

黄磷清洁生产关键技术及产业化研究

陈少霞

湖北兴发化工集团股份有限公司 湖北 宜昌 443700

摘要: 本文概述了黄磷生产现状,指出电炉法存在能耗高、污染大、磷渣处理难等问题。重点介绍了黄磷清洁生产关键技术,包括电炉尾气综合利用、磷渣资源化处理及湿法磷酸净化技术。同时分析了产业化面临的技术、资金、市场挑战,并提出加强产学研合作、拓宽融资渠道、提升产品竞争力等应对策略,以推动黄磷清洁生产产业化。

关键词: 黄磷;清洁生产;技术;产业化;研究

引言:在全球能源与环境问题日益凸显的背景下,黄磷生产行业作为传统高能耗、高污染领域,其生产现状与可持续发展之间的矛盾愈发突出。电炉法虽作为主流生产方式,具备工艺成熟与效率相对较高的优势,但能耗巨大、环境污染严重以及磷渣处理难题等问题,严重制约了行业的绿色转型。因此,探索并推广黄磷清洁生产关键技术,实现技术产业化,成为行业亟待解决的重要课题。本文旨在概述黄磷生产现状,剖析清洁生产关键技术,分析产业化面临的挑战,并提出相应的应对策略,以期为黄磷行业的绿色发展提供参考与借鉴。

1 黄磷生产现状概述

在全球黄磷生产格局中,电炉法以其成熟的工艺和相对较高的生产效率,成为主流的生产方式。这一工艺要求对原料进行精准把控,专业技术人员会依据磷矿石的品位、焦炭的热值以及硅石的理化特性,仔细调配三者的比例。调配完成后,将混合原料投入到专门设计的电炉内。电炉通过强大的电流作用,在内部营造出高达1400-1500℃的高温环境,为还原反应的发生创造条件。

(1) 这一看似高效的传统工艺,实则存在诸多亟待解决的弊端。从能耗层面深入剖析,电炉法堪称电能消耗的“大户”。以大型黄磷生产企业为例,每产出1吨黄磷,所消耗的电量惊人,通常在14000-15000千瓦时之间。如此巨大的电能消耗,主要源于两个关键因素。其一,为维持反应所需的高温环境,电炉需要持续不断地输入大量电能,以弥补因散热等原因导致的热量损失。其二,在反应过程中,原料分子间的化学键需要大量能量来打破,从而促使反应朝着生成黄磷的方向进行。在当前能源供应形势日益紧张,且能源价格频繁波动并整体呈上升趋势的大背景下,高昂的电能成本使得黄磷生产成本急剧攀升。这不仅压缩了企业的利润空间,还严重削弱了企业在市场中的价格竞争力,对企业的可持续

发展构成了严峻挑战。(2) 从环境污染的角度审视,电炉尾气成为大气污染的重要源头。尾气中包含多种有害成分,其中一氧化碳、磷氧化物以及氟化物尤为突出。一氧化碳是一种无色无味却毒性极强的气体,一旦被人体吸入,会迅速与血液中的血红蛋白结合,其亲和力远远超过氧气与血红蛋白的结合力。这就导致氧气无法正常输送到人体各个器官,进而对人体的呼吸系统、神经系统等造成严重且不可逆的损害。磷氧化物排放到大气中后,会积极参与复杂的光化学反应。在这个过程中,它们会促使二次污染物的形成,其中细颗粒物($PM_{2.5}$)的增加尤为明显。细颗粒物的增多会导致大气能见度显著降低,引发雾霾等恶劣天气现象,严重威胁居民的身体健康,同时也对城市的生态环境造成了极大的破坏。

(3) 生产过程中产生的磷渣同样带来了棘手的问题。磷渣的产量极为庞大,每生产1吨黄磷,大约会产生8-10吨磷渣。这些大量的磷渣如果仅仅进行简单堆放,不仅会占用数量可观的宝贵土地资源,还会因为长期暴露在自然环境中,受到雨水冲刷等自然因素的影响。磷渣中残留的磷元素会随着地表径流进入周边的土壤和水体。在土壤中,过量的磷元素会打破土壤原本的酸碱平衡,干扰土壤中微生物的正常代谢活动。土壤微生物对于维持土壤肥力、促进农作物生长起着关键作用,其代谢活动受到干扰后,土壤肥力会逐渐下降,这对农作物的生长发育和产量品质产生了极为不利的影响。在水体环境中,磷元素的过量存在会引发水体富营养化现象。这会刺激藻类等浮游生物过度繁殖,藻类在生长和死亡分解的过程中,会大量消耗水中的溶解氧。当水中溶解氧含量降低到一定程度时,水生生物会因缺氧而大量死亡,从而严重破坏水生态系统的平衡与稳定。

2 黄磷清洁生产关键技术

2.1 电炉尾气综合利用技术

(1) 尾气制化学品技术：电炉尾气富含高浓度一氧化碳，这为高附加值化学品的生产提供了丰富的原料。通过羰基合成等化学反应，一氧化碳可转化为多种有价值的化学品。以一氧化碳与甲醇在催化剂作用下生成醋酸为例，该反应不仅实现了一氧化碳的资源化利用，减少温室气体排放，还为企业创造了新的盈利点。随着技术发展，利用一氧化碳与氢气合成二甲醚、甲酸甲酯等化学品的技术也日益成熟。二甲醚是一种清洁燃料，具有良好的燃烧性能和环保特性；甲酸甲酯则在农药、医药等领域有广泛应用。这些技术的推广，极大地拓展了电炉尾气的综合利用途径，使黄磷生产过程中的废弃物转变为有价值的资源。(2) 尾气发电技术：尾气发电是电炉尾气有效利用的重要方式。在发电前，需对尾气进行净化处理，去除其中的杂质和有害成分，以保证发电设备的正常运行和延长使用寿命。净化后的尾气送入燃气轮机或内燃机中燃烧，带动发电机发电。所产生的电能可部分或全部回用于黄磷生产过程，降低企业对外部电网的依赖，节约用电成本。同时，尾气发电实现了能源的梯级利用，提高了能源利用效率。例如，在一些大型黄磷生产企业中，尾气发电系统可满足企业部分生产用电需求，减少了对传统能源的消耗，降低了企业的能源成本和环境压力。

2.2 磷渣资源化处理技术

(1) 制备建筑材料：磷渣具有潜在的水硬性，可用于生产多种建筑材料。将磷渣经过粉磨等处理后，与水泥熟料、石膏等按一定比例混合，可制备出不同强度等级的水泥。在混凝土中掺入适量磷渣粉，能够改善混凝土的工作性能，如提高混凝土的流动性、减少泌水等，同时提高其耐久性，如增强混凝土的抗硫酸盐侵蚀能力和抗碳化能力，降低混凝土的生产成本。此外，磷渣还可用于制造砖、砌块等墙体材料，实现磷渣的大规模资源化利用，减少建筑材料生产对天然资源的依赖，符合可持续发展的要求。(2) 提取有价值元素：磷渣中除了含有大量的钙、硅元素外，还含有少量的磷、铁、钛等有价值元素。通过磁选法可分离出磷渣中的铁元素，用于钢铁生产，提高钢铁的质量和性能。利用酸浸等化学方法可提取磷元素，进一步加工成磷酸等产品，满足化工、农业等领域的需求。对于钛元素，也可通过特定的工艺进行富集和提取，为钛产业提供原料，提高了资源利用效率，增加了企业的经济效益^[1]。

2.3 湿法磷酸净化技术

(1) 溶剂萃取法：溶剂萃取法是应用较为广泛的湿法磷酸净化技术。其原理是利用磷酸与杂质在特定有机

溶剂中的溶解度差异，通过萃取、反萃取等操作实现磷酸的净化。在萃取过程中，将湿法磷酸与有机溶剂充分混合，磷酸进入有机相，而大部分杂质留在水相。然后通过反萃取操作，使磷酸从有机相转移回水相，得到净化后的磷酸产品。该方法具有净化效率高、产品质量好的优点，能够有效去除湿法磷酸中的金属离子、硫酸根离子等杂质，满足高端磷酸产品的生产需求。(2) 离子交换法：离子交换法是利用离子交换树脂对湿法磷酸中的杂质离子进行选择性和交换，从而达到净化磷酸的目的。不同类型的离子交换树脂对不同杂质离子具有不同的亲和力，通过合理选择离子交换树脂和优化操作条件，可以高效去除磷酸中的阳离子杂质，如铁离子、铝离子等。离子交换法具有操作简便、设备投资相对较小的优点，尤其适用于对某些特定杂质要求严格控制的磷酸净化场合。在实际应用中，常将离子交换法与其他净化技术结合使用，以进一步提高湿法磷酸的净化效果。

3 黄磷清洁生产产业化面临的挑战

3.1 技术层面挑战

(1) 技术集成难度大：黄磷清洁生产涉及多种关键技术的协同应用，如电炉尾气综合利用、磷渣资源化处理、湿法磷酸净化技术等。实现这些技术的有效集成面临诸多难题，如不同技术之间工艺参数不匹配、设备兼容性差等。需要深入研究整个生产流程，系统优化技术集成方案，以满足产业化应用的需求。(2) 技术稳定性有待提高：部分新兴的黄磷清洁生产技术，如一些尾气制化学品技术和磷渣深度资源化利用技术，在实验室阶段取得了较好的成果，但在工业化放大过程中，由于生产规模、操作条件等因素的变化，技术稳定性受到考验。例如，某些催化剂在大规模生产中可能出现活性下降、寿命缩短等问题，影响生产的连续性和产品质量，需要进一步开展技术研发和工程化验证，提高技术的稳定性和可靠性。

3.2 资金层面挑战

(1) 前期投资大：实施黄磷清洁生产技术产业化，需要对现有生产装置进行改造或新建清洁生产设施，这涉及到设备采购、工程建设、技术研发、人员培训等多个环节，均需要巨额资金投入。对于一些中小型黄磷生产企业来说，难以承担如此大规模的前期投资，限制了清洁生产技术的推广应用。(2) 投资回报周期长：黄磷清洁生产技术产业化项目建设周期较长，且在项目运营初期，可能面临产品市场开拓困难、生产成本较高等问题，导致投资回报周期延长。这使得投资者对该领域的投资持谨慎态度，进一步加剧了资金短缺的问题，阻碍

了产业化进程。

3.3 市场层面挑战

(1) 产品市场竞争激烈: 随着黄磷清洁生产技术的推广应用, 市场上将会出现更多高质量、低污染的黄磷及相关产品。然而, 目前市场对这些清洁生产产品的认知度和接受度还相对较低, 传统产品在市场上仍占据较大份额。清洁生产产品需要在价格、质量、品牌等方面与传统产品展开激烈竞争, 如何提高清洁生产产品的市场竞争力, 拓展市场份额, 是产业化过程中面临的重要挑战之一。(2) 市场需求波动: 黄磷下游应用行业众多, 其市场需求受宏观经济形势、行业发展趋势等多种因素影响, 存在一定的波动性。这种市场需求的不确定性增加了黄磷清洁生产企业的市场风险, 对企业的生产计划和市场拓展策略提出了更高要求。在产业化过程中, 企业需要密切关注市场动态, 灵活调整生产和经营策略, 以应对市场需求波动带来的挑战^[2]。

4 推动黄磷清洁生产技术产业化的应对策略

4.1 技术创新与优化策略

(1) 加强技术研发合作: 鼓励企业、高校和科研机构之间开展产学研合作, 共同攻克黄磷清洁生产技术产业化过程中的关键技术难题。建立联合研发中心, 整合各方资源, 集中力量开展技术集成研究和技术稳定性优化研究。通过产学研合作, 加速科技成果转化, 提高技术创新能力, 为黄磷清洁生产技术产业化提供坚实的技术支撑。(2) 建立技术示范工程: 选择有条件的企业建设黄磷清洁生产技术示范工程, 对新技术、新工艺、新设备进行工业化验证和优化。通过示范工程的建设, 积累实践经验, 解决技术在实际应用中出现的问题, 为其他企业提供可借鉴的成功案例和技术模式。同时, 利用示范工程的展示效应, 提高行业对黄磷清洁生产技术的认知度和认可度, 推动技术的广泛应用。

4.2 资金支持与管理策略

(1) 拓宽融资渠道: 企业应积极与金融机构沟通, 争取绿色信贷、融资租赁等多元化融资方式, 缓解资金压力。此外, 还可以通过引入战略投资者, 吸引社会资本注入, 为黄磷清洁生产技术产业化项目提供充足的资金保障。(2) 优化资金管理: 黄磷清洁生产企业要加强

内部资金管理, 制定科学合理的资金预算计划, 优化资金使用结构, 提高资金使用效率。在项目建设过程中, 严格控制工程成本, 加强对设备采购、工程施工等环节的成本管理。在项目运营阶段, 通过精细化管理, 降低生产成本, 提高产品质量和市场竞争力, 缩短投资回报周期, 增强企业的盈利能力和资金回笼能力。

4.3 市场拓展与应对策略

(1) 提升产品竞争力: 黄磷清洁生产企业应加强品牌建设, 提高产品质量和服务水平, 通过技术创新降低生产成本, 以优质、低价的产品赢得市场。积极开展市场调研, 了解客户需求, 开发差异化产品, 满足不同客户群体的需求。同时, 加强市场营销推广, 通过参加行业展会、举办产品推介会等方式, 提高清洁生产产品的市场知名度和美誉度, 拓展市场份额。(2) 应对市场需求波动: 企业要建立完善的市场监测体系, 密切关注市场动态和行业发展趋势, 及时掌握市场需求变化信息。根据市场需求波动情况, 灵活调整生产计划和产品结构, 优化资源配置。加强与下游客户的合作与沟通, 建立长期稳定的合作关系, 降低市场需求波动对企业生产经营的影响。此外, 还可以通过开发新的应用领域, 拓展市场空间, 提高企业应对市场风险的能力。

结束语

综上所述, 黄磷清洁生产技术对于推动黄磷产业可持续发展意义重大。尽管当前在技术集成、稳定性、资金投入、回报周期以及市场竞争、需求波动等方面面临诸多挑战, 但通过加强技术研发合作、建立技术示范工程, 拓宽融资渠道、优化资金管理, 提升产品竞争力、应对市场需求波动等应对策略, 有望逐步克服困难。各方应共同努力, 加速黄磷清洁生产技术产业化进程, 实现黄磷产业的经济效益、环境效益和社会效益协同提升, 推动行业向绿色、低碳、循环方向转型。

参考文献

- [1]郭宝金,毕克刚,马彦伟,杨凡,朱江,杨改兴,郭红.黄磷生产节能降碳技术改造的研究与应用[J].低碳世界,2023,13(01):10-12.
- [2]李志娟.黄磷企业能源资源计量数据采集与监测标准的研究[J].中国计量,2022,23(08):40-42.