应对资源约束与低碳挑战——热法黄磷产业中试平台的战略定位

孙志立[1,2]，宁　平[2]，汤建伟[3]

（1. 中国无机盐工业协会，北京　100013；2. 昆明理工大学 环境科学与工程学院，云南 昆明　650500；
3. 郑州大学 生态与环境学院，河南 郑州　450001）

［摘　要］面对“双碳”目标与磷资源高效利用的国家战略需求，我国热法黄磷产业亟须发展新质生产力与维护产业链安全，向绿色高端化转型。为解决我国热法黄磷产业因中试平台缺失而导致的实验室成果向产业化转化困难，制约行业绿色低碳转型与低品位磷资源高效利用的关键问题，通过分析国内产业现状与国外研发体系经验，指出将中试平台建设提升至国家创新基础设施层面的战略必要性，并提出“政府引导–协会牵头–企业主体–科研院校参与”的共建共享机制。盘活现存小型工业磷炉作为专用中试平台，是应对资源与环境挑战、培育行业新质生产力的高效路径。

［关键词］热法黄磷；绿色低碳；中试平台；磷资源；技术创新；战略定位
［中图分类号］TQ126.3　　［文献标志码］A　　［文章编号］2097–4566（2026）01–0013–04

Addressing resource constraints and low-carbon challenges: Strategic positioning of the pilot platform for thermal yellow phosphorus production

SUN Zhili[1,2], NING Ping[2], TANG Jianwei[3]

(1. *China Inorganic Salts Industry Association*, *Beijing* 100013, *China*;
2. *Faculty of Environmental Science and Engineering*, *Kunming University of Science and Technology*, *Kunming* 650500, *China*;
3. *College of Ecology and Environment*, *Zhengzhou University*, *Zhengzhou* 450001, *China*)

Abstract: In response to “dual carbon” targets and the national strategic goals of achieving efficient utilization of phosphorus resources, the thermal yellow phosphorus industry in China urgently needs to develop new productive forces, safeguard industrial chain security, and transition toward green and high-end development. To address the critical challenges of difficult industrialization of laboratory achievements due to the lack of pilot platforms, which hinder the green and low-carbon transformation of the industry and the efficient utilization of low-grade phosphorus resources, the current state of domestic industry and international R & D systems are analyzed. It highlights the strategic necessity of elevating pilot platform construction to the level of national innovation infrastructure and proposes a “government guidance-association leadership-enterprise initiative-academic participation” collaborative mechanism. Revitalizing existing small-scale industrial phosphorus furnaces as specialized pilot platforms is an efficient pathway to address resource and environmental challenges while fostering new productive forces in the industry.

Key words: thermal yellow phosphorus; green and low-carbon; pilot platform; phosphorus resources; technological innovation; strategic positioning

2025年是“十四五”规划收官与谋划“十五五”发展的关键节点。回顾“十四五”，规划纲要明确提出了“依托企业建设中试服务平台”以及“强化科技创新基础设施”的战略方向。然而，作

收稿日期：2025–12–29

作者简介：孙志立（1953—　），男，云南石屏人，研究员、教授级高工，中国无机盐工业协会磷化工分会秘书长，长期从事磷化工生产技术和开发工作，对磷资源的优化配置及成型炉料制磷新工艺、新技术的应用有较深的理论研究和生产实践认识。

通信作者：汤建伟，二级教授，博导，国家钙镁磷复合肥技术研究推广中心副主任（执行），《生态产业科学与磷氟工程》主编，兼任中国化工学会硫磷钛专委会副主任委员，主要研究方向为磷资源高效利用。

为磷化工产业技术升级最后一公里的关键——中试平台却面临缺位风险，这与国家顶层设计的要求存在显著落差[1]。我国磷矿资源丰而不富，如今新能源产业对高纯黄磷原料又提出了更高需求，倒逼热法黄磷生产工艺必须绿色转型。面对保障国家磷资源安全与实现绿色低碳转型的双重目标，我国热法黄磷产业的创新能力正面临严峻考验。当前，国内可用于验证低品位磷矿资源化综合利用、新工艺路线和节能减排技术的中小型工业磷炉几乎绝迹，行业关键的中试平台正濒临消失。衔接磷化工基础研究与产业化的中试环节已成为制约技术突破的系统性瓶颈，导致大量创新技术无法获得工业化必需的工程数据，产业化决策风险极高。反观美欧等磷化工强国，均曾系统保留中小型实验磷炉作为技术创新的“苗圃”[1]。破解这一困局，有必要将行业中试平台建设提升至国家产业基础设施规划层面，亟须构建由政府引导、协会牵头、企业主体和科研院校参与的开放式行业中试平台。构建开放共享的公共验证平台，盘活存量“孤品”磷炉，这不仅是应对当前资源与环境挑战的务实之举，更是对生产工艺核心资产的抢救性保护和培育行业持续创新能力、实现绿色高端发展的战略基石。守护行业发展中试平台，是保障热法黄磷产业赢得全球绿色化工竞争主动权和未来话语权的战略举措。

1 我国黄磷产业中试平台缺失的现状与困境

任何新工艺，都必须在接近工业现实的环境中验证其技术与经济可行性。中试平台就成了将实验室的“样品”变为工业规模化“产品”的唯一可信赖的环节。

调研显示，某科技公司一项可显著节能降耗的创新技术，因缺乏中试验证，产业化进程受阻，十多年来，科研设计实验已经第三代，但仍无工业化实例。某高校一项创新技术能大幅度减少低品位磷矿的生产能耗，但找不到一家愿意且能够进行中试的装置。实验室的小型装置，能验证技术原理，却拿不到工业化放大规模必需的真实可靠的生产工况数据——比如物料流动规律、传热传质等工艺生产特性和操作数据[2]。这就导致再多再好的发明专利和创新技术也难以上升到产业应用和转化成生产力。

目前，国内与热法黄磷相关的部分发明专利技术仍然缺乏工业化中试，这反映了当前科技创新与产业应用之间的结构性脱节。

企业使用新技术的试错成本太高，万吨级电炉一天的产值就是几十万上百万元，一旦技术不成熟，损失动辄数百万甚至上千万元。试错成本高到企业无法承受就难以为继，而一项创新技术的优化与生产技术完善稳定，是短期运行不能够实现的。

如今，要建设一台同等规模、功能齐全完备的工业级中试制磷电炉平台，综合投资高达数千万元，还有复杂的安全环保、供电等公用工程系统等，绝非国内高等院校实验室和科研单位的预算所能承担；另外审批流程极长，还有能源评估、安全评价、环境影响评价等各项繁杂手续，从立项到建成投入使用，周期长达3～5年。

2 国外热法黄磷科研体系

2.1 美欧热法黄磷研发与保护

欧美发达国家、苏联和印度等在工业化创新进程中，均高度重视中试平台工业装置的保留与建设，在热法黄磷领域都建立了全球领先及可供借鉴的科学研发体系。根据公开技术史料，美国于20世纪30年代之后于TVA（田纳西河流域管理局）体系下进行了一系列的黄磷研发与实验性运行生产。在田纳西州马瑟肖尔斯地区建有100～5 000 kV·A（磷炉变压器容量，下同）级的多种炉型进行技术探索和本地化适配，这类炉子可以让研究人员在接近工业化条件的连续生产运行中采集数据，而无需承担大型黄磷工厂极高的生产成本和安全风险，技术成熟后，再追求极致的能源效率、经济成本和环保集中治理。20 000～50 000 kV·A的大型化主流生产装置紧随上马，热法制磷技术得到了快速发展。其间，美国在培育兆瓦级生产巨擘满足工业需要的同时，始终保留有强大的中小型实验炉体系作为技术创新的“苗圃”[3-4]。

挪威霍达兰郡奥达镇奥达冶炼厂博物馆现在还保留着挪威奥达冶炼公司的一台100多年前的小黄磷电炉，作为科研人员、中小学生“工业革命与环保”主题教育研学基地[1]。

2.2 苏联热法黄磷的研发

据文献记载，苏联乌克兰门捷列夫化工大学曾建有容量100～500 kV·A系列的室内黄磷中试电炉；哈萨克斯坦的奇姆肯特和江布尔曾经是世界黄磷产能、产量最大的区域，其磷化工产业早在20世纪八九十年代就非常发达，黄磷产量曾经达到50万t/a以上的水平[2,5]。在奇姆肯特磷化工园区有30 000～45 000 kV·A的黄磷电炉12台，有1台12 500 kV·A的黄磷中试装置，生产工艺及设备布局与大电炉几乎完全相同，专门用于不同矿区的磷矿物相、炉料组成与入炉后的工艺参数优化。中试平台

实验装置科学系统性的中试数据，直接支撑了苏联磷化工产业的飞速发展和当时大型黄磷装置的技术输出[5]。苏联依托系统的实验电炉群，完成了对复杂矿产的工艺适配性研究，为其技术领先地位奠定了坚实基础。

2.3 印度黄磷生产研发的超前意识

印度是非常典型的黄磷产品“有消费市场，无上游产能”的案例，每年3万～4万t的消费量完全依赖进口（2023年进口量3.2万t），是黄磷产品的纯消费国和进口国[1]。印度拥有一定储量的磷矿资源（$w(P_2O_5)$普遍低于25%）和相对廉价的劳动力，至今国内仍无一台1万t/a黄磷装置和商业化黄磷生产企业。但印度理工学院（IIT）与吉吉拉特氟化学有限公司却拥有一台50 t/a的黄磷中试装置用于科学实验，此种超前意识是一种认真严谨的科学态度。

3 我国热法黄磷产业中试平台的战略定位与实施路径

3.1 战略定位

2025年是“十四五”的收官之年，“十四五”规划中第十四章加快培育战略性新兴产业的第二节“推动战略性新兴产业融合化、集群化、生态化发展”中明确提出：“鼓励创新型企业组建创新联合体，依托企业建设中试服务平台。”中国无机盐工业协会王孝峰会长介绍：“预计到2025年年末，无机盐行业总产值、主要产品产品将分别突破6 800亿元和1亿t，其中磷化工产品占比8.5%，新能源材料用无机盐产品占比升至7%，电子级产品市场将突破500亿元”。这些数据足以说明热法黄磷在磷化工产业链中的基石作用。国家层面目前虽未出台专门针对黄磷行业中试平台的特定政策，但核心政策导向是鼓励科技创新和成果转化，支持产业基础高级化和产业链现代化。中试平台作为连接科学研究与产业应用的桥梁，是培育新质生产力的关键基础设施。展望“十五五”，国家又对现代化基础设施体系进行系统性强化，其中“创新基础设施”的地位将空前提升。将黄磷行业中试平台提升为国家战略性基础设施，不仅是单一行业的需求，更是保障国家磷资源战略安全、提升整个新能源材料与高端磷化工产业链韧性的必要需求[6]。它作为关键的“融合基础设施”，将为“磷–电–碳”协同等绿色低碳技术的验证与推广提供强有力的基石支撑。我们建议，应将黄磷产业中试平台的建设纳入“十五五”规划，明确其作为“科技创新基础设施”的战略定位，给予专项资金及政策支持。

3.2 实施路径

热法黄磷产业关乎磷资源安全和新材料供应，其关键工艺技术的自主可控是“国家战略科技力量”的体现。鉴于目前的产业政策与种种因素，解决我国热法黄磷技术创新面临的中试平台缺位困境和结构性脱节问题，现存装置是行业最宝贵的存量资产，其改造利用的成本和周期远低于新建。我们有责任和义务向政府有关职能部门清晰阐明其重要意义，平台的唯一目的是科研中试，其运行方式、产品去向、能耗核算均与生产装置有本质区别，应申请单列管理，彻底消除政策顾虑。

曾几何时，遍布云贵川鄂黄磷产区的三根电极小磷炉是当地经济发展活力的象征[6]。2006年，全国共有7 200～25 000 kV·A的各种类型的制磷电炉300多台、引进德国赫斯特技术的72 750 kV·A制磷电炉1台和引进苏联圣彼得堡化学研究院技术的90 000 kV·A制磷电炉2台，黄磷生产企业共有148家，变压器装机容量超过400万kV·A[6–8]。这些装置既是生产装置，又是黄磷生产技术比对、风险排查、工艺操控试错和技术参数优化、获取放大设计基础数据等不可替代的桥梁。具有独立自主创新发明的三相6根、三相7根、三相9根多电极制磷电炉就是在这样的“生态环境”中诞生的[9–10]。我国独创的多电极制磷电炉技术之所以获得成功，正是得益于当年有各种类型的电炉和一批可脱离生产压力、进行颠覆性构思与技术参数验证的工程试验装备作为创新技术的“摇篮”[11]。

国内尚有即将拆除的磷炉装置（3根电极），此类可用于热法黄磷生产工艺科研的小型工业磷炉在业内已基本绝迹，现存设备装置目前已成为国内黄磷行业的“孤品”。3根电极磷炉虽属小型装置，但其工艺参数控制精度、反应条件（温度、压力、气氛等）范围完全能满足当前科研中试的需求，其规模介于实验室装置与大型工业化装置之间[11]。另外，还可以针对目前热法黄磷工艺中的瓶颈问题（如提高收率、降低能耗、尾气利用、减少排放、杂质控制等）进行专项技术改进，以及创新技术开发与方案验证。

盘活现有资产建设国家级中试平台，是践行“放管服”改革、优化创新生态、以较小政策成本换取巨大战略收益的明智之举。如果能用近乎零成本、零时间代价，为国家保住一个极其稀缺的战略性科研平台（或者基础“工业遗产”设施），其意

义远超保留设备本身。

建议有关部委和地方政府，联合龙头企业、国家级科研机构，进行专题研究，共同规划建设国家级磷化工中试示范基地，将此类关乎资源安全的行业中试平台，参照国家企业技术中心、制造业创新中心等载体的标准，给予明确的政策认定和支持。对现存的可用于中试的小型工业装置进行普查和评估，将共建共享机制明确上升为国家层面的顶层设计。打破高校、科研机构和企业间的技术壁垒，明确平台的非营利性和公共服务属性。探索建立“政府引导-协会牵头-企业主体-科研院校参与”的开放式“技术创新联合体”。建立公平、透明的项目准入和管理机制，面向国内全行业开放，优先支持行业共性关键技术、卡脖子难题的攻关。以联盟形式共同投资、共同拥有、共同受益，解决单一主体投资大、风险高的问题，最终打造开放、中立、高效的热法黄磷产业公共中试平台。

面对“十五五”国家全力发展新质生产力的战略部署，我国磷化工产业必须向高端化、绿色化、智能化迈进。建设中试平台不是一项成本支出，而是对行业未来最重要的战略性投资，是企业家、科学家、工程师守护行业核心竞争力的责任和义务。

4 结束语

站在国家“双碳”目标与资源约束的历史交汇点，我国热法黄磷产业正处在从产能扩张迈向创新驱动的历史拐点，转向以“磷-电-碳”协同为核心、实现绿色高端发展的质量革命。面对绿色转型与资源高效利用的国家战略需求，建设一个开放共享的行业中试平台，已从发展选项升级为生存与发展的必然选择。赢得这场行业深刻变革的关键，不再仅仅是万吨级的“生产巨人”，而在于能否构建一个孕育颠覆性技术的“创新母体”——国家级黄磷产业中试平台。建议国家部委制定的产业政策超越对落后产能的简单淘汰，转向对关键创新基础设施的战略性前瞻布局。

保留并激活行业中试平台，并非开历史的倒车，而是为了赢得未来竞争的入场券，需要政府、行业与学术界凝聚共识，共同将行业中试平台的建设提升至保障国家磷资源安全、培育新质生产力的战略高度。历史的经验昭示我们：一时的产能优势可以赢得一场战役，但唯有可持续的制度化创新能力方能赢取整个时代；唯有构建起坚实的创新基石和超前策划战略定位，我国黄磷产业才能不仅赢得当下的市场，更有能力驾驭未来的世界潮流，为国家在全球绿色磷化工竞争中占据主动奠定基础。

[参考文献]

[1] 徐戴红，伍唐文，孙志立.世界热法黄磷产业现状与发展研究[J].生态产业科学与磷氟工程，2025，40(11)：7-14.
XU D H，WU T W，SUN Z L. Research on the current status and development of the world’s thermal yellow phosphorus industry [J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering，2025，40(11)：7-14.

[2] 孙志立，杜建学.电热法制磷[M].北京：冶金工业出版社，2010.

[3] 伯尔特R B，巴尔伯J C.电炉法生产元素磷[M].刘自强，蔡孝载，译.北京：化学工业出版社，1965.

[4] 尼.尼.波斯特里科夫.化学工艺学[M].成都：成都工学院出版社，1958.

[5] 孙志立.80 MW制磷电炉运行总结[J].硫磷设计与粉体工程，2002(4)：19-26.
SUN Z L. The Operation Summary of 80 MW Electric Furnace for Phosphorus Production[J]. Sulphur Phosphorus & Bulk Materials Handling Related Engineering，2002(4)：19-26.

[6] 孙志立，黄平，闫立宁，等.我国精细磷酸盐产业的现状及发展的重点和方向[J].肥料与健康，2021，48(1)：6-9.
SUN Z L，HUANG P，WEN L N，et al. Current Situation and Development Priority and Direction of China’s Fine Phosphate Industry[J]. Fertilizer & Health，2021，48(1)：6-9.

[7] 姚之琦，孙志立，闫立宁.我国黄磷及精细磷酸盐生产的困境和发展机遇[J].磷肥与复肥，2019，34(11)：1-3.
YAO Z Q，SUN Z L，WEN L N. Difficulties and opportunities of yellow phosphorus and fine phosphate production in China[J]. Phosphate & Compound Fertilizer，2019，34(11)：1-3.

[8] 孙志立，闫立宁.中国黄磷工业的创新发展之路[J].化肥工业，2018，45(3)：1-6.
SUN Z L，WEN L N. Innovation and Development Path of Yellow Phosphorus Industry in China[J]. Chemical Fertilizer Industry，2018，45(3)：1-6.

[9] 孙志立，闫立宁，黄平.致敬改革开放40周年——后发赶超的贵州磷化工进展[J].化肥工业，2019，46(5)：1-5.
SUN Z L，WEN L N，HUANG P. Paying Tribute to the 40th Anniversary of Reform and Opening-Up：Progress in the Phosphorus Chemical Industry in Guizhou，the Place that is Catching up[J]. Chemical Fertilizer Industry，2019，46(5)：1-5.

[10] 孙志立.热法黄磷不可或缺将随时代发展而进步[J].磷肥与复肥，2016，31(2)：刊首页.
SUN Z L. Indispensable yellow phosphorus production with electro thermal process will progress with development of time [J]. Phosphate & Compound Fertilizer，2016，31(2)：Issue of home page.

[11] 牛仁杰，潘江，李渴，等.热法制磷电炉变压器工艺参数异常案例的研究与分析[J].生态产业科学与磷氟工程，2025，40(10)：53-56.
NIU R J，PAN J，LI K，et al. Research and analysis of abnormal process parameters of thermal phosphorus furnace transformer [J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering，2025，40(10)：53-56.