

“零碳磷化工园区”建设的挑战、路径与案例研究

沈海龙¹, 侯屹东², 谭悦扬¹

(1. 云南云天化凯石科技有限公司, 云南 昆明 650600; 2. 云南省化工研究院, 云南 昆明 650600)

[摘要] 随着我国“双碳”目标各项落实工作有序推进, 国内涌现出越来越多的“零碳磷化工园区”, 成为磷化工园区迈向零碳化的重要参考案例。围绕“双碳”目标下“零碳磷化工园区”的建设路径展开系统研究。界定了“零碳磷化工园区”是指在运营阶段通过应用清洁能源、实施碳捕集与碳汇抵消等手段, 使碳排放无限接近零的状态。深入剖析了当前“零碳磷化工园区”建设面临的主要挑战, 包括技术瓶颈(如磷石膏利用率低、黄磷能耗高、碳捕集成本高昂、复合型人才短缺)、经济约束(初始投资大、回报周期长、融资难、市场对零碳产品认可度不足)以及管理障碍(缺乏统一碳核算标准、部门间数据壁垒)。针对挑战, 围绕能源系统、产业系统、经济体系、管理平台以及政策保障提出了“零碳磷化工园区”系统性建设路径。以云南安宁产业园区和山东聊城化工园区为例, 验证了上述路径的可行性与实效。最后指出, “零碳磷化工园区”建设是一项需多方协同的系统工程, 通过技术创新、模式与制度创新, 方可推动磷化工行业实现绿色低碳转型。

[关键词] “零碳磷化工园区”; “双碳”目标; 建设路径; 挑战分析; 路径设计

[中图分类号] F426.7 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-4566 (2026) 04-0082-05

Challenge, path, and case study on the construction of “zero carbon phosphorus chemical industrial parks”

SHEN Hailong¹, HOU Yidong², TAN Yueyang¹

(1. Yunnan Yuntianhua Kaishi Technology Co., Ltd., Kunming 650600, China;

2. Yunnan Chemical Research Institute, Kunming 650600, China)

Abstract: With the orderly promotion of China's “dual carbon” target, more and more “zero carbon phosphorus chemical industrial parks” have emerged domestically, becoming important reference cases for phosphorus chemical industrial parks to move towards zero carbonization. The construction path of the “zero carbon phosphorus chemical industrial parks” under the “dual carbon” goal is systematic studied. It is defined that “zero carbon phosphorus chemical industrial parks” refer to a state where carbon emissions are infinitely close to zero through the application of clean energy, the implementation of carbon capture and carbon sink offsetting, and other means during the operation phase. In depth analysis is conducted on the main challenges faced by current construction, including technical bottlenecks (such as low utilization of phosphogypsum, high energy consumption of yellow phosphorus, high carbon capture costs, and shortage of composite talents), economic constraints (large initial investment, long return cycle, difficult financing, insufficient market recognition of zero carbon products), and management barriers (lack of unified carbon accounting standards, inter departmental data barriers). In response to challenges, a systematic construction path is proposed for zero carbon phosphorus chemical industrial parks around energy systems, industrial systems, economic systems, management platforms, and policy support structures. Taking Yunnan Anning Industrial Park and Shandong Liaocheng Chemical Industry Park as examples, the feasibility and effectiveness of the above path are verified. Finally, it is pointed out that the construction of “zero carbon phosphorus chemical industrial parks” is a systematic project that requires multi-party collaboration. Through technological innovation, model and institutional innovation, it can promote the green and low-carbon transformation of the phosphorus chemical industry.

收稿日期: 2025-10-29

作者简介: 沈海龙(1987—), 男, 云南玉溪人, 工程师, 从事磷酸氢钙生产工艺技术管理工作。

基金项目: 云南省科技厅重点研发计划“氧化钙直接制备高品质饲料级磷酸钙盐关键技术研究”(202503AT100003-02)

Key words: “zero carbon phosphorus chemical industrial parks”; “dual carbon” target; construction path; challenge analysis; path design

0 引言

2020年9月我国明确提出力争2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和目标(即“双碳”目标)^[1]。自从国家“双碳”目标实施以来,国内磷化工企业纷纷对生产工艺做出优化改进,努力达到零碳排放标准。

在全球气候变化与碳排放问题日益严重的背景下,零碳园区建设是实现“双碳”目标的重要抓手^[2]。零碳,顾名思义,是二氧化碳零排放的含意。由于零碳排放只有在理想条件下才可能实现,在现实的磷化工园区生产过程中很难实现零碳排放。“十四五”期间,我国磷化工行业通过技术改造和创新,继续提高资源利用率,最大限度实现源头减排,并取得了显著成效^[3]。国内不少磷化工园区为践行“双碳”目标,积极探索“零碳磷化工园区”建设,如今已经形成不少可借鉴的经验,同时也发现“零碳磷化工园区”建设面临不少的挑战。基于此,本文将围绕“零碳磷化工园区”建设路径展开探讨。

1 “零碳磷化工园区”的概念与特征

1.1 “零碳磷化工园区”的定义

“零碳磷化工园区”指的是磷化工园区在运营阶段通过应用清洁能源,实施碳捕集与碳汇抵消实现零碳排放,重点在于园区全生命周期碳管理^[4]。本文的“零碳磷化工园区”,即磷化工园区的碳排放标准处于设定的排放标准限值以下,远低于排放标准限值,无限接近零碳排放状态。磷化工园区在运营阶段通过采取能源转型、产业升级、循环经济等手段实现碳排放与吸收平衡,即可达到“零碳磷化工园区”的标准。

1.2 “零碳磷化工园区”的特征

“零碳磷化工园区”具有极其鲜明的特征,主要以新能源(清洁能源)结构为主导,呈现出多产业耦合协同的发展趋势,数字化技术应用越来越广泛^[5]。

在“零碳磷化工园区”内,风电、光伏、生物质能等可再生能源的占比将超过80%,磷化工园区的能源结构以新能源(清洁能源)为主导。同时,“零碳磷化工园区”的产业将不再局限于磷化工加工生产,而是覆盖各行各业,贯穿磷化工的上、中、下游产业,形成多产业耦合协同发展模式。

“零碳磷化工园区”的碳足迹基本实现100%全覆盖,数字化技术应用助力磷化工园区实现智慧化管理。

2 “零碳磷化工园区”建设面临的挑战

尽管国内不少磷化工园区一直在探索实践“零碳磷化工园区”建设,但能真正达到零碳排放的磷化工园区寥寥无几,无一例外均面临着十分严峻的挑战。

2.1 技术瓶颈

当前我国大部分磷化工园区的磷石膏综合利用率不高,与国外标杆园区相比还存在较大的差距。黄磷生产属于高能耗行业,电能消耗占总成本的45%~60%^[6]。黄磷生产线耗能、耗电过高,是行业的通病,以至于“零碳磷化工园区”推进工作受到的阻力非常大。目前国内部分磷化工园区的绿氢制备成本居高不下,国内PEM(质子交换膜)电解槽关键材料过于依赖进口,国内技术相对落后。

与此同时,磷化工生产尾气中二氧化碳占比仅15%~20%,现有的化学吸收法能耗高,碳捕集效率低,成本较高(国内碳捕集成本为200~600元/t),产生的经济效益相对较差^[7]。复合型数字化人才短缺的问题,一直困扰着磷化工园区的零碳化建设,该困境短期内很难找到替代方案,在人才缺口未补齐之前,将会一直限制磷化工园区零碳排放的实现。

2.2 经济约束

“零碳磷化工园区”建设初始投资高,零碳改造需要投入大量的初始资金用于光伏电站、储能系统、碳捕集装置、智能化管理中心建设^[8]。“零碳磷化工园区”建设的投资回报周期较为漫长,往往需要几年,甚至是十几年才能看到显著性的经济效益。受制于投资回报周期长的特点,大部分传统金融机构对磷化工园区零碳项目改造建设的意愿度不高,造成磷化工园区零碳改造融资渠道十分有限,难以获得稳定的融资贷款,用于支持园区的零碳化建设。同时,零碳产品的市场接受度与认可度不高,绿色产品溢价未显现,尤其是下游客户对零碳产品的支付意愿不足,抑制了磷化工园区朝着零碳排放方向发展,严重打击了不少企业的积极性。

2.3 管理障碍

磷化工的产业链比较长,从磷矿开采,到生产加工以及终端产品包装、销售等,当前缺乏统一的碳核算标准^[9]。以至于磷化工园区企业之间的碳排放数据缺乏可对比性,长期处于“数据空档”期。不同主管部门对于磷化工零碳排放的标准限值未做到有机统一,比如环保部门更侧重污染物的排放,而能源部门则侧重能耗双控,碳市场监督管理部门则关注碳排放指标,不同部门的数据存在显著性差异,数据链条未打通,无形中增添了“零碳磷化工园区”建设的难度,合规性成本大幅度上升。

3 “零碳磷化工园区”建设路径设计

磷化工产业是化学工业的重要分支,其生产加工过程中会产生大量的二氧化碳,加剧全球气候变暖的速度^[10]。“零碳磷化工园区”的建设工作,须从细节做起,围绕能源系统、产业系统、经济体系、管理平台以及政策保障构建起一套完善的体系。

3.1 能源系统零碳化

能源系统是保障磷化工园区企业正常加工生产的中枢,是“零碳磷化工园区”建设的关键环节,其零碳化可从供给、分配、使用3个方面协同推进。

3.1.1 规模化应用清洁能源

通过利用磷化工园区的屋顶、闲置土地等区域建设分布式光伏电站,同时结合周边风能资源布局新能源风电项目,使清洁能源成为磷化工园区供能的重要组成部分,构建“光伏+储能”零碳化系统,为实现零碳磷化工园区夯实基础。

磷化工企业积极探索绿氢材料在工业供热、合成氨等生产工艺环节的替代应用,打造氢电耦合型零碳园区,通过电解水制氢实现能源闭环,降低磷化工园区对传统化石能源的依赖。与此同时,磷化工园区通过构建“热—电—气”多能互补系统,利用磷化工生产产生的废渣、废气等生物质资源进行气化发电,将生产过程中产生的余热进行回收利用,转换为磷化工生产加工所需的动能。

3.1.2 构建智能能源网络

磷化工园区通过建设智能微电网,嵌入AI(人工智能)算法技术,整合园区内使用的风电、光伏、储能、氢能等绿色新能源资源,优化能源的调度分配,提升磷化工园区的能源利用效率。为实现碳流向的可视化,磷化工园区可积极部署碳电表实时监测电力碳排放因子的波动情况,构建智慧能

源管理平台,做到精准把控磷化工园区的碳排放工作。不过,在零碳磷化工园区构建过程中,企业前期需要投入较大的成本,短期内很难见到显著经济效益,难免会有不少的企业有所顾虑。而构建智能能源网络,规模化应用清洁能源,能形成一定规模的产业集群,由此带动更多企业参与进来,从而彻底打消企业的顾虑。

3.2 产业系统绿色化

在“零碳磷化工园区”建设背景下,磷化工园区产业将朝着绿色化方向发展,积极引入低碳工艺技术,推动节能设备升级,进行产业结构优化调整,加快淘汰落后产能。

3.2.1 低碳工艺技术改造

磷化工园区将积极推广湿法磷酸净化、磷石膏制硫酸联产水泥等低碳工艺技术,减少传统热法磷酸的高温煅烧环节,引入新型催化剂降低反应温度,由此降低单位产品的碳排放值。磷化工园区企业应积极淘汰高耗能的机械设备,采用高效的换热器、磁悬浮离心机等节能装备,推动设备节能升级。在磷肥生产、黄磷冶炼等高碳排放环节试点碳封存技术,采取氨吸收法捕获二氧化碳并注入地下封存,从而实现深度减排。

3.2.2 产业结构优化调整

磷化工园区企业可依托磷矿资源打造“矿—化—电—材”一体化产业链,主动将磷化工产业链延伸,发展磷酸铁锂、电子级磷酸等高端磷化工产品,在提升产品附加值同时,将单位碳排放强度降低至行业平均水平。磷化工园区通过建立供应商碳足迹评价体系,打通园区与供应商的沟通壁垒,优先向供应商采购低碳原材料以及包装材料,推动磷化工园区供应链实现绿色转型。在磷化工园区内,对于不符合环保排放标准的磷肥、黄磷生产线,坚决予以关停,通过产业结构优化调整,助力磷化工产业系统朝着绿色化方向发展。

3.3 经济体系循环化

循环经济,是“零碳磷化工园区”建设的核心模式,应做好物质的循环利用以及产业共生网络的构建。

3.3.1 物质循环利用

磷化工园区企业可将磷石膏用于生产建材、土壤改良剂,或者作为路基的填充材料,减少天然石膏的开采量,间接降低碳排放。在磷化工园区内,通过利用膜分离、蒸发结晶等技术实现生产废水的循环利用,减少用水量,实现废水零排放。对于生

产过程中产生的废气，企业通过设置尾气回收装置，将黄磷尾气中的一氧化碳、氢气等作为燃料或原料，回收利用，减少对燃煤的消耗。

3.3.2 产业共生网络构建

磷化工园区通过建立园区级物质交换平台，推动园区内磷化工、建材、新能源等企业之间的副产品互换互通，构建磷化工园区循环经济产业链。通过建设集中供热、供水、供气、污水处理等公共设施，共享基础设施，所有新建建筑均达到绿色星级建筑标准，为“零碳磷化工园区”建设提供助力。与此同时，磷化工园区可积极探索碳金融创新模式，参与全国碳市场交易，通过向其他企业或客户出售剩余碳配额的方式获取额外的收益，为企业创造出更大的经济价值，间接降低碳排放值。

3.4 管理平台数字化

数字化是“零碳磷化工园区”建设的核心驱动力，需要将数据采集、共享、分析、决策等关键环节逐一打通，构建闭环的生态体系。

3.4.1 全生命周期碳监测

“零碳磷化工园区”建设，要搭建全生命周期的碳排放因子管理平台，借助数字化技术，建立园区级碳排放因子数据库，覆盖电力、热力、原料等全流程的碳排放因子数据。通过在磷化工生产关键环节部署传感器，实时监测碳排放数据，实现碳排放数据可视化追踪，为企业经营决策提供精准的数据支持。同时，通过引入区块链技术，确保碳排放数据不可篡改，为后期推行碳交易打下坚实基础，也倒逼磷化工园区企业朝着零碳化方向转型发展。

3.4.2 全面应用AI算法技术

在磷化工园区内，通过全面应用AI算法技术，分析园区企业碳排放趋势，动态调整生产计划，提升能源调度分配效率。通过构建磷化工园区区域能源互联网，结合AR/VR虚拟现实技术，模拟不同场景下的碳排放变化，优化园区内能源布局。

3.5 政策保障系统化

政策是“零碳磷化工园区”建设的重要保障，通过强化国家层面政策引导，完善地方层面政策配套，以及园区层面的政策创新，实现磷化工园区政策保障系统化。

3.5.1 主管部门层面政策引导

磷化工园区要积极申报国家碳达峰试点范围，明确碳排放减排目标以及具体的实施路径。当

地的金融机构积极赋能磷化工园区发展，对其发行“零碳园区”专项债券，为园区内企业提供低息金融贷款政策支持。有关主管部门通过出台磷化工行业“零碳园区”建设标准规范，明确碳排放的标准限值，厘清碳排放核算、能效标杆等关键指标，使“零碳磷化工园区”建设，有据可依，有规可循。

3.5.2 园区层面政策创新

磷化工园区将碳排放指标纳入园区内企业的KPI（关键绩效指标）考核，对超额完成目标的企业给予奖励，比如对碳减排连续2次考评达到标杆值的企业提供租金减免优惠，激发企业完成碳排放指标的积极性。同时，磷化工园区通过设立专项资金支持低碳技术研发，探索应用新技术、新设备，力求达到零碳排放标准。磷化工园区可设置“人才绿卡”的制度吸引高精尖人才入驻园区，与高校合作培养“零碳工程”复合型人才，为符合条件的人才提供住房、科研补贴、教育医疗保障，持续推动磷化工园区朝着“零碳园区”稳步迈进。

4 “零碳磷化工园区”实践案例

4.1 云南安宁产业园区

磷化工是云南安宁产业园区的三大主导产业之一。云南安宁产业园区是云南省零碳示范标杆园区，主要依托磷矿资源大力发展锂电池材料，其中绿色电源消纳占比超过50%，构建了集“光伏+储能+电池制造”的闭环产业链，充分论证了能源系统零碳化的可行性。同时，云南安宁产业园通过跨地域联动的方式，积极联动曲靖、玉溪等经济开发区，共同构建起西南零碳产业集群，在“零碳磷化工园区”建设方面起到了很好的引领示范作用，在产业共生发展方面起到很好的借鉴作用。

云南安宁产业园区通过推动跨产业、跨企业之间形成产业“生态圈”，打通供应链的上中下游，形成“副产品—原材料—产品”的产业闭环，比如滇环科创承接天安公司副产品磷石膏制硫酸，将零碳磷化工园区的经济体系构成闭环。在循环发展方面，云南安宁产业园区通过加强企业之间的副产品交换，推动废弃物资源化利用，实现园区内能量、物质、信息的高效循环，极大降低了二氧化碳的排放量。

4.2 山东聊城化工园区

山东聊城化工园区在“零碳磷化工园区”实践中，通过持续优化工艺和设备，实施智慧管控，自动采集与分析园区水、电、气、汽等能源数据，对

水、电、汽开展阶梯利用、综合利用,积极淘汰高耗能设备,通过仿真工艺流程优化,对热换器进行优化改进,实现了能源效率的最大化。山东聊城化工园区通过构建智能能源网络,实现了能源的最大化利用。基于搭建的能源管理中心,对固体废物进行提纯再生利用,水资源循环利用,动态调整电力负荷,实时监测热能管网,动态监测原料储存,以及动态监测大型装置运行状态。

山东聊城化工园区在提产降耗、能量耦合、设备升级等方面不断优化提升,极大提升了能源的利用效率。比如,该园区积极应用新一代MVR技术,升级改造现有装置蒸发浓缩系统,将乙内酰胺装置重排单元的“三效蒸发”系统改造为“MVR+双效蒸发”的方式,在有机胺装置改造成功后,产量提升23%,吨产品综合能耗下降25%,年节省标准煤2.4万t,减少二氧化碳排放量高达6万t。低碳工艺技术改造,给山东聊城化工园区带来了显著性的经济效益。又如,该园区对甲酸装置、多元醇装置、乙内酰胺装置等实施升级改造,经改造后节约蒸汽30 t/h,年可节约能耗标准煤5万t,减少二氧化碳排放量10万t。

5 结语

“零碳磷化工园区”的建设工作,是一项系统性工程,需要以能源系统的“零碳化”为基础,以产业系统绿色化为核心,以经济体系循环化为支撑,以管理平台数字化为手段,以政策保障系统化为保障,通过技术创新、模式创新、制度创新,推动磷化工园区从“高碳排放”向“零碳排放”转型发展,走上可持续发展的道路。

[参考文献]

- [1] 王白冰,夏郭效.绿色转型背景下零碳园区建设与优化路径研究[J].中国商论,2025,34(12):132-137.
WANG B B, XIA G X. Research on Development and Optimization Paths of Zero-Carbon Parks in the Context of Green Transition[J]. China Journal of Commerce, 2025,34(12): 132-137.
- [2] 陈鹏,贺鸿,唐建楷,等.磷化工产业降碳增汇的探索与展望[J].环境工程学报,2025,19(6):1305-1316.
CHEN P, HE H, TANG J K, et al. Exploration and prospect of carbon reduction and sink increase in phosphorus chemical industry[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2025,19(6):1305-1316.
- [3] 陶思成,蒋则明,李卫兵,等.零碳园区智慧化建设探究[J].合作经济与科技,2025(9):55-58.
- [4] 李贵东,王雪萌,安燕,等.典型磷化工企业碳足迹核算及减排措施[J].环境工程学报,2025,19(4):988-997.
LI G D, WANG X M, AN Y, et al. Carbon footprint accounting model and emission reduction measures of typical phosphorus chemical enterprises[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2025,19(4):988-997.
- [5] 王敏,闫星云,胡洁.信息可视化设计在零碳园区中的应用研究——以工业园区碳管理系统界面为例[J].设计,2024,37(12):132-135.
WANG M, YAN X Y, HU J. Research on the Application of Information Visualization Design in Zero Carbon Parks: Taking the Interface of Industrial Park Carbon Management System as an Example[J]. Design, 2024,37(12):132-135.
- [6] 姚瑞锋.基于多能耦合的近零碳园区建设方案探索[J].节能与环保,2024(5):56-63.
YAO R F. Exploration of Near Zero Carbon Park Construction Scheme Based on Multi Energy Coupling[J]. Energy Conservation and Environmental Protection, 2024(5):56-63.
- [7] 彭俊.零碳园区风光储优化配置研究[D].北京:华北电力大学,2024.
PENG J. Research on Optimal Configuration of Wind and Solar Energy Storage in Zero Carbon Parks[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2024.
- [8] 周敏,杨若溪.“绿色园区”“低碳园区”和“零碳园区”的概念辨析与发展[J].绿色建造与智能建筑,2024(4):29-33.
ZHOU M, YANG R X. Concept Analysis and Development of “Green Park” “Low Carbon Park” and “Zero Carbon Park”[J]. Green Construction and Intelligent Buildings, 2024(4):29-33.
- [9] 徐拥军,王劲松.浅析零碳园区规划思路[J].张江科技评论,2024(3):126-129.
- [10] 徐莹.基于碳达峰和碳中和背景下的磷化工产业绿色低碳节能减排研究[J].化工设计通讯,2023,49(1):156-158.
XU Y. Research on Green, Low Carbon, Energy saving and Emission Reduction of Phosphorus Chemical Industry Based on Carbon Peak and Carbon Neutralization[J]. Chemical Engineering Design Communication, 2023,49(1):156-158.