附件

磷化工节能技术应用指南与案例

机械工业技术发展基金会
机械工业节能与资源利用中心
2024 年 6 月

编者按：

为贯彻落实《工业领域碳达峰实施方案》《工业能效提升行动计划》及《“十四五”工业绿色发展规划》等文件精神，按照工业和信息化部、联合国开发计划署、全球环境基金共同开展的“中国磷化工产业链节能与绿色低碳提升项目”工作任务部署，机械工业技术发展基金会特别编制了《磷化工节能技术应用指南与案例》，旨在助推磷化工行业节能绿色技术改造，促进磷化工行业节能技术进步，并提升磷化工行业节能技术市场占有率。《磷化工节能技术应用指南与案例》详细介绍了多项节能技术的适用范围、原理及工艺、技术指标、功能特性及应用案例，可为磷化工行业企业提供宝贵的参考与借鉴。

目 录

（一）磷酸铁一步法全流程连续制备关键技术..... 9
（二）湿法磷酸生产过程低压蒸汽发电节能技术..... 12
（三）半水-二水湿法磷酸技术 15
（四）硫酸低温热回收技术 18
（五）磷石膏等固废资源化综合利用技术及装备..... 20
（六）磷石膏无害化处理关键技术..... 23
（七）大型流态化焙烧磷石膏制备高附加值材料关键技术26
（八）溶剂萃取法精制工业磷酸技术..... 28
（九）黄磷生产过程余热利用及尾气发电（供热）技术. 30
（十）等温变换技术 33
（十一）新型工业尾气煅烧窑炉成套设备..... 36

（一）磷酸铁一步法全流程连续制备关键技术

1. 技术适用范围

适用于磷化工行业电子材料专用制造节能技术改造。

2. 技术原理及工艺

该技术主要以铁、磷酸、双氧水为主原料，通过溶铁、结晶、老化、压淋洗涤、闪蒸、烧结、分级破碎及包装等工序生产无水磷。采用铁与磷酸直接反应进行制备，通过优化工艺条件控制晶型实现特有形貌，以满足下游高性能磷酸铁制备要求，同时工艺废水实现全部套用技术，实现废水近零排放；亚铁液制备及结晶工序均采用连续自动化控制技术，实现输入与输出的稳定性，解决均一性差、成本高等问题。工艺流程见图 1。

3. 技术指标

（1）振实密度：0.9 克/立方厘米；

（2）磷酸铁锂电化学容量：162 毫安时/克；

（3）极片压实密度：2.55 克/立方厘米；

（4）低温性能相对其他工艺的产品提高 10%—15%；

（5）杂元（Ca/Mg/Mn/Ti）≤50 ppm。

4. 技术功能特性

（1）以铁和磷酸为原料，实现了一步反应结晶工艺在常温常压下的磷酸铁制备；

（2）磷酸连续溶铁制备亚铁液，合成处通过自动化控制制

备合成液，继而合成液通过压淋洗涤、闪蒸干燥后进行连续的进料至回转窑并连续出料实现脱水烧结;

（3）成品性能稳定性好，磷酸铁产品为片状晶型，纯度高，应用后低温性能优异，终端产品续航能力提高 5%—10%;

（4）实现了废水的零排放和清洁生产。

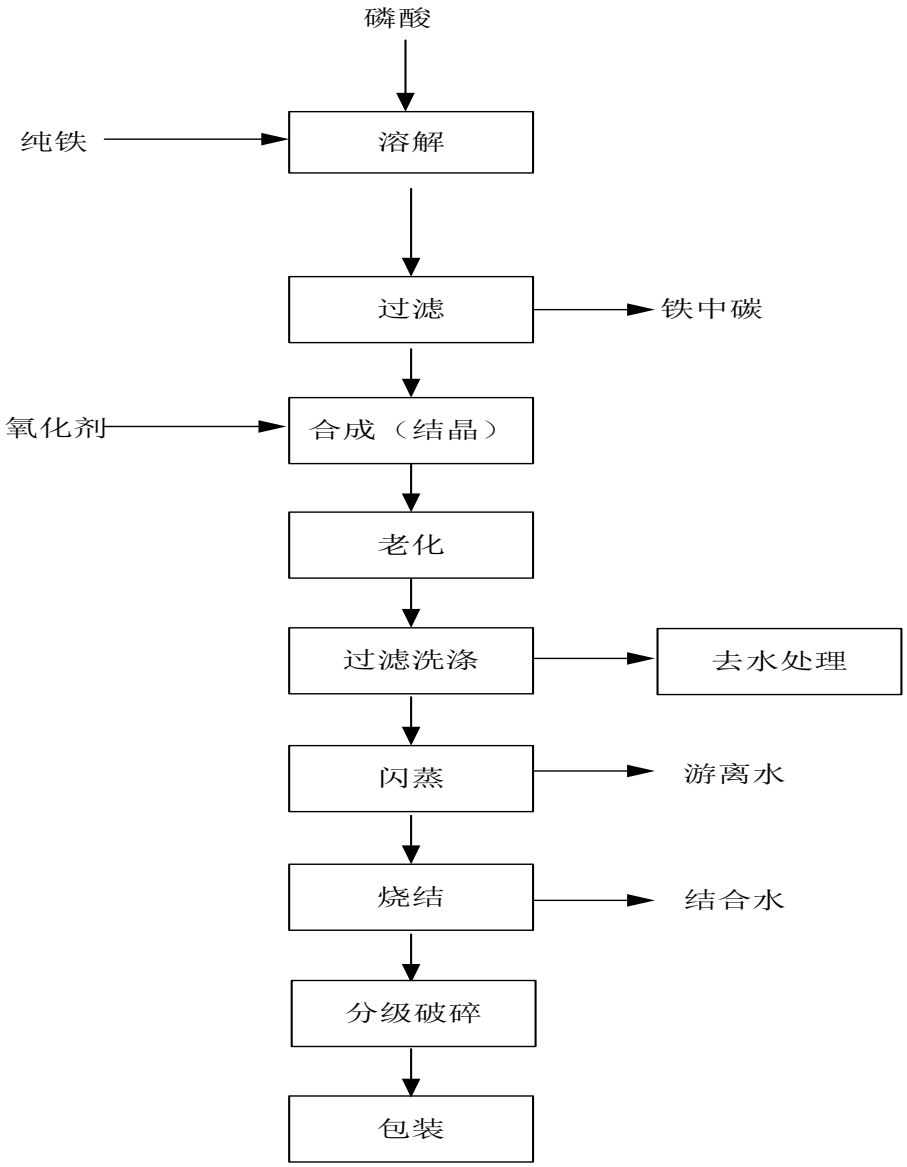

图 1 工艺流程图

5. 应用案例

（1）项目基本情况。技术提供单位为山东彩客新材料有限公司，应用单位为沧州彩客锂能有限公司。改造前旧生产线产能为 1.5 万吨磷酸铁/年，单位产品能耗为 0.50 吨标准煤/吨磷酸铁。

（2）主要技术改造内容。应用磷酸铁一步法全流程连续制备技术，调整工艺参数，进行设备改造，把推板窑改为回转窑，同时新增亚铁板框过滤机、闪蒸干燥系统、粉碎装置、包装装置等，原有生产线扩能至 3 万吨磷酸铁/年。2021 年 6 月实施节能改造，实施周期 18 个月。

（3）节能减排效果及投资回收期。改造完成后，单位产品能耗降低至 0.40 吨标准煤/吨磷酸铁，可实现节能量 3255 吨标准煤/年，减排二氧化碳 8658.3 吨/年。投资额 2000 万元，投资回收期为 6 年。

（二）湿法磷酸生产过程低压蒸汽发电节能技术

1. 技术适用范围

适用于磷化工行业湿法磷酸工艺节能技术改造。

2. 技术原理及工艺

该技术采用背压式汽轮机代替传统的减温减压装置，利用低压蒸汽余压余热发电，可回收利用蒸汽减温减压过程中损失的有效能，能满足下游稳定的供汽要求和正常生产，减少因下游用汽不平衡造成蒸汽放空的能源浪费和环境污染，有利于生产过程中的蒸汽平衡调节。DCS 系统流程如图 2 所示。

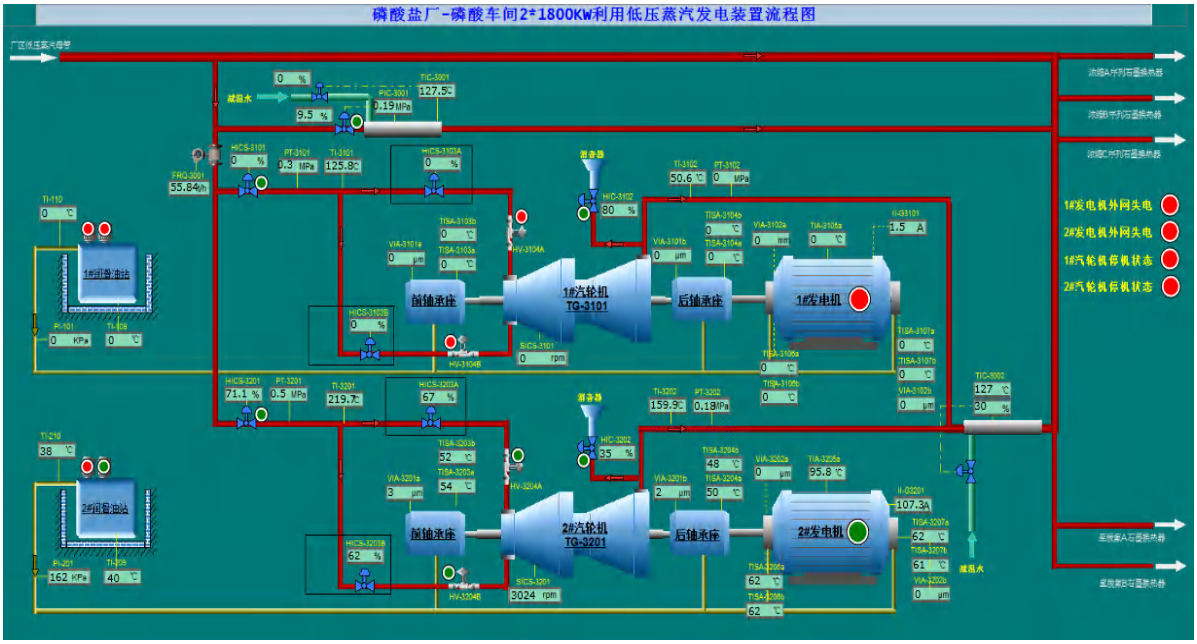

图 2 DCS 系统流程图

3. 技术指标

（1）汽轮机进汽：蒸汽压力 0.45～0.52 兆帕，蒸汽温度约

200 ℃;

（2）汽轮机排汽: 蒸汽压力 0.16～0.21 兆帕，蒸汽温度 131 ℃左右。

4. 技术功能特性

（1）利用背压式汽轮发电机组代替传统的减温减压装置，回收利用蒸汽减温减压过程中损失的有效能，回收率约 75%;

（2）减少了传统减温减压装置因下游用汽不平衡放空过程中的热损失、热污染和噪声污染;

（3）采用异步发电技术进行发输电，电气系统更加简洁，操作更加便捷，运行平稳可靠。

5. 应用案例

（1）项目基本情况。技术提供单位为云南磷化集团有限公司，应用单位为云南磷化集团有限公司磷酸厂。改造前硫酸装置正常运行，产出约 165 吨/小时低压蒸汽（0.5 兆帕、200 ℃左右），除少量供硫酸装置自身使用外，约 130 吨/小时低压蒸汽用于磷酸装置浓缩及脱氟等工序。进入磷酸装置的低压蒸汽经过减温减压装置后，蒸汽温度及压力分别降低至 0.2 兆帕和 130 ℃左右，进入各石墨换热器进行热交换，以满足磷酸装置生产需要。蒸汽在减温减压过程中有效能损失达 15.8%左右，造成较大能源浪费。

（2）主要技术改造内容。去掉原减温减压装置，改造安装 2 台设计发电容量为 1700 千瓦的汽轮发电机组及配套管路、附件，配套 2 台 1800 千瓦高效能双支点双级冲动背压式汽轮机，

带动由 2 台 1800 千瓦异步电机组成的汽轮发电机组。产生的 10 千伏电能分别接入现有磷酸 10 千伏高压配电室 I 段和 II 段母线，最后并入 10 千伏电网，同时产生 0.18～0.21 兆帕、131 ℃左右的低压蒸汽，供给磷酸装置生产使用。2016 年 2 月实施节能改造，实施周期 7 个月。

（3）节能减排效果及投资回收期。改造完成后，在硫酸、磷酸装置正常运行情况下，年发电量为 2414 万千瓦时，可实现节能量 7483.4 吨标准煤/年，减排二氧化碳 19905.84 吨/年。投资额 700 万元，投资回收期为 1 年。

（三）半水—二水湿法磷酸技术

1. 技术适用范围

适用于磷化工行业湿法磷酸工艺节能技术改造。

2. 技术原理及工艺

原料磷矿与硫酸在半水反应槽中生成半水石膏，通过半水过滤给料泵将半水料浆输送至半水过滤机，滤液作为成品酸送往罐区，成品酸可经过浓缩处理得到更高浓度 P_2O_5 的产品磷酸。半水石膏经过一次洗涤后，与半水过滤冲盘水一同进入二水转化槽。二水转化料浆通过二水过滤给料泵输送至二水过滤机，二水石膏经过三级洗涤后，送至界外。半水闪冷气经过二级氟吸收及循环水洗涤后，排至烟囱；成品氟硅酸经过硅胶过滤后输送至罐区储槽。半水反应尾气经过文丘里洗涤器、二级尾气洗涤后排至烟囱，过滤尾气及二水转化尾气经过一次洗涤后排至烟囱。工艺流程如图 3 所示。

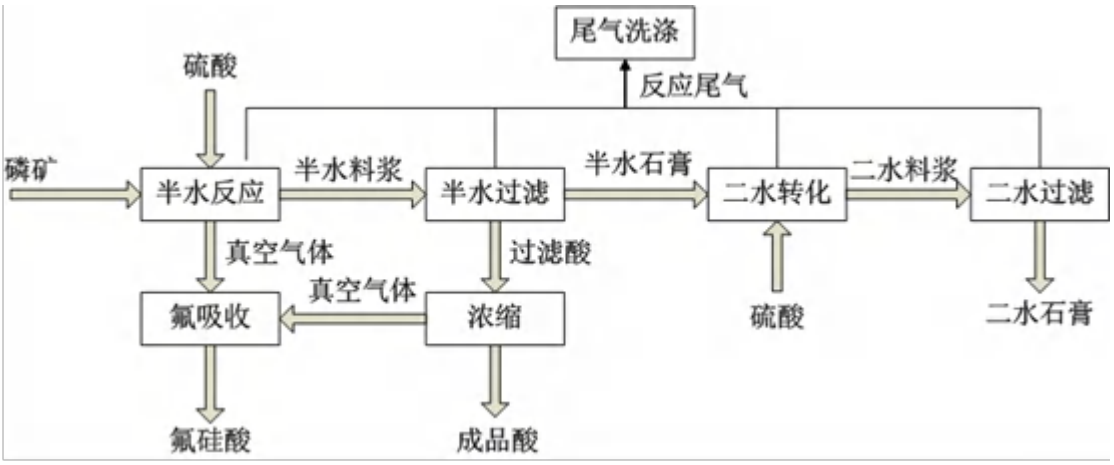

图 3 工艺流程图

3. 技术指标

（1）相比传统二水法工艺，磷酸浓度提高 15%;

（2）相比传统二水法工艺，能耗降低 52%;

（3）相比传统二水法工艺，磷回收率提高 2.5%~4.5%，副产磷石膏中总磷含量小于 0.5%，水溶性磷含量小于 0.2%。

4. 技术功能特性

（1）相较于传统二水工艺生产的 25%P_2O_5，每生产 1 吨 100%P_2O_5，可减少 1.5 吨浓缩蒸汽消耗;

（2）半水—二水工艺磷回收率高达 98.5%，高于二水工艺及半水工艺，减少了原料矿石消耗，且有利于磷石膏无害化处理及再利用;

（3）成品酸中含固量约为 1%，优于二水工艺的 5%，磷石膏品质好。半水—二水工艺副产的磷石膏总磷仅为二水工艺磷石膏的一半，水溶性磷小于 0.2%。

5. 应用案例

（1）项目基本情况。技术提供单位为中国五环工程有限公司，应用单位为中化重庆涪陵化工有限公司。该项目为新建项目。

（2）主要技术改造内容。采用半水—二水湿法磷酸技术新建一套 30 万吨/年湿法磷酸装置，实现生产 100%P_2O_5 30 万吨/年及副产 100%氟硅酸 1.15 万吨/年。2020 年 11 月实施节能改造，实施周期为 18 个月。

（3）节能减排效果及投资回收期。项目建成后，年产 30 万

吨 100%P_2O_5，浓缩工序消耗蒸汽量减少 40.8 万吨/年，水耗减少 57 万吨/年，可实现节能量 3.8 万吨标准煤/年，减排二氧化碳 10.1 万吨/年。投资额 4.17 亿元，投资回收期为 3 年。

（四）硫酸低温热回收技术

1. 技术适用范围

适用于化工和冶金等行业的硫酸生产领域。

2. 技术原理及工艺

硫酸低温热回收技术采用高温高浓酸吸收，将吸收酸温度提至 180~200 ℃，硫酸浓度提高至 99%以上，然后在系统中用蒸汽发生器替代循环水冷却器，将高温硫酸的热量传给蒸汽发生器中的水产生蒸汽。工艺流程如图 4 所示。

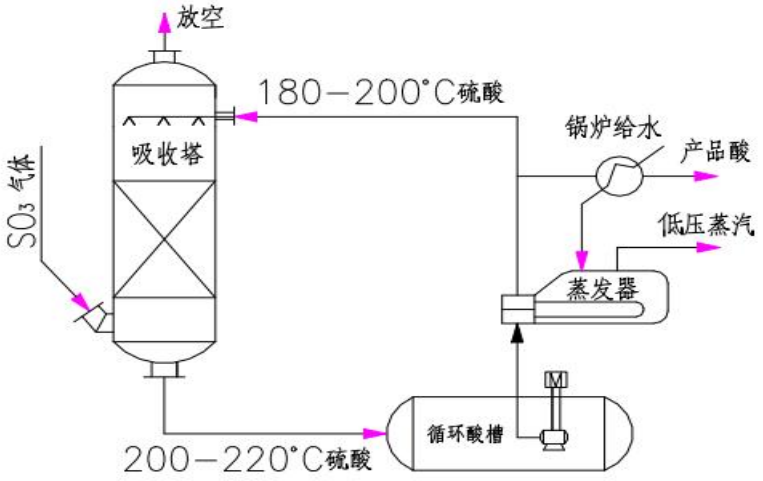

图 4 工艺流程图

3. 技术指标

（1）产汽压力：0.6~1.0 兆帕；

（2）产汽率：0.45~0.6 吨蒸汽/吨硫酸；

（3）每生产 1 吨硫酸节省循环冷却水：36 吨。

4. 技术功能特性

采用高温高浓酸吸收，将吸收酸温提高至 180~200 ℃，硫酸浓度提高至 99%以上，然后在系统中用蒸汽发生器替代循环水冷却器。

5. 应用案例

（1）项目基本情况。技术提供单位为南京海陆化工科技有限公司，应用单位为四川龙蟒磷化工有限公司。该公司原有一套 1100 吨/天硫磺掺烧亚铁制酸生产装置，改造前采用传统低温三氧化硫吸收工艺，吸收工艺反应热由循环冷却水带到空气中，能量未有效回收，制酸系统干吸工段消耗循环水量 3000 吨/小时，能耗水耗较高。

（2）主要技术改造内容。新建一台热回收塔与原有一吸塔并联，烟气管道用插板阀切换，高温吸收产生高温浓酸，采用蒸发器降温产出低压饱和蒸汽，蒸发器出口浓酸送入混合器，用低压喷射水调节酸浓。2017 年 1 月实施节能改造，实施周期 7 个月。

（3）节能减排效果及投资回收期。改造完成后，产汽量为 21.5 吨/小时（0.8 兆帕），节约循环水量 1650 吨/小时，可实现节能量 2.38 万吨标准煤/年，减排二氧化碳 6.33 万吨/年。投资额 2500 万元，投资回收期为 2 年。

（五）磷石膏等固废资源化综合利用技术及装备

1. 技术适用范围

适用于磷石膏综合利用。

2. 技术原理及工艺

通过农林固废生物质加工模块工艺技术设备，将农业生物质固废经脱水、烘干、粉磨制成生物质燃料，为再生煅烧系统提供热量；将城乡污泥、尾矿污泥和建筑渣土等控制混合比例，形成粒状原料，通过煅烧形成再生轻质骨料；利用再生煅烧系统的余热，将磷石膏闪烧成改性磷石膏建材，再利用再生轻集料、改性磷石膏建材特性制备出满足国家规范、标准要求的绿色环保节能建材。工艺流程如图 5 所示。

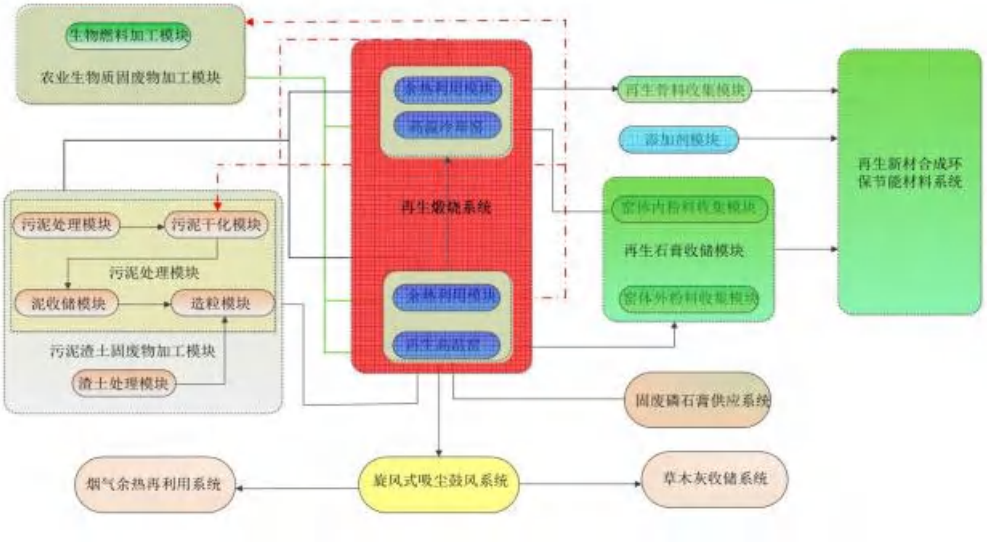

图 5 工艺流程图

3. 技术指标

（1）磷石膏无害化指标：水溶性 P_2O_5 ≤ 0.1%；水溶性 F- ≤ 0.01%；半水硫酸钙含量 ≥ 90%；pH 值 ≥ 7.2；白度 > 60%；硫酸钙吸收率 > 90%；抗折强度 ≥ 3 兆帕；2 小时抗压强度 ≥ 6 兆帕；绝干抗压强度 ≥ 12 兆帕；强度波动率 ≤ 5%；

（2）磷石膏消纳量：15 ~ 20 万吨/年；污泥处理量：15 ~ 20 万吨/年；建筑废弃渣土处理量：3 ~ 5 万吨/年；

（3）新型轻质高强集料产量：8 ~ 10 万立方米/年；再生石膏产量：10 ~ 15 万吨/年；轻质绿色节能环保新型装配式墙体材料产量：50 ~ 60 万立方米/年；保温砌块产量：3 ~ 5 万立方米/年。

4. 技术功能特性

（1）自主创新“三废协同”处理技术，可同时对 3 种大宗固废进行综合化利用，协同化、自动化程度高；

（2）三段式余热煅烧系统，实现余热循环利用，最大程度地挖掘热能利用效率；

（3）生产成本降低，在磷石膏处置过程中不使用煤炭资源作为燃料，热量供给由生物质燃料提供，处置成本由原来的 200 元/吨降低至 120 元/吨；

（4）研发负碳式的磷石膏规模化、模式化、无害化、资源化处理处置一体创新技术。

5. 应用案例

（1）项目基本情况。技术提供单位为湖北聚海环境科技有限公司，应用单位为大悟海聚环境科技有限公司。该项目为新建

项目。

（2）主要技术改造内容。应用磷石膏、污泥、农林等固废资源化综合利用技术及装备，一期项目建设用地 80 亩，建有 2 条磷石膏协同污泥（渣土）处置生产线，2 条余热煅烧磷石膏生产线，1 条砂浆生产线，1 套高性能石膏条板及砌块生产线，1 套装配式保温隔音墙板及砌块生产线，1 套磷石膏合成高性能路用材料及生态构配件生产线。2022 年 10 月实施节能改造，实施周期 12 个月。

（3）节能减排效果及投资回收期。项目建成后，年消纳磷石膏 20 万吨、处理污泥 20 万吨、处理废渣土 5 万吨，产出 10 万立方米新型轻质高强集料、15 万吨再生石膏、60 万立方米轻质绿色节能环保新型装配式墙体材料、5 万立方米保温砌块，可实现减排二氧化碳 134 万吨/年。投资额 2.5 亿元，投资回收期为 5 年。

（六）磷石膏无害化处理关键技术

1. 技术适用范围

适用于工业副产磷石膏综合利用。

2. 技术原理及工艺

该技术关键工艺涉及磷石膏浮选、洗涤及改性工序，全过程采用自动化智能控制。通过浮选除色、除硅等工序，将磷石膏中的黑色有机质、SiO_2 等去除，提高磷石膏白度和纯度。采用水洗-改性技术路线将磷石膏中有机物、可溶性 P_2O_5 和 F^- 等脱出进行资源化利用，微量的有害物质进行改性处理得到无害化磷石膏，使其性质接近天然石膏。工艺流程如图 6 所示。

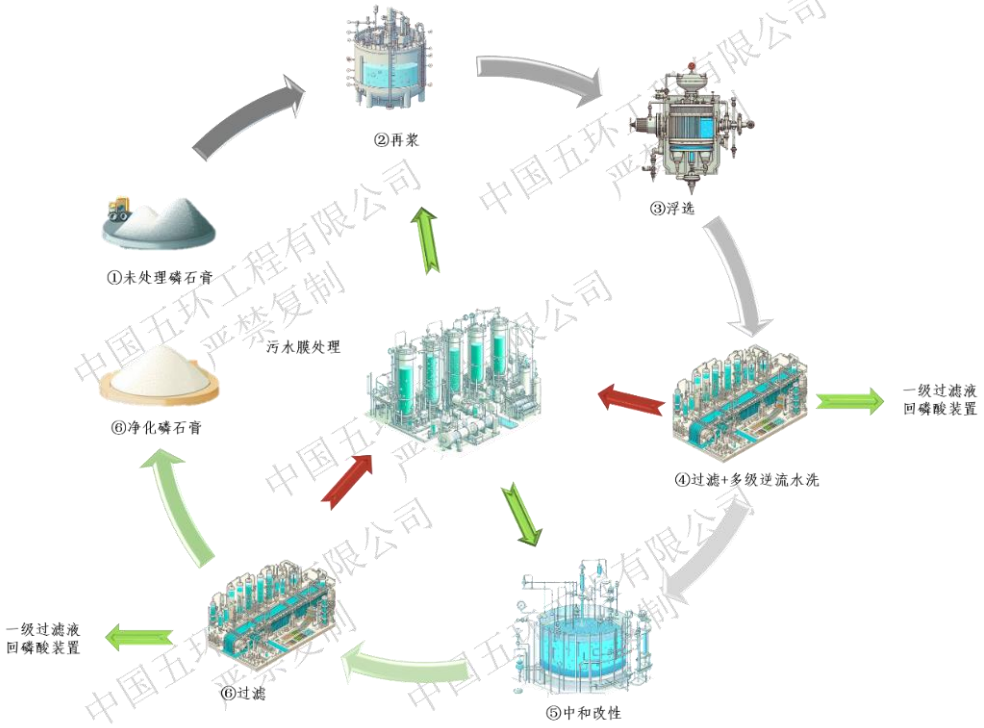

图 6 工艺流程图

3. 技术指标

磷石膏经无害化处理后，达到 I 类或接近 I 类固废的水平，其浸出液的 P、F、NH_3-N 浓度及 pH 值均符合 GB 8978—1996《污水综合排放标准》中的一级标准。

4. 技术功能特性

（1）实现了从浮选除杂、多级逆流水洗精制、改性处理到成品生产的全流程智能自动化控制;

（2）生产出满足多领域综合利用要求的优质磷石膏产品，广泛应用于建材、道路路基、矿山填埋等重要领域，或直接进行安全堆存，实现了磷石膏的最大化无害化利用;

（3）核心设备采用先进的设计理念和精密加工工艺，部分关键技术参数领先于国际同类产品，无害化处理集成度高。

5. 应用案例

（1）项目基本情况。技术提供单位为中国五环工程有限公司，应用单位为湖北楚星化工股份有限公司。该项目为新建项目。

（2）主要技术改造内容。新建单套 100 万吨/年磷石膏无害化处理装置，可用于磷石膏的无害化处理及综合利用，实现年产 20 万吨石膏粉、10 万吨石膏基自流平砂浆及 70 万吨石膏缓凝剂。2023 年 11 月实施节能改造，实施周期 8 个月。

（3）节能减排效果及投资回收期。项目建成后，年产 20 万吨石膏粉及 10 万吨自流平砂浆可在建筑施工中的非承重墙体砌筑、墙（顶）面抹灰、地面找平等应用方面替代传统水泥熟料 24

万吨，可实现节能量 2.6 万吨标准煤/年，减排二氧化碳 6.92 万吨/年。投资额 1.15 亿元，投资回收期为 6.7 年。

（七）大型流态化焙烧磷石膏制备高附加值材料关键技术

1. 技术适用范围

适用于工业副产石膏综合利用。

2. 技术原理及工艺

磷石膏利用热烟气作为流态化动力，先进入干燥文丘里、一级旋风分离器、预热文丘里、两级旋风预热器完成烘干预热去除附着水，再通过流化床煅烧炉进行焙烧和换热，除去 1.5 个或 2 个结晶水完成转晶，转晶后热物料经过冷却文丘里、三级旋风冷却分离器、流化床冷却器进行冷却、陈化，最终成为合格的建筑石膏粉或无水 II 型石膏粉产品。该技术有效利用系统整体热能降低单位产品能耗。工艺流程如图 7 所示。

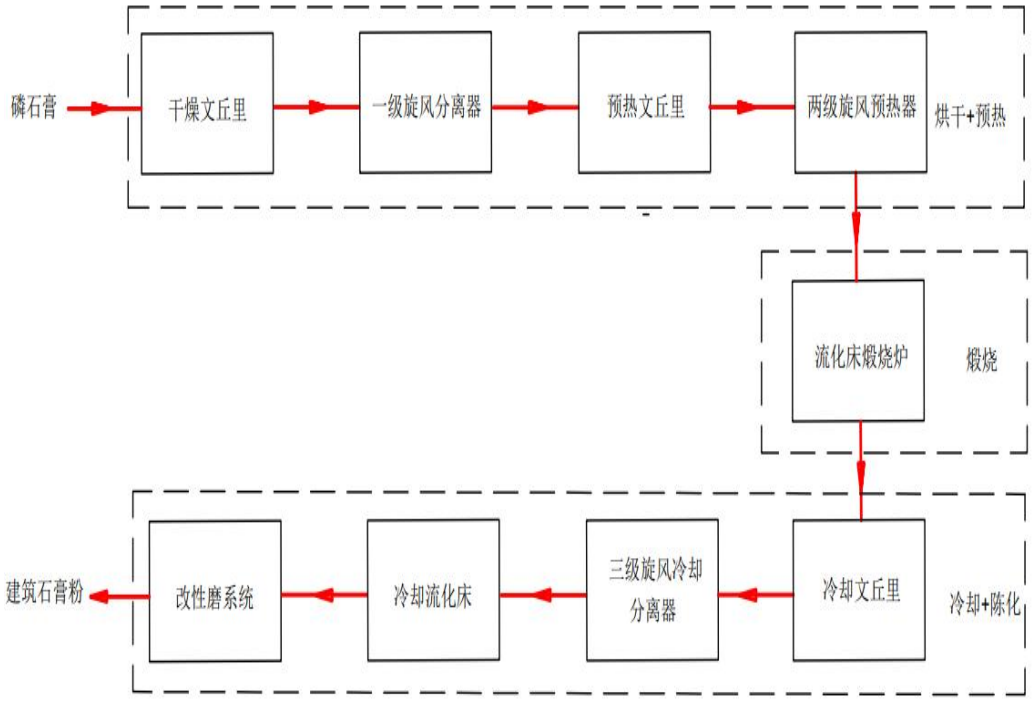

图 7 工艺流程图

3. 技术指标

（1）利用二水石膏生产每吨建筑石膏粉的热耗≤360000千卡（折标煤51.4千克），比传统炒制法降低15%以上;

（2）建筑石膏粉三相组分中，无水相（AⅢ）≤8.0%、半水相（HH）≤4.5%。

4. 技术功能特性

该技术采用粉体流态化焙烧原理，利用1套装置即可实现生产建筑石膏粉和无水II型石膏粉2种产品。

5. 应用案例

（1）项目基本情况。技术提供单位为云南云天化环保科技有限公司，应用单位为云南云天化环保科技有限公司。该项目为新建项目。

（2）主要技术改造内容。新建一套大型流态化煅烧工艺的柔性生产装置，建筑石膏粉产能为36万吨/年，无水II型石膏产能为21.6万吨/年。2021年6月实施节能改造，实施周期6个月。

（3）节能降碳效果及投资回收期。项目建成后，年产36万吨建筑石膏粉，与传统工艺相比单位能耗降低9千克标准煤/吨，并在地面找平，墙面抹灰等应用方面替代传统水泥砂浆32万吨，可实现节能量3.1万吨标准煤/年，减排二氧化碳8.25万吨/年。投资额2.1亿元，投资回收期为8年。

（八）净化湿法磷酸技术

1. 技术适用范围

适用于磷酸净化及下游产品行业节能技术改造。

2. 技术原理及工艺

湿法磷酸精制技术是在湿法磷酸中加入一定量低水溶性的有机萃取剂，使得磷酸与杂质分离达到净化湿法磷酸的一种方法，其原理是磷酸可以溶于有机萃取剂而其他杂质不溶于萃取剂，从而萃取出高纯度的磷酸。湿法磷酸经过预处理、萃取、初脱硫、深脱硫、洗涤、反萃和浓缩等工艺后可得到工业级精制磷酸。工艺流程如图 8 所示。

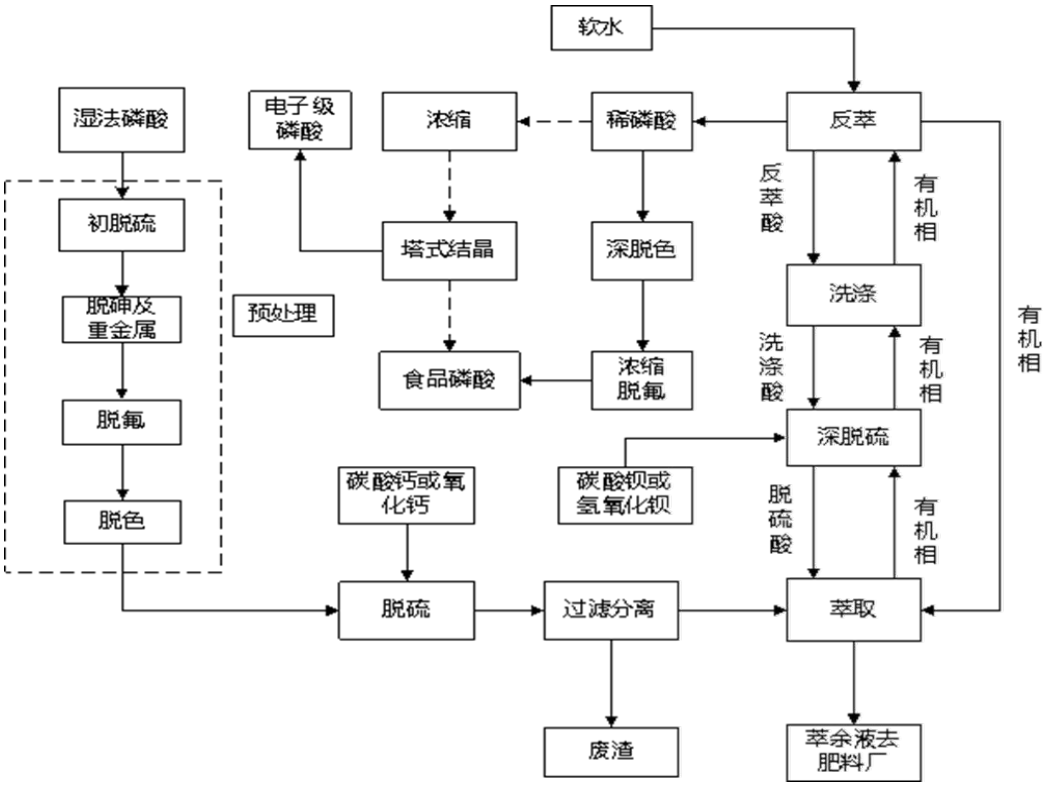

图 8 工艺流程图

3. 技术指标

净化磷酸萃取率＞70%。

4. 技术功能特性

（1）相比于热法磷酸技术，工艺综合能耗（折标准煤）降低 83.3%;

（2）可实现对磷酸分级利用，更适应我国中低品位磷矿资源的现状特点。

5. 应用案例

（1）项目基本情况。技术提供单位为四川大学，应用单位为中化重庆涪陵化工有限公司。该项目为新建项目。

（2）主要技术改造内容。采用乳化萃取净化磷酸技术，新建一套 10 万吨/年的湿法磷酸净化设备，工艺步骤主要包括硫酸酸解磷矿粉、除铁、萃取、洗涤、反萃和浓缩。2019 年 12 月实施节能改造，实施周期 18 个月。

（3）节能减排效果及投资回收期。项目建成后，与传统热法磷酸净化技术相比，单位能耗降低了 2810 千克标煤/吨，可实现节能量 28.1 万吨标准煤/年，减排二氧化碳 74.7 万吨/年。投资额为 2.3 亿，投资回收期为 5 年。

（九）黄磷生产过程余热利用及尾气发电（供热）技术

1. 技术适用范围

适用于化工行业黄磷生产节能技术改造。

2. 技术原理及工艺

通过对黄磷生产中排放的尾气进行收集、加压并进行净化处理，再输送到专用燃烧器中进行配风旋混燃烧，燃烧后产生的热量及强腐蚀高温烟气再经过耐腐蚀的专用黄磷尾气锅炉进行换热，交换后的热量用于加热水产生蒸汽或者利用蒸汽带动汽轮机发电系统发电，所产蒸汽与电量均用于黄磷生产，降低产品能耗。工艺流程如图 9 所示。

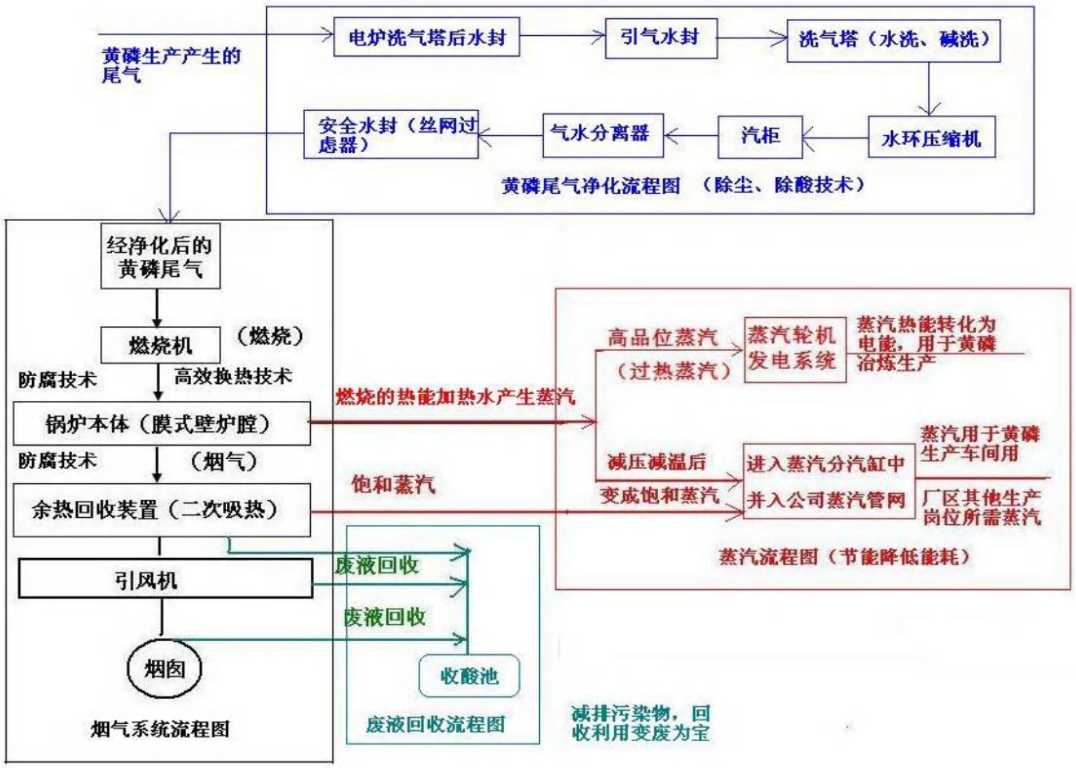

图 9 工艺流程图

3. 技术指标

（1）黄磷生产单位综合能耗下降 15%~32%;

（2）净化成本与替代的技术相比下降 60%以上;

（3）系统热效率较原有的换热方式提高 35%以上。

4. 技术功能特性

（1）研发低成本模式下黄磷尾气净化技术，采用水洗除尘及碱洗除酸，选择适合净化剂，使得尾气中的杂质、总硫、总磷的含量控制在合理的范围之内，避免尾气杂质堵塞燃烧及换热设备，减轻尾气酸性物质对系统设备的腐蚀;

（2）研发以黄磷尾气为燃料的专用锅炉，通过特有的设计结构实现烟气流动无死角，减少腐蚀物质堆积，避免腐蚀；换热元件采用耐腐蚀材料，表面采用等离子耐腐喷涂，并进行分段防腐处理等措施，解决尾气燃烧对锅炉的腐蚀问题;

（3）研发尾气热能梯级利用技术，采用热能回收技术，使尾气燃烧后高温段产生中压、中温过热蒸汽用于发电，低温段产生低压饱和蒸汽用于黄磷生产所需热能供应，提高尾气热能综合利用率。

5. 应用案例

（1）项目基本情况。技术提供单位为武汉东晟捷能科技有限公司，应用单位为贵州省瓮安县瓮福黄磷有限公司。改造前原有 4 台 12500 吨/年黄磷生产装置，副产黄磷尾气未被有效利用，燃空排放，主要耗能种类为电力、煤炭，年生产黄磷 5 万吨，单

位产品能耗为 3.2 吨标准煤/吨。

（2）主要技术改造内容。采用黄磷生产过程余热利用技术对 4 台黄磷电炉的黄磷尾气（约 20000 标立方米/小时）进行余热利用，所回收高位热能（过热蒸汽）用于发电，低位热能（饱和蒸汽）用于供热，所发电量及供热全部用于黄磷生产；新装 2 台 25 吨/小时燃黄磷尾气专用锅炉+12 兆瓦汽轮机发电机组，配套净化、化学水处理、循环冷却塔等公辅设置。2017 年 3 月实施节能改造，实施周期 18 个月。

（3）节能减排效果及投资回收期。改造完成后，单位产品能耗降低至 2.2 吨标准煤/吨，实现节能量 2.6 万吨标准煤/年，减排二氧化碳 6.92 万吨/年。投资额 5200 万元，投资回收期为 2 年。

（十）等温变换技术

1. 技术适用范围

适用于氮肥、甲醇生产及工业废气高价值综合利用一氧化碳变换新建装置和传统变换工艺节能技术改造。

2. 技术原理及工艺

等温变换反应器主要由外壳、上管板、下管板、内套管、外套管、径向框等部件组成。根据气固相可逆放热反应原理，充分考虑变换反应各阶段放热量，采用双管板结构技术、双套管与全径向技术、径向分布器技术，设计独特的换热元件结构置于等温变换反应器内部，利用沸腾水相变吸热，及时高效移出反应热，实现等温、低温、恒温反应，解决了传统绝热变换的难题。工艺流程如图 10 所示。

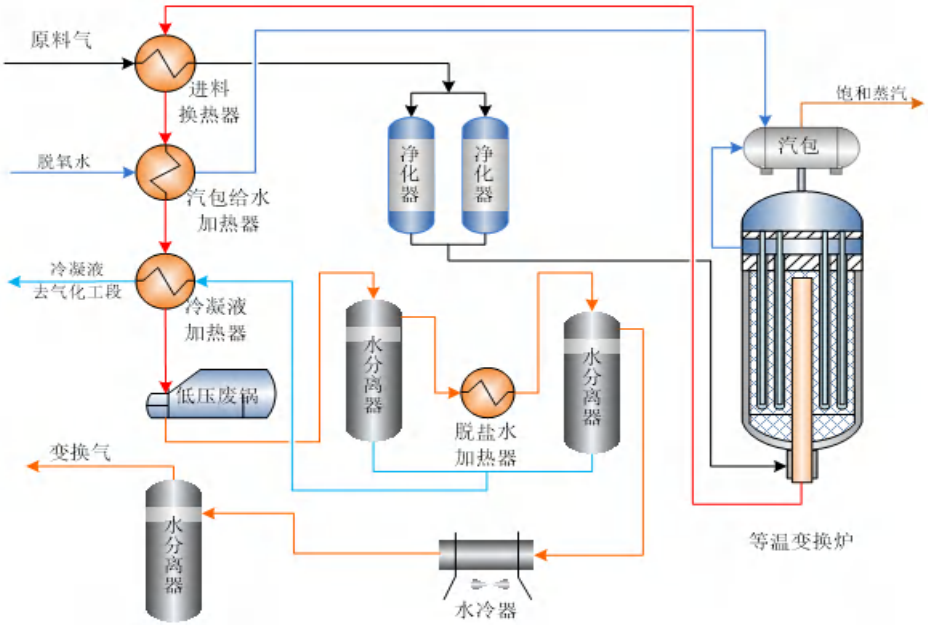

图 10 工艺流程图

3. 技术指标

（1）等温变换反应器阻力≤0.03 兆帕，系统阻力≤0.3 兆帕；

（2）反应器床层温差≤30℃；

（3）副产物甲烷≤100 ppm。

4. 技术功能特性

（1）反应温度低，反应效率高。沸腾水相变高效移热，等温、低温、恒温反应，一炉一段深度变换；

（2）热回收率高。水相变产生大量中压蒸汽，变换系统蒸汽消耗自产自足，大量富余蒸汽可用于发电；

（3）阻力低，流程短。反应器全径向结构，系统设备少，流程短，阻力低；

（4）适用范围宽。对不同压力等级、一氧化碳含量、水气比、含硫或无硫原料气，均可实现深度变换或满足其工艺要求。

5. 应用案例

（1）项目基本情况。技术提供单位为湖南安淳高新技术有限公司，应用单位为河南晋开投资控股集团公司。项目为 60 万吨/年氨合成装置传统四段绝热变换工艺改造，改造前系统阻力达 0.8 兆帕，第一变换炉和第二变换炉催化剂长期高温运行造成使用寿命短，出口变换气中一氧化碳含量达 1.7%（设计值为 0.6%）。

（2）主要技术改造内容。原第一变换炉 30%气量粗煤气副线增加 1 台等温变换炉，运行气量为 40%粗煤气量，减少第一变

换炉负荷；增加 1 台汽包回收反应热产 3.7 兆帕中压蒸汽；增加 1 台排污膨胀槽回收热能产低压蒸汽；减少第二变换炉负荷，运行温度由 430 ℃降到 300 ℃，增加催化剂使用寿命；增加 1 台开工循环泵用于开车使用。2019 年 4 月实施节能改造，实施周期 3 个月。

（3）节能减排效果及投资回收期。改造完成后，系统阻力降低 0.2 兆帕，相当于每小时节电 800 千瓦时；变换气中一氧化碳含量降至 0.5%，相当于氢气量增加 229 标立方米/小时；蒸汽产量增加 13.1 吨/小时；可实现节能量 1.18 万吨标准煤/年，减排二氧化碳 3.13 万吨/年。投资额 2400 万元，投资回收期为 2 年。

（十一）新型工业尾气煅烧窑炉成套设备

1. 技术适用范围

适用于磷化工行业黄磷尾气利用节能技术改造。

2. 技术原理及工艺

黄磷炉产生的黄磷尾气中含有大量的磷泥和粉尘，首先经过洗涤塔洗涤，保证尾气的洁净度达到95%，再经过除雾器吸附磷泥和水流入沉淀池，保证尾气的洁净度达到99%以上；洁净后的黄磷尾气通过储气柜进行稳压，保证压力满足窑炉煅烧，通过热值和成分分析仪对尾气进行准确检测，保证黄磷尾气用量的控制，满足生石灰产品的质量；黄磷尾气管线设置氧气分析仪、气体置换系统、气动快速切断阀和泄爆阀，保证石灰窑的安全运行。工艺流程如图11所示。

3. 技术指标

（1）设备烧制产品成品率≥95%；

（2）设备生过烧率控制在3%～8%；

（3）设备在线检测颗粒物≤5毫克/立方米，二氧化硫≤30毫克/立方米，氮氧化物≤50毫克/立方米。

4. 技术功能特性

（1）采用黄磷尾气能源直接利用法实现氧化钙煅烧，解决了黄磷尾气杂质多，处理技术难度高的问题；

（2）改进生产系统的着火点位置和供应量，改进窑体及内部结构比例，使之适应生产工况。

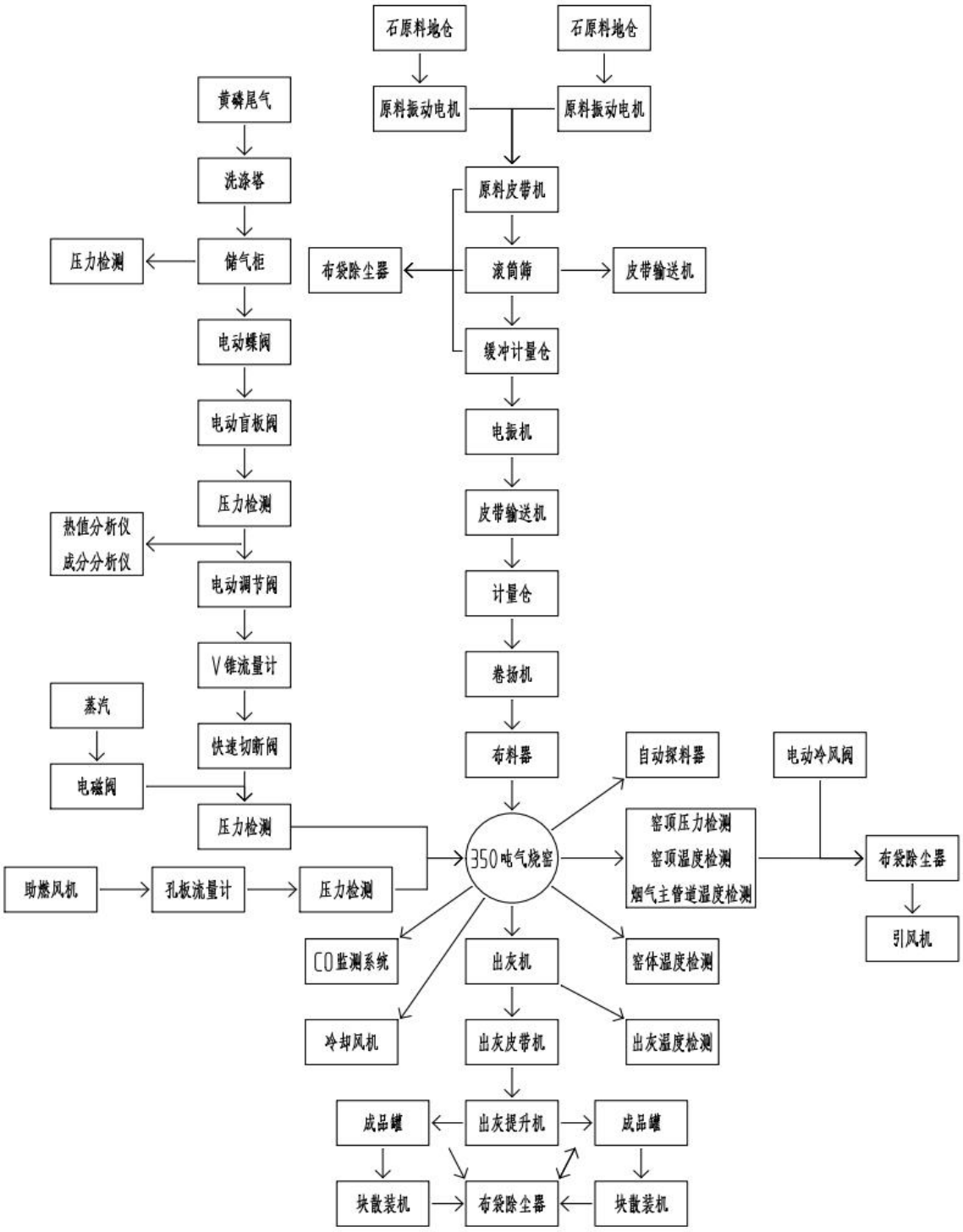
石原料地仓
石原料地仓
黄磷尾气
原料振动电机
原料振动电机
洗涤塔
原料皮带机
压力检测
储气柜
布袋除尘器
滚筒筛
皮带输送机
电动蝶阀
缓冲计量仓
电动盲板阀
电振机
压力检测
皮带输送机
热值分析仪
成分分析仪
电动调节阀
计量仓
V锥流量计
卷扬机
蒸汽
快速切断阀
布料器
自动探料器
电动冷风阀
电磁阀
压力检测
350吨气烧窑
窑顶压力检测
窑顶温度检测
烟气主管道温度检测
布袋除尘器
助燃风机
孔板流量计
压力检测
引风机
CO监测系统
出灰机
窑体温度检测
冷却风机
出灰皮带机
出灰温度检测
成品罐
出灰提升机
成品罐
块散装机
布袋除尘器
块散装机

图 11 工艺流程图

5. 应用案例

（1）项目基本情况。技术提供单位为山东万达环保科技有限公司，应用单位为云南澄江橙源新材料有限公司。云南澄江橙源新材料有限公司从事氧化钙生产，产能为 10.5 万吨氧化钙/年，改造前利用常规能源煤作为燃料，年消耗标准煤 1.26 万吨，产生二氧化碳排放 3.35 万吨。

（2）主要技术改造内容。利用新型工业尾气煅烧窑炉成套设备对原生产线进行节能技术改造，设备使用过程性能稳定，尾气利用率符合建设要求，实现了黄磷尾气替代煤进行煅烧氧化钙生产。2022 年 1 月实施节能改造，实施周期 1 年。

（3）节能减排效果及投资回收期。改造完成后，年度可实现有效利用黄磷尾气 3675 万立方，可实现节能量 1.26 万吨标准煤/年，减排二氧化碳 3.35 万吨/年。投资额 2000 万元，投资回收期为 2 年。

抄送：工业和信息化部节能与综合利用司、工业和信息化部电子第五研究所（中国磷化工产业链节能与绿色低碳提升项目工业和信息化部部分管理办公室）

机械工业技术发展基金会　　2024年6月30日印发