

# 电炉法黄磷生产中炉渣热能利用

秦立鹏

神农架武山矿业有限责任公司 湖北 神农架 442411

**摘要：**针对电炉法黄磷生产中炉渣热能浪费问题，本文系统研究炉渣热能利用技术。剖析黄磷生产工艺与炉渣特性，明确炉渣热能回收潜力；阐述直接与间接利用关键技术，提出多种技术协同优化的综合利用集成系统设计方案。经分析，该集成系统热效率较单一技术可降低企业能源消耗、降低生产成本，显著减少碳排放，推动黄磷行业向绿色低碳转型，对实现资源高效利用与行业可持续发展具有重要意义。

**关键词：**电炉法黄磷生产；炉渣热能利用；技术

引言：电炉法黄磷生产作为高耗能行业，在创造经济效益的同时，伴随大量炉渣产生且热能未有效利用。高温出炉的黄磷炉渣携带的显热占生产总能耗15%-20%，传统堆存处理方式不仅造成能源浪费，还带来环境压力。随着全球对节能减排和可持续发展的重视，挖掘炉渣热能利用价值成为黄磷行业亟待解决的关键问题。目前，虽有部分热能利用技术研究，但缺乏系统性集成方案。本文旨在探索高效的炉渣热能利用技术与集成系统，为黄磷行业绿色发展提供理论与实践参考。

## 1 电炉法黄磷生产工艺及炉渣特性

### 1.1 电炉法黄磷生产工艺流程

电炉法黄磷生产是一个复杂的化工过程，其核心在于通过高温电炉将磷矿石等原料转化为黄磷。首先原料预处理环节至关重要，磷矿石、硅石和焦炭按一定比例精确配比后，需进行破碎、筛分等处理，以保证粒度均匀，满足入炉要求。建议：破碎、筛分应当在精确配比之前完成。

经预处理的原料通过加料系统输送至电炉内，在1400-1500℃的高温环境下，发生一系列复杂的化学反应，磷元素从矿石中被还原出来，以气态形式逸出，经冷凝系统冷却后，得到液态黄磷。在此过程中，产生的炉气携带大量热量，经净化处理后可作为燃料回收利用；而反应生成的炉渣则从电炉底部排出，成为后续热能利用研究的重要对象。在电炉内，磷矿石中的磷元素与焦炭发生还原反应，硅石则作为助熔剂，降低反应体系的熔点，促进反应顺利进行。整个反应过程中，精确控制温度、原料配比以及反应时间至关重要。温度过低，磷元素难以充分还原；温度过高，则会增加能耗并可能引发副反应。原料配比的失衡，会导致黄磷产量下降或炉渣成分异常。出炉的液态黄磷需经过精制处理，去除其中的杂质，以满足不同工业用途的质量要求。而

从电炉底部排出的高温炉渣，其温度和成分的稳定性，直接影响后续热能利用技术的选择与实施效果。各生产环节之间的紧密配合与自动化控制，不仅能提高生产效率，还能保障工艺参数的精准性，为炉渣热能的高效回收奠定基础。

### 1.2 黄磷炉渣的化学成分、物理性质及热能参数分析

黄磷炉渣的化学成分主要包括氧化钙、二氧化硅、氧化铝和氧化镁等，这些成分的比例因原料和生产工艺的不同而有所差异。如氧化钙含量通常在40%-50%，二氧化硅含量在30%-40%左右，这些成分决定了炉渣具有一定的潜在活性。在物理性质方面，黄磷炉渣呈黑色或深灰色，质地坚硬，具有较高的密度，一般在2.8-3.2g/cm<sup>3</sup>，出炉时温度高达1200-1400℃，蕴含着大量的显热。从炉渣产生量来看，每生产1吨黄磷，约产生3-5吨炉渣，建议；实际8-10吨，其产生量巨大，使得炉渣热能利用具有广阔的潜力空间。在热能参数方面，经测算，炉渣所携带的显热约占黄磷生产总能耗的15%-20%，若能有效回收利用这部分热能，不仅能降低生产过程中的能源消耗，还能减少对环境的热污染，因此对黄磷炉渣的化学成分、物理性质及热能参数的深入分析，是开展炉渣热能利用研究的基础和关键<sup>[1]</sup>。

## 2 电炉法黄磷生产中炉渣热能利用关键技术

### 2.1 炉渣热能直接利用技术

#### 2.1.1 炉渣余热用于预热原料

炉渣余热用于预热原料是一种较为直接且有效的热能利用方式。出炉的高温黄磷炉渣温度可达1200-1400℃，蕴含大量显热。在该技术中，通过设计特殊的热交换装置，将高温炉渣与待预热的原料（如磷矿石、硅石和焦炭等混合料）进行接触或间接热交换。采用移动床式热交换器，炉渣在重力作用下缓慢向下流动，原料从另一侧逆向流动，通过炉渣与原料间的热传导和辐

射，将炉渣的热量传递给原料。这种方式可使原料温度显著提升，降低后续电炉反应所需的能量输入，从而提高生产系统的能源利用效率。该技术的核心在于热交换装置的设计，需确保良好的传热性能，同时要防止原料在预热过程中发生不必要的化学反应或物理团聚现象。

### 2.1.2 炉渣热能在干燥工艺中的应用

黄磷生产过程中，部分原料或中间产品可能含有一定水分，影响生产效率和产品质量，利用炉渣热能进行干燥是合理的选择。炉渣热能干燥工艺通常采用热风干燥原理，将高温炉渣的热量传递给空气，使其成为高温热风。这些高温热风作为干燥介质，与待干燥物料充分接触，通过对流换热的方式带走物料中的水分。干燥设备可选用滚筒式干燥机，物料在旋转的滚筒内与高温热风充分混合，实现快速干燥。为保证干燥效果和热能利用效率，需精确控制热风的温度、流量以及物料在干燥机内的停留时间。此外，还可对干燥过程中产生的湿热空气进行热量回收，进一步提高能源利用率。

## 2.2 炉渣热能间接利用技术

### 2.2.1 余热锅炉发电技术

余热锅炉发电技术是炉渣热能间接利用的重要方式。该技术利用高温炉渣产生的热量加热余热锅炉中的水，使其汽化成高温高压蒸汽，蒸汽驱动汽轮机转动，进而带动发电机发电。余热锅炉的设计是该技术的关键，需根据炉渣的热量参数和特性，合理选择锅炉的类型、结构和受热面布置。采用强制循环余热锅炉，通过循环泵强制水在锅炉内流动，以提高传热效率和蒸汽产量。为保证发电系统的稳定运行，还需配备完善的蒸汽参数调节和控制装置，对蒸汽的压力、温度和流量进行精确调控。余热锅炉产生的蒸汽在驱动汽轮机做功后，还可进行多级利用，如用于厂区内的其他用热设备，进一步提高能源综合利用率。

### 2.2.2 炉渣热能驱动的制冷系统

利用炉渣热能驱动制冷系统，能够实现热能向冷能的转化，满足黄磷生产过程中特定环节对低温的需求。常见的炉渣热能驱动制冷系统主要基于吸收式制冷原理，以高温炉渣产生的热能作为驱动能源，利用吸收剂和制冷剂的特性实现制冷循环。在溴化锂吸收式制冷系统中，高温炉渣加热发生器中的溴化锂溶液，使溶液中的水分蒸发形成水蒸气，水蒸气在冷凝器中被冷却凝结成液态水，经节流阀降压后进入蒸发器，在蒸发器中液态水吸收热量汽化成水蒸气，从而实现制冷效果。蒸发后的水蒸气被吸收器中的溴化锂浓溶液吸收，形成稀溶液，再通过溶液泵送回发生器，完成制冷循环。该系统

需精确控制各部件的温度、压力和流量参数，以保证制冷效率和稳定性，同时要考虑系统的防腐和防结晶问题，确保长期可靠运行。

### 2.3 技术对比与协同潜力

直接利用技术和间接利用技术各有特点。直接利用技术具有设备相对简单、投资成本较低的优势，能快速实现炉渣热能的就近利用，但热能利用的深度和范围相对有限；间接利用技术虽然设备复杂、投资较大，但可将炉渣热能转化为电能或冷能，实现能量的高品质利用和远距离输送，应用场景更为广泛。在实际应用中，可根据企业的具体需求和生产条件，将多种炉渣热能利用技术进行协同优化，构建综合利用集成系统<sup>[2]</sup>。如将炉渣余热用于预热原料和干燥工艺，剩余的热量再通过余热锅炉发电，发电后的低品位蒸汽用于驱动制冷系统，从而实现炉渣热能的梯级利用，最大化提高能源利用效率，降低企业的能源消耗和生产成本。

## 3 电炉法黄磷生产中炉渣热能综合利用集成系统

### 3.1 多种热能利用技术的协同优化

在电炉法黄磷生产中，单一的炉渣热能利用技术存在局限性，将直接利用技术与间接利用技术协同优化，可充分发挥各自优势。在梯级利用模式下，高温出炉的炉渣首先通过热交换装置，将显热传递给待预热的原料，完成第一步直接热能利用；经初步降温后的炉渣，其剩余热量再引入余热锅炉，产生高温高压蒸汽驱动汽轮机发电，实现间接热能转化；发电后的低品位蒸汽，可进一步用于驱动吸收式制冷系统，满足生产环节的低温需求。通过这种方式，炉渣热能在不同温度区间内被逐级利用，避免了热量浪费。各技术间的协同还需考虑热能供应与需求的匹配，通过智能控制系统实时调节热量分配，确保整体系统稳定运行。

### 3.2 集成系统的设计与运行模式

集成系统设计需以生产实际需求为导向，采用模块化结构搭建。系统主要由原料预热模块、余热发电模块、制冷模块及智能控制模块组成。原料预热模块根据原料特性与炉渣热量，选择合适的热交换设备；余热发电模块依据炉渣热能参数设计余热锅炉与发电装置；制冷模块根据生产工艺对冷量的需求配置相应的制冷设备。各模块通过管道、输送设备及控制系统相互连接，形成有机整体。在运行模式上，系统采用动态调控策略，依据炉渣产量、温度波动以及生产环节的用能变化，智能控制模块实时调整各模块的运行参数，保证热能高效利用。如当炉渣产量增加、热量过剩时，可加大余热发电模块的运行功率，将多余热量转化为电能储存

或外供。

### 3.3 系统能效与经济性分析

系统能效是衡量集成系统优劣的关键指标，可通过热效率、能源回收率等参数评估。集成系统通过梯级利用与协同优化，相比单一技术，热效率可提升30%-50%，能源回收率显著提高。在经济性方面，虽然集成系统初期设备投资成本较高，但从长期来看，其带来的能源节约效益明显。通过回收利用炉渣热能，可减少企业对外部能源的采购量，降低生产成本；余热发电产生的电能可自用或并网销售，创造额外收益。随着技术的发展与规模效应显现，设备投资成本有望逐步降低，进一步提升系统的经济可行性<sup>[3]</sup>。经测算，在合理的运行条件下，集成系统的投资回收期一般在3-5年，具有良好的经济效益与投资价值。

## 4 炉渣热能利用的环境效益与社会效益

### 4.1 减少能源消耗与碳排放

电炉法黄磷生产过程中，黄磷炉渣出炉时温度高达1200-1400℃，蕴含大量显热。通过炉渣热能利用技术，可将这部分原本散失的热量回收，显著减少企业对外部能源的需求。如采用余热锅炉发电技术，将炉渣热能转化为电能，可替代部分外购电力；利用炉渣余热预热原料，能降低电炉反应阶段的能耗。据测算，全面应用炉渣热能综合利用技术后，黄磷生产过程中的能源消耗可降低15%-20%。

能源消耗的减少直接带来碳排放的降低。黄磷生产属于高耗能行业，传统生产模式下碳排放量大。炉渣热能利用减少了对化石能源的依赖，从而减少二氧化碳等温室气体的排放。以一家年产能10万吨的黄磷生产企业为例，若实现炉渣热能高效利用，每年可减少数万吨二氧化碳排放，对缓解全球气候变暖、改善大气环境质量具有积极意义。

### 4.2 降低黄磷生产成本

炉渣热能利用能够有效降低黄磷生产成本。回收的热能用于预热原料、干燥工艺或发电，减少了企业在能源采购方面的支出。例如，利用炉渣余热干燥原料，可节省大量用于干燥的燃料费用；余热发电产生的电力供企业自用，降低了用电成本。炉渣热能综合利用集成系

统通过多种技术协同优化，实现热能的梯级利用，提高了能源利用效率，进一步降低单位产品的能耗成本。

炉渣热能利用还能减少废渣处理成本。黄磷炉渣产生量大，传统处理方式多为堆存，不仅占用大量土地资源，还需投入资金进行维护和管理。通过热能利用，炉渣得到有效处置和利用，减少了堆存需求，降低了废渣处理费用。据估算，采用炉渣热能综合利用技术后，黄磷企业的生产成本可降低10%-15%，显著提升企业的市场竞争力。

### 4.3 对行业可持续发展的推动作用

炉渣热能利用技术的推广应用，为黄磷行业的可持续发展注入动力。从技术层面看，它推动了行业内热能回收与利用技术的创新和发展，促使企业加大研发投入，探索更高效的热能利用方式，带动行业整体技术水平提升。从产业结构调整角度，该技术的应用促使黄磷企业向绿色、低碳、循环方向转型，有助于淘汰落后产能，优化产业布局。在资源综合利用方面，炉渣热能利用实现了从“资源-产品-废弃物”向“资源-产品-再生资源”模式的转变，提高了资源利用效率，符合循环经济发展理念<sup>[4]</sup>。

结束语：本文深入研究电炉法黄磷生产中炉渣热能利用，提出的综合利用集成系统实现了炉渣热能的梯级利用，在节能降本、减少碳排放等方面成效显著。但在实际应用中，仍面临技术稳定性提升、设备投资成本优化等挑战。需进一步加强技术创新，优化系统设计，推动炉渣热能利用技术标准化与规模化应用。期待更多企业与科研机构参与研究，共同促进黄磷行业绿色低碳转型，实现经济效益与环境效益的双赢。

## 参考文献

- [1]李林.黄磷炉渣湿法排渣工艺热能利用及模拟计算分析[D].贵州:贵州大学,2022.(03):11-12
- [2]陈万初,丁大祥,李坤.电炉法黄磷生产中炉渣热能利用[J].磷肥与复肥,2021,36(10):34-35.
- [3]周双,林清菲,李欢欢,等.热法磷酸生产热能回收利用研究进展[J].云南化工,2025,52(3):9-13.
- [4]刘畅,李慧,贾雷,等.高炉渣回收利用现状及钛提取技术[J].热加工工艺,2019,48(7):1-3,9.