黄磷炉气干法除尘技术研究现状及展望

张　帅[1]，白德海[1,2]，汤先岗[3]，宁　平[2]，朱晓华[1]，李梦歆[1]，马懿星[2]，申修堂[4]，孙　健[1,3]

（1. 中冶建筑研究总院有限公司 钢铁工业环境保护全国重点实验室，北京　102629；
2. 昆明理工大学 环境科学与工程学院，云南 昆明　650500；3. 中冶节能环保有限责任公司，北京　100088；
4. 贵州中合磷碳科技有限公司，贵州 贵阳　550000）

［摘　要］黄磷是重要的基本化工原料之一，目前的电热炉还原和湿法收磷生产工艺特点是高污染和高能耗，在生产过程中会产生大量泥磷和污水，处置过程能耗高、成本高、环境风险大。炉气干法除尘虽能显著减少泥磷量并降低蒸磷能耗，但面临生产工艺匹配、滤料寿命短、设备易堵塞、长期稳定运行难度大等挑战。结合“双碳”与循环经济发展导向，阐述相关政策对黄磷行业减污降碳、推广干法除尘技术的要求，对比分析湿法喷淋除尘的局限性与干法除尘（含静电除尘、过滤式除尘等）技术的特点，剖析干法除尘在黄磷炉气处理中面临的炉气成分与温度影响、设备材料适配性、运行参数优化等核心问题。探讨黄磷炉气干法除尘技术的可行性，介绍国内企业与高校的相关技术创新成果，指出干法除尘契合行业升级与减污降碳政策导向，推广前景广阔。

［关键词］黄磷炉气；干法除尘；静电除尘；过滤式除尘；节能降碳
［中图分类号］TQ126.3+16；X701　　［文献标志码］A　　［文章编号］2097-4566（2026）05-0083-08

Development and prospect of dry dust removal technology for yellow phosphorus furnace gas

ZHANG Shuai[1], BAI Dehai[1,2], TANG Xiangang[3], NING Ping[2], ZHU Xiaohua[1], LI Mengxin[1], MA Yixing[2], SHEN Xiutang[4], SUN Jian[1,3]

(1. *State Key Laboratory of Iron and Steel Industry Environmental Protection, Central Research Institute of Building and Construction Co., Ltd., Beijing* 102629, *China*; 2. *Faculty of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming* 650500, *China*; 3. *Energy Saving and Environmental Protection Co., Ltd., Beijing* 100088, *China*; 4. *Guiyang Zhonghe Phosphorus Carbon Science and Technology Co., Ltd., Guiyang* 550000, *China*)

Abstract: Yellow phosphorus is one of the important basic chemical raw materials. Currently, electric furnace reduction and wet-process phosphorus recovery for yellow phosphorus production are high-pollution and high-energy-consumption processes, generating substantial phosphorus sludge and wastewater that are costly and energy-intensive to dispose of with high environmental risks. Dry dust removal technology for yellow phosphorus furnace gas significantly reduces phosphorus sludge and phosphorus distillation energy consumption, but faces challenges including ecological process matching, short filter material lifespan, easy equipment clogging, and poor long-term stable operation. Against the backdrop of “dual carbon” and circular economy development goals, relevant policies requiring the yellow phosphorus industry to abate pollution, reduce carbon emissions, and promote dry dust removal technology are elaborated, the limitations of wet spray dedusting and the characteristics of dry dust removal technologies (such as electrostatic precipitator, filter-type dedusting) are compared, and core issues in its application to yellow phosphorus furnace gas treatment are analyzed, such as the effects of furnace gas composition and temperature, equipment material compatibility, and operating parameter optimization. It discusses and demonstrates the feasibility of dry dust removal technology, presents technological innovations by domestic enterprises and universities, notes that dry dust removal technology aligns with industrial upgrading and pollution/carbon reduction policies with broad promotion prospects.

Key words: yellow phosphorus furnace gas; dry dust removal technology; electrostatic precipitation; filter-type dedusting; energy conservation and carbon reduction

收稿日期:2026-04-09

作者简介:张　帅(2001—　),男,四川资阳人,在读硕士研究生,主要从事烟气污染与治理研究工作。
通信作者:孙　健(1978—　),男,山东临沂人,正高级工程师,主要从事工业环境保护技术与装备开发相关工作。

0 引言

黄磷是重要的基本化工原料之一，用途十分广泛，主要采用电热炉还原法生产，具有高能耗和高污染的特点。目前黄磷生产工艺是将黄磷炉气直接导入冷凝系统，黄磷电炉出口炉气中含有大量粉尘，这些粉尘会在黄磷冷凝过程中与黄磷一起进入冷凝系统，形成粗磷；粗磷在精制过程中又产生大量的污水及泥磷[1]。泥磷被纳入危废管理，要求在厂区内进行安全处置和综合利用，处置过程能耗高、环境风险大、成本高；大量污水需实现近零排放，也给企业带来了很大的环保压力。采用干法除尘技术可以显著降低泥磷产量，但会面临与现有工艺的匹配、高温炉气导致的滤料寿命缩短和设备堵塞等问题，导致目前黄磷电炉尚无长期稳定工业化运行的干法除尘工艺。

本文立足于“双碳”目标与循环经济导向，旨在梳理黄磷炉气干法除尘技术的研究现状，分析其存在的问题，并探讨未来的发展趋势。

1 黄磷炉气

1.1 黄磷生产现状

我国是全球黄磷生产大国，生产区域高度集中于云、贵、川、鄂4省，依托当地丰富的磷矿资源及水电优势，形成规模化电炉法生产集群[2-3]。当前黄磷主流生产工艺仍为电炉法，其核心流程为磷矿石、硅石和焦炭在高温下还原反应生成黄磷。

1.2 黄磷炉气的组成成分

黄磷炉气的组分以黄磷蒸气、一氧化碳为核心，同时裹挟高浓度粉尘与少量磷、硫类杂质。其中粉尘含量尤为突出，质量浓度通常维持在30～60 g/m³，其粉尘构成如表1所示[4-7]。

表1 黄磷炉气粉尘XRF分析结果

Table 1 XRF analysis results of dust in yellow phosphorus furnace gas

成分类别	具体物质	质量分数/%	来源
硅氧化物	SiO_2	45.2～52.8	主要来自原料石英砂
铝氧化物	Al_2O_3	8.5～12.3	原料黏土杂质带入
钙氧化物	CaO	6.3～9.7	来自原料石灰石及炉衬
铁氧化物	Fe_2O_3	3.1～5.6	原料及设备腐蚀产物
磷化合物	P_2O_5	10.8～15.4	黄磷氧化及冷凝产物
镁氧化物	MgO	2.1～3.8	原料中镁杂质
碱金属氧化物	K_2O	1.2～2.5	原料及燃料中钾盐
	Na_2O	0.8～1.6	原料及燃料中钠盐
硫化合物	硫化物（以S计）	0.3～0.8	原料中硫杂质氧化产物

1.3 相关政策

近年来，我国明确规定了黄磷单位产品能源消耗限额等级、技术要求等，现有的黄磷生产装置单位产品能耗限定值应低于标准煤2 800 kg/t[8]，多项政策对现有、新建和改扩建黄磷装置节能减碳目标提出了明确要求，详见表2[9]。

表2 黄磷行业实施节能减碳的政策

Table 2 Proposed policies for energy conservation and carbon reduction in the yellow phosphorus industry

发布年份	政策文件	发布部门	主要内容
1996	《工业炉窑大气污染物排放标准》	国家环境保护局	针对其他炉窑，规定烟（粉）尘质量浓度排放限值的一、二、三级标准，现有污染源分别为150、300、400 mg/m³，新污染源分别为0、200、300 mg/m³
2008	《黄磷准入条件》	工业和信息化部	明确为促进产业结构升级，控制高耗能、高污染，制定准入条件。工艺装备方面，新建黄磷装置，单台磷炉变压器容量必须达到20 000 kV·A及以上，相关配套设施必须符合要求。现有黄磷装置，单台装置在10 000 kV·A及以上的，如在原料粉尘回收、能耗、尾气综合利用、泥磷回收、污水处理、安全保障和磷渣综合利用等方面没有达到条件要求，必须在准入条件实施起2年内完成相关改造，并经相关部门验收合格后方可继续生产；环保与资源利用方面，须完成环评、节能评估，达标排放，实现尾气、污水、废渣等综合利用，不达标企业淘汰或整改；经济技术指标方面，新建、在建及现有装置须达到对应能耗等指标
2011	《关于印发铬盐等5个行业清洁生产技术推行方案的通知》	工业和信息化部	明确黄磷电炉干法除尘替代湿法除尘技术，并且推行的方案是在黄磷炉气出口处安装静电除尘器，使炉气进入冷凝前预先将粉尘除去，则冷凝后的粗磷和循环水中含有的泥磷量大幅度降低，可大大提高磷回收率及黄磷质量。在除去98%的粉尘并提高10%的磷回收率的同时，吨产品可节约用电近6 000 kW·h，节约用水30 m³
2022	《高耗能行业重点领域节能降碳改造升级实施指南（2022版）》	工业和信息化部	黄磷行业节能降碳改造升级实施指南明确要求普及推广磷炉气干法除尘及泥磷连续回收技术，提升除尘效率。同时鼓励采用催化氧化法、变温变压吸附法等先进技术对炉气进行深度净化，进一步降低粉尘及有害物质含量。该指南聚焦黄磷行业能效提升与碳排放控制，提出推广磷炉气干法除尘、泥磷连续回收、炉气催化氧化净化等关键技术，其目标是到2025年，黄磷领域能效标杆水平以上产能比例达到30%，能效基准水平以下产能基本清零
2024	《推进磷资源高效高值利用实施方案》	工业和信息化部等部门	专栏6清洁生产工程中进一步提到推广黄磷电炉干法除尘替代湿法除尘，推动企业无害化处理产品改造安全设施和环保设施等要求
2024	《黄磷单位产品能源消耗限额》（GB 21345—2024）	国家市场监督管理总局、国家标准化管理委员	规定了黄磷单位产品能源消耗（以下简称能耗）限额等级、技术要求、统计范围和计算方法。适用于电炉法黄磷生产企业单位产品能耗的计算、考核，以及对新建和改扩建项目的能耗控制

根据上述文件，可以明确在黄磷生产行业，节能减碳将会是未来的趋势。其中，黄磷生产的能源消耗包括其本身电炉制磷的能耗，也包括粗磷制备单元（包括含磷炉气的除尘/洗涤、冷凝）、成品精制与包装单元、泥磷回收、污水处理、尾气净化等工艺过程的能耗。现阶段国内黄磷生产的主流除尘方案仍依赖湿法喷淋技术，干法除尘的工业化应用相对有限。但是，黄磷电炉干法除尘工艺是国家明确鼓励普及推广的成熟清洁生产和绿色技术工艺，故而针对黄磷炉气干法除尘技术的发展进行分析具备显著的现实价值与研究意义。

尤其《黄磷单位产品能源消耗限额》（GB 21345—2024）是由国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会联合发布的强制性国家标准，于2024年4月29日发布，2025年5月1日起实施。该标准面向电炉法黄磷生产企业，规定了单位产品能耗的限额等级、统计范围及计算方法，新增综合能耗三级限额指标并将能耗基准值提高8%，旨在推动行业淘汰落后产能、提升能源利用效率[10]。

2　国内黄磷炉气除尘的研究现状与应用

2.1　湿法喷淋除尘

目前，我国黄磷生产中含磷炉气除尘大多采用湿法除尘，其使用多级喷淋塔（通常3～4级），利用水雾直接冷却炉气，使气态磷（P_4）冷凝为液态并捕集粉尘。喷淋过程中，收集的粗磷需通过沉降分离与精制漂洗获取成品黄磷；另外，粉尘、氟硅酸（SiF_4水解产物）等与磷形成泥磷混合物，大约有10%的磷进入泥磷中。泥磷经蒸磷处理后元素磷的回收率为70%，即：一是泥磷需要采用高能耗的蒸磷方式才能回收磷；二是大约有30%的磷留在蒸磷残渣中无法得到有效利用[11-13]。湿法除尘工艺流程如图1所示。

黄磷电炉中的粉尘分为两种，一种是原料中夹带的粉尘和炉料受热炸裂产生的粉尘，另一种是炉料中挥发组分遇高温挥发逸出的粉尘。我国的黄磷电炉多采用直接喷水冷凝的方式，通过喷淋水在冷凝塔中对磷炉气冷却，使其中的磷蒸气冷凝下来。粉尘在冷凝过程中可以充当“晶核”粒子，但实际生产中会增加泥磷量，影响磷的精制净化分离。

湿法喷淋技术存在泥磷产生量大、污水回用困难、蒸磷能耗高等问题。泥磷中的杂质主要是由粉尘和磷直接黏结形成的，剩下少部分是由氟化物转化为SiF_4，进而水解产生的SiO_2与磷黏结形成的，所以泥磷的形成主要是炉气中的粉尘导致的[14-16]。

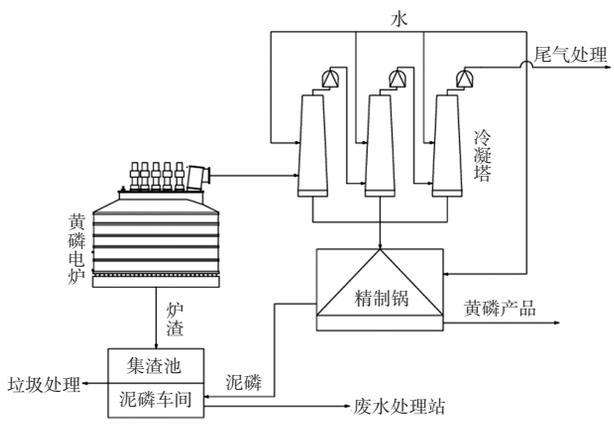


图1　湿法除尘工艺流程

Fig. 1　Schematic diagram of wet dust removal process

2.2　干法除尘

2.2.1　干法静电除尘

干法静电除尘的原理：在阴极（电晕极）与阳极（集尘极）之间形成非均匀电场，使电晕极周围气体电离，产生大量自由电子和正负离子；含尘气体通过电场时，粉尘颗粒获得电荷；荷电颗粒在电场力作用下向极性相反的集尘极移动，最终吸附在极板表面形成粉尘层；通过振打极板使粉尘脱落至灰斗。

我国曾在黄磷生产中使用过静电除尘技术[17]，电除尘器作为一种高效清除粉尘、净化气体的环保设备，可以回收烟气中的磷，减少泥磷量和污水中的悬浮物，提高磷收率[18]。

在黄磷炉气静电除尘实验中，静电除尘器运行工况越好，黄磷一次收率越高。其除尘效率的主要影响因素包括炉气温度、阴极振打绳的完好情况等。炉气温度过高或过低均会影响除尘效率，甚至导致设备损坏或除尘效果下降；此外，磷矿品质、粉尘电阻等也会对除尘效率造成影响[19-21]。

静电除尘器在国外大型制磷电炉中的应用较为成熟，但未能在我国中、小型黄磷生产装置中推广使用。原因在于：我国中、小型黄磷生产装置中使用静电除尘器会面临投资费用高、氮气用量大、电耗高、除尘效率不稳定等问题；同时，静电除尘器会因高温而产生不均匀变形，或因氮气密封不足破坏绝缘，导致工作电压消失，影响除尘效率，所以推广应用受到限制[22]。

2.2.2　干法过滤式除尘

干法过滤式除尘是通过多孔滤料拦截、惯性碰撞、扩散吸附等机制捕集气体中的颗粒物，主要设备包括布袋除尘器、滤网式除尘器和滤芯除尘器。

针对湿法工艺能耗高的问题，将干法过滤式除尘技术应用到制磷工艺中[23]，可以提高除尘效率，减少泥磷量。虽然在湿法喷淋生产工艺中黄磷炉气温度通常不超过 200 ℃，但是如果采用干法工艺，为了保证炉气中的黄磷蒸气不冷凝，温度要高于黄磷的露点并且留有足够的余量，这时的炉气温度会控制在高于 200 ℃或者更高，超过常规滤料耐温极限，涤纶、聚苯硫醚（PPS）、玻纤长期在高温下易收缩、硬化甚至熔融，并且黄磷炉气中含有酸性物质，这些酸性物质对滤料有腐蚀作用，同时粉尘被滤料捕集时，会使滤料变色和阻力加大（如赤磷、炭粉、砷粉等），而且粉尘中的一些物质与空气中的氧气发生反应后，会产生黏性物质（如磷酸等）附着在滤料表面，导致除尘器发生堵塞。随着技术的发展，采用更加先进耐用的滤料（如陶瓷、金属滤料等）可能会解决这些问题。

2.2.3 其他干法除尘

除上述两种干法除尘之外，还有惯性力除尘、离心力除尘、重力沉降式除尘等，它们的除尘原理和捕集的粉尘大小都各有特点，但是基于黄磷炉气中的粉尘特性，这些除尘方法的效率较低，无法达到较好的除尘效果，一般将它们进行预除尘，再与跟静电除尘或者过滤式除尘相结合，形成多级除尘结构，达到较高的除尘效率。

3 干法除尘技术在黄磷炉气应用中存在的问题

尽管干法静电除尘技术与干法过滤式除尘技术具有高除尘效率、可大幅度削减泥磷产生量的突出优势，然而受本身技术限制，其在制磷领域的工程化应用中仍存在不少亟待解决的问题。

3.1 炉气成分及温度的影响

国内黄磷生产装置中，电炉出口导气管处的炉气温度多为 120 ~ 180 ℃，平均温度约 150 ℃；而炉气中磷蒸气的露点为 160 ~ 170 ℃，当炉气温度低于 160 ℃时，磷蒸气便会开始冷凝液化[24]。同时，黄磷电炉炉气本身成分复杂，携带有固态粉尘、气态磷氧化物、氟化物及水蒸气等多相杂质；上述磷蒸气提前冷凝的特性与多相杂质组分叠加，极易在干法除尘系统中引发一系列连锁不良反应，进而严重影响设备的长周期稳定运行。

在干法除尘的工艺环境中，炉气中的磷氧化物、氟化物等活性组分易与水蒸气发生化学反应，生成磷酸、偏磷酸等具有强腐蚀性与强吸湿性的酸性物质。这些酸性物质会快速吸附环境中的水蒸气，进而与炉气携带的粉尘中含有的氧化钙等碱性组分发生中和反应，最终生成磷酸盐、氟化物等盐类化合物。

当炉气在除尘系统内流动过程中，若其温度未能得到有效控制，降至水蒸气的露点以下时，系统内的水蒸气会迅速凝结形成水。由于炉气中磷蒸气的露点为 160 ~ 170 ℃，在这种温度条件下会发生冷凝，同时与此前生成的盐类化合物和凝结水充分混合、溶解，逐渐形成具有极强黏性的泥状混合物。这些灰泥会在除尘器的滤料孔隙、极板表面、气流通道等关键部位快速沉积并牢牢附着：一方面会直接堵塞滤料孔隙或气流通道，导致系统通风阻力急剧升高，破坏炉气的稳定流通；另一方面其顽固的黏附特性会大幅度增加清灰难度，常规的脉冲喷吹、机械振打等清灰手段难以将其彻底剥离，进而造成除尘效率持续下滑，严重时甚至会导致设备停机检修，影响整条生产线的连续运行[25]。

这一问题对主流的干法除尘设备构成了严峻制约：对于过滤式除尘器，灰泥堵塞会导致滤料通透性能急剧下降，过滤阻力迅速超出设计阈值，大幅度缩短其使用寿命；对于静电除尘器，灰泥附着在电极与极板表面会破坏电极的放电均匀性、降低极板的集尘能力，进而削弱电场强度与粉尘荷电效率，使得除尘效果进一步恶化。因此，将炉气温度稳定维持在水蒸气露点以上，从源头避免水蒸气凝结与灰泥形成是关键问题。

3.2 除尘设备材料的影响

黄磷炉气因富含酸性组分而具备显著的腐蚀性，同时伴随高温特性，这一核心属性对干法除尘系统的长期稳定运行构成了严峻挑战。干法除尘器的关键接触部件（滤料或极板）长期与这类高温、强腐蚀性炉气直接接触，在双重侵蚀作用下极易引发材质劣化与功能失效问题。

对于常规滤袋除尘器而言，其配套滤料一方面难以承受黄磷炉气的高温环境，易出现热变形、熔融或老化破损，另一方面无法抵御炉气酸性组分的化学侵蚀，会逐渐发生水解、氧化等降解反应，导致滤料密封性下降、使用寿命大幅度缩短，无法满足长期连续稳定运行的工况需求，对其他过滤方式的滤料影响也很大；而针对静电除尘器，其核心工作部件是电极与极板，在黄磷炉气酸性介质的长期浸润下，同样会发生持续性腐蚀劣化，表面氧化剥落、材质厚度减损、表面粗糙度异常等，这会直接破坏电极的放电均匀性与电场强度，导致放电效率显著降低，最终造成除尘系统的处理效果偏离设计

标准，无法达到工艺净化要求。因此，选择合适的除尘材料也是很重要的问题。

3.3　除尘设备的运行参数影响

在黄磷炉气干法除尘系统的运行管控中，运行参数的精准设计至关重要。磷矿种类繁多，在生产过程中炉气温度波动较大，需要调整相应的温控参数。此外，及时且高效的清灰操作是保障设备长期稳定发挥除尘效能的重要环节之一，不同类型的干法除尘器需结合其工作原理，合理控制其运行参数保持稳定运行。

对于过滤式除尘器（如金属滤料过滤除尘器），清灰频率的科学设定与精准调控是核心操作要点。过滤除尘器对炉气中粉尘进行拦截、过滤时，随着运行时间推移，粉尘会逐渐在滤料表面形成粉尘层。若清灰频率设定过低、清灰操作不及时，滤料表面粉尘层会持续增厚，导致过滤阻力急剧升高，炉气流通受阻，系统处理风量下降；清灰频率过高也会不必要地增加滤料的机械磨损，缩短其使用寿命。

对于静电除尘器，定期清灰同样是不可或缺的关键操作。若不及时清灰，粉尘堆积过厚会形成“电场屏蔽”效应，破坏电场分布均匀性，影响粉尘的荷电效率与吸附效果，甚至引发电极间的短路或反电晕现象。此外，值得注意的是，供电电压的适配性与运行稳定性，也是影响除尘效率的重要因素[26]。

4　干法除尘工艺的可行性与技术发展

4.1　黄磷炉气应用干法除尘工艺的可行性

（1）根据炉气成分和粉尘特性，通过加热或冷却装置实现精确控制，合理设定干法除尘设备的运行温度，确保设备内温度高于水蒸气露点，防止其凝结；在炉气进入干法除尘设备前，设置专门的除湿装置，或者向炉气中添加烟气改性剂，将炉气中的水蒸气含量降低到合适水平，降低水蒸气凝结形成黏性物质的风险。同时增设除焦油等预处理工序，去除炉气中的焦油、磷化物等黏性物质，防止它们包裹粉尘颗粒导致粉尘黏结[27]。

（2）在核心材料选择上需要重点突破腐蚀与高温两大关键瓶颈。过滤材料优先选用高强度金属或高性能陶瓷材质[28]，此类材料不仅能高效抵御炉气中酸性介质、腐蚀性粉尘的长期侵蚀，更可稳定耐受炉气排放时的高温环境，在确保除尘效率持续达标、满足环保排放要求的基础上，显著延长滤料的服役寿命，降低系统运维成本；电极与极板则采用优质不锈钢或更高耐蚀等级的特种合金材料，该类材质兼具优良的抗腐蚀性能与稳定的导电特性，既能抵御炉气腐蚀对电极结构的破坏，又能保障电场始终维持稳定且均匀的放电状态，为高效除尘提供可靠的电场环境支撑，实现除尘系统长期稳定、高效运行的整体目标。

（3）在干法除尘系统参数设计方面，可引入PLC（可编程逻辑控制器）自动控制系统进行温度监控和自动清灰操作，结合过滤式除尘器的滤料材质特性、黄磷炉气实时含尘浓度及系统运行阻力变化规律，精准设定适配的清灰时间间隔与频次参数代码，实现清灰操作的自动化、精准化运行，进一步保障过滤式除尘器的稳定高效运行[29]。

（4）我国黄磷行业发展初期，由于工业基础薄弱、自主研发能力不足，黄磷生产技术和核心装备依赖进口，彼时引进的均为大型磷炉，主要用于搭建行业生产框架、奠定产业基础[30]；随着改革开放推进，国内磷化工产业需求逐步释放，中、小型磷炉凭借投资小、见效快、门槛低的优势，迅速取代进口大型磷炉成为行业主流，尤其在磷矿资源丰富的云南、贵州、湖北等地，中、小型磷炉遍地开花[31]；进入21世纪后，国家逐步重视高能耗、高污染产业的治理，黄磷行业作为典型的“双高”产业，迎来了严厉的政策调控和结构调整期。早期引进的大型磷炉因技术老化、环保不达标、产能适配性不足等被逐步拆除，而小型磷炉因能耗超标、污染严重，被纳入政策性淘汰范围，限期退出市场，经过多轮产业整治和升级，目前我国黄磷生产行业已形成以中型磷炉为主的产业格局，这类中型磷炉兼顾了产能效率、环保要求和技术可行性，既规避了小型磷炉的粗放污染问题，又克服了大型磷炉投资过高、适配性不足的弊端；与此同时，国内静电除尘器技术也实现了突破性发展，通过供电系统升级、电极极板结构优化、耐蚀材质应用等技术改进，如今的静电除尘器已能够在更高电压等级下实现持续、稳定运行，有效解决了过往电压波动导致的电场放电异常、除尘效率不稳定等核心问题[26]，且设备的工况适配性、运行经济性与可靠性均大幅度提升。

另外，国内钢铁冶炼氧气转炉炼钢的一次烟气CO含量很高，经过多年的发展，主要采用干法圆筒型电除尘器净化回收系统。当进口粉尘质量浓度约为75 g/m^{3}时，出口粉尘质量浓度能够控制在≤10 mg/m^3，除尘效率很高，且满足长期、安全、稳

定运行的要求[32]。

综上，干法除尘工艺正在逐步攻克制磷行业应用中的核心技术瓶颈，其适配性与可行性显著增强，在制磷行业的规模化应用已呈现出愈发清晰的发展趋势。

4.2 干法除尘技术的新发展

近年来，在制磷行业中应用干法除尘技术一直处于探索状态，目前也出现了一些针对黄磷炉气干法除尘的技术创新。

CN202420389730.4 公开了一种黄磷烟气净化系统[33]，如图 2 所示。该净化系统使用金属滤芯作为滤料，采用三级除尘装置，前两级除尘除去一部分黄磷炉气的粉尘，降低过滤滤芯的除尘压力，第三级进行过滤除尘，并且在前两级除尘中输送粉体，该粉体是可吸附易结露物质的烟气改性剂，同时在前两级管道外壳设置保温结构和烟气加热器，避免除尘中发生结露现象。

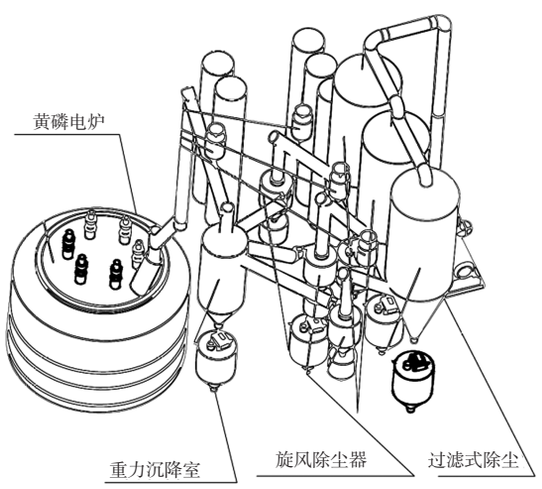


图 2 一种黄磷烟气净化系统

Fig. 2 A yellow phosphorus flue gas purification system

CN202511345268.3 公开了一种黄磷炉气干法静电除尘技术[34]，如图 3 所示。由于黄磷炉气中含有大量 CO[24]，在高温环境下与 O_2 接触会发生爆炸，所以在系统启动前，先通入氮气置换内部空气，使氧浓度降至安全阈值以下，防止高温下黄磷蒸气遇氧气发生燃烧或爆炸；之后再将黄磷炉气加热至高于其露点，确保黄磷以气态形式存在，通过双电场卧式静电除尘器将粉尘等物质除去。

CN202211015844.4公开了一种实用新型专利[35]，此实用新型专利的特点是通过滤材过滤掉炉气中的粉尘，净化后的炉气可以直接进行黄磷冷凝回收，无需喷淋塔，减少泥磷和污水的产生。多台除尘过滤装置可以叠加放置，适应不同产量的黄磷生产线，易于扩展和维护。

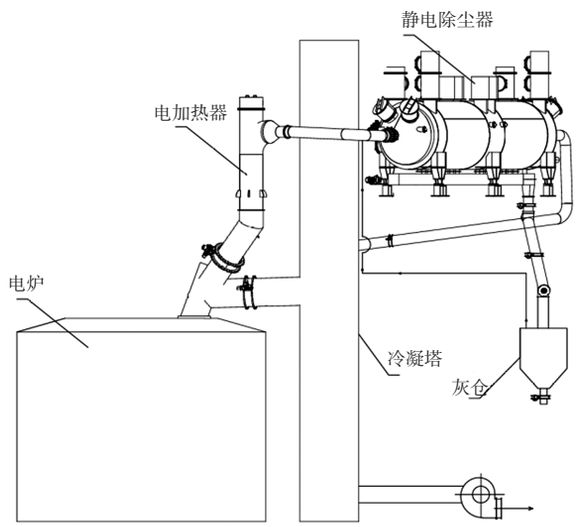


图 3 一种黄磷炉气干法静电除尘技术

Fig. 3 A dry electrostatic precipitation technology for yellow phosphorus furnace gas

CN201910917914.7 公开了一种低温干法净化黄磷炉气的装置及方法[36]，其核心装置为撞击式除尘器，黄磷炉气首先经过撞击式除尘器去除大颗粒粉尘，撞击式除尘器外壁采用蒸汽保温和加热，防止可凝性气体凝结；最终，净化后的黄磷炉气进入黄磷冷凝塔，产出黄磷产品。该方法取消了传统的漂磷与泥磷回收装置，减少了污染和能耗；金属毡除尘器的工作温度较低（150 ~ 180 ℃），降低了能耗。黄磷电炉出口管直接插入撞击式除尘器，解决了炉气出口固体物料堵塞问题。采用两级除尘方式，提高了除尘效率；与传统工艺相比，一次磷收率提高 5% ~ 8%，减轻了操作人员的生产劳动强度，提高了系统的安全性。

上述新技术印证了行业内多家企业正积极推进干法除尘在黄磷炉气净化中的应用实践，其根本目的是化解干法除尘的技术瓶颈，保障除尘系统稳定运行。

4.3 干法除尘技术的技术实施

基于现有黄磷生产工艺基础，可在黄磷生产电炉与收磷塔之间增设干法静电除尘系统或干法过滤式除尘系统（以下简称干法除尘系统）。该干法除尘系统需先对炉气进行预处理，通过管道投加烟气改良剂或安装加热器加热炉气的方式，使磷蒸气温度维持在其露点以上，从而有效避免磷蒸气结露析出；预处理后，采用重力除尘等粗除尘工艺，去除炉气中的大颗粒粉尘杂质，降低后续精除尘环节的处理负荷；随后，炉气经干法静电除尘或干法过滤

式除尘完成精除尘处理，再通入冷凝收磷塔进行磷回收作业。采用该工艺方案回收得到的粗磷，其泥磷含量可显著降低，大幅度减少粗磷精制过程中的能耗与生产成本，既契合国家节能降碳相关政策导向，又能提升企业的经济效益与市场竞争力，具体配套设施如图4所示。

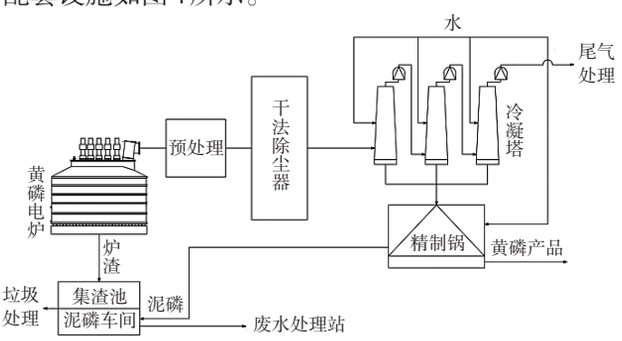


图4　干法除尘工艺配套设施

Fig. 4　Supporting facility of dry dust removal process

具体以干法静电除尘技术为例，图4中的预处理可以设置为电加热器，干法除尘器设置为静电除尘器。黄磷炉气经过电加热器后进入静电除尘器，在通过电场的过程中，炉气中的粉尘被吸附到阳极板，通过振打落到电除尘器底部，然后收集至底部的螺旋输送机，经插板阀进入排灰管道输送至灰仓。结合图3，静电干法除尘系统由6个子系统组成：静电除尘系统采用阴极线、阳极板及高频直流电的方式产生静电场，实现对高温粉尘的静电除尘；炉气电加热系统采用耐腐蚀电加热管将导气管出来的炉气加热到磷蒸气的露点以上，从而保证在进入静电除尘器之前磷蒸气不会冷凝；排灰系统实现高温除尘灰的安全排出；氮气保护系统使用热氮气对设备进行排空，对电加热器接线盒和保温桶进行保护，使用常温氮气对灰仓进行保护；控制系统实现在线检测、PLC控制；安全系统实现系统温度超高（低）保护、烟气压差超高保护，保证系统运行维护安全可靠，出现泄漏或者温度异常时紧急停车。整个系统在密闭体系下运行，需要严格防止外部空气进入静电干法除尘系统。

5　结语

目前黄磷炉气湿法收磷产生的泥磷量大、能耗高、耗水量大，同时政策上对节能减碳也提高了要求，与之相比，干法除尘工艺相较于传统湿法收磷工艺，在减碳降耗、提质增效方面具备显著优势——能够实现降低90%以上的泥磷产生量，降低相应的蒸磷能耗，提升收磷塔粗磷的品质，降低相应的磷精制能耗、水耗，有效降低生产过程中的碳排放量与资源消耗成本，契合行业节能减碳的核心需求。尽管干法除尘技术目前仍面临设备内部粉尘堵塞、除尘关键材料耐用性不足等现实挑战，但随着行业技术研发持续推进与创新实践深入开展，相关痛点问题正逐步得到针对性攻克。因此，干法除尘技术与黄磷行业的产业升级需求、国家节能减碳政策导向高度契合，具备现实应用的技术支撑，在黄磷行业的规模化推广与应用拥有极为广阔的发展前景。

［参考文献］

［1］ 梅毅，梁雪松，杨亚斌，等.黄磷产业的节能降耗与资源利用[J].现代化工，2010，30(10)：80-83.
MEI Y，LIANG X S，YANG Y B，et al. Energy and materials saving and resources proper utilization raw material-reducing of yellow phosphorus industry[J]. Modern Chemical Industry，2010，30(10)：80-83.

［2］ 高永峰.我国磷化工行业创新发展思路探讨[J].磷肥与复肥，2020，35(2)：1-7.
GAO Y F. Discussion on innovation and development of phosphorus chemical industry in China [J]. Phosphate & Compound Fertilizer，2020，35(2)：1-7.

［3］ 崔继荣，高永峰.我国磷化工发展现状及措施建议[J].肥料与健康，2020，47(4)：1-4.
CUI J R，GAO Y F. Development Status of Phosphorus Chemical Industry in China and Suggestions for Development Measures[J]. Fertilizer & Health，2020，47(4)：1-4.

［4］ 马懿星.电晕放电协同分离转化黄磷炉气中粉尘和磷硫杂质[D].昆明：昆明理工大学，2016.
MA Y X. Cooperation separation and conversion of dust and sulfurous phosphorus impurities from yellow phosphorus gas by corona discharge[D]. Kunming：Kunming University of Science and Technology，2016.

［5］ 卢柏廷.黄磷“三废”及其污染防治[C]//中国国际磷化工会议论文集.宜昌：中国无机盐工业协会，2007：99-109.

［6］ 云南省磷业公司.电炉黄磷生产手册[M].昆明：云南科技出版社，1988：130-140.

［7］ 南京化学工业公司磷肥厂.电炉法生产黄磷[M].北京：化学工业出版社，1978.

［8］ 国家市场监督管理总局，国家标准化管理委员会.黄磷单位产品能源消耗限额：GB 21345—2024[S].北京：中国标准出版社，2024.

［9］ 国家环境保护局.工业炉窑大气污染物排放标准：GB 9078—1996[S].北京：中国环境科学出版社，1996.

［10］ 聂云祥，牛仁杰，问立宁，等.GB 21345—2024《黄磷单位产品能源消耗限额》国家标准解读[J].生态产业科学与磷氟工程，2024，39(10)：9-12.
NIE Y X，NIU R J，WEN L N，et al. Interpretation of national standard GB 21345—2024 *Norm of energy consumption per unit product of yellow phosphorus*[J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering，2024，39(10)：9-12.

［11］ 程正霖，吴桐，孙健，等.黄磷炉气除尘现状及发展趋势[J].环境工程，2023，41(S2)：487-492.
CHENG Z L，WU T，SUN J，et al. Present Situation and Development Trend of Gas Dust Removal in Yellow Phosphorus

Furnace [J]. Environmental Engineering, 2023, 41 (S2): 487-492.
[12] 孙志立,杜建学.电热法制磷[M].北京:冶金工业出版社,2010.
[13] 问立宁,孙志立.黄磷生产冷凝收磷原理探讨及操作参数优化[J].磷肥与复肥,2017,32(1):24-27.
WEN L N, SUN Z L. Theoretical discussion on phosphorus recovery by condensation in yellow phosphorus production and its operational parameters optimization[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2017, 32(1): 24-27.
[14] 李志林.泥磷中温蒸馏提取黄磷腐蚀行为的研究[D].昆明:昆明理工大学,2013.
LI Z L. Study on Corrosion Behavior of Yellow Phosphorus Distillation Extraction from Phosphorus Sludge at Moderate High Temperature[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013.
[15] 杜建学,孙志立.大型制磷电炉降低泥磷量的对策分析[J].硫磷设计与粉体工程,2015(2):31-36,12.
DU J X, SUN Z L. Analysis of countermeasures to reduce phosphorus sludge volume for large electric furnace for phosphorus production[J]. Sulphur Phosphorus & Bulk Materials Handling Related Engineering,2015(2):31-36,12.
[16] 孙志立,问立宁.黄磷生产磷炉气除尘、冷凝收磷的研究与探讨[J].硫磷设计与粉体工程,2017(2):1-4.
SUN Z L, WEN L N. Study and Discussion of Phosphorus Recovery through Dust Elimination and Condensation of Furnace Gas from Yellow Phosphorus Production[J]. Sulphur Phosphorus & Bulk Materials Handling Related Engineering,2017(2):1-4.
[17] 姜飞帅,李宛霞.浅谈电除尘技术发展[J].中小企业管理与科技(下旬刊),2017(7):168-169.
JIANG F S, LI W X. Discussion on the Development of Electrostatic Precipitator Technology [J]. Management & Technology of SME (Late Monthly), 2017(7): 168-169.
[18] 陈善继.电除尘器在黄磷装置中的应用综述[J].硫磷设计与粉体工程,2010(1):25-31,58.
CHEN S J. Application Summary of Electrostatic Precipitator in Yellow Phosphorous Plant [J]. Sulphur Phosphorus & Bulk Materials Handling Related Engineering, 2010(1):25-31,58.
[19] 顾志勤.影响制磷静电除尘器除尘效率的因素[J].硫磷设计,1994(1):25-29.
[20] 赵春伟,孙志立.黄磷生产中静电除尘器运行工况分析[J].磷肥与复肥,2016,31(7):27-30.
ZHAO C W, SUN Z L. Analysis on operation condition of electrostatic dust collector in yellow phosphorus production[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2016,31(7):27-30.
[21] 孔维奇,孙志立.大型磷炉静电除尘器除尘电压消失原因分析及改造[J].磷肥与复肥,2014,29(3):44-46.
KONG W Q, SUN Z L. Cause analysis and transformation for voltage disappear of dust collection device of large scale phosphorus furnace [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2014, 29(3): 44-46.
[22] 孙志立.静电除尘器在黄磷生产中的应用及存在的问题[J].化肥工业,2017,44(1):20-23.
SUN Z L. Use of Electrostatic Precipitator in Production of Yellow Phosphorus and Existing Problems [J]. Chemical Fertilizer Industry, 2017, 44(1): 20-23.
[23] 吴振山.制磷电炉炉气过滤式干法除尘工艺异常现象分析[J].硫磷设计与粉体工程,2016(5):39-43.
WU Z S. Analysis of Abnormal Phenomenon in Filtration Type Dry-process Dust Collection Process for Phosphorus Furnace Gas [J]. Sulphur Phosphorus & Bulk Materials Handling Related Engineering, 2016(5):39-43.
[24] 杨振,张立震,贾长斌,等.黄磷装置炉气干式除尘技术研究[J].硫磷设计与粉体工程,2023(5):24-27.
YANG Z, ZHANG L Z, JIA C B, et al. Study on Dry Dust Removal Technology for Furnace Gas of Yellow Phosphorus Stripping Plant [J]. Sulphur Phosphorus & Bulk Materials Handling Related Engineering, 2023(5):24-27.
[25] 余思民.温度对大型磷炉静电除尘器的影响[J].云南化工,2014,41(2):65-68,72.
YU S M. Impacted of Temperature on Electrostatic Precipitator in Large-scale Phosphorus Furnace Plant[J]. Sulphur Phosphorus & Bulk Materials Handling Related Engineering, 2014, 41 (2) 65-68,72.
[26] 施从南.化工电除尘器的技术特点及设计对策[J].硫磷设计,1997(2):26-29.
[27] 成都易态科技有限公司.黄磷炉气干法除尘设备的保温系统:201521135047.5[P].2016-08-10.
[28] 姬忠礼,栾鑫,苗林丰.高温气体过滤技术及装备发展概况[J].化工进展,2020,39(6):2304-2311.
JI Z L, LUAN X, MIAO L F. Overview of hot-gas filtration technology and equipment development [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(6): 2304-2311.
[29] 高麟,汪涛,方波.一种黄磷炉气干法除尘过滤系统:CN104922986A[P].2015-09-23.
[30] 孙志立,问立宁.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.
[31] 孙志立,姚之琦.钙镁磷肥的贡献与发展思考[J].化肥工业,2017,44(5):1-4.
SUN Z L, YAO Z Q. Contribution of Calcium Magnesium Phosphate Fertilizer and Thoughts of Development[J]. Chemical Fertilizer Industry, 2017, 44(5): 1-4.
[32] 郭启超,李永辉,张娟,等.面向大型转炉的煤气干法圆筒型电除尘器研制[J].重型机械,2025(4):105-109.
GUO Q C, LI Y H, ZHANG J, et al. Development of Gas Dry Cylindrical Electrostatic Precipitator for Large Converters [J]. Heavy Machinery, 2025(4): 105-109.
[33] 成都易态科技有限公司.黄磷烟气净化系统:CN202420389730.4[P].2024-11-12.
[34] 中治建筑研究总院有限公司,中治节能环保有限责任公司.一种黄磷炉气干法静电除尘方法及控制系统:CN202511345268.3[P].2025-11-18.
[35] 四川七化建化工工程有限公司.一种黄磷电炉出口炉气高温除尘过滤器:CN202211015844.4[P].2023-12-26.
[36] 昆明理工大学.低温干法净化黄磷炉气的装置及方法:CN201910917914.7[P].2021-03-23.