

# 他们用头发丝直径万分之一的金颗粒，撬动了万吨级大产业

■本报记者 孙丹宁

甲基丙烯酸甲酯(MMA)作为一种重要的基础化工原料,是有机玻璃、高性能涂料和润滑油添加剂等材料的基础构件。然而,在这条关乎高端制造与百姓生活的产业链上游,中国MMA产业长期受制于传统工艺的“三座大山”——环境污染重、工艺流程长、生产成本低,并且全球乙炔法MMA核心技术被少数国际巨头掌握,技术壁垒森严。

“我们希望开辟出一条绿色、高效的新路线,让中国人用上自己生产的MMA。”秉持着这样的信念,中国科学院大连化学物理研究所(以下简称大连化物所)研究员黄家辉带领团队从2015年率先布局攻关,开启了长达11年的攻坚战。

近日,这一征程迎来了里程碑式的节点:5万吨/年乙炔三步法制MMA工业示范装置在辽宁盘锦实现满负荷稳定运行,产出纯度高达99.97%的MMA产品。“我相信只要方向正确、方法得当、持之以恒,就没有攻克不了的技术难题。”黄家辉说。

## “又脏又贵”的传统工艺

MMA是一种现代工业不可或缺的关键材料。由它制成的PMMA(聚甲基丙烯酸甲酯)透光率高达92%以上,兼具优异的耐候性、抗紫外线和抗冲击性,被广泛应用于汽车尾灯与仪表盘、建筑采光板、液晶显示器导光板、医疗高分子材料等领域。截至2025年底,国内MMA产能已达到285.5万吨,产量约182万吨,中国MMA产业正处于从“量的扩张”向“质的飞跃”的关键转型期。

不过,在下游应用背后,上游生产却长期戴着沉重的“枷锁”。国内MMA生产主要依赖丙酮氰醇法和异丁烯三步法。丙酮氰醇法虽然工艺简单、技术成熟,但其原料氢氰酸属于剧毒物质,很难通过外购方式获取,并且该工艺会排放大量含剧毒氢氰酸的废水,处理起来十分困难,因此建设氢氰酸合成装置受到技术、原料和环保等多方面因素限制。

异丁烯三步法工艺优点是技术成熟可靠、原料易得、产品质量好,对环境的影响较小。但是,它的缺点也十分明显,设备多、工艺较为复杂,产物总收率低,并且含酸废水不能生化处理,经济性也很差。

“传统工艺又脏又贵”——业内这句直白的感叹,道出了传统工艺的“尴尬”。生产过程中剧毒原料的使用和大量废弃物的排放,给环境造成沉重负担,也让企业背上了高昂的环保处理成本负担。

更致命的是该技术命脉“受制于人”。巴斯夫、瑞彩特、三菱等国际巨头



5万吨/年乙炔三步法制MMA工业示范装置。

受访者供图

长期垄断乙炔法核心技术,不对外转让。中国MMA产业在技术上长期处于“跟跑”状态,高端产品高度依赖进口。

“开发甲醇甲基丙烯酸酯一步法氧化酯化技术,或许可以为MMA生产提供新的技术途径。”黄家辉敏锐地捕捉到一线曙光。这条路线最大的挑战在于核心催化剂——纳米金催化剂。甲基丙烯酸酯与甲醇在纳米金催化下,只需一步即可生成MMA,流程极短、反应温和,无有毒排放,且转化率和选择性都显著优于传统催化工艺。

“正是看到了纳米金的巨大潜力,我们才决心啃下这块‘硬骨头’。”黄家辉对《中国科学报》说。

2015年,经过大量文献调研、企业交流和国内外技术优劣研判,团队正式向这一方向发起冲锋。

## 一次关乎成败的“大考”

纳米金催化剂,是一种直径约为头发丝万分之一的金颗粒。要在微观尺度上精准控制这些金颗粒的尺寸、分布以及载体的相互作用,其难度可想而知。

团队专注于纳米金催化剂制备方法和载体的筛选,在实验室间歇釜反应中,历经一年多的反复试错,他们终于让甲基丙烯酸酯转化率突破90%,MMA选择性超过95%。2016年底,团队与青岛三力本诺新材料股份有限公司(以下简称青岛三力本诺)正式签署合作开发协议,开始聚焦于催化剂小试制备优化和实验室浆态床反应器连续评价。

然而,实验室里制备几克高性能催化剂相对容易,工业上要实现百公斤甚至吨级稳定生产,难度却呈指数级飙升。从克级到公斤级,温度、pH值、搅拌速率、加料速率等参数的微小波动都会被急剧放大,导致金颗粒尺寸不均、团

聚失活,催化性能大打折扣。

团队花了大量时间精力优化制备流程,严格控制每一种原料的品质和每一个工艺参数。通过大量实验,团队攻克了稳定控制催化剂活性的关键技术,实现了催化剂公斤级稳定制备。

“凭借‘载体酸碱性的精准调控’‘金颗粒尺寸的纳米级控制’以及‘金属-载体相互作用的增强’这三大技术突破,团队成功破解了纳米金催化剂‘高活性’与‘高稳定性’难以兼得的难题。”

随后,催化剂在立升级反应器上连续运行超过3800小时,转化率和选择性依然保持稳定,这为后续的中试放大奠定了坚实基础。

2019年8月,青岛三力本诺正式在辽宁盘锦精细化工中试平台启动千吨级中试装置建设。2020年7月,装置迎来72小时满负荷连续稳定运行考核。这相当于一次关乎成败的“大考”。考核前夕,团队承受着巨大的压力:催化剂在工业条件下是否依旧稳健?整个流程能否连续运转?任何一个环节掉链子,都可能导致功亏一篑。

72小时后,结果出来了:甲基丙烯酸酯转化率93.2%,MMA选择性96.9%。当最后一组数据确认合格时,大家才真正意识到,他们做到了首次在千吨级规模上验证一步法氧化酯化路线的可行性,并证明自主研发的纳米金催化剂能够在工业条件下稳定运行。

“此前这套工艺长期被国外垄断,国内没有替代方案。”黄家辉说,“这一时刻的成功是对所有参与其中的科研人员的肯定,意味着我们可以依靠自主研发打破国外垄断,可以解决这个生产领域的‘卡脖子’问题,用更环保、更经济的方式生产MMA。”

2020年7月27日,“纳米金催化甲基丙烯酸酯一步法氧化酯化制MMA

新工艺”在盘锦通过中国石油和化学工业联合会组织的科技成果鉴定。鉴定委员会一致认为,该成果属于国内首创,总体上达到国际先进水平。

## 解决“有没有”和“好不好”

千吨级中试的成功只是序章。甲醇甲基丙烯酸酯一步法氧化酯化,是乙炔三步法制MMA中最关键的一步。核心关卡打通后,2022年,5万吨/年乙炔三步法制MMA工艺示范装置在辽宁盘锦启动建设。2025年2月,一步法氧化酯化单元投料试生产,当月产出合格MMA产品,纯度达到99.97%。

随后,企业投入了一年多的时间进行了反复的改进与优化。今年6月,装置实现满负荷稳定运行。这标志着国内首次拥有完全自主知识产权的乙炔法MMA工业装置,正式从图纸变成了现实。

“经过一年多的改进和优化,该示范装置已实现满负荷稳定运行,验证了乙炔三步法合成MMA新工艺在工程放大与产业化应用中的可行性。”黄家辉说。

该新工艺的成功运行,对我国MMA产业具有重要意义,其核心在于同时解决了“有没有”和“好不好”两个根本问题,兼具保障产业链安全和推动行业技术升级的“双重作用”。

“这套新工艺为我国MMA行业指明了一条更先进、更可持续的发展路径,不仅补齐了我国在高端MMA生产技术上‘受制于人’的短板,更通过绿色、高效的工艺为整个行业的转型升级树立了标杆,为保障国家新材料产业链安全提供了关键技术支撑,可以更好地保护我们的‘绿水青山’。”黄家辉说。

成果的背后,是“院所+企业+中试平台”三方协同的力量。

大连化物所作为“技术策源地”,依托金催化研究中心多年的基础研究积累,攻克了纳米金催化剂的核心技术。青岛三力本诺作为“产业主力军”,不仅投入超过14亿元的项目资金,还整合了相关外部资源,组建覆盖反应工程、分离工程等领域的全链条攻关联合体,形成“科研院所攻前沿、企业主导工程化”的清晰分工与优势互补,确保了技术研发始终面向产业需求。盘锦精细化工中试平台则作为“关键连接器”,提供了千吨级中试所需的全部硬件设施与专业技术服务,将前沿技术从实验室推向产业化。

项目成功运行后,团队也期待这项技术能在MMA行业得到广泛推广。“我们希望能够帮助更多企业摆脱对进口技术和落后工艺的依赖,让绿色高效的中国MMA产业真正实现从‘跟跑’到‘领跑’的跨越。”黄家辉说。

在人们通常的印象中,混凝土建筑是十分结实的。但事实上,至少在民用建筑领域,大多数混凝土的使用寿命都短于建筑的设计寿命。

究其原因,混凝土材料有一个难以根治的“顽疾”——裂缝。

“建筑行业有一句俗话:‘没有不开裂的混凝土’。”在接受《中国科学报》采访时,天津城建大学材料科学与工程学院教授荣辉介绍说,在荷载、温湿变化和介质侵蚀下,混凝土结构不可避免地会产生裂缝。“这些裂缝如同建筑的慢性伤口,会不断削弱建筑的耐久性、缩短服役寿命。”

人体的伤口可以自然愈合,混凝土材料的“伤口”却只会越来越大。因此,到了一定时间,人们只能花费大量时间和金钱,对建筑中的混凝土进行修复。

国内咨询公司贝哲斯在一份报告中称,2025年,我国混凝土修复市场的规模已经超过300亿元;全球混凝土修复市场规模更是超过1340亿元。

能不能让混凝土如人体一样,拥有“自愈能力”呢?

## 0.2毫米的“分水岭”

荣辉从事的正是让混凝土拥有“自愈能力”的研究。

不久前,在第51届瑞士日内瓦国际发明展上,荣辉与天津城建大学教授王海良团队牵头完成的“负载多元微生物的陶砂自修复混凝土设计制备成套技术”,从全球35个国家和地区的千余项发明中脱颖而出,获得金奖。

“简单地说,这项技术就是将特定微生物加入混凝土材料中,再以特定方式使这些微生物在材料出现裂缝时,能自动聚集到裂缝内部,通过微生物诱导碳酸钙沉淀,生成方解石,将裂缝修复好,并防止其继续开裂。”荣辉说。

荣辉告诉《中国科学报》,当混凝土结构出现裂缝时,0.2毫米是一个“分水岭”。宽度小于0.2毫米的裂缝并不会对结构的安全性造成影响,但如果超过0.2毫米,就需要进行人为的修复。因此,最经济的方式就是在裂缝宽度没有超过“安全值”时,将隐患消除于未然。

在这方面,能自动弥合微小裂缝的微生物自修复材料有着明显优势。

世界范围内,相关研究最早出现在荷兰。2005年左右,荷兰代尔夫特理工大学的科研人员首次尝试用微生物修复开裂的混凝土材料。几年后,他们又探索将微生物混入混凝土的方法,以期实现材料的“自修复”。

2011年前后,国内部分高校和科研机构注意到了这一科研新领域,并尝试进行研究。然而,在这一过程中,他们发现了一个难以解决的问题。

## 从“单干”到“组团”

“混凝土的修复主要依靠微生物的活动实现,但科研人员发现,混凝土中的微生物普遍存在存活率低、长期活性不足的问题,这导致其修复速率始终比较慢,难以满足实际工程的需要。”荣辉说。

研究中,荣辉逐渐意识到,单一种类的微生物由于功能并不全面,很难解决这一问题。但是,如果将几种微生物同时加入混凝土中,使其能够“组团”,则有可能大幅提升修复速率。

“比如,微生物在修复裂缝的过程中,一定是先修复裂缝表面与空气接触的部分。”荣辉说。不过,表面裂缝一旦被修复,就会阻止空气中的二氧化碳和水分进入裂缝内部,并减少碳酸根离子的产生,而这些都是微生物持续“工作”的必要条件。

这一问题在单一微生物条件下很难解决,荣辉团队的解决方式则是加入三种微生物。其中,第一种微生物主要负责提供碳酸根离子;第二种微生物则可以优化局部环境,并为后续的碳酸钙沉淀提供成核位点,还可以为深层裂缝修复提供二氧化碳;第三种微生物则可以高效催化碳酸盐的生成。三者优势互补、协同联动,从而大幅提升了裂缝修复能力。

同时,针对微生物在混凝土材料中存活率低的问题,研究团队还依据陶砂材料高孔隙率、生物亲和性好的特点,研发出陶砂固载微生物自修复材料,将微生物吸附到陶砂材料的多孔结构中,从而大幅提高了微生物的存活率。

此外,面向高海拔、高寒及大温差等极端服役环境,团队构建并评估了适用于复杂服役环境的微生物自修复材料体系,为特殊地区基础设施耐久性提升提供了技术支撑。

## 既要有信心,又要有耐心

这些技术结合在一起,便形成了此次团队在日内瓦捧回金奖的全套完整技术。

据测算,该技术一旦应用于混凝土建筑中,可使裂缝的14天面积修复率达100%。换句话说,混凝土裂缝在经过14天养护后,所有开裂的缝隙空间都会被微生物碳酸钙晶体完整填满,裂缝完

# 这项获金奖的技术让混凝土建筑有『自愈能力』

■本报记者 陈彬



荣辉(右一)在指导学生。 受访者供图

全封堵严实。

“一旦在建筑物上大面积应用,该技术估计可以节省30%左右的后期维护费用。”荣辉说。

据悉,研究团队已经和中国建筑集团、中国中铁集团旗下施工单位合作,并在部分地下室顶板、便道路面、大面积地坪项目中进行了技术示范应用。

“其中就包括了拉萨至日喀则机场段工程施工便道。”荣辉告诉记者,在该项目的应用效果表明,即便是高原高寒环境条件下,相关技术仍能保持较好的裂缝自愈能力及环境适应能力,对降低裂缝扩展风险、提升结构长期服役稳定性具有积极作用。

此外,该技术也在广东东莞房建小区地下室顶板施工中得到了应用,用自修复混凝土浇筑的地下室顶板无裂缝开裂,有效保障了地下室顶板的质量。

值得一提的是,6月24日,中国建筑材料联合会向全国发布了《关于征集第六批全国建材行业重大科技攻关“揭榜挂帅”项目研发榜单方向的通知》,其中第一部分是“面向水泥、玻璃、陶瓷等基础产业绿色化、数智化、高端化发展方向,征集迭代性、变革性材料及其制造方法、技术、工艺”,混凝土的自修复技术显然就在这一范围。

“事实上,早在2023年,国家发展改革委修订发布的《产业结构调整指导目录(2024年本)》就明确指出,鼓励混凝土自修复材料的开发和应用。”在荣辉看来,这些都说明了国家对于混凝土自修复技术以及材料未来产业化应用的重视。

不过,这并不意味着这条产业化应用之路已经畅通无阻。

荣辉告诉记者,目前微生物自修复材料与技术应用的前期投入还比较大。虽然相较于后期节省的维修成本,这笔投入依然是“赚”的,但如何压低成本仍是一个需要解决的问题。

荣辉对此并不担心。“科研成果从诞生到产业化应用一定会有一个过程。”他介绍,比如曾经引发某些地区严重环境污染的粉煤灰,从被发现可以应用到混凝土中到大面积推广,经历了至少30年的时间。“对于科研成果的产业化,我们既要有信心,也要有耐心。相信随着配套技术的成熟以及产业化规模的扩大,目前我们所面对的问题最终都会得到圆满解决。”

## 资讯

## 星载激光通信智能产线在西安正式投产

本报讯(记者李媛)7月16日,陕西首条专业化星载激光通信智能产线在西安正式投产,激光通信终端将作为核心载荷全面提升卫星自主运行、高效组网与大规模星座管理能力。

凭借20余年的自主技术攻关积淀,中国科学院西安光学精密机械研究所(以下简称西安光机所)联合旗下商业航天产业化平台——西安中科天塔科技股份有限公司(以下简称中科天塔),成功打通星载激光通信“科研创新—工程量产—在轨智能”的全链条转化体系。

中科天塔承担激光通信终端

“从1到N”规模化任务,目前已完成可批量生产的星载激光通信终端和在轨智能系统的开发,同步启动航天垂直大模型“华山”全网内测,将实现空间光电硬件与航天智能算法双向落地,为卫星全域“太空智驾”提供技术和应用支撑。

中科天塔总经理曾伟刚介绍,数字化智能产线占地2000平方米,覆盖零部件装调、整机集成、精密调试、空间环境模拟、自动化检测全生产流程,配套数字化管理系统与全自动综合测试平台,可同步完成多台设备性能检测,依靠智能系统自动识别产品故障,保障批

量生产的产品质量稳定。产线一期可年产600套激光通信终端,计划2027年实现年产千套以上能力。量产终端通信速率覆盖5Gbps(千兆比特每秒)至100Gbps,体积小、功耗低、抗干扰能力强,核心光学部件均为西安光机所自主研发,可充分适配各类低轨巨型星座批量配套需求。

立足国家空地一体化网络建设重大需求,西安光机所自2004年起,开展从基础预研、技术攻关到在轨验证的自主创新,深耕星间高速光传输领域,先后承接多项国家重大任务,累计研制各类星载激光通

信终端百余套,部分产品已在轨业务化运行。在轨运行数据显示,西安光机所自主研发可实现星间激光快速对准、稳定通信,能够长期支撑跨星海量数据互通。

西安光机所党委书记、副所长郝伟在投产仪式上说,西安光机所针对空间激光通信核心技术,与以中科天塔为代表的产业化公司衔接协同,会将更多原创性前沿性技术转化为现实生产力,推进科技创新和产业创新深度融合,加速技术验证和迭代,促进科技成果从实验室走向实际应用市场,加快塑造发展新动能新优势。

## 北京为重点实验室成果转化按下“加速键”

本报讯(记者沈春蕾)7月16日,中关村国际技术交易中心重点实验室成果转化系列活动在北京举办启动仪式。启动仪式由北京市科委、中关村管委会、中关村发展集团等主办。现场,来自清华大学重点实验室的16个原创项目登台路演。

2025年,北京市出台《北京市推进科技成果转化落地行动方案(2025—2027年)》,并建立清单台账式对接服务机制,形成成果归集、智能匹配、跟进服务、效果反馈的工作闭环,先后推动中关村各分园、特色园与国家重点实验室等单位对接成

果近4000项,累计对接服务1.3万次,在京落地600余项。

本次系列活动是在清单台账对接服务国家重点实验室基础上,进一步向北京市重点实验室拓展服务范围,围绕人工智能、集成电路、医药健康、新能源、新材料五大产业领域,每周开展重点实验室专场路演对接。

中关村发展集团副总经理周瑞现场发布中关村国际技术交易中心熟化工坊。熟化工坊作为中关村国际技术交易中心服务矩阵的重要组成,将协助路演项目建立

供应链资源,实现“上午设计、下午打样、一周量产、同步出海”。北京市科学技术研究院携创新医疗器械双准入概念验证平台等8家平台入驻熟化工坊。

现场还发起成立北京概念验证联盟,联合全市优质概念验证载体,共同建设项目联合推进、创新资源共享、专业服务互通的一体化协同网络。

今年以来,北京市科委、中关村管委会聚焦科技成果转化关键环节,将支持形式从“概念验证平台”扩展到“校企合作平台”“拨投联动”

等各维度,发布了提升概念验证能力、建设校(院)企合作平台、建立“拨投联动”机制等一系列配套政策,积极推动中关村国际技术交易中心全面投入运营。

随着重点实验室成果转化系列活动启动,北京市将通过联成果、联需求、联资本、联载体,助力实验室项目打通熟化关、落地关、市场关,深耕重点实验室原始创新资源,助力“北京创造”从图纸变为产品,释放首都原始创新活力,推动前沿技术走出实验室、走向生产线、走进大市场。