（ $\cdot O_2^-$ ）持续积累，进一步破坏细胞膜稳定性，促使酚类氧化酶异常活跃，加速果皮褐变、果肉软化。荔枝

从一个圆润饱满、晶莹剔透的果实，快速转变为萎缩、变色、失味的“过熟果”^[1]。

自毁程序3——乙烯释放，走向“催熟自残”

在果蔬生理学中，乙烯是一种广泛存在的植物激素，调控着果实成熟、衰老乃至脱落等一系列生理过程。虽然荔枝被归类为非呼吸跃变型果实，理论上对乙烯的依赖不如香蕉、番茄等更生型果实明显，但实测数据显示，荔枝采摘后仍会持续释放乙烯，且在贮藏过程中释放速率逐步上升。

乙烯的释放，不仅是荔枝自身成熟信号的一部分，更是衰败链条中的重要“放大器”。首先，它会促进果皮中花青素和其他酚类物质的降解，导致颜色快速褪去，果皮褐变加剧。研究发现，乙烯可上调多酚氧化酶(PPO)和过氧化物酶(POD)的表达水平，增强其活性，从而加快果皮的氧化变色过程^[1]。

此外，荔枝含糖量高，在高温高湿环境下易被病原菌侵染，导致果肉变酸，使腐烂速度加快。病原菌侵染是荔枝腐烂最关键的因素，致病菌包括霜疫病菌、荔枝炭疽病菌、青霉属和盘多毛孢属等多种真菌，由于气候



等原因，霜疫霉病和荔枝炭疽病是造成广东荔枝腐烂最主要的病害^[1]。

虽然荔枝这么会“自毁”，但广大吃货怎能允许这种事情发生，于是人们开发出了多种技术来给荔枝续命。

荔枝的续命方案

荔枝采后快速衰败的核心问题在于其高代谢、高耗氧和高敏感特性。如果无法在短时间内抑制其呼吸、氧化和乙烯合成，即便现代物流再高效，也难以阻止其商品品质迅速下降。对此，科研人员不断探索多种干预手段，试图给荔枝续续命。

01. 超低温“冻眠”：冻结代谢反应

近年来，广东科研团队率先提出“荔枝冻眠锁鲜技术”，其关键在于通过 -35°C 以下的速冻处理，在荔枝细胞尚未完全衰老前迅速抑制其生理活动。该技术核心是调控冰晶形成路径与颗粒大小，利用细小致密的冰晶包埋细胞内容物，避免传统冷冻造成的组织结构破坏^[2]。

冻眠过程包括“快速预冷——真空包装——精准速冻——低温储藏”四个环节，每一环都需精确控制。研究表明，冻眠荔枝解冻后仍能保留80%以上的原始营养与风味，果皮色泽红润，果肉晶莹脆嫩，显

著优于普通冷藏样本。

该技术的成功，不仅是物理保鲜手段的突破，也意味着荔枝商品期可从3~5天延长至10个月以上，极大拓展其市场空间。当然，存储这么长时间，成本也高，荔枝的风味也会有一定损失，需要根据情况取舍。

02. 气调与包装：调控呼吸环境

除冷冻外，“气调保鲜”也是阻断自毁程序的重要策略之一。荔枝在低氧、高二氧化碳的气氛下，其呼吸速率、乙烯合成与酶促活性均显著降低。研究显示，控制储藏气成分为6% O₂，3% CO₂和91% N₂，可延长荔枝贮藏期至60天，相似的技术也常用于车厘子的运输。

此外，真空包装与阻湿薄膜的结合应用，也能有效减少水分流失与氧气渗透，从外部环境切断荔枝氧化反应的原料供应。部分新型包装材料还具有控湿、控气和抗菌多重功能，是商业流通中的重要辅助手段。

03. 化学保鲜剂：延缓氧化反应

在传统保鲜体系中，柠檬酸和L-半胱氨酸的组合被证实具有较好的抗氧化和防褐变效果。二者可协同作用，抑制PPO和POD等氧化酶活性，同时提升超氧化物歧化酶(SOD)和抗坏血酸过氧化物酶(APX)等抗氧化酶表达，从而减缓果皮变色与果肉质构劣变^[3]。

此外，啞菌酯等低毒高效的广谱杀菌剂，在控制果实霉变方面亦表现优异，配合有机酸使用，可显著延长保鲜时间至6天

以上。

总结

荔枝是一种极有“个性”的水果：它在枝头饱满、甜美、诱人，一旦采摘，却会快速凋萎、失色、退味。从果皮失水、呼吸过速，到乙烯自催熟、酶促褐变，它像是设定好了倒计时，在离开枝头的那一刻，便启动了只需4~5天的死亡程序。

好在今天，我们已能通过“冻眠锁鲜”等先进技术，让荔枝保鲜时间从数日延长至数月，荔枝早不再是当年“一骑红尘妃子笑”的贵重珍馐，它已经成为北方朋友们夏天都容易买到品尝的寻常水果了，而且现在我们吃的荔枝，多半比杨贵妃那会儿还要原汁原味！

参考文献

- [1] 李晓琴. 荔枝采后风险评估及保鲜技术研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
- [2] 叶青. 冻眠锁鲜技术让广东荔枝四季可食[N]. 科技日报, 2024-05-11(003).
- [3] 黄文艺, 张宝翼, 陈笑冰, 等. 荔枝采后保鲜包装技术研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(11): 426-434.

刚果民主共和国正采取干预措施，以提振钴价并稳定供应链。

刚果的钴困境

来源：chemistryworld；作者：ZAHRA KHAN；翻译：余婉宁

原文链接：<https://www.chemistryworld.com/news/congos-cobalt-conundrum/4021696.article>



来源：© Elne Burgers/Getty Images

刚果民主共和国的钴产量占全球 70% 以上，且其中大部分是在铜、镍开采过程中作为副产品产生的

钴是绿色技术中的关键组成部分，广泛应用于电池电极、电动机磁体及风力涡轮机磁体等领域。

由于这些技术的需求出现变化，钴供应链的脆弱性随之显现，进而导致其价格剧烈波动。

刚果民主共和国的钴产量占全球总量的 70% 以上。过去十年间，钴的需求量大幅上升，其

中每年有超过两万吨流入电池市场——这一数据在 2021 年占钴总消费量的 57%。未来几十年，全球钴需求预计将增至当前的 4 倍，这主要得益于其在锂离子电池中不可或缺的作用。电池正极中的钴含量直接影响电池的能量密度，尽管目前研究已逐渐转向替代正极材料，但钴仍是电动汽车（EV）电池中的限制性因素。

2018 年 4 月，钴价创下每吨 10 万美元的历史峰值。随着价格飙升，投资者和企业因担心预期的供应短缺可能导致价格进一步上涨，再加上美中持续贸易争端的影响，开始大量采购钴，引发了“钴抢购潮”，进而将价格推向更高。

此后，刚果民主共和国的矿企维持甚至扩大了钴产量，因为钴通常是铜、镍开采的副产品，而铜、镍的需求一直居高不下。但钴的需求并未如预期般激增——部分原因是电动汽车销量增速低于预期，另一部分则是电池制造商开始采用低钴需求量的正极材料。在价格达到峰值后，受新冠肺炎疫情冲击，钴价大幅下跌，此后便持续走低。这导致了钴的供应过剩，刚果民主共和国的仓库中库存不断累积，2024 年钴价已降至每吨



来源：© 美联社 / Alamy Stock Photo
在刚果民主共和国实施出口禁令期间，印度尼西亚加大了钴的加工与供应力度，但全球供应链仍相对受限

约 3 万美元。

刚果民主共和国的出口政策因钴供应过剩问题而制定，该国正努力在经济增长与社会责任之间寻求平衡。2025 年 2 月，刚果民主共和国实施了为期 4 个月的出口禁令以提振钴价，随后又推出出口配额制，实现对价格的有效调控。

由于钴的生产集中在少数国家，且与镍、铜的生产紧密关联，钴市场对政治格局变化极为敏感。英国法拉第研究所首席经济学家斯蒂芬·吉福德指出：“若需求发生变化，供应端难以快速响应，因为供应链缺乏

多元化。”刚果民主共和国的钴矿产量占全球 3/4 以上，而中国掌控着近 80% 的钴精炼环节，在产业链中占据更强主导地位。尽管刚果民主共和国的经济影响力不容忽视——其出口一旦中断便会波及全球——但治理不善与政策执行乏力，限制了该国对市场的掌控能力。

刚果（金）近 70% 的工业钴矿由中资企业运营。该国已意识到，中国铝业（CMOC）等国有企业在全球供应链中权力过大，因此成立委员会以削弱中资投资者的影响力。卡内基国际和平基金会的刚果矿业专家克里斯

蒂安 - 热罗·内马表示：“新任总统希望减缓中国在钴产业中的存在感和发展速度。”自 2021 年起，刚果民主共和国开始积极审查中资矿业合同，旨在提高透明度和收益分成比例，同时扩大与其他国家的合作，以降低中国在该领域的主导地位。该国出台的监管措施（包括为期 4 个月的出口禁令），正是试图从中资承包商那里获取更多利益的手段。内马补充道：“我们还担心，作为生产国却没有本土企业参与钴生产，这意味着我们无法掌控市场价格。”

中国的主导地位不仅体现在钴精炼环节，还延伸至电池制造领域。中国是全球最大的钴消费国，钴被广泛用于电池、智能手机、电子设备及航空航天技术等领域。2018 年以来，电池技术已开始从含钴材料向高镍材料转型，性能提升后的磷酸铁锂（LFP）正极材料因成本更低而日益普及。若这一趋势持续，可能对钴需求产生重大影响。吉福德指出：“电动汽车电池的长期需求最终取决于其性能和成本。”尽管钴的使用量可能减少，但镍、锂等其他金属的需求会增加，因此总会存在替代权衡。即便电池行业逐渐降低对钴的依赖，由于电池总量增长，钴

的总需求仍可能保持稳定。荷兰莱顿大学的电池供应链研究员梁亚楠评论道：“我认为我们无法简单脱离钴而使整个供应链变得更轻松。”

价格操控

尽管刚果民主共和国已实施出口禁令，但受铜、镍需求驱动，中国铝业（CMOC）等企业运营的矿场仍在继续生产钴，导致自身钴库存不断累积。荷兰莱顿大学环境研究员苏珊·范登布林克表示：“一旦禁令解除，大量钴流入市场可能引发价格波动。”

禁令已导致钴价应声上涨，其中标准级钴、氢氧化钴及硫酸钴的价格均出现上扬。不过，由于印度尼西亚等其他主要供应方正增加产量以填补缺口，目前预测其对价格的长期影响还为时过早。专家认为，禁令对价格的影响难以持久——企业一旦释放库存，钴价可能再度下跌。

刚果民主共和国或许会维持严格的出口限制，直至市场恢复平衡。内马警告道：“更多出口配额会推高价格，进而削弱企业购买钴的意愿。”他指出，若要实现长期效果，需出台一系列政策并长期执行以平衡市场，但“钴



来源：© Michel Lunanga / 盖蒂图片社

刚果民主共和国的相当一部分钴产量来自非正规的手工采矿及小型采矿作业。这类采矿方式在规避该地区冲突方面更为灵活，但也存在工人安全及童工剥削等问题。

价再也回不到2018年的水平了”。

钴价的波动源于供应链灵活性不足且易受干扰。刚果民主共和国国情复杂，既有冲突遗留问题，也存在腐败及人权滥用等隐患。该国相当一部分钴产量来自手工及小型采矿（ASM），而这些矿场普遍存在使用童工的现象。非伦理采矿不仅让儿童面临人身伤害和剥削风险，政府加强监管也会影响供应链的稳定性。外部利益相关方要求负责任地采购钴，这给钴生产带来了压力——许多国家承诺终结现代奴隶制和强迫劳动，进一步对钴生产造成冲击。

这些挑战极为复杂，因为手工及小型采矿是刚果民主共和国民众的重要收入来源，若简单将其排除在供应链之外，会引发新的问题。布林克表示：“我认为手工及小型采矿并非真的在破坏供应链稳定性，实际上反而能增强供应链的韧性。”由于该地区冲突频发，手工采矿作业的灵活性使其能在地理上分散分布，并形成独特的交易模式。在刚果战乱期间，大部分钴正是由这些手工矿场供应，这也凸显了它们在全球供应链中的关键作用。

为推行负责任的采购标准，刚果民主共和国实施了非法采矿禁令，并成立了新的管理机构——刚果钴业总公司（EGC），该公司拥有所有手工开采钴的专属权。部分电池企业已决定在其电池产品中禁用所有手工开采的钴，以彰显对伦理采购的承诺。但这一举措很难落实。布林克指出：“禁令也是促使该行业整顿并推动规范化的契机。”嘉能可等矿业公司正与刚果钴业总公司合作，助力手工及小型采矿获得相关认证。

刚果民主共和国产出的钴具有独特的化学组成，可作为材料“指纹”，为整个电池价值链的材料开发数字护照。这是一项由多方参与的欧盟项目，旨在提高钴的可追溯性和供应链可靠性。相关数据还将包含材料生产过程中的碳足迹，梁亚楠相信，一旦该项目落地，数字护照将有助于稳定供应链。内马则认为：“刚果钴业总公司的作用还有待观察，自其成立以来，围绕手工采矿控制权的争夺就从未停止。而且该公司既缺乏人力，也没有足够的专业能力。”不过他仍乐观地表示，假以时日，随着

基础设施改善，手工及小型采矿行业有望实现规范化。

电池回收

实现钴供应多元化、摆脱对铜和镍伴生关系依赖的一个途径是回收利用。吉福德称：“到2040年，电池中含有的钴量将几乎与刚果民主共和国的钴产量相当。”这凸显了投资回收基础设施的重要性。英国正与澳大利亚等具备钴精炼能力的国家开展国际合作，欧盟也在转向回收领域。范登布林克表示，未来10年钴总需求预计将再次上升，虽然原生钴供应不会有太大变化，但“二次回收的钴供应量有望增长至当前的四倍”。

刚果民主共和国及其钴产业必须解决供应链的脆弱性问题，以确保长期可持续发展。内马对这些新的可追溯工具能否成功持较为怀疑的态度，他表示：“当最大的生产国是一个公共管理混乱、治理不善的国家时，即便是可追溯性和透明度也会变得更为复杂。”他强调，解决问题不能仅靠编码和技术，还需要实地的人力资本、政策支持、基础设施以及所有参与者的合作才能实现。

清洁技术化学初创企业在华扩张，而非西方本土

对部分西方企业而言： 中国是二氧化碳利用的理想之地

来源：cen；作者：Craig Bettenhausen；翻译：余婉宁

原文链接：<https://cen.acs.org/environment/greenhouse-gases/Western-firms-China-place-carbon/103/web/2025/07>



来源：碳循环国际公司（Carbon Recycling International）
碳循环国际公司位于中国河南省安阳市的顺丽工厂，将炼钢过程中产生的二氧化碳转化为甲醇

二氧化碳捕集与利用技术听来颇具吸引力。这一过程打破了应对气候变化的固有逻辑，将原本属于环境问题的废

弃物流——二氧化碳转化为化学品和燃料的原料。但从热力学角度而言，捕集二氧化碳以及将其转化为有机分子均为耗能过

程，因此该技术也被称作“电力制液体”技术。

那些致力于开发这类高耗能

工艺的化学初创企业及其他公司，必须证明其技术既能带来净气候效益，又能实现盈利。早期的技术研发与商业拓展多集中于欧洲和北美，然而越来越多的企业发现，中国才是他们实现工业化量产与商业成功的理想之地。

以 Econic Technologies 公司为例，其首席执行官基思·威金斯称，该公司选择在中国扩大技术应用规模，原因在于中国迫切希望开发不依赖进口石油的化学原料。Econic 公司的催化工艺可激活二氧化碳，使其与环氧乙烷或环氧丙烷发生开环共聚反

应，进而将捕集到的二氧化碳有效引入烷氧化反应中——化工行业早已借助这类反应生产大批量聚合物、涂料和表面活性剂。

目前，Econic 公司最成熟的反应工艺可用于生产多元醇，在产品的质量占比中，捕集的二氧化碳最高可达 30%。根据应用场景和客户需求，其余成分可为生物基原料或石油化工原料。

威金斯表示，首批获得 Econic 技术许可的客户计划将多元醇作为原料，用于生产聚氨酯、聚酯和聚碳酸酯涂料。很快，采用相同基础工艺的聚

氨酯泡沫也将投产。这家脱胎于伦敦帝国理工学院的企业，近期还公布了一项姊妹工艺，**可生产碳酸酯乙氧基化物**——威金斯称这是一种适用于多个行业的新型表面活性剂。

Econic 的首份技术许可授予了特种化学品生产商 Monument Chemical，该公司计划未来几个月内在肯塔基州的工厂启用一条利用二氧化碳生产多元醇的生产线。威金斯认为这是个不错的项目，但中国多元醇生产商长华化工科技正采用 Econic 的工艺建设一座规模大得多的工厂：该厂将



来源：长华化工科技（ChangHua Chemical Technology）

长华化工科技董事长顾仁发（左，音译）与 Econic Technologies 首席执行官基思·威金斯在一场活动上合影，该活动旨在庆祝双方签署一项利用二氧化碳生产多元醇的许可协议

于第四季度投产，初期年产能可为8万吨，最终将扩至100万吨以上。

威金斯指出，制造业是中国经济增长的核心，但这一战略存在短板：“他们70%的原材料需要进口，因为没有整合化石燃料或化石原料的上游产业链。”与此同时，二氧化碳资源丰富且价格低廉。

“中国迫切希望围绕能分解二氧化碳并将其转化为有用碳材料的技术构建供应链。”他表示，在一个政府对产业拥有强大调控力的国家，二氧化碳资源化利用的相关努力得到了政府的大力支持。

冰岛碳循环国际公司（CRI）的首席技术官埃梅里克·萨伦表示，供应链自主是中国政府的重要优先事项，可持续发展同样如此。该公司采用热化学方法将二氧化碳和氢气转化为甲醇。

“在环境问题上，西方民众对中国的认知往往过时了。”他说，“我们总认为欧美国家才是具有前瞻性的国家，但中国对环境问题的关注同样真切，而且中国政府最高层已制定了专门的绿色转型战略。”

他还指出，与欧美相比，“中国政府有能力要求企业：‘若想

保留经营许可，就必须针对碳排放采取措施。’而这类举措正在落实。”

萨伦表示，中国已启动碳排放权交易体系——许多经济学家认为这是减少温室气体排放最有效的市场机制。他提到，企业的初始排放配额虽略高，但该机制已具备长期降低二氧化碳排放的调节能力。与此同时，在美国，由共和党起草、正提交国会审议的预算法案可能会加大企业碳减排额度交易的难度。

与Econic等将二氧化碳转化为化学品的企业一样，碳循环国际公司的工艺要具备气候效益，前提是必须依赖低碳能源。萨伦称，中国近年来快速部署太阳能和风能，因此成为极具吸引力的市场。

中国能源行业协会预计，今年中国新增风电装机容量将达115 GW，新增太阳能装机容量达255 GW。相比之下，美国联邦能源监管委员会的数据显示，2024年美国可再生能源新增装机总量约为34 GW。此外，中国在新增核电装机方面也位居世界前列。

这部分可再生电力中，已有相当一部分（或即将）接入电解槽，用于电解水制氢——而氢正

是碳循环国际公司（CRI）工艺所需的原料。“中国汇聚了一批能提供廉价电力和廉价氢气的产业，”萨伦表示，且捕集的二氧化碳也易于获取，价格合理。“从技术和供应链角度来看，这里具备开展项目的适宜条件。”

事实上，相关项目正在推进。碳循环国际公司最初在冰岛建成一座示范工厂，管理层起初打算在当地扩大规模。冰岛拥有丰富的地热和水电资源，非常适合生产低碳氢——而要实现二氧化碳净减排，该公司的工艺离不开这种氢。

但即便在冰岛，二氧化碳衍生产物化学品的市场前景可观，中国仍是做出积极响应的市场。中国清洁能源开发商天楹集团旗下有一座年产17万吨的二氧化碳制甲醇工厂，计划今年秋季启用，所用绿氢将通过采购获得。这将是碳循环国际公司在华的第三座工厂，萨伦表示，这三座工厂生产的甲醇主要将用作海运船舶燃料。

中国大型产业集群产生的废气，为二氧化碳转化为化学品提供了另一重机遇。正是这类原料吸引了Synata Bio公司将首座工厂建在中国河南省，而非其总部所在地芝加哥郊区。

该公司正在商业化一种发酵工艺，利用氢气、一氧化碳和二氧化碳生产乙醇。其位于河南能源化工集团煤制甲醇园区内的工厂，年产乙醇达5万吨。首席执行官蒂姆·塞萨雷克计划将这些乙醇作为低碳原料在当地销售，用于化工生产。

这座工厂是该公司计划建设的多座工厂中的首座，目前正在准备投产。“我们将在运营过程中进行测试，并积累大量经验。”塞萨雷克说。

得益于河南化工园区大规模、24小时不间断的生产模式，Synata的反应器能稳定获取3种输入气体。这种稳定性有助于精确控制发酵的化学计量，使该公司的微生物能定向生产乙醇，进而降低蒸馏过程的成本和碳足迹。

塞萨雷克表示：“即便不考虑可持续发展相关激励政策，我们生产的合成乙醇成本也将低于其他替代产品。”

他认为，利用当前被直接排放或燃烧的二氧化碳、一氧化碳和氢气副产品，存在巨大的扩张空间。仅在河南厂区，“现有废气量就足以支撑我们将产能从5万吨扩至50万吨。”该

公司也已在国内其他地区考察选址。塞萨雷克称，与多数致力于将二氧化碳转化为低碳燃料和化学品的企业不同，Synata并不依赖太阳能和风能。

“中国确实有围绕能源增量进行创新的决心。”塞萨雷克表示，这既意味着扩大可再生能源和核能的规模，也意味着从传统化石能源中挖掘更多价值。“在考虑能源增量时，他们非常注重如何高效地将这些废弃物流转化为经济收益。我们的业务恰好契合了这种扩大能源版图的整体意愿。”

专注于材料科学和清洁能源领域的化学工程师兼顾问普拉加蒂·达拉帕尼指出，审批便捷是推动中国清洁技术发展的另一重要因素。在欧美，企业若要建设化工厂，需完成一长串合规任务，且往往需要获得各级政府的建设许可和运营许可。而她表示，在中国，审批体系更为集中，需完成的事项较少，且要求并非总能得到严格执行。

达拉帕尼还提到，对于符合国家优先发展方向的项目，政府愿意加以扶持。在不阻碍经济发展的前提下减少二氧化碳排放，便是其中之一。中国国家主席习近平多次重申2020年设定的国

家目标：2030年前实现温室气体排放达峰，2060年前实现碳中和。

碳简报(Carbon Brief)根据中国政府提供的统计数据进行分析后发现，中国电力行业的排放量已开始下降。但过去一年，由于化工行业产量增加且以煤炭为原料，该行业的排放量上升了约3%。

“这就是清洁技术项目能更快落地的原因，比如一年内或一年半就能启动，”达拉帕尼说，相比之下，欧美同类项目往往需要数年时间。“但这的确伴随着环境评估不够严格、公众咨询渠道有限、透明度和监管力度不足等问题。”她补充道。

Econic公司的威金斯认为，过去几十年，中国的产业战略常常侧重于成熟的制造技术，通过规模化生产和低成本劳动力形成竞争优势。如今，中国也在凭借自身规模和体制特点，抢占包括二氧化碳利用在内的新兴技术领域的领先地位。

“如今的中国，在人才素质、对技术的理解能力以及快速实现规模化的能力上，都令人难以置信。我从未见过这样的情况。”威金斯说，“他们已经把二氧化碳当作一种原料，并且正在将这一想法付诸实践。”

珐琅

古老技艺的永恒魅力与不褪色

之谜

作者：李文波；Email: eynwnu@163.com

珐琅

琅，这一古老而神秘的艺术形式，以其绚丽的色彩、宝石般的光泽和质感以及历经千百年而不褪色、不失光彩的特性，成为人类艺术宝库中的瑰宝（图1）。它不仅是一种装饰工艺，更是一种文化的传承，见证了人类文明的辉煌历程。本文将深入探讨珐琅的起源、制作工艺和化学稳定性等。

1. 珐琅的起源与发展

珐琅，又称“佛郎和法蓝”，是以石英、长石和硼砂等为原料经高温熔融制成的无机玻璃质材料，覆盖于金属或其他材质表面（图2）。珐琅的历史可以追溯到公元前12世纪的埃及。最初，珐琅主要是作为一种装饰金属的工艺而存在。它通过将熔融的玻璃质材料涂覆在金属表面，经过高温烧制后形成一层坚固的保护层。这种工艺在古代地中海地区得到了广泛的应用，尤其是在珠宝制作和宗教用品上。15世纪中叶，珐琅工艺在西欧法国得到了进一步的发展。当时的珐琅制品以其精美的工艺和鲜艳的色彩而闻名于世。随后，珐琅工艺经蒙古西征传入中国，并在明清时期达到了鼎盛^[1]。

按胎体材质可分为铜胎珐琅（如景泰蓝（因其在明代景泰



❶【图1】 a. 珐琅画（图片来源于新浪新闻）； b. 掐丝珐琅狮戏球海马纹碗（图片来源于网易）； c. 掐丝珐琅缠枝莲纹熏炉（图片来源于360个人图书馆）； d. 掐丝珐琅首饰（图片来源于百度百科）



❷【图2】（左）清光绪 - 金漆多宝花卉珐琅盆景（图摄于北京颐和园博物馆）；（右）元 - 掐丝珐琅缠枝莲纹鼎式炉（图片来源于搜狐）

年间大量烧制且以孔雀蓝为主色调而得名）、银胎珐琅、金胎珐琅、瓷胎珐琅及玻璃胎珐琅。金属胎体影响珐琅的质感和应用场景，如铜胎珐琅多用于工艺品，金胎珐琅常用于高端首饰。

工艺分类：①掐丝珐琅：金属表面焊接金属丝形成隔间，填充珐琅釉料，代表作为明清景泰蓝；②画珐琅：直接在金属胎上绘制珐琅釉料，需多次烧制，工艺复杂；③内填珐琅：金属胎鑿

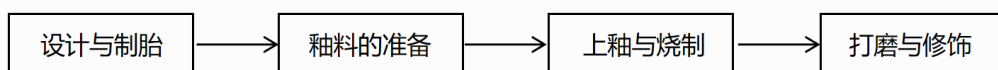
刻花纹后填充珐琅，呈现宝石镶嵌效果；④ 鑲胎 / 锤胎珐琅：通过鑲刻或锤揲金属形成图案，再施珐琅，立体感强；⑤ 透明珐琅：罩以透明釉，显露金属浮雕的明暗变化。

珐琅制品用途广泛：首饰珐琅（如腕表表盘）、工艺品珐琅（花瓶、摆件）、宗教用品（宗教纹饰器皿）和建筑装饰（珐琅板）等，兼具实用性与艺术价值。北京以掐丝珐琅（景泰蓝）闻名，广东

擅长画珐琅（广珐琅），欧洲则发展出微绘珐琅等独特风格。

2. 珐琅的制作工艺

珐琅的制作工艺复杂且精细，需要经过多个步骤才能完成一件精美的作品（图 3）。



【图 3】珐琅制作工艺流程图

2.1 设计与制胎

制作珐琅的第一步是设计。设计师会根据需求绘制出图案，然后选择合适的金属材料制作胎体。常见的金属胎体材料包括铜、金和银。以铜为例，工匠会将铜片裁剪成所需的形状，然后通过锤打、焊接等工艺制作出胎体的雏形。

2.2 釉料的准备

珐琅的釉料主要由石英、长石、硼砂和氧化物等无机矿物质组成。这些原料经过研磨、筛选后，与水或粘合剂混合，形成糊状或浆料。为了获得不同的颜色，工匠会在釉料中加入各种金属氧化物作为着色剂。例如，钴氧化物（ CoO ）用于蓝色，铁氧化物（ Fe_2O_3 ）用于红色和棕色，

铬氧化物（ Cr_2O_3 ）用于绿色，锰氧化物（ Mn^{3+} ）用于紫色^[2]。

2.3 上釉与烧制

将准备好的珐琅釉料均匀地涂覆在金属胎体表面，通常需要多次上釉。每一层釉料都需要干燥后，再放入高温窑炉中进行烧制。烧制温度一般在 $750\sim 850^\circ\text{C}$ 之间。在高温下，珐琅粉末会熔化并与金属胎体牢固结合，形成光滑的玻璃状涂层。烧制完成后，珐琅制品会呈现出鲜艳的色彩和光泽。

2.4 打磨与修饰

烧制后的珐琅制品表面可能会有些不平整的地方，需要进行打磨和修饰。工匠会使用细砂纸或磨石对表面进行打磨，使其更加光滑。此外，还可以通过雕

刻、镶嵌等工艺对珐琅制品进行进一步的装饰。

3. 珐琅不褪色的原因

珐琅不褪色的原因主要归结于其独特的制作工艺和化学稳定性。以下是详细的分析：

3.1 高温烧制

珐琅的制作过程中，高温烧制是一个关键步骤。如式（1）所示，在高温环境下，珐琅的玻璃质材料与金属氧化物颜料发生复杂的物理和化学反应，形成了稳定的化学键^[3]。这些反应使得颜料颗粒被紧密地包裹在玻璃质基体中，形成了一个均匀且稳定的微观结构。这种结构类似于宝石的内部结构，颜料被固定在其中，难以被外界因素影响。



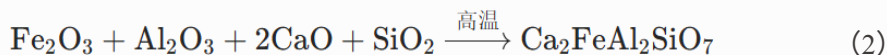
3.2 玻璃质基体的保护作用

珐琅的玻璃质基体（主要成分是硅酸盐）具有很强的耐腐蚀性，不仅为颜料提供了物理支撑，还起到了重要的保护作用。同时，玻璃质基体的致密结构可以有效阻挡紫外线、水分和其他化学物质的渗透，从而保护颜料免受氧化和分解的影响。

例如，在珐琅制品表面形成的玻璃质涂层，其厚度通常在 0.1~0.5 mm 之间。这种涂层就像一层坚固的“防护盾”，将内部的颜料与外界环境隔离开来^[4]。即使在极端的气候条件下，如高湿度和强酸雨等，珐琅制品依然能够保持其色彩和光泽。

3.3 颜料的化学稳定性

珐琅颜料大多是由金属氧化物组成的，这些氧化物本身具有很高的化学稳定性。如式（2）所示，氧化铁（ Fe_2O_3 ）是红色颜料的主要成分，它在高温烧制过程中会与玻璃质材料形成稳定的铁铝酸盐^[5]。这种化合物不仅耐高温，还具有很强的抗紫外线和抗化学腐蚀能力。



此外，珐琅颜料在高温烧制过程中会经历复杂的化学反应，形成稳定的晶体结构。这些晶体结构具有很强的抗光性和抗化学性，使得颜料在长期使用中不会发生褪色。

3.4 历史见证

从历史的角度来看，珐琅的耐久性得到了充分的证明。许多古代的珐琅制品，如中国的景泰蓝和欧洲的珐琅首饰等，经过数百年的岁月洗礼，依然色彩鲜艳。这些古老的珐琅制品不仅展示了珐琅的化学稳定性，还体现了其艺术价值。

例如，故宫博物院收藏的明代景泰蓝制品，其表面的珐琅色彩依然如新。这些制品经历了数百年的时间，依然能够展现出珐琅的美丽和魅力。

4. 珐琅的应用领域

珐琅的不褪色特性和化学稳定性使其在多个领域得到了广泛应用。

4.1 艺术品

珐琅在艺术品领域也有广泛的应用。珐琅可以用于制作各种艺术品，如画作和雕塑等（图 4a）。这些艺术品不仅具

有很高的艺术价值，还能够长期保存。

例如，法国的利摩日（Limoges）珐琅画^[6-7]以其精湛的工艺和鲜艳的色彩而闻名。这些画作在高温烧制过程中形成了稳定的化学结构，能够抵御各种环境因素的影响。

4.2 钟表

珐琅表盘是高端钟表的标志性特征之一。其不仅具有极高的艺术价值，还能够保证钟表的耐用性和美观性（图 4b）。

4.3 珠宝首饰

珐琅首饰以其绚丽的色彩和宝石般的光泽而受到人们的喜爱。珐琅可以用于制作各种首饰，如戒指、项链和手镯等（图 4c）。这些首饰不仅美观，而且具有很高的耐久性。

例如，卡地亚 (Cartier) 的珐琅首饰以其精湛的工艺和鲜艳的色彩而闻名。这些首饰在日常佩戴中能够抵御各种环境因素的影响，保持其色彩和光泽。

同样，百达翡丽 (Patek Philippe) 的珐琅表盘以其精湛的工艺和不褪色特性而备受收藏家的喜爱。这些表盘在高温烧制过程中形成了稳定的化学结构，能够抵御时间的侵蚀。

4.4 建筑装饰

珐琅在建筑装饰领域也有重要的应用。珐琅可以用于制作各种建筑装饰品，如瓷砖和壁画等。这

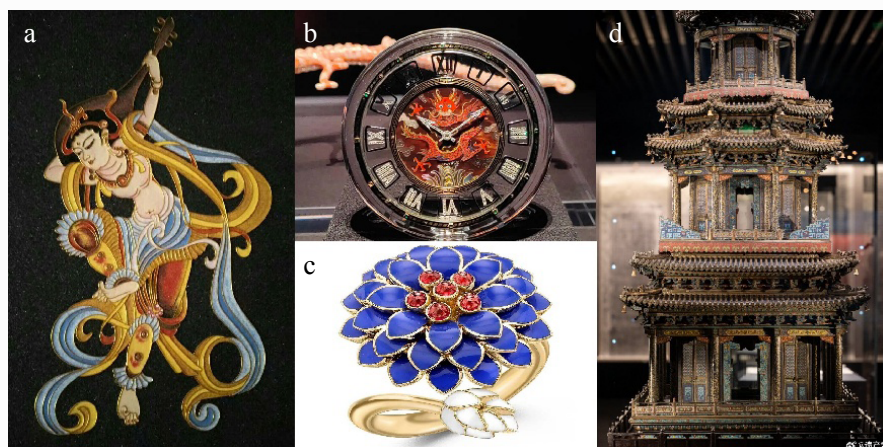


图 4】珐琅工艺品 (a) 图片来源于百度百家号；(b) 图片来源于微博；(c) 图片来源于搜狐；(d) 图片来源于 360 个人图书馆

些装饰品不仅美观，而且具有很高的耐久性（图 4d）。

例如，北京故宫的景泰蓝装饰以其精湛的工艺和鲜艳的色彩而闻名。这些装饰品在高温烧制过程中形成了稳定的化学结构，能够抵御各种环境因素的影响。

5. 结论

随着科技的发展，珐琅工艺也在不断创新。现代珐琅工艺不仅保

留了传统的制作方法，还引入了新的技术和材料。例如，现代珐琅制品可以通过激光雕刻等技术进行更复杂的装饰。

同时，珐琅的应用领域也在不断扩大。除了传统的珠宝首饰、钟表和艺术品等领域，珐琅还被应用于建筑装饰和汽车内饰等领域。这些新的应用领域为珐琅的发展提供了更广阔的空间。

参考文献

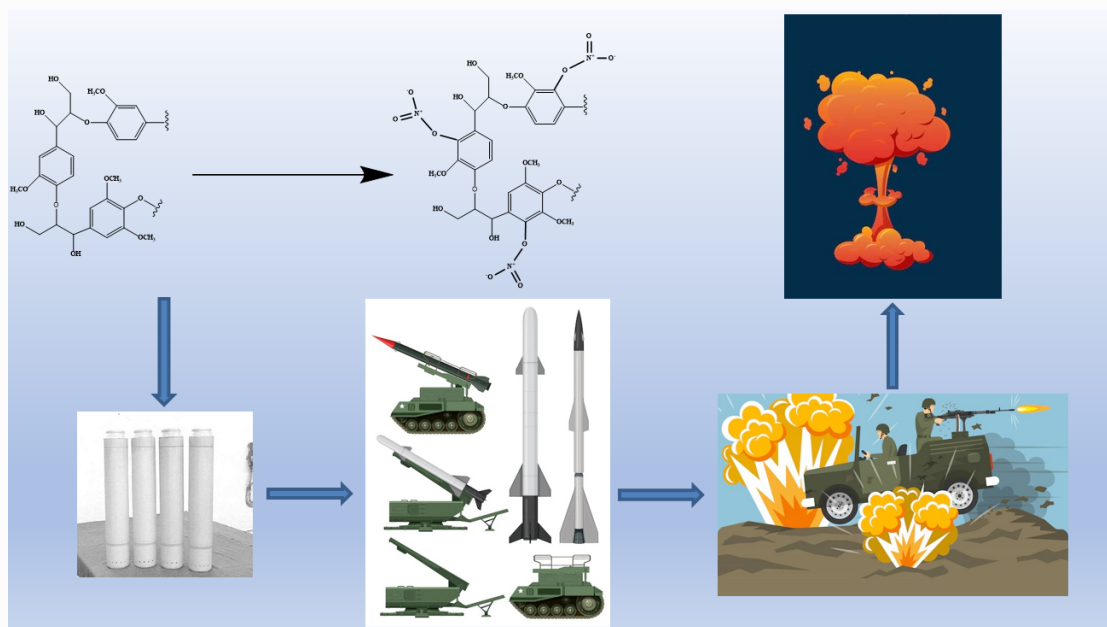
- [1] 章美薇. 珐琅工艺的起源与传播研究[D]. 北京：北京服装学院, 2017.
- [2] 王承遇, 卢琪. 中国古代琉璃着色剂的演变[J]. 玻璃与搪瓷, 2017, 45(5): 23-28.
- [3] Colomban P, Kirmizi B, Gougeon C, et al. Pigments and glassy matrix of the 17th-18th century enamelled French watches: A non-invasive on-site Raman and pXRF study[J]. Cultural Heritage, 2020, 44: 1-14.
- [4] Colomban P, Franci G S, Ngo A T, et al. Non-invasive Raman and XRF study of Mīnā'ī decoration, the first sophisticated painted enamels[J]. Materials, 2025, 18(3): 575-592.
- [5] Oezcoban H, Yilmaz E D, Schneider G A. Hierarchical microcrack model for materials exemplified at enamel[J]. Dental Mater, 2018, 34(1): 69-77.
- [6] Colomban P, Gerken M, Gironda M, et al. On-site micro-XRF mapping of enameled porcelain paintings and sculpture. First demonstration[J]. Europ Ceram Soc, 2025, 45(1): 124-163.
- [7] Barba C I, Nucera A, Barberi R C, et al. Study and micro-Raman characterization of pigments present on majolicas of historical and artistic interest from Gerace, Italy[J]. Heritage Sci, 2023, 11(1): 114-139.

小药筒，大能量

作者：吴孟德，刘超，刘彤彤，杨庭，万炜涵，郭浩然；Email: 1690855057@qq.com



Image by freepik on Freepik



①【图 1】可燃药筒应用示意图

1. 可燃药筒是什么

可燃药筒能装填发射药，可以在膛内燃烧，提高弹药飞行的初速，在射击时自行消失，无需处理废壳^[1-5]。目前，可燃药筒在主战坦克和大中口径自行火炮中得到广泛应用。

2. 为什么要防护可燃药筒

可燃药筒含有硝化纤维素，热感度高、点火温度低，在高射速武器系统中，膛内的高温会引发自燃现象，导致安全事故^[6-8]。为了防止可燃药筒在发射前的意外自燃，需要提升它的耐高温性能。

同时，可燃药筒内部的纤维素网络有很多空隙和外部的多孔结构，导致水分可沿着其表面进入内部空隙中，吸水性强，容易受潮^[9-11]。可燃药筒需要面对恶劣的贮存环境，如海军武器装备常年处于气候潮湿且含有大量盐雾的空气环境中，盐雾与水汽的侵蚀情况十分严重。因此，需要提高可燃药筒的防水、防盐蚀性能。

下面，我们将按照可燃药筒主要组分、含能组分的合成、制备方法优化、研究方法、防护涂层研究和可燃药筒未来研究方向，依次展开介绍。

3. 可燃药筒主要组分有哪些

可燃药筒主要成分是硝化纤维素、纸纤维、粘合剂、安定剂和增强组分。可燃药筒根据材料性质属于聚合物药筒，可以分为半可燃药筒（由金属底座和可燃管组成）和全可燃药筒（实现药筒可消失或最小残留），半可燃药筒是金属药筒改进的产物。其中，硝化纤维素作为主要燃烧剂，起到提供能量的作用；纸纤维不仅可以提高可燃药筒的孔隙结构，提高燃烧效率，还可以减轻可燃药筒的重量；粘合剂起到粘合其他组分的作用；安定剂（如二苯胺和凡士林等）可以中和分解产物、抑制反应速率，提高可燃药筒的化学稳定性；增强组分（如聚酯纤维和碳纤维等）可以有效提高可燃药筒的力学强度和燃烧效率。

传统的可燃药筒制备方法有：织物硝化法、抽滤模压法、注塑模压法、卷制法和绕丝法。

织物硝化法作为最早的制备方法，首先将硝化的有机合成纤维、纸纤维和棉纤维等编织成特定的形状，接着用二氧化氮等氮氧化合物对其进行气相硝化制备出可燃药筒。本制备方法采用后硝化工艺，产品质量稳定性较差，制备难度较大。

抽滤模压法，属于一次成型的制备方法，制备出的可燃药筒具有初始燃烧活度高和渗透性燃烧的特点。作为早期的可燃药筒制备方法，主要制备过程是配料制浆、抽滤制坯和模压成型 3 个步骤。用碎浆机将纤维素完全粉碎，所得的碎屑再同硝化棉（含能材料）、树脂（粘结剂）以及相应的安定剂等一起加入反应器中进行混合搅拌，待混合充分后得到均匀的浆液。接着将所配得的浆液倒入多孔滤板用抽滤罐进行真空抽滤，在特定的压力和设定时间下，制备出一定尺寸的圆形湿坯。然后将湿坯放入热压成型模具中，在设定的模温、蒸汽压和一定的时间下，进行塑模。最后将所得的试样放入真空烘箱中烘干，即可制备出可燃药筒。

注塑模压法与抽滤模压法不同的是粘结剂的加入方式。注塑模压法是将硝化纤维素、木浆纸、含能组分以及增强剂混合均匀，填充到模具中，接着向模具中加入粘结剂，最后加热固化成型，制备出可燃药筒。该生产方法所制备的可燃药筒存在局部粘结剂过多问题，影响了燃烧性能，需要改进注塑模压法的加工工艺。

卷制式可燃药筒，是由浸泡过三硝基甲苯（TNT）或其他高能含能材料的硝化纤维纸卷制而成。此类药筒具有多层结构，组分中含有大量的硝化纤维素，该药筒整体结构呈疏松多孔的巢体或毡

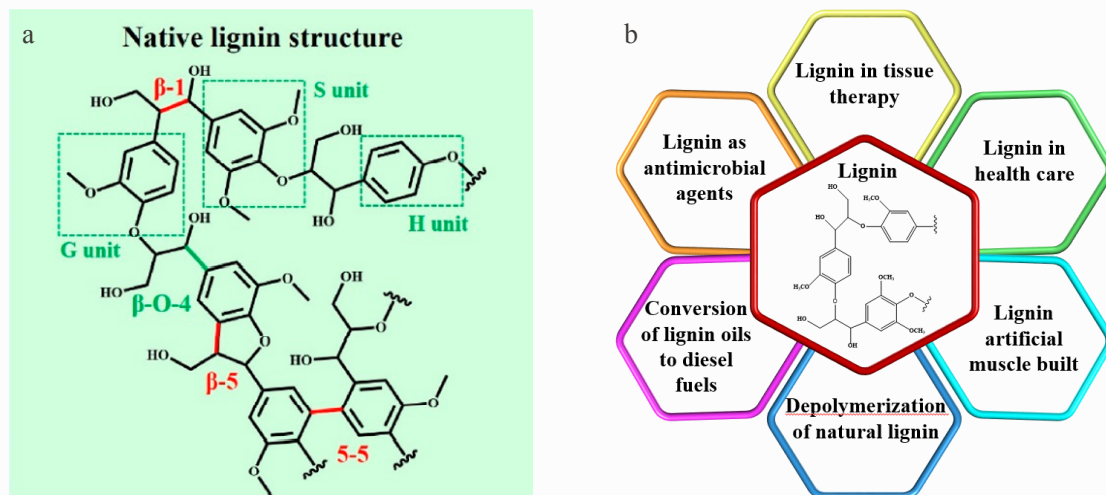
状。该类卷制药筒在潮湿的环境中会快速地吸收水分，并迅速达到吸湿平衡状态，环境湿度越大，所吸收的水分就越多。卷制式可燃药筒受环境湿度的影响较大，随着环境湿度的增加，自身的燃烧性能发生变化，燃烧速率降低，需要采取相应的防水措施，以提高卷制式可燃药筒的防水性能。

可燃药筒绕丝制备法，是将浸泡过树脂的金属或非金属丝线缠绕在适当的轴心上，成型、固化和脱模所制成。首先将切好的硝化纤维素纸卷刷胶并传送至转轴上，每一个药筒都要用绕丝缠绕多层，每层的纸卷（除第一层外）都需要经过供料滚筒给纸的上表面涂覆一层粘合剂，以方便下一次的绕丝，经过多层绕丝固化后得到成品的可燃药筒。该生产方法所制备的可燃药筒具有较好的抗拉强度和延展性，但此类药筒表面的多孔结构和内含的大量亲水纤维素，使它极易吸潮，改变了武器的内弹道性能，产生大量的燃烧残渣，降低弹药的射速，造成膛炸事故。该制备方法相对复杂，需要对整体的制备方法升级与简化。

4. 能量担当——硝化木质素

为了提高可燃药筒的整体性能，采用木质素取代传统的纤维素制备硝化木质素，作为可燃药筒的含能组分。如图 2 所示，木质素是自然界丰富的有机资源，主要由 3 种单体组成（G、S 和 H 单体）。这些不同的结构由 C—O 键和 C—C 键连接。由于含有多种官能团，木质素发生多种化学反应，如：氧化反应、还原反应、硝化反应、光解反应和缩聚反应等。科研人员拟采用木质素作为原料，采用硝化法以合成出新型的含能材料硝化木质素。

如图 3 所示，共设计出 3 种木质素硝化反应路线，以制备出硝化木质素。



【图 2】(a) 木质素化学结构和 (b) 应用领域^[12-13]



【图 3】硝化木质素合成方法

4.1 NO₂ 直接硝化

在反应釜中加入木质素原料和硝化催化剂(如: $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 和

Na-ZSM-5), 常用的硝化催化剂如表 1 所示。将一定压力的 NO_2 气体注入反应釜中, 在反应釜中进行硝化反应, 考察催化剂、 NO_2 气体压力和反应时间对

木质素硝化反应的影响。

4.2 液相硝化

表 1 硝化反应有机溶剂

	Organic solvent
1	Benzene
2	Methylbenzene
3	Cyclohexane
4	Anhydrous ethanol
5	Naphthalene

4.3 N_2O_5 - O_3 混合硝化

采用固态的绿色硝化源 N_2O_5 ，通入 O_3 气体对木质素进行硝化反应。选择三口烧瓶，实验装置如图 4 所示。在烧瓶中加入木质素原料、催化剂和有机溶剂，并控制 N_2O_5 和 O_3 的气体流速，考察不同气体流速下木质素的硝化反应效果。

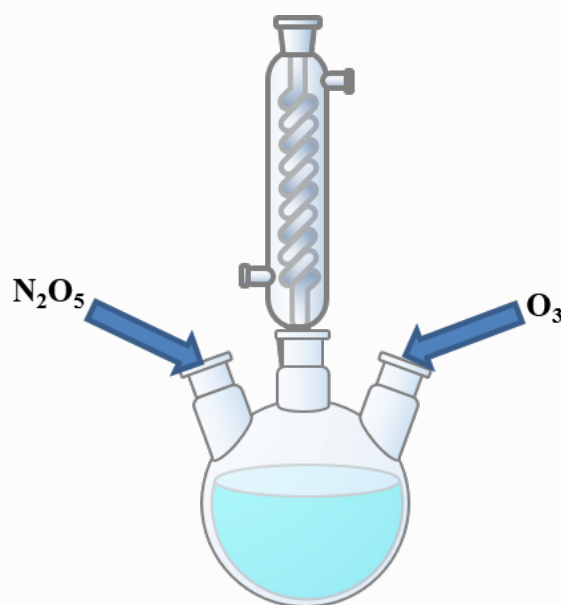


图 4 N_2O_5 - O_3 混合硝化实验装置

5. 如何优化可燃药筒制备方法

结合抽滤、模压法、卷制法和绕丝法等早期的可燃药筒制备方法^[14-19]，设计出可燃药筒的全新制备方法，具体制备过程如图 5 所示。

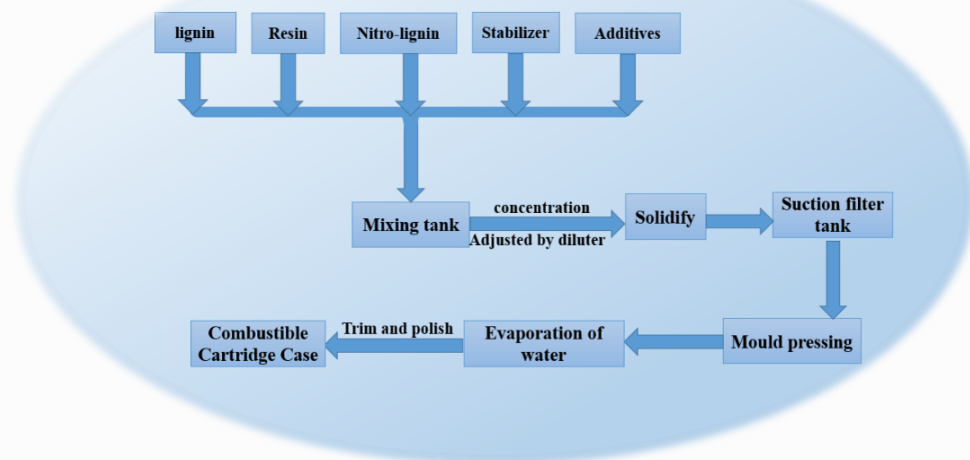


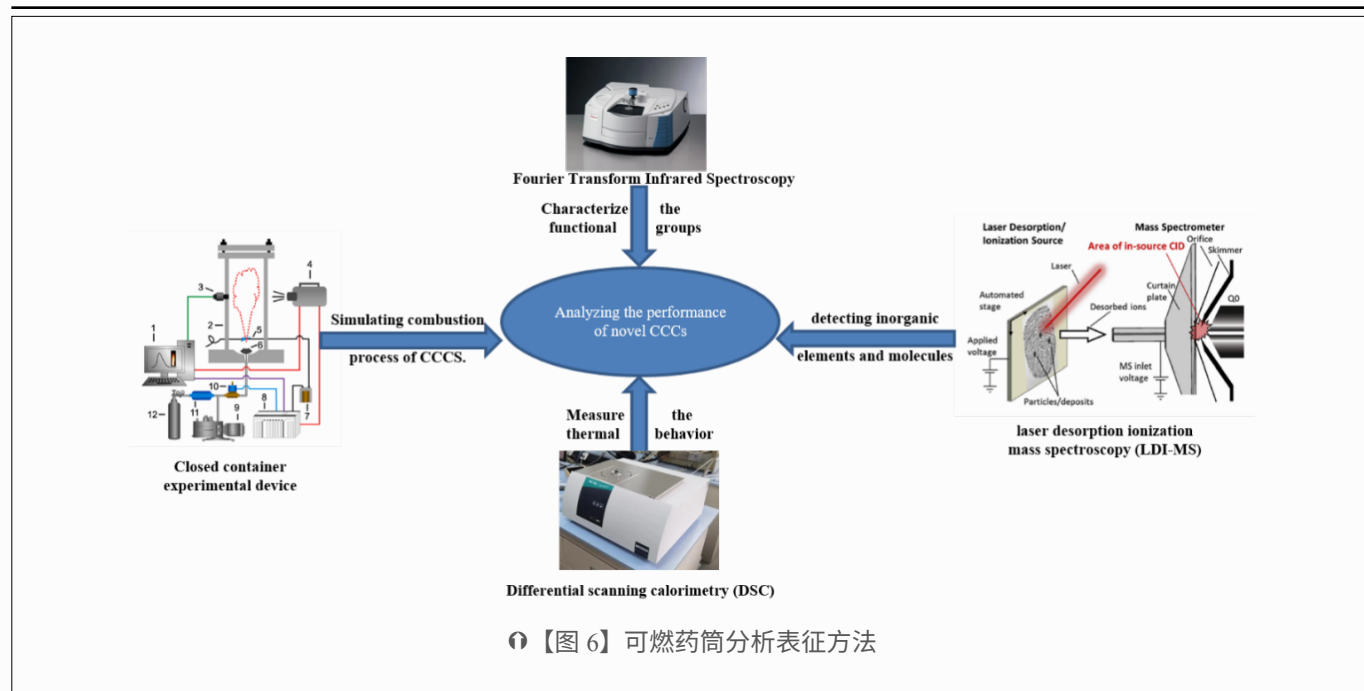
图 5 可燃药筒制备方法优化

6. 可燃药筒有哪些研究方法

如图 6 所示, 通过傅里叶变换红外光谱 (FT-IR) 分析所合成的硝化木质素的化学结构, 确定最佳的合成路线及实验条件。采用密闭爆发器试验研究新型可燃药筒的内弹道性能。采用差示扫描量热 (DSC) 获取硝化木质素与新型可燃药筒在温度程序过程中

的吸热、放热和比热变化等相关热效应信息, 研究其熔融与结晶过程、玻璃化转变、相转变、氧化稳定性、反应温度与反应热焓, 比热、结晶度和反应动力学参数。

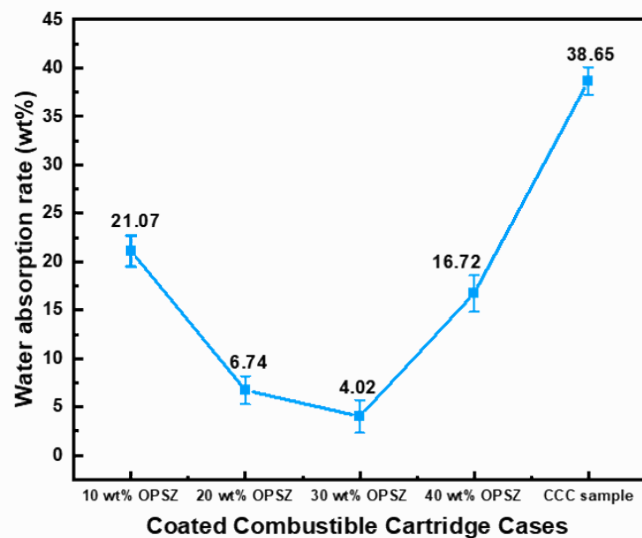
综合多种分析表征方法以研究不同制备方法下可燃药筒的性能, 确定最佳的设计配方及制备方法。



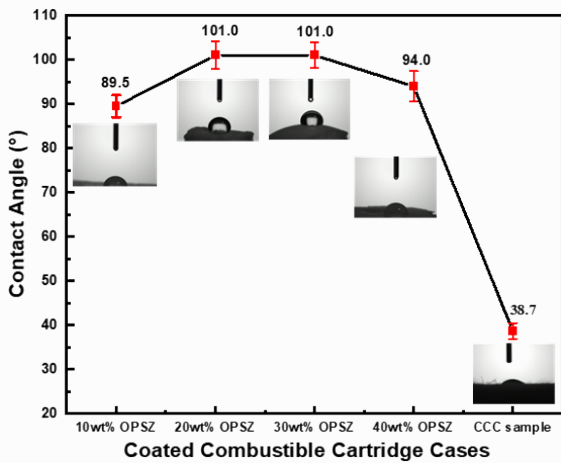
7. 可燃药筒防护涂层有哪些效果

在环氧树脂化学结构上接枝有机聚硅氮烷 (OPSZ), 形成一种新型的交联改性树脂, 制备出 OPSZ 复合涂层, 用以防护可燃药筒。在 30% 的 OPSZ 防护下, 可燃药筒具有最低的盐水吸收率 4.02%, 水接触角达 101.0 (°) (图 7 和图 8), 耐腐蚀性最佳。

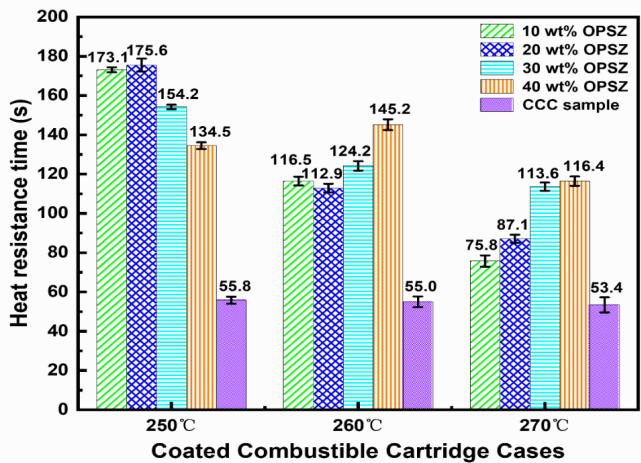
如图 9 所示, 在 250 °C 下, 随着 OPSZ 含量的增加, 可燃药筒的防护时间先增加后降低, 其中, 20% 的 OPSZ 涂层耐热性能最优。在 OPSZ 复合涂层保护下, 可燃药筒在 27.83 MPa 时断裂伸长率最高达 72.96%, 拉伸附着力最高达 18 MPa (图 10)。



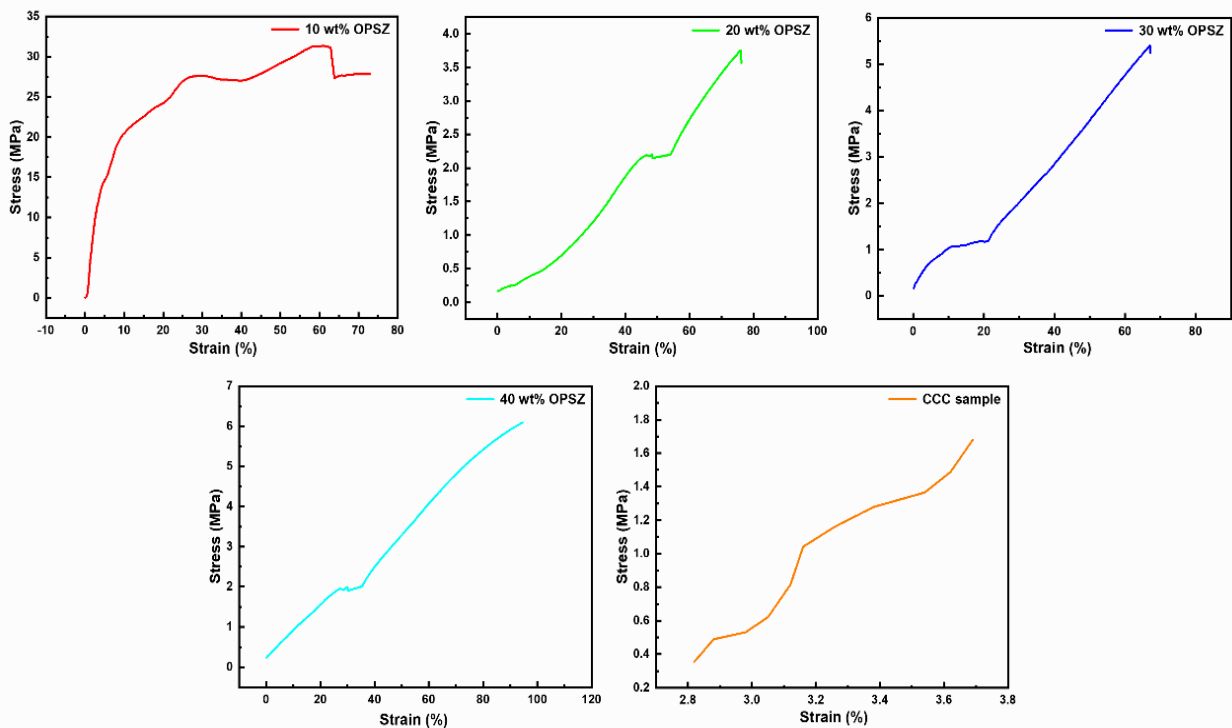
① 【图 7】不同 OPSZ 涂层浸没盐水 3 天后吸水率



【图 8】不同 OPSZ 复合涂层的水接触角数值



【图 9】OPSZ 涂覆下可燃药筒的平均耐热时间的柱状图



【图 10】OPSZ 涂覆下可燃药筒的非线性应力 - 应变曲线

以环氧树脂和聚酰亚胺 (PI) 为前驱体, *N*-甲基吡咯烷酮为引发剂, 合成 NPMF 复合涂层。如图 11 所示,

NPMF 复合涂层可以在可燃药筒的体表形成致密的交联网络, 有效地提高了可燃药筒的防水性能。

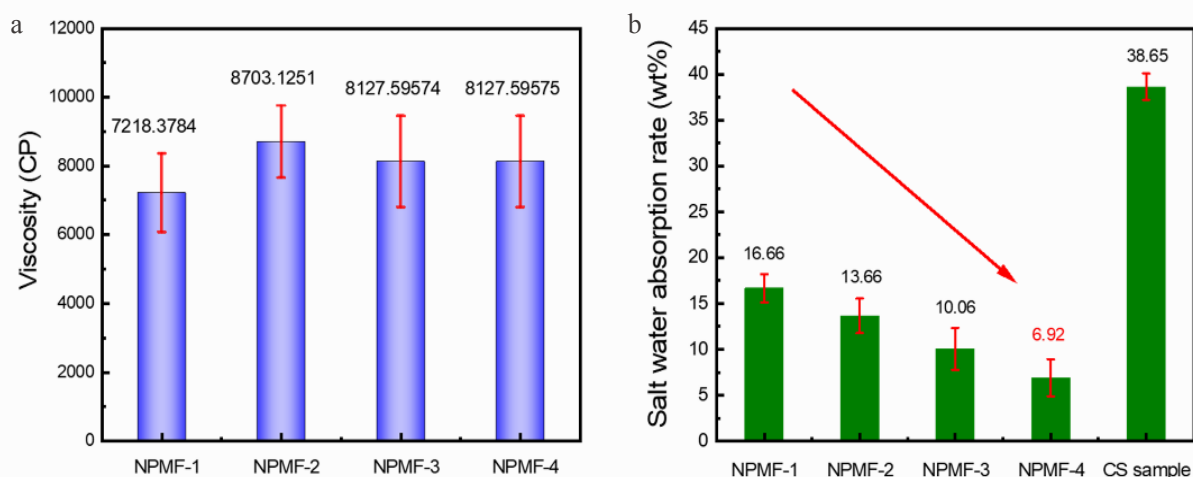


图 11 (a) NPMFs 涂层粘度和 (b) NPMFs 涂层盐吸水率

NPMF 涂层具有优良的抗腐蚀能力 (图 12 和图 13)。其中, NPMF-4 具有最高的电阻值 (53488.3Ω), 抗腐蚀性能最优。

8. 可燃药筒未来研究方向有哪些

为了推动可燃药筒在武器弹药领域的进一步应用, 仍需要在耐热性能的优化、粘合剂的选择、制备方法的改进、燃烧机理的研究和可燃药筒与发射药燃烧匹配性的研究等 5 个方面进行探究:

8.1 可燃药筒耐热性能的优化

可燃药筒中的含能组分硝化纤维素可以瞬时燃烧, 以保证可燃药筒燃烧的完全性和提供弹丸射击的部分能量。但硝化纤维素自身的热敏性高, 降低了可燃药筒的耐热性能。早期, 为了提高可燃药筒的耐热性能, 加入聚丙烯酸纤维, 不仅可以增强可燃药筒的力学性能, 还可以提升其耐热性能, 但聚丙烯酸纤维的高吸水性会降低可燃药筒的燃烧速率, 产生燃烧残渣。因此, 仍需要继续改进可燃药

筒配方的设计, 在保证可燃药筒高燃烧速率的同时优化其耐热性能。

8.2 可燃药筒粘合剂的选择

不同种类的粘合剂对可燃药筒力学性能的影响各不相同, 性能优异的粘合剂能够提高可燃药筒的力学强度, 以满足使用要求。如采用树脂基粘合剂合

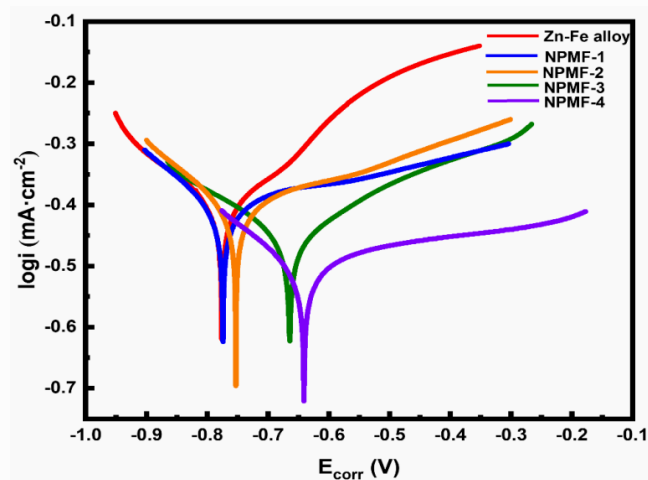


图 12 NPMFs 涂层样品的 Tafel 曲线

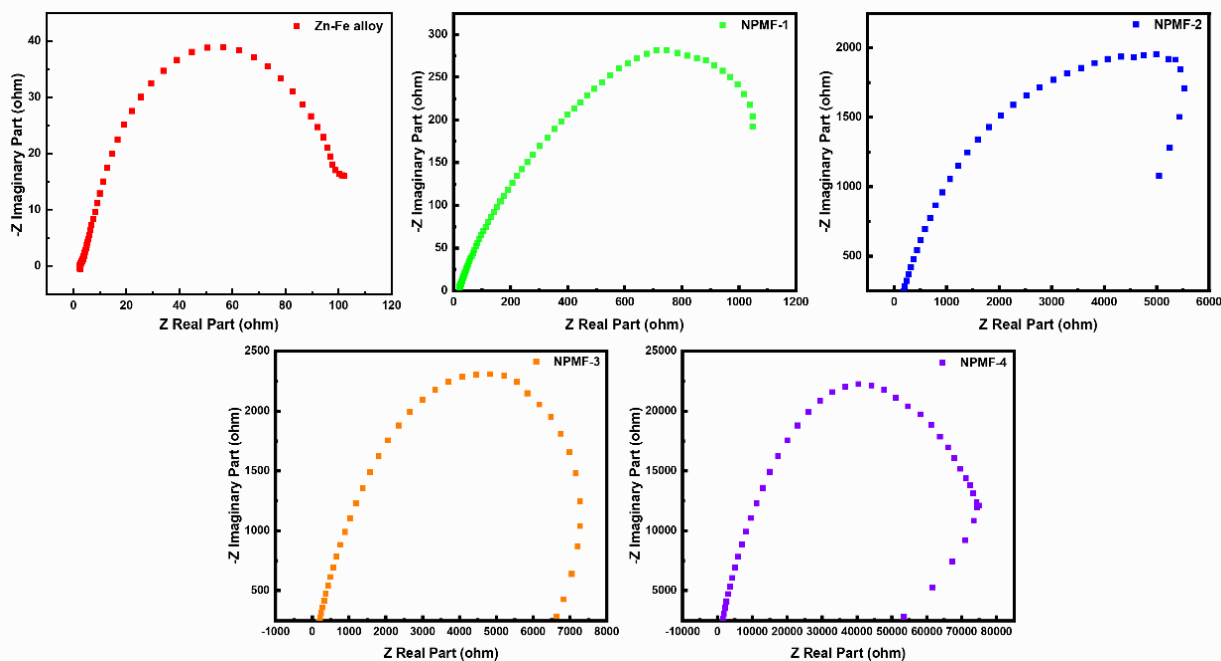


图 13 NPMFs 涂层 Nyquist 图

成的树脂基可燃药筒，具有优良的粘结性和延展性。

8.3 可燃药筒制备方法的改进

可燃药筒的改进制备方法主要有：超临界流体发泡法、真空吸附法和离心驱水法等。超临界流体发泡法采用 SC- CO_2 发泡剂，制备出新型的微孔型可燃药筒。其中，微孔结构增加了含能材料的内表面和空隙率，不仅可以提高燃烧面积，还可以增强气流穿透和对流燃烧。同时，低密度的微孔型可燃药筒还具有较低的点火延误，增加了可燃药筒在发射过程中的高燃速和高消耗，具有能量含量可控、燃烧速率快、易损性低和耐热性能好等优点。真空吸附法以网模为过滤介质，采用过滤吸附使过滤介质两侧形成压力差，浆液中的溶剂从回流管中排出，而浆液中的固体组分被过滤介质滤出，形成

湿坯，最后将湿坯脱水、热压成型后制备可燃药筒。此制备方法可以高效排除浆液中的溶剂，有效地缩短可燃药筒的制备时间，同时，也节约其生产成本。离心驱水法是利用驱水机的离心力作用，以实现浆液中固体和液体的分离，从而得到固体组分，再将固体组分进行模压成型，干燥制备可燃药筒。真空吸附法和离心驱水法所制备的可燃药筒空隙率较高，燃烧性能良好，但力学性能较差，不利于模块装药。

8.4 可燃药筒燃烧机理的研究

由于可燃药筒的多孔性结构，导致其发生渗透性燃烧。目前，科研人员主要利用密闭爆发器试验测试可燃药筒的燃烧过程，以获得压力与时间曲线，再变换为质量与时间曲线得到质量燃烧速率，

采用多孔火药的药型计算公式反演燃烧规律，预设其药型参数经验公式，最后经过大量试验确定各个参数，从而研究可燃药筒的燃烧特性。但这种研究方法只能从表观上分析其燃烧规律，很难对其渗透性燃烧做出合理的解释。因此，需要深入研究可燃药筒的燃烧规律，从而揭示其渗透性燃烧机理。

8.5 可燃药筒与发射药燃烧匹配性的研究

可燃药筒与主装药燃烧匹配性是一个关键性的研究内容，二者燃烧匹配合理，有助于可燃药筒的完全燃烧和提高主装药的燃速，以充分释放能量，从而提高弹丸的射速；燃烧匹配不合理，

会导致可燃药筒燃烧不完全，产生大量残渣。可燃药筒的燃烧过程与其装填条件密切相关，因此，需要测试不同装填条件下可燃药筒与主装药的燃烧过程，以研究二者之间的燃烧匹配性差异，从而促进可燃药筒在武器弹药领域的应用。

9. 结语

目前，科研人员制备出了碱性硅树脂复合涂层、环氧乙烯基树脂复合涂层、聚硅氮烷改性复合涂层、聚酰亚胺复合涂层、乙烯基树脂改性复合涂层（图 14）^[20-24]，对可燃药筒进行了全方位的强化，在不远的未来，可燃药筒将在军事领域不断发光、发热。



① 【图 14】复合涂层防护下的可燃药筒

参考文献

- [1] Ho C H, Tomkins B A, Ramsey R S, et al. Determination of nitroester and stabilizer migration in combustible cartridge case wall[J]. Propell Explos Pyrot, 1996, 21(2): 79-84.
- [2] Miguel S A. Design criteria for inert or consumable polymer cartridge materials[J]. J Spacecraft Rockets, 1973, 10(5): 333-340.
- [3] Zimmerman F J. Development of 7.62 mm and 30 mm combustible cartridge case ammunition[J]. J Spacecraft Rockets, 1969, 6(3): 312-314.
- [4] Yang W, Ying S. Burning characteristics of microcellular combustible ordnance materials[J]. Propell Explos Pyrot, 2016, 41(1): 136-141.
- [5] Dey A, Athar J, Gogoi S, et al. Improvements in the structural integrity of resin based combustible cartridge Cases (CCC) at elevated temperatures[J]. Central Europ J Energetic Mater, 2015, 12(1): 117-127.
- [6] Shedge M T, Patel C H, Tadmok S K, et al. Polyvinyl acetate resin as a binder effecting mechanical and combustion properties of combustible cartridge case formulations[J]. Defence Sci J, 2008, 58(3): 390-397.
- [7] Peter L D. Fibrillated polyacrylic fiber in combustible cartridge cases[J]. Ind Eng Chem Res, 1984, 23(3): 438-441.
- [8] Syal R K, Sindker D V, Narr P S, et al. Hazard assessment for manufacture of combustible cartridge cases using picrite[J]. Defence Sci J, 1996, 46(2): 71-75.
- [9] Jia H, Lu G, Jiang J, et al. The influence of humidity on burning perfectibility of molded combustible cartridge case[J]. Adv Mater Res, 2011, 295-297: 446-449.
- [10] Syal R K, Narr P S. Study of brass obturator design for combustible cartridge case for 105 mm tank gun ammunition[J]. Defence Sci J, 2013, 47(3): 373-381.
- [11] Eliška J, Vojtěch Z, Pavel K, et al. Combustible cartridge case material characteristics evaluation[J]. Propell Explos Pyrot, 2024, 49(9): e202400100.
- [12] Cao Y, Zhang C, Tsang D C, et al. Hydrothermal liquefaction of lignin to aromatic chemicals: Impact of lignin structure[J]. Ind Eng Chem Res, 2020, 59: 16957-16969.
- [13] Guo T, Liu T, He J, et al. One-pot transformation of lignin and lignin model compounds into benzimidazoles[J]. Eur J Org Chem, 2022, 2: e202101152.
- [14] 郑林, 李生慧, 魏学涛. 硝化棉含氮量对叠氮硝铵发射药力学性能的影响[J]. 火炸药学报, 2003, 26(3): 47-50.
- [15] 田书春, 胡义文, 袁小丽, 等. 叠氮类热塑性弹性体对模压可燃药筒燃烧性能的影响[J]. 火炸药学报, 2018, 41(2): 147-152.
- [16] 李忠山, 田书春, 周逸, 等. 纤维素甘油醚硝酸酯基模压可燃药筒的制备与性能[J]. 火炸药学报, 2019, 42(5): 521-530.
- [17] 邹伟伟, 郝晓琴, 张志勇, 等. 小口径可燃药筒及装药的燃烧性能研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(8): 1423-1429.
- [18] 田书春, 周伟良, 李忠山, 等. 新型黏结剂和水性交联剂在模压可燃药筒中的应用[J]. 爆破器材, 2018, 47(3): 27-36.
- [19] 李忠山, 胡义文, 孟勇, 等. 阴离子羧甲基淀粉钠对模压可燃药筒性能的改进[J]. 爆破器材, 2017, 46(6): 26-30.
- [20] Wu M, Xiao Z. Polyimide-modified epoxy coatings reinforced with functional fillers for enhanced thermal stability and corrosion resistance[J]. Adv Compos Hybrid MA, 2025, 8: 172.
- [21] Wu M, Xiao Z. Optimum preparation of organopolysilazane composite coatings and their role in protecting combustible cartridge cases[J]. Surf Interfaces, 2025, 58: 105804.
- [22] Wu M, Xiao Z. Enhancement of heat resistance and waterproof performance of combustible cartridge cases with phenolic epoxy resin-modified polydimethylsiloxane composite coating[J]. Colloid Surface A, 2025, 708: 136002.
- [23] Wu M, Du J, Xiao Z. Preparation and properties of an organosilicon-modified coating to protect combustible cartridge cases[J]. Colloid Surface A, 2024, 696: 134380.
- [24] Wu M D, Xiao Z G. Fabrication of vinyl ester-modified phenolic resin composite coatings for the protection of combustible cartridge cases[J]. ACS Omega, 2025, 10(14): 13807-13815.

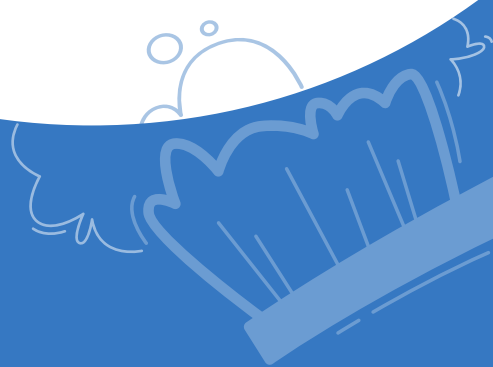
龋齿虽小疾，颇解妨食眠，昨暮作尤剧，颊辅相钩联。

——陆游



预防
龋齿
选它们就是了

作者：星落；Email: lwb0564335@163.com



俗话说：牙齿好，才能牙口好；牙口好，才能胃口好；胃口好，才能身体好。一口健康洁白的好牙，不仅看上去美观，而且吃饭也会嘛嘛香，可以说它与我们生活具有密切的关系。然而，与牙齿有关的各类疾病，正在潜移默化地影响人体健康，其中，龋齿作为一种细菌性疾病，令牙疼患者苦不堪言。龋齿，俗称虫牙和蛀牙，如图 1 所示，是牙科极为常见的一种疾病，感染龋齿后，可能还会引发牙髓炎和根尖周炎，甚至引起牙槽骨和颌骨的炎症。民间常说，牙疼不是病，疼起来要人命，如果不加以治疗，任其发展，后期还会形成牙齿龋洞，且无法自愈，最终导致牙齿脱落丧失，饱受疼痛侵袭^[1]。正如开篇的诗《龋齿》所描述的一般，诗人陆游就曾深受龋齿疾病的折磨。

我国第四次全国口腔流行病学调查数据显示，中国 3、4 和 5 岁年龄组的乳牙患龋率分别为 50.8%、63.6% 和 71.9%，12、15、35~44、55~64 岁和 65~74 岁年龄组的恒牙患龋率分别为 38.5%、44.4%、89.0%、95.6% 和 98.0%，患病率与年龄呈现正相关趋势，映射出随着饮食结构的日益变化，龋齿已经成为人们生活中一种十分常见的疾病^[2]，值得注意的是，龋齿现已成为儿童群体中非常常见的疾病，龋齿率



①【图 1】健康洁白的牙齿与龋齿牙图（图片来源于 360 新知与知乎）

健康口腔行动工作指标

主要指标	基线（2016年）	2020年	2025年	属性
12岁儿童龋患率（%）	34.5%	控制在32%以内	控制在30%以内	预期性
12岁儿童龋齿充填治疗比（%）	16.5%	20%	24%	预期性
儿童窝沟封闭服务覆盖率（%）	19.4%	22%	28%	预期性
成人每天2次刷牙率（%）	36.1%	40%	45%	倡导性
65~74岁老年人存留牙数（颗）	22.5	23	24	预期性

①【图 2】健康口腔行动方案（2019~2025 年）（图片来源于中华人民共和国中央人民政府网）

久高不下。此外，为贯彻落实《“健康中国 2030”规划纲要》和《中国防治慢性病中长期规划（2017~2025 年）》，进一步加强健康口腔工作，提升群众口腔健康意识和行为能力，国家卫生健康委制定了《健康口腔行动方案（2019~2025 年）》。该方案具体工作指标如图 2 所示，体现出我国对于龋齿患病率的重视。

有趣的是，我国权威网站新华网发表一篇题为《古人的虫牙会“说话”，它们泄露了这些秘密》的文章指出，原始社会的人类几乎没有龋齿疾病的发生，可

就在人类渐渐以淀粉（多糖）为主的谷物作为主食以后，龋齿的发病率却逐渐上升，这又是为什么呢？其实，这跟人类饮食变迁与龋齿的发病原因有关。此外，有没有什么物质能够预防龋齿疾病的发生呢？欢迎走进今天的科普读物，了解龋齿背后的故事以及预防龋齿的化学小能手。

1. 龋齿的发病原因

龋齿是细菌感染性疾病，它的发展不是瞬间完成的，需要长期的酸性环境才能破坏牙齿结构。如图 3 所示，龋齿主要发病因素有以下几点：

1.1 病菌感染

变异链球菌、乳杆菌属和放线菌等病菌是导致龋齿发病的常见病菌。例如，变异链球菌与牙齿表面亲和力强，能够以蔗糖为原始材料合成细胞外多糖，并附着于牙齿表面，此外，该类病菌还会导致碳水化合物的产酸能力大大增强，使得牙周局部 pH 值下降，导致牙齿脱矿，进而诱发龋齿^[3]。而值得注意的是，病菌感染导致的龋齿往往是多种病菌共同作用的结果，而人类吃的淀粉类主食，富含糖类物质，没有及时清洁口腔的话，牙缝内残留的食物残渣，正是这些细菌的能量来源。长期受到细菌侵蚀的牙齿表面还会形成牙菌斑，它是指粘附在牙齿表面或口腔其他软组织上的微生物群，由大量细菌、细胞间物质、少量白细胞、脱落上皮细胞和食物残屑等组成。

1.2 人体自身引起

在人类幼儿阶段，牙齿发育不完全，质地不够坚硬，抗酸能力差，牙齿本就易脱矿，又因儿童天性喜爱糖类物质，致使抵抗外界病菌的能力大大降低，从而易于形成龋齿^[4]。此外，人体唾液中本就含有多类有机物质，分泌在口腔中时，可以帮助口腔中和酸性 pH，并帮助人体清理食物残渣。当唾液腺的分泌功能障碍时，导致唾液流速与流量降

低，致使清洁功能大大下降，导致龋齿病发^[5]。

1.3 饮食所致

先回答上文的问题，为啥原始人几乎没有蛀牙。就拿新石器时期来讲，距今 1 万多年的原始人，他们还没有现在这样丰富的饮食。原始人靠狩猎为生，因此，他们主要靠吃肉与蔬菜、少量根茎淀粉、水果和坚果等物质来生存，这导致他们的饮食食物中含糖量极低，几乎很难导致龋齿发病。而现如今的社会，饮食丰富多样，各种碳水化合物可供选择，各类糖饼、糖块千变万化，这些物质容易被微生物病菌利用，增

强产酸能力，导致龋齿病发^[6]。随着时间这一因素的发展，龋齿不加以治疗只会越拖问题越大。

1.4 口腔卫生不良

卫生状况不良的口腔是滋生与培养细菌的温床。长期不注意清洁口腔，就会导致食物残渣残留于口腔与牙缝中，日复一日，便会诱发口腔内部的细菌感染，而未及时清理的食物残渣所产生的酸性环境，会对牙齿造成持续性伤害。

2. 预防龋齿发病的化学物质

了解了龋齿的发病原因之后，那么又该怎样去预防它呢？其实，龋齿也有它相应的预防途



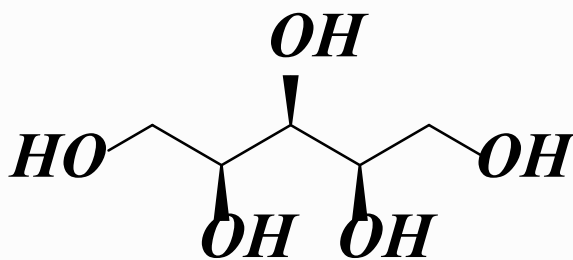
【图 3】龋齿发病的主要原因

径,从生物化学角度来讲,主要分为两种。一种是通过饮食添加来预防;一种是通过氟化物来预防。我们依次来看:

2.1 木糖醇

在常见的食品添加剂中,有一类物质叫做甜味剂,它们能帮助人类从食品中品尝出甜味,蔗糖就是我们熟知的甜味剂。但对于食糖爱好人群来讲,甜类饮食加速了龋齿的发病时间。但是有一种化学物质它的甜度与蔗糖差不多,但热量却仅有蔗糖的一半多,这就是木糖醇,常被用于蔗糖等甜味剂的替代品以降低龋齿的发病率。作为木糖的代谢产物,木糖醇隶属于糖醇,是一种分子醛、酮中的羰基被还原为羟基后生成的多元醇类化合物。木糖醇学名为(2R, 3R, 4S)-戊五醇,化学式为 $C_5H_{12}O_5$,化学结构式如图4所示,具有清凉的口感,其在1890年由德国化学家Fisher、Stahe和法国化学家Betrand在木糖与钠汞齐的反应中发现^[7]。

木糖醇原产于芬兰,在当地非常普遍。当地普遍选择用木糖醇代替蔗糖来制造食用糖果以及口香糖,后被世界所推崇。此外,在牙膏中添加木糖醇也能有效防止龋齿病(图5)。木糖醇防止龋齿的详细机理如下:



④【图4】木糖醇的化学结构式



④【图5】木糖醇口香糖和牙膏(图片来源于21食品商务网和阿里1688)

抑制细菌生长和产酸:口腔中的变形链球菌等细菌可利用蔗糖等可发酵碳水化合物产酸,导致牙齿脱矿形成龋齿。而木糖醇不能被这些细菌发酵利用^[8-9],变异链球菌吸收木糖醇后会导致磷酸化的代谢产物堆积,生命活力降低,从而抑制了变形链球菌的生长及酸的产生,防止了钙磷盐从牙的珐琅质上溶解造成“酸蚀”^[10]。

促进牙齿再矿化:木糖醇能使唾液及龋齿斑点处碱性浓度上升,pH值升高使钙盐重新沉淀于珐琅质,使牙齿重新变硬,从

而修复珐琅质的损坏。木糖醇还可抑制细菌的繁殖和酸的产生,使唾液及斑点中细菌依赖的脂肪磷酸质下降,又抑制了细菌在牙齿表面吸附,从而使斑点数量下降,减少了细菌对牙齿的侵蚀^[11]。

2.2 氟化物

氟化物是当今能够真正从化学角度预防龋齿病的化学物质^[12],例如氟化钠与单氟磷酸钠。当人体摄入氟化物时,氟离子会作用于牙齿,它会改善牙齿主要成分羟基磷灰石 $[Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2]$ 的结晶度,加速其矿化,并氟化羟基

磷灰石中的羟基基团,进一步生成氟磷灰石 $[\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2]$, 这是一种高抗酸性物质。当不完全氟化时,则会生成氟磷灰石混合物 $[\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_x(\text{OH})_{2-x}]$, 也具有一定的抗酸性, 由此, 通过增强牙齿的耐酸性, 达到预防龋齿的目的。

此外, 不同浓度的氟离子会与牙釉质发生不同的化学反应, 但无论时间长短, 都在一定程度上起到矿化牙齿的作用, 氟离子还在一定程度上同龋齿分解出的钙离子或是唾液中的钙离子结合形成的 CaF_2 或 CaF_2 的沉积物, 融入牙齿自身, 保护牙齿^[13]。氟化物还会与致龋菌发生作用, 抑制它们的新陈代谢活动, 减少其产生的酸量, 从而降低对牙齿的损害^[14]。在牙膏中添加含氟化合物被认为是预防龋齿的有力途径(图6)。

总的来看, 氟化物预防龋齿的主要原因可总结为以下两点:

降低牙齿表层釉质的溶解度: 氟离子可以取代羟基磷灰石中的羟基, 形成氟磷灰石。氟磷灰石的晶体结构更加稳定, 在酸性环境下的溶解度比羟基磷灰石低, 从而使牙齿更能抵抗酸的侵蚀, 减少脱矿的发生。

促进釉质再矿化: 即使牙齿发生了微小的龋坏, 在氟化物的作用下, 也可以促进脱矿的釉质



①【图6】含氟牙膏示意图(图片来源于虎窝淘)

重新矿化。唾液中的钙和磷等矿物质在氟离子的参与下, 更容易沉积到牙齿表面, 修复受损的釉质, 使龋坏得到一定程度的逆转。

3. 如何保护牙齿健康

1989年, 我国将9月20日定为全国爱牙日, 提醒我们保护牙齿健康(图7)。维护牙齿健康需要从日常口腔护理、饮食习惯和定期检查等多方面着手, 以下是笔者查阅资料后的一些具体建议:

正确刷牙: 每天至少早晚各刷一次牙, 每次刷牙时间不少于



①【图7】全国爱牙日示意图(图片来源于千库网)

3 分钟,使用软毛牙刷,按照巴氏刷牙法进行刷牙,将牙刷与牙齿呈 45 (°) 角,放在牙齿和牙龈交界处,轻轻颤动牙刷,然后顺着牙缝上下刷,确保牙齿的每个面都能刷到。

使用牙线:刷牙只能清洁牙齿表面,而牙线能清除牙缝和牙龈沟内的食物残渣和牙菌斑。每天至少使用一次牙线,将牙线轻轻放入牙缝中,呈 C 形包绕牙齿,上下拉动清洁牙缝。

使用漱口水:漱口水可以作为口腔护理的辅助手段,能帮助减少口腔细菌,清新口气。饭后或不方便刷牙时,使用含有杀菌成分的漱口水漱口,但不要过度

依赖漱口水,因为它不能替代刷牙和使用牙线。

控制甜食摄入:少吃糖果、蛋糕和饮料等高糖食物,这些食物容易被口腔中的细菌分解产生酸性物质,侵蚀牙齿,导致龋齿。如果吃了甜食,应及时刷牙或漱口。

合理安排进食时间:避免在睡前吃东西,尤其是甜食和黏性食物。因为睡眠期间口腔唾液分泌减少,自洁作用减弱,食物残渣更容易在口腔中滋生细菌,损害牙齿。

戒烟限酒:吸烟和过量饮酒会对口腔健康产生不良影响,容

易导致牙齿变色、口臭和牙龈疾病等问题。戒烟和适量饮酒有助于维护口腔健康。

4. 结语

牙齿健康不容忽视,无论是饮食还是生活习惯,我们都应该注意牙齿问题,一旦发现自己患有龋齿,请不要拖延,赶快去医院治疗。医院会针对龋齿症状,对症治疗,对于早期龋齿一般采用药物治疗,主要是含氟物质,而对于中期乃至晚期患者来讲,通常采用填充治疗、根管治疗甚至是拔牙治疗。不过也不用过分担心,只要保持健康的生活习惯,相信龋齿这个“可恶”的破坏者都会远离你我,所以,让我们关注牙齿健康,做一名护牙小能手吧!

参考文献

- [1] 刘保全. 龋齿的预防与治疗[N]. 大众健康报, 2022-12-15, 011.
- [2] Cheng L, Zhang L, Yue L, et al. Expert consensus on dental caries management[J]. Int J Oral Sci, 2022, 14: 17.
- [3] 李瑞华, 张凯, 刘姗姗, 等. 蚌埠市儿童窝沟封闭预防龋齿效果分析[J]. 中国学校卫生, 2020, 41(3): 461-462.
- [4] 葛文兴. 2014-2016年临沂市河东区中小学生龋齿患病情况分析[J]. 中国公共卫生, 2018, 34(6): 911-913.
- [5] Manzoor M, Lommi S, Furuholm J, et al. High abundance of sugar metabolisers in saliva of children with caries[J]. Sci Rep, 2021, 11(1): 4424.
- [6] 姚瑶, 欧晓艳, 周小军, 等. 江西省赣南赣北两地3~5岁学龄前儿童患龋现状与进食模式的差异性分析[J]. 中国全科医学, 2019, 22(25): 3099-3103.
- [7] 罗佳彤. 木糖醇的发现、研究及应用[J]. 食品界, 2023(2): 114-116.
- [8] 赵玉国, 丁勇, 王树青, 等. 木糖醇对口腔龋齿的预防作用研究[J]. 现代食品, 2018, (15): 58-61.
- [9] Gupta J, Gupta K. Xylitol on dental caries: A review[J]. J Drug Delivery Ther, 2018, 8(5): 69-72.
- [10] 冯永强, 王江星. 木糖醇的特性及在食品中的应用[J]. 食品科学, 2004(11): 379-381.
- [11] Janakiram C, Deepan Kumar C V, Joseph J. Xylitol in preventing dental caries: A systematic review and meta-analyses[J]. J Nat Sci Biol Med, 2017, 8(1): 16-21.
- [12] Leverett D H. Fluorides and the changing prevalence of dental caries[J]. Science, 1982, 217: 26-30.
- [13] 廉晨悦. 氟化物防治龋齿的化学原理及其微型模拟实验[J]. 科学家, 2017, 5(2): 12-17.
- [14] 张丹丹. 神奇的氟, 龋齿的天然敌人[J]. 健康必读, 2024(34): 44-45.

中国科学院长春应化所， 最新 Science

来源：高分子科学前沿公众号；编辑有修改；

原文链接：https://mp.weixin.qq.com/s/nkU0CrQRaRxdRTfvzK_zfg

[Current Issue](#)
[First release papers](#)
[Archive](#)
[About](#)
[Submit manu](#)

[HOME](#) > [SCIENCE](#) > [FIRST RELEASE](#) > [STABLE AND UNIFORM SELF-ASSEMBLED ORGANIC DIRADICAL MOLECULES FOR PEROVSKITE PHOTOVOLTAICS](#)

RESEARCH ARTICLE

[f](#) [X](#) [W](#) [in](#) [B](#) [Q](#) [D](#) [E](#)

Stable and uniform self-assembled organic diradical molecules for perovskite photovoltaics

[WENPING WU](#) , [HAN GAO](#) , [LINGBO JIA](#) , [YUAN LI](#) , [DEZHONG ZHANG](#) , [HONGMEI ZHAN](#) , [JIANAN XU](#) , [BINHE LI](#) , [ZIRAN GENG](#) ,
[YANXIANG CHENG](#) , [HUI TONG](#) , [YANXIONG PAN](#) , [JUN LIU](#) , [YONGCAI HE](#) , [XIXIANG XU](#) , [ZHENGUO LI](#) , [BO HE](#) , [MIN ZHOU](#) , [LIXIANG WANG](#) ,
[AND CHUANJIANG QIN](#)

[fewer](#)
[Authors Info & Affiliations](#)

SCIENCE • 26 Jun 2025 • First Release

目前，钙钛矿太阳能电池 (PSCs) 的效率已超过 26.5%，而有机自组装分子 (SAMs) 在提升反式结构 PSC 性能中起着重要作用。要推动 PSC 进一步发展，SAMs 不仅需具备良好的空穴传输能力和稳定性，还要适用于大面积溶液加工，然而现有设计方法很难同时满足这些需求。传统通过扩展共轭结构提高导电性和稳定性，但容易导致分子堆积、膜层

不均匀。相比之下，引入稳定的双自由基结构成为新的设计思路，双自由基不仅提升了载流子浓度和分子内能级结构，还可通过大位阻基团增强分子稳定性和工艺适应性。虽然自由基掺杂已用于提高其他空穴传输层的导电性，但真正适用于 PSC 的双自由基 SAMs 仍鲜有报道，同时也缺乏精准表征其稳定性和膜层质量的方法。

在此，中国科学院长春应化

所秦川江研究员、王利祥研究员、周敏研究员、张德重助理研究员联合隆基绿能 Bo He 和李振国设计了一种用于钙钛矿太阳能电池的有机自组装分子，旨在进一步提升钙钛矿光伏器件的性能。作者通过“共面共轭的给体-受体”策略，开发出具有双自由基结构的自组装分子，以促进载流子在 SAMs 中的高效空穴传输。这类双自由基 SAMs 不仅展现出优异的光热稳

定性和电化学稳定性, 还因分子结构中的空间位阻设计, 显著提升了膜层的组装均匀性和大面积溶液加工性能。作者利用先进的扫描电化学单元显微镜 - 薄层循环伏安技术, 精准测定了 SAMs 的载流子传输速率、稳定性和组装特性。最终, 基于该技术的 PSCs 器件效率突破了 26.3%, 小型组件 (10.05 cm^2) 效率达到 23.6%, 钙钛矿 - 硅叠层电池 (1 cm^2) 效率超过 34.2%。同时, PSCs 在 45°C 跟踪测试下稳定运行 2000 h, 效率保持在 97% 以上。相关成果以“Stable and uniform self-assembled organic diradical molecules for perovskite photovoltaics”为题发表在《Science》上, 第一作者为吴文平, Han Gao, Lingbo Jia 和 Yuan Li 共同第一作者。双自由基 SAM 的开发和表征为了在自组装分子中实现稳定且高效的双自由基结构, 作者提出了一种共面供 - 受体 (D-A) 交叉共轭设计思路 (图 1A)。以传统闭壳层分子 MeO-2PACz 为对照, 作者设计了两种新型双自由基 SAMs, RS-1 和 RS-2, 分别通过强供体苯氧嗪和强受体氰基磷酸的组合, 利用短 π 间隔保持整体共平面结构。其中 RS-2 还引入了甲氧基进一步增强了分子稳定性与与钙钛矿的相互作用。吸收与荧光光谱和 HOMO 轨道分布均证实了分子的高度共轭和良好的电子离域

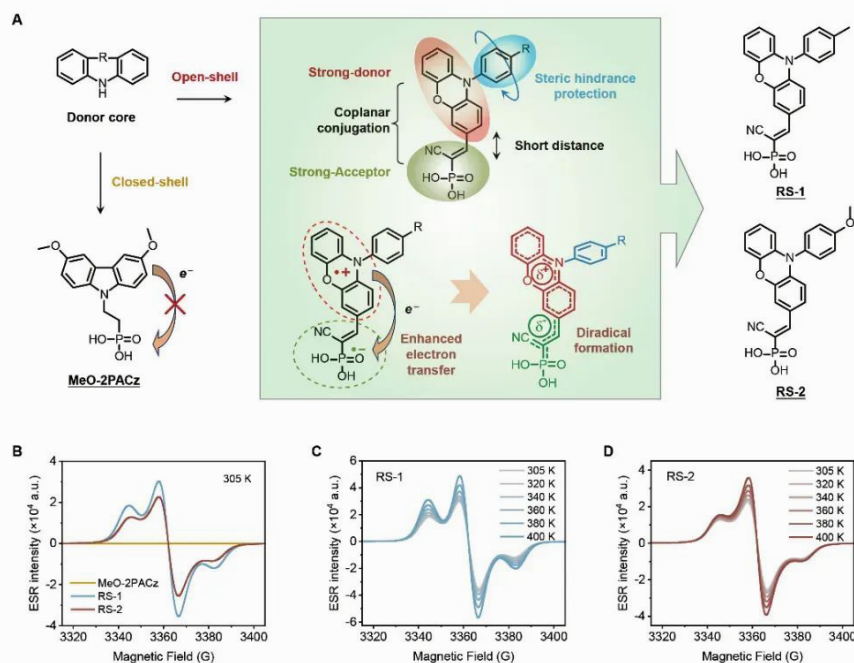


图 1 双自由基 SAM 的设计

性。电子自旋共振测试进一步验证了双自由基的形成, RS-1 和 RS-2 在 SAMs 中展现出明显且稳定的 ESR 信号 (图 1B), 双峰特征表明分子内发生了单电子转移, 形成稳定的自由基离子对结构。升温后 ESR 信号进一步增强 (图 1C 和 1D), 表明双自由基结构在热激发下依然稳定。而传统 MeO-2PACz 几乎不显示 ESR 信号, 说明其缺乏有效的自由基特性。

双自由基 SAM 的精确电化学表征

作者系统研究了自组装分子的电化学特性, 发现它们的空穴传输性能和稳定性密切相关。常规的溶液循环伏安测试表明, RS-1 和 RS-2 等双自由基 SAMs 具有良好的扩散控制和化

学稳定性 (图 2A 和 2B), 但这并不能准确反映它们在 ITO 基底上作为空穴传输层的实际性能。为此, 作者采用了先进的扫描电化学显微 - 薄层循环伏安技术, 系统评估了 ITO/SAMs 的真实稳定性、空穴转移速率和组装密度 (图 2C)。结果显示, 相比传统 MeO-2PACz, RS-1 和 RS-2 在连续 25 次 CV 循环后活性位点保留率分别高达 67% 和 71%, 远优于 MeO-2PACz 的 21% (图 2D)。进一步引入碘化铅 (PbI_2) 模拟实际应用中的碘离子侵蚀, 发现 RS-1 和 RS-2 的活性位点依然保持在 61% 和 64%, 而 MeO-2PACz 降至仅 4% (图 2E)。液质联用分析确认了碘化反应的发生。SECCM-TLCV

技术还揭示, RS-1 和 RS-2 的载流子转移速率约为 MeO-2PACz 的两倍 (图 2F), 且组装密度与均匀性也更好 (图 2G), 为大面积溶液工艺奠定了基础。这些结果充分证明了我们设计的双自由基 SAMs 在导电性、稳定性和加工性方面的综合优势。

含钙钛矿的双自由基 SAM

作者通过理论计算和实验系统研究了不同自组装分子之间的相互作用, 结果显示, RS-1 和 RS-2 的二聚能明显高于传统 MeO-2PACz, 说明它们分子间堆积更弱、溶解性更好 (图 3A)。接触角和 XPS 测试表明, RS-1 和 RS-2 形成的 SAM 层主要由共价锚定分子组成, 而 MeO-2PACz 则存在大量堆积结构, 导致其组装密度和均匀性较差。进一步模拟发现, RS-2 顶部的甲氧基结构不仅有利于与钙钛矿结合, 还通过空间位阻提升了结合能, 有助于获得更好的钙钛矿沉积效果。在 RS-2 上沉积的钙钛矿薄膜晶粒尺寸更大, 结晶性和吸收性能与其他样品相当。然而, 荧光测试 (图 3B) 显示, RS-2 上的钙钛矿薄膜具有更强的 PL 强度和 10.1% 的 PL 量子效率, 表明薄膜缺陷更少、质量更好。TRPL 测试进一步证实, RS-2 样品的空穴提取效率和缺陷钝化效果优于

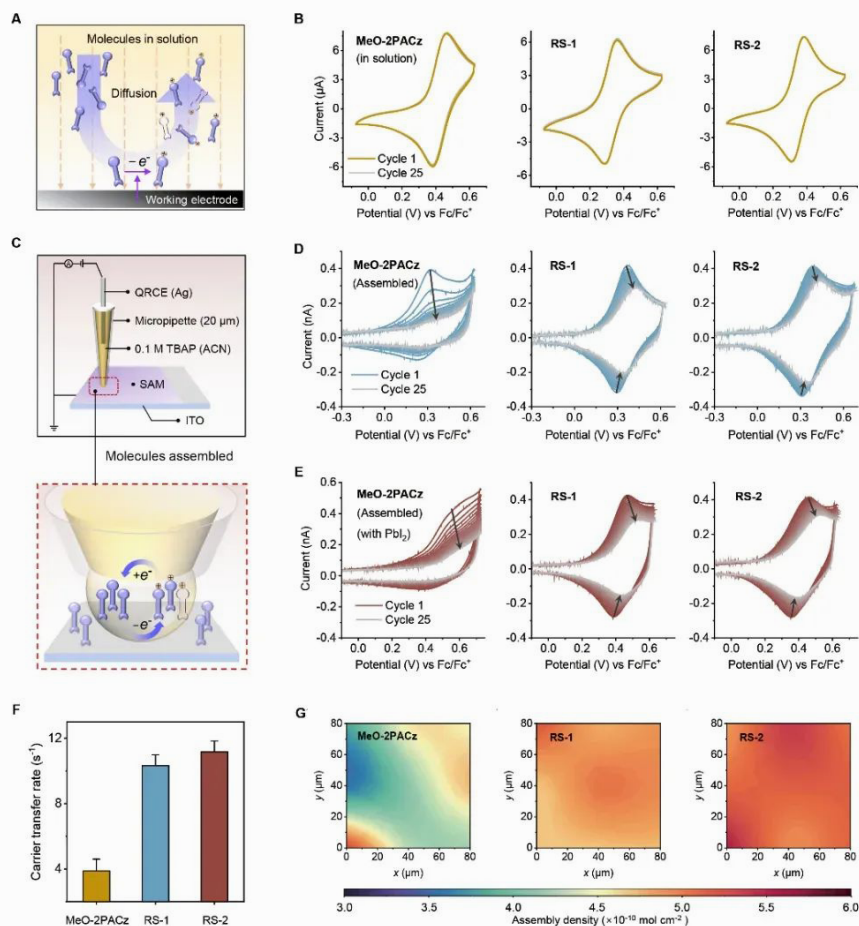


图 2 用于评估 SAM 的稳定性、载流子传输速率以及组装密度和均匀性的电化学技术

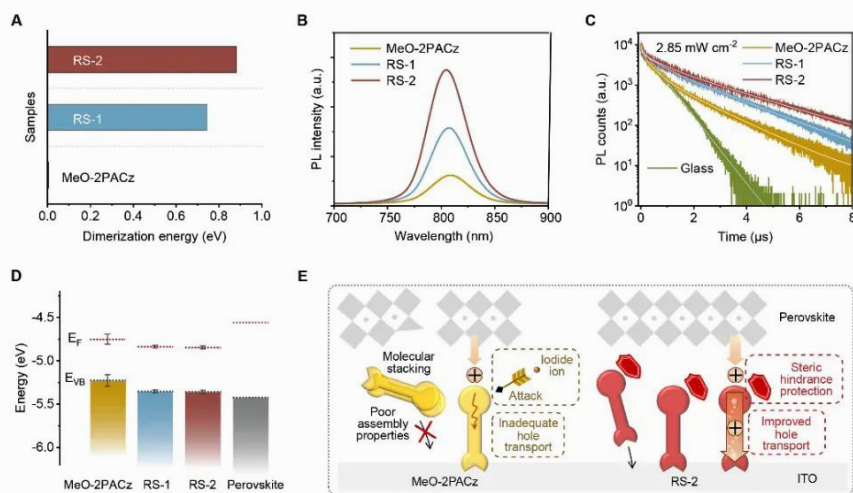


图 3 SAM 对钙钛矿的影响

其他对比组 (图 3C)。此外, UPS 分析揭示, RS-2 组装层引入的偶

极提升了 ITO 表面的功函数和价带能级 (图 3D), 有利于空穴的有

效提取。综合来看, RS-2 兼具优异的组装性能、空穴传输能力、稳定性和钙钛矿薄膜质量 (图 3E)。

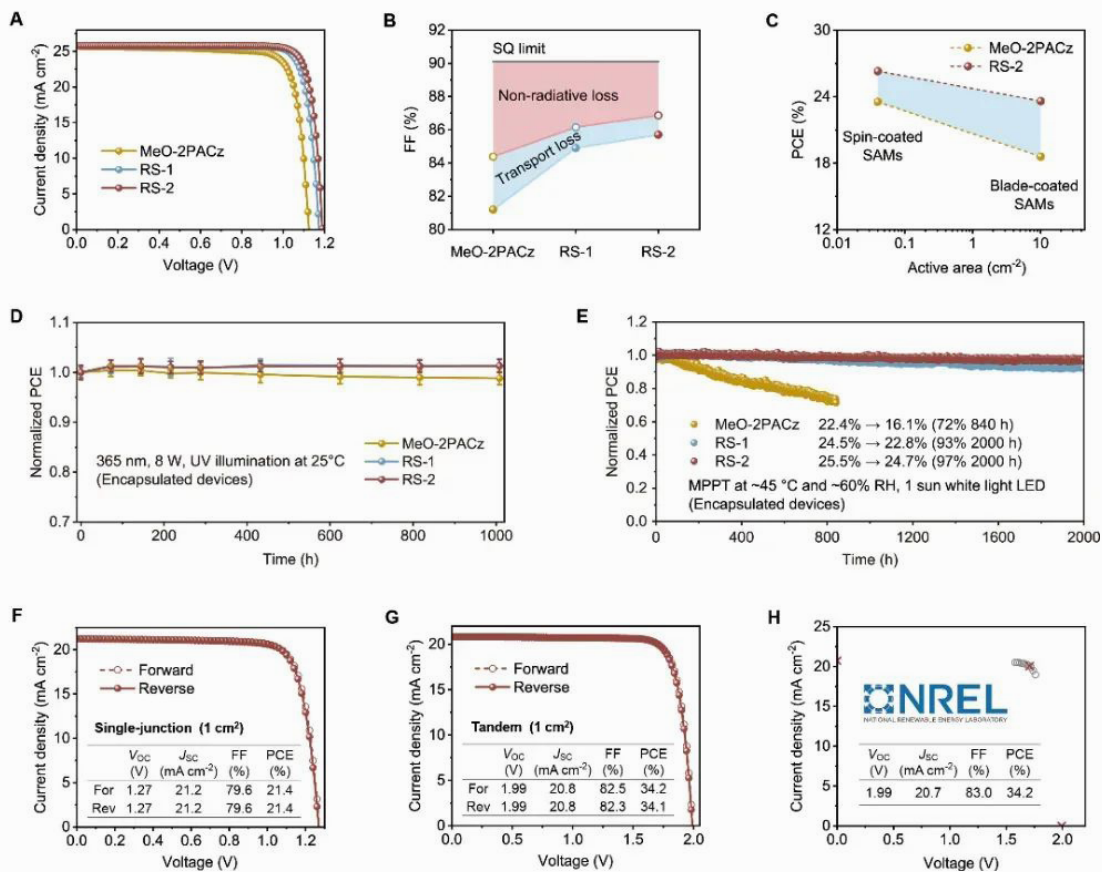
光伏特性

作者利用二自由基自组装分子 (RS-2) 制备了高性能钙钛矿太阳能电池, 其效率最高达 26.3%, 明显优于传统 MeO-2PACz (23.5%) 和 RS-1 (25.5%) (图 4A)。RS-2 器件通过提升空穴传输、抑制非辐射复合, 带来了更高的开路电压和填充因子, 且漏电流低、复合少。在大面积 10.04 cm² 小组件中, RS-2

同样展现出优异溶液加工适应性, PCE 高达 23.6%, 远超 MeO-2PACz (18.6%) (图 4C)。长期稳定性方面, RS-2 基 PSC 在 45 °C 连续光照 2000 h 后仍保持 97% 效率 (图 4E), 且耐碘腐蚀, 结构稳定。即使在 85 °C 高温高湿条件下工作 960 h, RS-2 器件仍有 92% 效率, 小组件保持 96%。此外, RS-2 在 1 cm² 宽带隙 PSCs 中效率超 21.4% (图 4F), 在钙钛矿-硅叠层电池中效率突破 34.2%, 并通过 NREL 认证 (图 4G 和 4H), 性能处于国际领先, 且稳定可靠。

讨论

有机自组装分子已广泛应用于倒置结构钙钛矿太阳能电池和叠层器件中, 但要推动钙钛矿光伏技术进一步发展, 仍需提升 SAM 的空穴导电性、化学稳定性和大面积溶液加工性能。本文开发的新型二自由基 SAM 同时解决了这些问题。二自由基结构有效改善了载流子传输性能, 分子立体位阻设计不仅稳定了自由基, 还显著提升了膜层的均匀性和大面积加工能力。这些优势通过高精度的 SECCM-TLCV 技术得到了清晰验证。



【图 4】PSC 的光伏性能

《化学通讯》

科普教育类

编委会成员



编委：莫尊理
西北师范大学



编委：陶胜洋
大连理工大学



编委：姜雪峰
华东师范大学



编委：薛斌
上海海洋大学



编委：李艳梅
清华大学



编委：徐海
中南大学



编委：宋卫国
中国科学院化学研究所



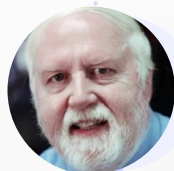
主编：杨小牛
中国科学院长春应用化学研究所



副主编：刘正平
北京师范大学



编委：邱晓航
南开大学



编委：戴伟
北京化工大学



编委：胡文兵
南京大学



编委：杨天林
中国科普作家协会会员
宁夏作家协会会员



编委：卞江
北京大学



编委：欧阳瑞镭
上海理工大学
材料与化学学院



编委：朱平平
中国科学技术大学



编委：董川
山西大学



编委：蒋尚达
华南理工大学



编委：孙亚飞
中国科学院自然
科学史研究所