节能减排技术在磷酸二氢钙装置尾气处理中的应用

王　凯，何成江

（川恒生态科技有限公司，四川 德阳　618400）

［摘　要］针对饲料添加剂磷酸二氢钙（MCP）生产过程中雾化、烘干及冷却工艺产生的尾气能源浪费与排放问题，系统分析现有尾气处理系统的热源分布特征与回收潜力。基于热力学分类原理，提出“高品位直接利用–低品位梯级回收”的协同节能策略，创新性地集成闪蒸降温与余热回收技术，构建尾气热能多级回收系统。通过闪蒸罐内饱和蒸汽的梯级释放实现尾气温度精准调控（由120 ℃降至60 ℃），同步回收400 kg/t的二次蒸汽用于原料预热；开发冷却气闭环循环工艺，将传统外排的冷却气余热回用于烘干环节，标准煤消耗降低7 kg/t。改造后系统实现尾气排放总量削减40%，CO_2减排量达20 kg/t，并彻底消除“白烟”视觉污染。该研究为磷酸盐行业尾气治理提供了兼具经济性与环保性的技术范例，对推进“双碳”目标下的工业节能改造具有示范意义。

［关键词］磷酸二氢钙；尾气处理；节能减排

［中图分类号］TQ110.9　　［文献标志码］B　　［文章编号］2097–4566（2025）09–0099–07

Application of energy-saving and emission reduction technology in treatment of tail gas in MCP plant

WANG Kai, HE Chengjiang

(*Chuanheng Ecological Technology Co., Ltd., Deyang* 618400, *China*)

Abstract: Aiming at the energy waste and emission problems of tail gas generated in the atomization, drying and cooling processes during the production of feed additive calcium dihydrogen phosphate (MCP), the heat source distribution characteristics and recovery potential of the existing tail gas treatment system are systematically analyzed. Based on the thermodynamic classification principle, a collaborative energy-saving strategy of “direct utilization of high-grade energy-stepwise recovery of low-grade energy” is proposed. It innovatively integrates flash cooling and waste heat recovery technologies to construct a multi-level recovery system for tail gas thermal energy. The tail gas temperature is precisely regulated (from 120 ℃ to 60 ℃) through the stepwise release of saturated steam in the flash tank, and 400 kg/t secondary steam is simultaneously recovered for preheating the raw materials. Develop a closed-loop circulation process for cooling gas, reusing the waste heat from the traditionally discharged cooling gas in the drying process to reduce the consumption of standard coal by 7 kg/t. After the renovation, the system achieves a 40% reduction in total exhaust emissions, with a CO_2 reduction of 20 kg/t, and completely eliminates the visual pollution of “white smoke”. This research provides a technical example that is both economically viable and environmentally friendly for the treatment of tail gas in the phosphate industry, and has a demonstration significance for promoting industrial energy-saving transformation under the “dual carbon” goals.

Key words: calcium dihydrogen phosphate; tail gas treatment; energy-saving and emission reduction

磷酸二氢钙（MCP）是一种高效、优良的磷酸盐类饲料添加剂，在饲料行业的应用主要包括作为磷和钙的营养添加剂，用于补充家禽和家畜的磷和钙营养需求[1]，促进其生长发育和骨骼健康。此外，磷酸二氢钙还具有缓冲作用，帮助动物维持消化系统的酸碱平衡，提高饲料的适口性和消化率。

目前国内饲料添加剂磷酸二氢钙的生产工艺主要有中和法、结晶法、磷酸氢钙法、氢氧化钙混合法。除了上述方法外，还存在一些其他的生产工艺，如采用湿法磷酸和碳酸钙为原料，结合干法[2]返料工艺进行生产。此外，某些特定的专

［收稿日期］2025–06–10

［作者简介］王　凯（1987–），男，四川德阳人，工程师，长期从事磷化工生产技术研究工作。

利工艺也可能被用于饲料级磷酸二氢钙的生产，这些工艺可能涉及特定的磷矿品位选择、萃取净化、中和沉淀以及后续的烘干和筛分等步骤[3-5]。综上所述，饲料添加剂磷酸二氢钙的生产工艺具有多样性，但绝大多数的化工单元操作都需要雾化、二次烘干、冷却工序，雾化尾气、烘干尾气和冷却尾气的处理是不可回避的问题。雾化工艺中，中和工序产生的磷酸二氢钙料浆通过雾化机高速旋转的分散盘将液体甩成雾滴，在雾化塔与高温烟道气接触进行充分热交换，雾滴中的水分蒸发成水蒸气与换热后的高温热空气混合形成含有大量水蒸气的雾化尾气。同时雾化半成品中少量磷酸二氢钙粉末也会与气流混合，形成以空气、水蒸气、磷酸二氢钙粉尘为主要成分的雾化尾气，尾气含有大量的热。二次烘干工艺也是采用烟道气与雾化半成品磷酸二氢钙进行热交换，进一步蒸发水分，蒸发的水分、热空气以及随气流混合的磷酸二氢钙粉末进入烘干尾气。由于二次烘干主要为除去烘干产品中的游离水分并脱除部分磷酸二氢钙的结晶水，此工序尾气温度较高。冷却工序与烘干工序恰恰相反，采用的除湿冷却空气与高温产品换热，冷却尾气主要为换热后的高温空气。尾气经除尘设备处理后大部分粉粒被收集，但细微粉末会随尾气排出，形成明显的烟带或白烟，对大气环境造成一定影响。

随着国家环保要求提高，各行业在逐步实施超低排放改造，烟气中的SO_2、SO_3（H_2SO_4）和NO_x等污染物含量将会大幅度下降，正常运行工况下蓝色或黄色烟羽现象基本不会出现，但由于烟气湿度较大，白色烟羽现象比较明显，造成严重的视觉污染，给周边居民带来较大的疑虑，更给工厂环保工作带来一定的压力。此外白色烟羽中的冷凝液呈弱酸性，飘落后会腐蚀附近的建筑物、钢结构，对植物的生长也会产生一定的危害[6]。针对雾化工艺尾气处理，常用的方法是多级水洗除尘、脱硫、脱硝工艺与湿式静电除尘技术。尾气首先进入洗涤塔进行降温和初步净化，去除部分卤素，含氮、含硫等物质以及微量的粗盐颗粒物；随后湿烟气进入湿式静电除尘器进一步净化除尘。湿式静电除尘器本体是以合成树脂为黏合剂、玻璃纤维及其制品作增强材料、碳纤维制品为导电功能材料而制成的复合材料。它具有表面平整光滑、机械强度高、耐腐蚀、质量轻、导电性能好、耐高温、阻燃性强、使用寿命长等优点，并且可进行模块化设计，整体一次成型、整体脱模工艺制造，运输、安装方便。湿烟气通入时其电晕极被水湿润，容易放出电子，同时水雾被电晕极芒刺尖端的电火花击碎细化，电场中存在大量带电雾滴，增加了细颗粒物与离子碰撞荷电的概率，使带电粒子在电场中的运动速度加快，捕捉更多细小颗粒物，颗粒物的排放达到特别排放限值要求。湿式静电除尘器也拥有捕集烟气中酸雾、颗粒物的强大功能，尤其是对脱硫后的气溶胶，微细、黏性、高比电阻粉尘，细小的金属颗粒，酸雾，水雾等有理想的捕集效果[7]。但静电除尘器对于尾气中高温水蒸气冷凝形成的雾状小液滴捕捉效果不佳，所以为保证脱白效果对进入静电除尘器尾气温度有较高要求。烘干尾气一般采用旋风除尘器或布袋除尘器等设备去除废气中的大颗粒粉尘，再进行尾气洗涤以达到除尘目的。绝大部分尾气处理工艺对尾气的余热利用较少，且尾气处理流程较为冗长，大多数热源都是通过凉水塔水蒸发的形式直接将热量逸散至空气中，不利于水的综合利用。

磷酸二氢钙（MCP）工业化生产高度依赖雾化–烘干–冷却工艺链，但由此衍生的高能耗尾气治理已成为制约行业绿色升级的关键瓶颈。现有工艺中，雾化尾气（120~150 ℃，w（H_2O）30%~40%）、烘干尾气（80~110 ℃）及冷却尾气（50~70 ℃）存在三重矛盾：（1）湿热耦合排放导致白色烟羽（冷凝液pH 4.5~5.5）与腐蚀速率>0.15 mm/a的酸性沉降；（2）湿式静电除尘器对气溶胶态水蒸气的脱除效率不足50%，且尾气余热回收率<15%；（3）多级水洗工艺产生40~60 ℃低温废热（焓值2.8~3.5 MJ/kg），90%以上通过凉水塔无效耗散。这本质上反映了传统技术“重末端净化、轻能量重构”的思维局限，亟待建立热力学品位分级调控机制。

以四川某公司60 kt/a磷酸二氢钙装置尾气处理系统采用余热回收节能减排技术取得的成果为例，探究饲料磷酸盐产品制造过程中雾化、烘干、冷却尾气处理过程中节能减排技术的应用。

1 磷酸二氢钙装置工艺及现状分析

1.1 工艺概述

湿法磷酸经除杂后得到的净化磷酸与重过磷酸钙反应生产磷酸二氢钙料浆。为保证生产的料浆没有颗粒包裹和输送顺畅，需要先将重过磷酸钙粉与水制成重过磷酸钙浆，通过重过磷酸钙浆与净化磷酸反应生产w（固）在55%~60%的磷酸二氢钙料浆。料浆通过高速旋转的雾化机离心成为细小雾状小液滴，小液滴在雾化塔用燃煤燃烧器内加热形成的高温烟道气进行干燥，形成w（H_2O）8%左右的

磷酸二氢钙半成品，通过回转圆筒二次烘干，成为产品，通过除湿冷空气换热冷却形成最终产品。雾化尾气经三级重力沉降、三级洗涤、除沫处理后排空。烘干尾气、冷却尾气通过布袋除尘后直接排空。

技改前尾气处理工艺流程见图1。

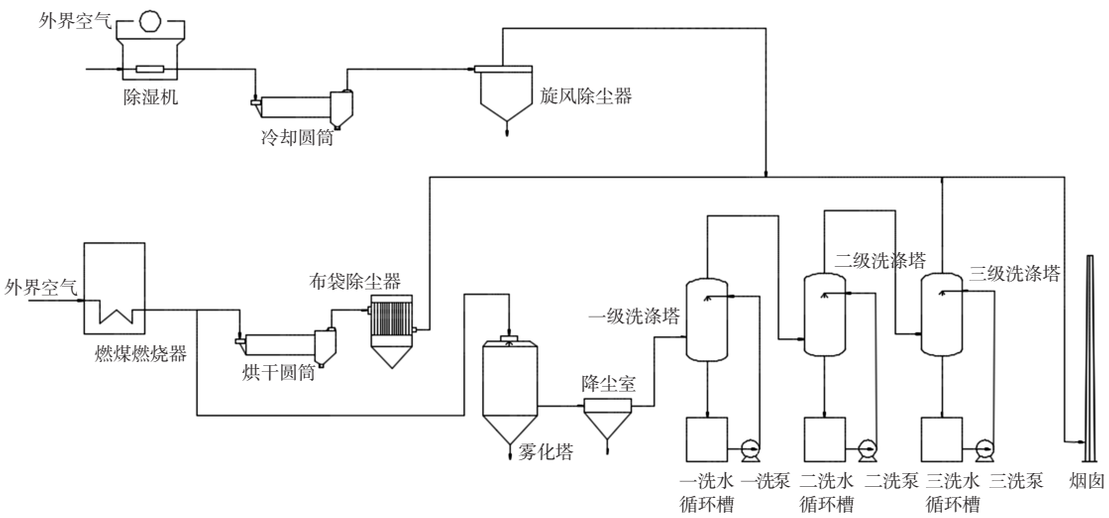

图1　技改前尾气处理工艺流程

Fig. 1　Process flow of tail gas treatment before technological transformation

1.2　现有尾气处理系统问题分析

该装置雾化尾气一直采用传统的洗涤+除沫+除霾的工艺流程，尾气洗涤级数多，洗涤流程长，能源浪费大，脱白效果不佳。烘干和冷却尾气温度较高，与雾化尾气混合后形成白色烟羽拖尾较长，严重影响视觉感官效果。主要问题有以下几个方面：

1）　雾化尾气水含量大，排烟温度高，脱白效果不佳

磷酸二氢钙料浆经雾化机雾化形成雾状小液滴，在雾化塔中用来自热风炉的热风进行瞬间干燥，形成粉末状小颗粒。为保证产品细度，雾化形成的粉末状小颗粒不能过大，且在下落和进入回转圆筒二次烘干时小颗粒不黏结在一起形成大颗粒，雾化半成品水含量也不宜控制过高。综合上述条件及工艺要求，雾化过程的尾气温度不宜低于水分蒸发温度，一般在98～100 ℃，尾气$w(H_2O)$ 13%～15%。即便经三级洗涤排烟温度依旧在60 ℃左右，且随洗水温度上升，烟气温度呈上升趋势。为实现稳定控制，补加低温冷水，被置换的高温一洗水至中和制浆进行回用，但中和制浆用水有限，大部分高温一洗水无法回用。由于无法回用的高温一洗水中含少量产品和磷且呈酸性，只能进入废水处理系统，造成一洗水损失，同时增大了水处理负担。即便如此，烟气温度均在55～60 ℃，脱白效果差，特别是在冬季环境温度较低时尤为明显。另外，为了减缓循环洗涤水固含量的上涨速度，减少置换洗涤水的频次，同时为了收集更多产品，雾化尾气进入洗涤前，采用多级重力沉降尽可能多的回收产品。由于磷酸二氢钙吸潮结垢的特性，$w(H_2O)$在10%左右的雾化半成品进入沉降室后极易结垢造成重锤阀无法关闭，系统长时间处于密封不严的情况，外界空气进入，无形增大了尾气洗涤量，更不利于洗涤吸收效果，同时外界未除湿空气进入会造成磷酸二氢钙吸潮黏结在尾气管道上，造成尾气管道堵塞。

2）　二次烘干尾气温度高，热利用率低

由于工艺的需要，通过回转圆筒对雾化半成品进行二次烘干，二次烘干的作用是进一步脱除雾化半成品的游离水，同时脱除磷酸二氢钙结晶水。磷酸二氢钙在100 ℃开始失去结晶水，在109 ℃时结晶水完全脱除，脱除结晶水后的物质在200～203 ℃会进一步分解为偏磷酸钙。烘干尾气温度一般控制在110～120 ℃，烘干尾气温度高，热量浪费大。

3）　产品冷却除湿引入外界空气造成总排放量增大，冷却气热源未充分利用

外界空气经引风机进入除湿机，通过除湿机冷却降温，其中的水蒸气冷凝，绝对湿度下降，调节温度使除湿空气的温度和相对湿度符合工艺要求。除湿空气温度与高温产品存在较大温度差，在气固接触过程中进行热交换，达到降低产品温度的目的，冷却尾气经布袋除尘后排空。但随着除湿空气的引入，总排气量增加，为使产品不产生高温热结块

现象，冷却气排放量较大，就目前现有装置，冷却气量与雾化尾气量基本相当，导致总尾气排放量增加了40%。另外在冷却过程中为保证产品温度较低不造成热结，采用气固逆流交换强化热交换效果，导致冷却气体热交换后的温度高于产品包装温度，经布袋排空时温度已上升至50 ℃，排放温度较高。

1.3 技术方案设计原理

基于上述存在的问题，主要技术节点在于以下几个方面：洗涤效果强化与提升；烟羽脱白；热量回收利用。

1） 洗涤效果的强化与提升机制分析

尾气洗涤效果强化主要利用的机制有多相界面作用、化学协同效应[8]、动态分离、系统参数优化等。

利用多相界面机制的方法有：（1）雾化与湍流混合方式，通过高速叶轮（60～150 m/s）将洗涤液雾化为微米级液滴，与含尘气体形成剧烈湍流混合，增加气液接触面积和碰撞概率，捕集效率提升30%～50%。典型设备如喷淋塔和旋风水膜除尘器，利用喷嘴或旋转离心力实现液滴均匀分布。（2）表面润湿与扩散吸附，粉尘颗粒通过液膜润湿（接触角＜90°）降低表面张力，水分子通过范德华力和氢键作用吸附在颗粒表面，使颗粒团聚后沉降。

利用化学协同效应机制的方法有离子交换、络合反应和相变诱导脱除。由于利用化学协同效应需要加入化学药剂，对饲料级产品生产存在质量安全和成本增加风险，不利于现有成熟工艺。

利用动态分离机制的方法有：（1）离心力分级沉降，旋风水膜除尘器中，含尘气体以15～25 m/s切向速度旋转，粉尘受离心力作用向筒壁运动，与液膜结合后沉降，10 μm以上颗粒去除率＞98%；（2）水膜冲刷防堵，湿式电除尘器通过连续水膜（厚度0.1～0.5 mm）冲刷极板，避免干式除尘器的粉尘板结问题，同时捕集荷电颗粒效率＞99.5%。

利用系统参数优化的方法有：（1）液气比调控。最佳液气体积比为0.5～1.5 L/m^3，过高导致能耗增加，过低则覆盖不充分。（2）多级串联增效。喷淋塔除尘效率较高，在不同实验条件下，除尘效率均可达80 %以上，对于粒径0.1 ~1.0 μm的颗粒物，喷淋塔可以实现比较高效的除尘效果；湿式电除尘器除油烟效率较高，可达80 %以上[9]。

2） 烟羽形成机制分析

尾气烟羽核心成因为湿烟气冷凝与颗粒物富集。以湿法脱硫/脱硝后的烟气为例，当烟气温度降至55～65 ℃，水蒸气含量处于饱和状态，排入低温环境时因温度骤降达到过饱和状态，水蒸气凝结为雾滴，形成白色或灰色烟羽。其次是污染物协同作用。化工尾气中都带有硫酸盐、硝酸盐、磷酸盐等细微颗粒（粒径≤2.5 μm）作为凝结核，加速水蒸气凝结。另外一些尾气中含有气溶胶，气溶胶与雾滴结合，增强烟羽稳定性并延长扩散距离。

另外，尾气烟羽同时受环境条件影响。（1）温度与湿度。低温环境加大烟气与环境温差，导致水蒸气快速冷凝，烟羽更明显。高湿度环境抑制烟气水分扩散，烟羽体积增大且持续时间延长。（2）大气稳定度。稳定层结（如逆温层）抑制垂直扩散，烟羽水平延展呈扇形或锥形，污染物近地面富集。不稳定层结（如晴热午后）湍流增强，烟羽呈波浪形并快速消散，视觉污染减轻。

研究表明，白色烟羽形成条件为饱和湿烟气（含SO_3、硫酸盐等）遇冷凝结，多见于湿法脱硫后排放，呈连续雾状带，末端扩散模糊。白色烟羽的消除首先需要控制烟气状态，先降温除湿，通过冷凝技术降低烟气水含量，减少可凝结水蒸气总量[10]；再升温脱白，即加热烟气至80 ℃以上，使排放后始终处于不饱和状态，消除视觉白烟。其次，对颗粒物深度脱除。采用高效除尘除雾器（如湿式电除尘、超滤膜）去除$PM_{2.5}$及气溶胶，减少凝结核。

3） 闪蒸降温与余热回收的机制分析

闪蒸降温是通过快速降压使高温高压液体达到过饱和状态，触发部分液体汽化吸热。当高压流体进入低压闪蒸罐时，压力骤降至接近常压，导致液体沸点降低。此时液体温度高于新压力下的沸点，引发闪蒸现象，部分液态水吸收自身显热转化为蒸汽潜热，剩余液体温度显著下降。

闪蒸释放出热量成为可回收的低品位热能。热泵机组的余热回收原理是基于逆卡诺循环，通过压缩机对工质做功，将低温余热提升至可利用的高温热能，具体流程如下：蒸发吸热—压缩提温—冷凝放热—节流降压。闪蒸产生的低温蒸汽通过蒸发器与热泵工质（冷媒）换热，工质吸收热量后汽化，压缩机对气态工质加压升温，使其温度提升至目标需求，高温高压工质在冷凝器中释放热量用于供暖、工艺加热等，工质冷凝为液态。液态工质经膨胀阀降压后返回蒸发器，完成循环[11]。

2 技改方案及措施

按上述技术方案设计原理，技改后尾气处理工艺流程如图2所示。对系统洗涤工艺流程进行优化，强化洗涤效果，降低颗粒物，减少凝结核的

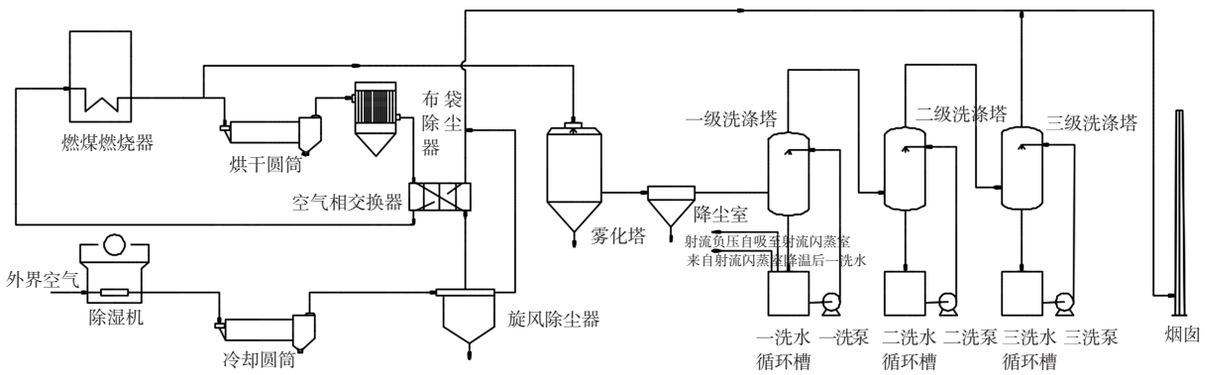

图2　技改后尾气处理工艺流程

Fig. 2　Process flow of tail gas treatment after technological transformation

量，消除烟羽的形成条件，同时采用降温工艺优化，改变烟气状态以达到烟羽脱白的效果。同时利用余热回收技术和热交换技术对系统热源进行回收利用，以达到节能减排降碳的效果。

2.1　洗涤工艺流程优化

1）　雾化洗涤前段重力沉降设备改造

重力沉降设备采用锁气阀下料模式，极大地减少下料过程外界空气进入增大气体洗涤负荷，同时对沉降设备采取保温措施，既减缓磷酸二氢钙因温度降低吸潮造成管道和下料通道堵塞，同时又减少环境逸出热损失，为热源的回收利用创造条件。

2）　雾化一级洗涤塔改造

雾化一级洗涤塔采用低气速、强喷淋的洗涤塔，通过扩大洗涤塔直径和增加洗涤高度，极大地降低雾化尾气的气流速度，延长洗涤气体停留时间。同时采用高效空塔喷淋技术[12]，对喷淋洗涤水采用双层独立喷淋的给水方式，极大地保证了喷淋洗水量。每层由原来的4组喷头改为8组独立喷头，使得喷淋水幕化，强化洗涤效果。同时洗涤喷头由原来的圆孔喷头改为自主设计的32 m^3/h螺旋雾化喷头，经此喷头喷淋出的洗水呈塔内全覆盖水幕状。

洗涤泵选用低扬程、大流量的循环洗涤泵，使得喷淋水在塔内自然形成搅动状态，有利于尾气中的磷酸二氢钙进入液相而不易造成结垢沉积，避免进一步造成洗涤泵和管线堵塞而影响洗涤效果。

3）　一洗水闪蒸降温改造

将一级洗涤水收集槽改为高低位差两个收集槽，如图3所示，经洗涤塔洗涤后温度上升的洗水

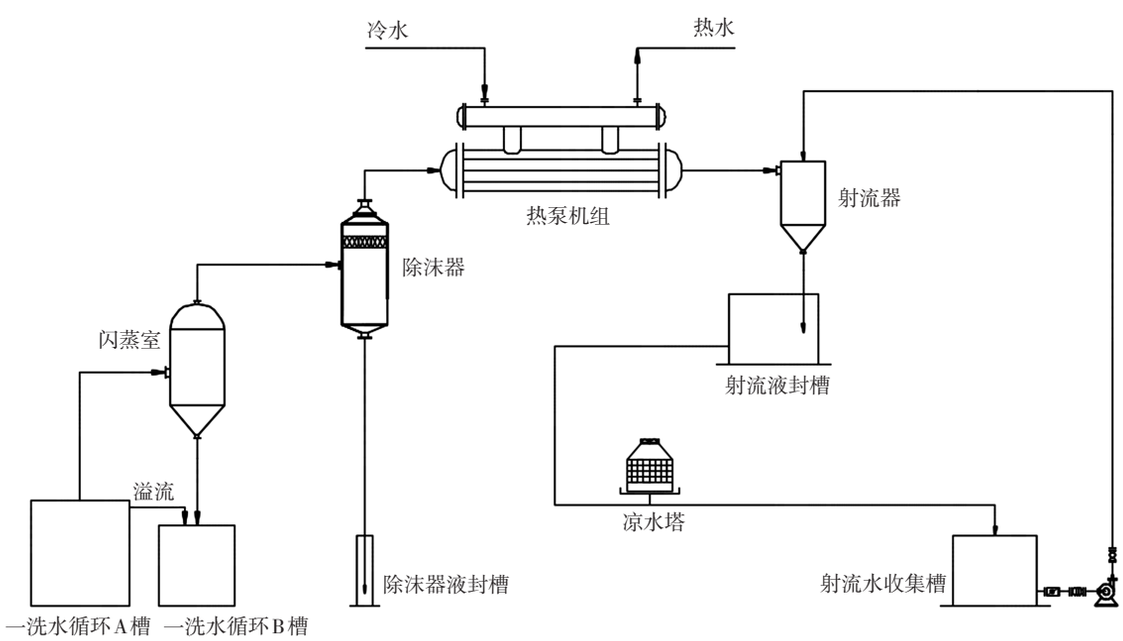

图3　一洗水闪蒸冷却与余热回收系统流程

Fig. 3　Flow of one wash water flash cooling and waste heat recovery system

收集到高位收集槽（A槽），A槽洗水通过闪蒸上水管线进入闪蒸塔，在负压条件下，经洗涤后的高温洗涤水进入沸腾状态，形成大量蒸汽，并带走大量的热，一级洗涤水温度急剧下降，经闪蒸降温的低温一洗水通过冷却回水管线溢流进入低位收集槽（B槽）。A槽与B槽安装高度相差0.5 m，利用连通器原理实现A槽–闪蒸室–B槽自然流动，B槽与2台循环泵相连接，循环泵将B槽冷却洗水再次喷淋至洗涤塔，如此建立循环。因洗水温度不再上升，不需要再进行补水降温的操作，随着洗水循环，进入洗水中的磷酸二氢钙粉末量逐步增多，洗水达到一定浓度后，返回磷酸二氢钙中和系统回用，不再外置洗水至废水处理系统，可实现自身水平衡。

经闪蒸降温洗涤水由55 ℃下降至50 ℃，经一级洗涤塔洗涤后尾气温度可降低至50 ℃（较技改前下降10 ℃），再经二级、三级洗涤塔和除沫器后，排烟温度已低于40 ℃，极大地降低了尾气中水蒸气含量，破解了白色烟羽生成的热力学临界条件，实现了尾气脱白。

2.2 低位热能的高效利用

1） 热泵机组低位热能转化

如图3所示，闪蒸室生成的蒸汽进入热泵机组，通过热泵技术[13]将低位热能转化成高位热能[14]，替代原蒸汽对磷酸装置磷石膏洗涤水进行加热。经热泵后的少量蒸汽、不凝性气体及冷凝水经除沫器除沫后进入射流器，射流器采用射流泵提供动力，形成闪蒸系统真空。热泵机组采用氟利昂作为冷媒通过换热器冷却闪蒸蒸汽吸收蒸汽热量，形成氟利昂蒸汽，低温的氟利昂蒸汽通过压缩机加压，形成高温氟利昂蒸汽，高温氟利昂蒸汽采用多级换热器梯度换热的方式对磷石膏洗涤水进行多级分段加热，此种方法高效利用了氟利昂热量，实现热量的转移。

2） 热源选择应用对比

与雾化尾气直接采用热泵转换热相比，该方法系统运行周期更长。采用热泵转换热时，由于雾化尾气中含大量磷酸二氢钙颗粒物，当雾化尾气冷凝后，水与磷酸二氢钙颗粒更易形成浆料，在重力沉积作用下在列管内壁结垢，造成列管堵塞。热泵机组换热时，由于磷酸二氢钙溶液溶质不易挥发的特点，洗涤水在闪蒸过程中产生的蒸汽几乎全为水蒸气，不带盐分的水蒸气冷凝后对列管结垢影响极小，换热器可实现长周期运行。

2.3 低湿冷却尾气的高效利用

为保证产品在冷却过程中不吸湿，采用外界大气作为冷却介质，经冷却除湿机处理后，空气温度和绝对含湿量极大下降，形成低湿冷空气。低湿冷空气进入冷却回转圆筒与产品进行热交换，过程中除热传递外，未发生任何反应，经换热后，部分粉尘进入冷却尾气，粉尘经布袋除尘器过滤后，冷却尾气依然是洁净空气且绝对含湿量低于大气，由于低湿冷空气与产品进行热交换后，温度会上升至在50 ℃左右，成为低湿热空气。低湿热空气与大气相比除湿度外其余成分未发生任何变化，可作为助燃空气。低湿热空气湿度低、温度高，会减少煤的吸湿性，提升了有效热能输出。高温助燃气体自带热焓大，可降低因升温空气而造成的煤耗。但此时50 ℃的低湿热空气作为助燃气体温度依旧偏低，可用二次烘干尾气加热。

二次烘干尾气来自燃煤燃烧器，空气中的氧气含量低，不能作为助燃气体再次使用，但经布袋除尘器除尘后，洁净度较高，排空温度90 ~ 100 ℃，温度较高。增设1台气气换热器[15]，低湿热空气与二次烘干尾气在气气热交换器中进行换热，再次提升冷却尾气温度，二次升温的冷却尾气通过引风机进入燃煤燃烧器作为助燃空气。由于燃煤燃烧器需用的助燃空气量仅为冷却尾气量的20%，绝大部分冷却尾气依旧采用排空，只有少量冷却气体进气气热交换器进行换热，极大地保证进燃煤炉助燃空气的初始温度，降低了二次烘干尾气的排气温度。同时在进燃煤炉助燃风管设置自动调节阀，通过温度、相对湿度、风量的监控和智能计算实现最优空燃比控制，保证燃烧充分和热量输出最优。

3 实施效果及效益

3.1 直接经济效益

（1）技改实施后，磷酸二氢钙装置每小时为磷酸装置提供80 ℃洗水15 m^3，折合蒸汽2.5 t/h，蒸汽价格按160元/t计算，年收益288万元。

（2）技改实施后，经统计磷酸二氢钙装置每吨产品标准煤耗下降7 kg，CO_2减排量达20 kg。折算产品成本下降7元/t，装置全年生产能力6万t，直接降低成本42万元/a。

3.2 环保效益

经技改后，磷酸二氢钙装置排气筒减排总气量5 000 m^3/h，较技改前下降7%，全年减少CO_2排放1 230 t。颗粒物、总F、NO_x等均达《工业炉窑主要大气污染物排放标准》，排烟温度低于45 ℃，烟羽脱白效果明显。

4　结束语

通过对磷酸二氢钙装置的技改，创新提出“能量梯级回收-冷凝相变脱白”集成技术路线：①基于闪蒸降温原理构建尾气余热多级提效系统，实现蒸汽潜热回收与显热品位升级；②开发冷却气闭环循环工艺，将传统外排的低温余热回用至烘干环节，突破热能“高放低用”困局；③通过冷凝再热耦合控制，破解白色烟羽生成的热力学临界条件。工程实践表明，该技术体系在实现尾气脱白的同时可深度挖掘工艺过程的热潜力，为无机盐行业提供兼具减排降耗与经济可行性的解决方案。

低位热源回收技术的广泛应用仍面临一些挑战，如初始投资成本高、系统复杂以及不同行业间的技术适配性问题。未来的研究应进一步探索低成本、高效率的余热回收技术，并结合智能化控制系统，提升余热回收的自动化水平和运行稳定性。同时，政策支持和市场机制的完善也将为余热回收技术的推广提供重要推动力。

总之，低位热源回收作为节能降耗的重要手段，将在全球能源转型和碳中和目标的实现中发挥关键作用。笔者期待通过技术创新和多学科协作，推动余热回收技术在更广泛领域的应用，为实现绿色低碳发展贡献力量。

[参考文献]

[1] 周斌.饲料级磷酸二氢钙生产新工艺[J].饲料博览,2003(3):22-23.

[2] 莫桂英,贾振宇.湿法磷酸干法直接生产饲料级磷酸二氢钙(MCP)中试试验研究[J]. 湖北化工,2002(6):42-43.
MO G Y, JIA Z Y. Middle—Experimental Study on Production of Feed—Grade MCP Directly by Dry Process of Wet—Process Phosphoric Acid [J].Hubei Chemical Industry, 2002 (6): 42-43.

[3] 胡震,于海莲.利用磷矿制备饲料添加剂磷酸二氢钙[J]. 化工矿物与加工,2011,40(9):3-5
HU Z, YU H L. Preparation of feed-grade monocalcium phosphate with phosphate rock [J]. Industrial Minerals & Processing,2011,40(9):3-5.

[4] 唐安江,张林生.低浓度泥磷磷酸生产饲料添加剂磷酸二氢钙的试验[J]. 贵州化工,1999(1):20-22,37.
TANG A J, ZHANG L S. Preparation of Feed Calcium Dihydrogen Phosphate fromSludge Phosphuric Acid[J]. Guizhou Chemical Industry, 1999 (1): 20-22,37.

[5] 黄隐华,张允湘.湿法磷酸净化制备饲料级磷酸二氢钙新工艺[J]. 西南大学学报(自然科学版),2007(7):54-58.
HUANG Y H, ZHANG Y X. New Technology of Preparation of Feed-Grade MCP by Purifying Wet-Process Phosphoric Acid[J]. Journal of Southwest University(Natural Science Edition), 2007(7):54-58.

[6] 姚增权.湿烟气的抬升与凝结[J]. 国际电力,2003(1):42-46.
YAO Z Q. The Rise and Condensation of a Moist Plume [J]. International Electric Power for China,2003(1):42-46.

[7] 张富兵.湿式静电除尘器在制酸尾气治理中的应用[J]. 节能与环保,2022(8):84-85.
ZHANG F B. Application of wet electrostatic precipitator in treatment of acid-making tail gas [J]. Energy Conservation & Environmental Protection, 2022 (8): 84-85.

[8] 马维雄,王晓丹.化学协同除磷效果及对活性污泥性能的影响分析[J]. 清洗世界,2024,40(4):28-30.

[9] 陈瑶姬,戴豪波,邓丽萍.“喷淋洗涤+湿式电除尘技术”在定型机废气治理中的性能研究[J]. 广东化工,2020,47(17):137-139.
CHEN Y J, DAI H B, DENG L P. Performance Research of “Spray Washing + WESP” Technology in Waste Gas Treatment of Setting Machine[J].Guangdong Chemical Industry, 2020, 47(17):137-139.

[10] 杨海波.烟羽的形成机理及脱白技术分析[J]. 电子质量,2021(3):18-21.
YANG H B. Analysis and Research on the Formation Mechanism of Tobacco Plume and De-whiteningTechnology[J]. Electronics Quality,2021(3):18-21.

[11] 高军,马光宇,刘常鹏,等.工业低温循环水余热回收技术的开发与应用[C]//河北省金属学会.2019年炼钢生产新工艺、新技术、新产品研讨会论文集.无锡:[出版者不详],2019:463-467.

[12] 魏光.高效空塔喷淋技术在烟气脱硫装置中的应用[J]. 化学工程与装备,2011(7):230-233.

[13] 叶露阳,董梁.热泵技术在化工生产低位热能回收中的研究应用[J]. 化工设计通讯,2024,50(2):99-100,106.
YE L Y, DONG L. Research and Application of Heat Pump Technology in Low level Heat Recovery in Chemical Production [J]. Chemical Engineering Design Communications, 2024, 50(2): 99-100,106.

[14] 肖升,赵江华.二水湿法磷酸反应工序低位热能回收利用[J]. 磷肥与复肥,2023,38(9):25-27.
XIAO S, ZHAO J H. Recovery and utilization of low heat energy in dihydrate wet-process phosphoric acid reaction process [J].Phosphate & Compound Fertilizer, 2023, 38(9): 25-27.

[15] 叶茂,杨志忠,晏顺娟,等.SCR烟气脱硝尿素热解用炉内气气换热器技术研究[J].东方电气评论,2015,29(2):76-82.
YE M, YANG Z Z, YAN S J, et al. Research on the Flue Gas-air Heat Exchanger ofUrea Pyrogenation for SCR Flue Gas De-NOx Technology[J].Dongfang Electric Review,2015,29(2):76-82.