

300 kt/a 湿法磷酸生产节能减排措施

刘正东¹, 李建闻¹, 朱桂华²

(1. 云南磷化集团有限公司, 云南 晋宁 650600;
2. 云南磷化集团有限公司磷资源开发利用工程技术研究分公司, 云南 晋宁 650600)

[摘要] 针对云南磷化集团有限公司 300 kt/a 湿法磷酸生产中存在的高温尾气余热未利用、循环水泵能耗过高及冷凝水热值浪费等问题, 提出系统性节能减排措施。通过回收反应闪冷尾气 (78 °C)、浓缩冷凝液 (105 °C) 和脱氟尾气余热, 年回收热能达 6.37×10^{11} kJ, 减少蒸汽消耗 28.97 万 t; 采用永磁调速技术对循环水泵进行节能改造, 实现节电率 42.7%; 优化蒸汽冷凝水回用系统, 年回收高温冷凝水 79.2 万 t。实施后年节约标煤 2.47 万 t, 减少碳排放 1.65 万 t。研究证明, 通过工艺优化、热集成利用和设备节能改造的协同实施, 可显著提升湿法磷酸生产的能源利用效率, 为磷化工行业绿色低碳发展提供实践范例。

[关键词] 湿法磷酸; 节能减排; 余热回收; 循环水泵节能; 冷凝水回用; 热集成优化

[中图分类号] TQ126.3⁺5 **[文献标志码]** B **[文章编号]** 2097-4566 (2025) 08-0094-05

Energy-saving and emission reduction measures for 300 kt/a wet-process phosphoric acid production

LIU Zhengdong, LI Jianwen, ZHU Guihua

(1. Yunnan Phosphate Group Co., Ltd., Jinning 650600, China; 2. Phosphorus Resources Development and Utilization Engineering Technology Research Branch of Yunnan Phosphate Group Co., Ltd., Jinning 650600, China)

Abstract: Taking the 300 kt/a wet-process phosphoric acid production plant of Yunnan Phosphate Group Co., Ltd. as the research object, systematic energy saving and emission reduction measures are proposed to address the problems of high temperature tail gas waste heat not being utilized, high energy consumption of circulating water pumps, and waste of condensate heat value in traditional wet-process phosphoric acid production. By recycling reaction flash cooled tail gas (78 °C), concentrated condensate (105 °C), and waste heat from defluorination tail gas, the annual heat recovery reaches 6.37×10^{11} kJ, reducing steam consumption by 289 700 tons; The permanent magnet speed regulation technology is adopted for energy-saving renovation of circulating water pumps, achieving a power saving rate of 42.7%; The steam condensate reuse system is optimized, with an annual recovery of 792 000 tons of high-temperature condensate. After implementation, 24 700 tons of standard coal will be saved annually, and 16 500 tons of carbon emissions will be reduced. Research has shown that the coordinated implementation of process optimization, thermal integration utilization and equipment energy-saving transformation can significantly improve the energy utilization efficiency of wet-process phosphoric acid production, providing a practical example for the green and low-carbon development of the phosphorus chemical industry.

Key words: wet-process phosphoric acid; energy-saving and emission reduction; waste heat recovery; energy-saving of circulating water pump; reuse of condensate water; thermal integration optimization

0 引言

磷酸作为一种关键的基础化工原料, 在众多领域有着广泛且不可或缺的应用。磷酸是生产高效磷复肥的核心原料, 如磷酸铵、重过磷酸钙、磷酸二氢钾等, 这些肥料对于提高农作物产量、改善土壤肥力起着关键作用, 直接关系到全球粮食安全与农

业的可持续发展; 磷酸还可用于制造各种工业助剂, 助力工业生产的顺利进行; 在食品行业, 磷酸作为食品添加剂, 保障了食品的品质与口感; 在医

[收稿日期] 2024-07-10; **[修回日期]** 2025-04-24

[作者简介] 刘正东 (1969-), 男, 云南江川人, 高级工程师, 主要从事化工生产工艺管理和工程建设管理工作。

药行业，磷酸参与众多药品的合成，为人类健康保驾护航。

磷酸的生产工艺主要分为热法和湿法。热法工艺将磷矿石高温还原，制得的磷酸产品为热法磷酸，这种磷酸质量较好，通常用于制造磷酸盐产品、食品级磷酸盐及电子级磷酸。湿法磷酸是用各种酸与磷矿反应生产得到，含有较多的杂质，产品质量相对较差，通常用来生产肥料，若要进行更深层次的利用，需对湿法磷酸进行脱杂净化，净化后磷酸品质提升，可用来制造饲料级、工业级、食品级磷酸盐产品。湿法工艺凭借原料来源广泛、设备简单、生产能耗低、成本低以及污染小等显著优势，在磷酸生产中占据主导地位。在湿法磷酸生产过程中，硫酸与磷矿反应会释放出大量热能，每吨磷矿石与 $w(\text{H}_2\text{SO}_4)$ 98%硫酸反应，放出的热量高达 908×10^3 kJ。然而，在传统的湿法磷酸生产中，这些热量往往未得到充分利用，造成了极大的能源浪费。

随着全球对能源问题的关注度日益提高，以及环保要求愈发严格，湿法磷酸生产中的热量再利用与节能成为了行业发展的关键方向。对生产过程中的余热进行有效回收和再利用，首先能够显著降低生产成本。通过将余热用于预热原料、产生蒸汽供其他生产环节使用等方式，可以减少对外部能源的依赖，降低能源采购成本。以某湿法磷酸生产企业为例，实施热量再利用措施后，每年可节省大量的燃料费用，有效提升了企业的经济效益。其次，有助于提升企业的竞争力。在市场竞争日益激烈的当下，成本降低意味着产品价格更具优势，企业能够以更低的价格提供产品，从而吸引更多客户，扩大市场份额。同时，高效的能源利用也体现了企业的技术实力和环保责任感，有助于提升企业的品牌形象。再者，从行业可持续发展的角度来看，热量再利用与节能符合全球绿色发展的趋势，能够减少能源消耗和温室气体排放，降低对环境的负面影响，推动整个磷化工行业朝着绿色、低碳、可持续的方向发展，对于实现资源高效利用和生态环境保护具有重要意义。因此，如何在保证生产效率的同时实现节能减排，已成为磷酸生产企业面临的重要课题。

云南磷化集团有限公司（简称云南磷化集团）磷化工事业部建设有80万t/a硫酸、30万t/a磷酸和50万t/a饲料级钙盐装置。其中，磷酸生产装置在传统工艺的基础上增加了脱重金属（简称脱重）、

压滤和脱氟等工序，生产线延长，装置数量增加。与传统的磷酸装置相比有着自身的特点。

笔者以云南磷化集团的磷酸生产为例，探讨湿法磷酸生产中的节能减排措施及其效果。

1 云南磷化集团磷酸装置的特点

云南磷化集团磷酸装置的主要产品是脱氟磷酸，可直接用于生产饲料级磷酸钙盐，在传统的反应、过滤、浓缩基础上还增加了磷酸的脱重、压滤和脱氟等装置（工艺流程见图1）。其中反应生产工艺为二水法硫酸生产工艺，设计生产能力300 kt/a，反应槽采用9格方槽^[1]；过滤采用转台真空过滤机，由两个同样过滤面积的过滤机系列组成；浓缩共3个系列，每个系列设计产能为10万t/a，生产工艺为强制循环闪蒸间接加热浓缩工艺；脱重共一个系列，在酸中加入硫化钠反应生成硫化物沉淀而除去重金属；脱氟采用空气气提脱氟技术，由4个脱氟塔组成。

二水法工艺反应、过滤得到 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 26%左右的稀磷酸，稀磷酸经陈化、澄清，上部清酸送入浓缩装置进行浓度提升，浓缩采用分段浓缩工艺，第一段将酸浓提升到 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 41%左右，进入中间酸槽澄清分离，上部清酸送到脱重反应槽进行脱重反应，脱重酸经澄清后进行压滤处理，压滤得到 $w(\text{固}) < 1\%$ 的清酸，送到二段浓缩进行提浓，将酸浓提升到 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 48%左右后，在酸中加入脱氟剂，进行高温气提脱氟^[2]，得到合格的饲料磷酸，作为生产饲料磷酸钙盐的原料酸使用。

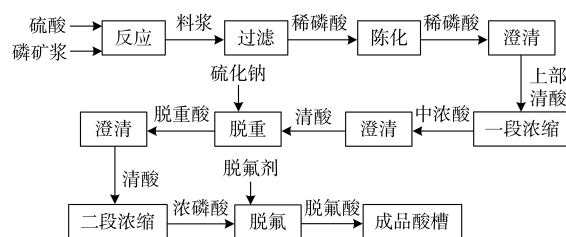


图1 云南磷化集团磷酸生产工艺流程

Fig. 1 Process flow of phosphoric acid production in Yunnan Phosphate Group Co., Ltd.

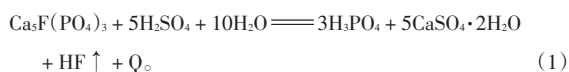
2 磷酸生产中热气体的来源及应用

在反应、浓缩和脱氟生产过程中，都有不同温度的热气体产生，合理利用热气体所带出的部分热量，可以降低磷酸生产的蒸汽消耗。

2.1 热气体的来源

湿法磷酸生产工艺为二水法硫酸工艺，硫酸和磷矿浆在反应槽中进行反应（见式（1）），反应过程中产生大量含氟热气体，同时因反应槽没有完全

密封,在风机的抽吸作用下有空气进入含氟气体中,反应槽中的混合气体称为反应尾气。



反应尾气温度达到70℃左右,经三级洗涤后尾气温度降到30℃左右达标排放。经过洗涤,尾气中的氟和热量大部分进入洗涤液中,第一级洗涤液作为氟硅酸产品使用,尾气中的氟得到回收利用,后两级的洗涤液作为过滤器落渣斗冲洗水使用,渣斗冲洗水没有温度控制要求。因此反应尾气热能没有得到有效利用。

硫酸分解磷矿的反应为放热反应,加上硫酸在反应槽中稀释产生大量热量,硫酸稀释热大部分进入液相中,这部分稀释热和反应热会使反应料浆温度上升,超过适宜的反应控制温度。为了控制反应料浆的温度稳定,将反应料浆通过真空系统的闪冷器,料浆在闪冷器中过热汽化,汽化使料浆温度下降至沸点,从而可以稳定控制反应槽的料浆温度,闪冷过程产生的大量热的水蒸气称为闪冷尾气。

稀磷酸在浓缩工序的石墨换热器中被蒸汽间接加热,加热的循环磷酸进入闪蒸室中,闪蒸产生大量水蒸气,含氟水蒸气称为浓缩尾气,浓缩尾气经过两级洗涤得到氟硅酸产品,洗涤吸收氟后的浓缩尾气温度略有降低,但仍含有大量的水蒸气,由于尾气含热量大,所需冷却水量大,装置无法进行平衡利用,最终尾气在冷凝器中通过酸性循环水降温冷凝进入循环水中,循环水在循环水站与空气换热后水温降低,热量被空气带走。这部分尾气带出的热量没有得到再利用。

磷酸脱氟采用高温气提脱氟技术,进入脱氟装置的空气量大,与高温磷酸逆流接触过程中产生传热传质,空气变成高温高湿含氟尾气,该尾气中含有大量的热量。

2.2 热气体的热量利用

2.2.1 闪冷尾气

闪冷尾气温度78℃,主要是水蒸气,经两级逆流洗涤后用大量酸性水冷凝回收,不凝性气体经真空泵抽排以保持系统真空度在控制范围内,从而保持萃取槽中料浆温度稳定。洗涤尾气的洗涤液温度大幅度上升达到70℃以上。因过滤器冲洗水的温度控制在约80℃,将洗涤液用作过滤器冲洗水,可以明显减少冲洗水的加热蒸汽用量。

闪冷洗涤系统每小时补水量150 m³/h,水温25℃,洗涤气体后水温上升到73℃,通过洗涤每小

时回收的热量为150 × 1 000 × (73-25) × 4.18 kJ/h=30 096 000 kJ/h,可以减少加热蒸汽量13.68 t/h,减少标准煤消耗1 026.9 kg/h,减少碳排放688.0 kg/h^[3]。

闪冷尾气每小时可带出热量112 077 700 kJ^[4],通过洗涤回收气体所带热量的比例为26.85%。

2.2.2 脱氟尾气

湿法磷酸脱氟采用空气气提脱氟技术,将脱氟剂加入循环磷酸中,循环磷酸经石墨换热器加热到100℃后经喷头喷洒于脱氟塔中,与脱氟塔下部进来的自然空气逆流接触,酸中的氟与脱氟剂反应生成SiF₄逸出到空气中被空气带出,含氟高温尾气经两级洗涤吸收气体中的氟,温度降到62℃,再经第三级洗涤降温后排空,第三级洗涤补入大量冷却水进行循环洗涤,洗涤液吸收热量温度升高到50℃,送到过滤系统作为磷石膏的最后一级洗涤水,从而减少了洗涤水的蒸汽消耗量。

三洗塔每小时补充水量为100 m³,水温为25℃,洗涤升温回收热量为:100 × 1 000 × (50-25) × 4.18 kJ/h=10 450 000 kJ/h,进三洗塔的尾气所带热量52 339 000 kJ/h,热量回收率达到20%,减少石膏洗涤水加热蒸汽用量4.75 t/h,减少标准煤消耗356.6 kg/h,减少碳排放238.9 kg/h。

3 循环水泵的节能技改

通过生产实践,证实磷酸配套的酸性循环水泵设计时余量过大,循环水泵扬程为63 m,扬程过剩,正常运行须减小出口阀开度,才能让泵的输送水量在合适范围内,因此对循环水泵进行节能改造^[5],可降低运行电耗,提高能量利用率。

磷酸生产配套的酸性循环水站,设计循环水处理能力10 000 m³/h,配用4台循环水泵,3用1备,泵的流量为3 340 m³/h,扬程63 m,配用电机功率800 kW,电机采用高压电机。泵的输送流量采用出口阀门手动调节,由于设计时泵配置能力余量过大,循环泵的流量过大,需通过泵出口阀门开度大小调节水量大小,造成节流损失,循环水泵部分电能消耗成为无用功而损失掉。

利用离心泵的流量特性,泵的转速与流量成比例变化。因此可通过技改对泵进行转速调节来实现输送量的调节,避免循环水输送过程中的无用功损失。

泵的转速常用调节方式为变频调节、永磁调速、液力耦合器调速等。循环水泵由于电机功率较大,配置的是高压电机。采用变频调速须使用高压变频器,高压变频器费用高、占地大,后期运行维

护费用相对较高。而液力耦合器需配有冷油装置,且节能效果相对较差^[6]。永磁调速费用与高压变频器的费用相当,但占地面积小,只需对泵基础稍加改造即可,调节方便,运行可靠,维护费用相对较低,同时电机与泵间对中要求不高,可实现软启动^[7]。

经过比较,选用永磁调速技术进行循环水泵的转速调节,通过调节导体转子与永磁体间磁场耦合面积,实现对泵转速的控制来调节生产系统用水量^[8]。泵启用时将泵出口阀全开,避免阀门造成的节流损耗。

技改后,在保持同样输送水量的条件下,泵的运行电流明显下降,小时用电量从改造前的2 372 kW·h下降到1 359 kW·h,节电效率达到42.7%,节能效果显著。每小时可节省电能消耗1 013 kW·h,每吨折百浓磷酸电耗下降24 kW·h,减少标煤消耗405.2 kg,减少碳排放275.5 kg。

4 冷凝水的回收利用^[9]

磷酸浓缩装置配置3个系列,脱氟2个系列,共配置有5台石墨换热器,每小时使用蒸汽110 t,蒸汽在换热器中与磷酸换热后冷凝成水,冷凝水温度105℃,冷凝液回收后送硫酸除氧器使用,与脱盐站的成品脱盐水温度相比高出80℃,同样的冷凝水比脱盐水多带入除氧器热量:110×1 000×80×4.18 kJ/h=36 784 000 kJ/h,可减少硫酸除氧器的加热蒸汽16.72 t/h^[10],减少标准煤消耗1 255.1 kg/h,减少碳排放840.9 kg/h。

5 进一步提高热能利用的措施

5.1 优化反应硫酸加入点,增加闪冷洗涤水量,提升反应热能利用率

硫酸原加入点是萃取槽的2#和3#室,在硫酸与磷矿浆反应前,需将硫酸与返酸通过混合三通在反应槽上部空间提前稀释,稀释后的稀硫酸与磷矿浆反应。硫酸稀释过程中产生大量的稀释热(705.7 kJ/kg)^[11],硫酸稀释热有20%左右进入反应尾气中,其余进入磷酸料浆中。

在原有硫酸加入条件下,闪冷尾气洗涤系统补水最大只能达到150 m³/h,而过滤冲盘水量需230 m³/h,不满足冲盘水用量的需求。而增加补水量则洗涤液温度下降,不利于减少冲盘水蒸汽用量。若闪冷尾气中所带热量增加,在保持闪冷洗涤液温度不降低条件下,则可以提高闪冷系统洗涤补水量。

在保证反应指标控制稳定的基础上,通过技

改,将60%以上的硫酸调整加入到闪冷器进口处,硫酸在闪冷器中被磷酸料浆稀释,这部分稀释热进入闪冷尾气中,闪冷尾气所带热量增加,闪冷尾气总热量每小时增加到122 749 266.9 kJ以上,随硫酸调整加入量而有一定变化。这样可使反应尾气中的总热量相应减少。在保持闪冷洗涤水温稳定在73℃基础上,可以加大闪冷系统洗涤水补加量,洗涤补水量每小时可增加40 m³,由此可多回收热量8 025 600 kJ/h,减少冲盘水加热蒸汽用量3.65 t/h,同时调整硫酸加入点后还可以减少萃取槽的泡沫量,减少或取消消泡剂的使用。

5.2 提高脱氟尾气的热利用率

脱氟洗涤补水量100 m³/h时,脱氟尾气所带热量的热利用率只有20%,加大洗涤补水量,可以明显提高热利用率。通过系统水平衡调整,可以将脱氟洗涤补水量增加到130 m³/h,多出的30 m³/h水作为磷石膏洗涤净化过滤机洗涤水加以利用,从而增加热能利用3 135 000 kJ/h,减少蒸汽消耗1.43 t/h,脱氟尾气所带热量利用率提升6%。

6 技术经济分析

通过以上节能措施的综合运用,按装置每年运行7 200 h计算,每年可减少蒸汽使用量28.97万t,减少电能消耗729.36万kW·h,减少标准煤消耗2.47万t,减少碳排放1.65万t,节能减排效果显著(见表1)。

表1 节能收益明细

Table 1 Detailed statement of energy saving benefits

名称	回收热量/ (kJ·h ⁻¹)	节约 蒸汽量/ (t·h ⁻¹)	节约 标煤准量/ (kg·h ⁻¹)	碳减排量/ (kg·h ⁻¹)
闪冷尾气热回收	38 121 600	17.33	1 300.7	871.5
脱氟尾气热回收	13 585 000	6.18	463.6	310.6
冷凝水热回收	36 784 000	16.72	1 255.1	840.9
循环水泵节电	1 013 ^①		405.2	275.5

注:①节电量,单位为kW·h/h。

7 结语

磷酸生产过程中产生的废热点多量大,在水平衡允许的条件下,通过洗涤冷却使尾气降温并达标排放,洗涤液吸收尾气中的热量后温度升高,对洗涤液进行合理利用,可相应减少磷酸生产的蒸汽消耗量,降低碳排放量。浓缩和脱氟过程中产生的蒸汽冷凝液热值较高,回收替代硫酸脱盐水使用,不仅可以减少硫酸装置的除氧器蒸汽用量,还可以大幅度降低硫酸脱盐水装置负荷,减少脱盐水用量,降低工艺水消耗。对装置动设备进行核算,对设计

余量大的高功率离心泵或风机,将用出口阀或风机进口格栅调节流量改变为调节泵或风机的电机转速来进行调节,减少电能损失,节能效果明显。做好磷酸生产用水的串级使用,有利于节能减排。

展望未来,湿法磷酸生产在热量再利用和节能技术方面有着广阔的发展前景。在技术创新方面,预计会出现更加高效的余热回收技术和设备。随着材料科学的不断进步,新型的高效导热材料将被应用于余热回收设备中,进一步提高换热器和废热锅炉的换热效率,降低热量损失。例如,研发具有更高导热系数和耐腐蚀性能的纳米材料,用于制造换热器的换热管,可使热量传递效率提高30%~50%。同时,智能化的余热回收系统将成为发展趋势,通过传感器和自动化控制系统,实时监测和调节余热回收过程,实现余热的精准回收和高效利用。

在工艺优化方面,将更加注重生产工艺的一体化和协同化。进一步完善半水法、半水-二水法等高效反应工艺,使其在不同原料和生产条件下都能稳定运行,提高产品质量和生产效率。同时,加强反应过程与其他生产环节的耦合,如将反应热直接用于磷酸的深度加工,减少中间环节的能量损耗。例如,探索将反应热用于磷酸的净化和精制过程,实现从磷矿到高品质磷酸产品的一体化生产,提高能源利用效率和产品附加值。

此外,随着全球对可持续发展的关注度不断提高,湿法磷酸生产中的热量再利用和节能将与环境保护更加紧密地结合。在余热回收过程中,注重减少对环境的影响,开发环保型的余热回收技术和设备。同时,加强对磷石膏等副产物的综合利用,将其转化为有价值的产品,实现资源的循环利用,减少废弃物的排放。

深入研究不同生产工艺和原料条件下的热量利用规律,为工艺优化提供理论支持。加强对能源管理和控制技术的研究,提高能源管理的精细化水平,实现能源的高效利用和可持续发展。

[参考文献]

- [1] 刘红.大型二水湿法磷酸国产化反应槽技术优化及应用[J].化肥工业,2013,40(3):19-22.
LIU H. Optimization and Application of Technology of Large Domestic Dihydrate Wet-Process Phosphoric Acid Reactor [J]. Chemical Fertilizer Industry, 2013, 40(3): 19-22.
- [2] 刘正东,金伟潮,刘庆,等.湿法磷酸高温脱氟装置材料的选择与应用[J].磷肥与复肥,2023,38(10):43-45.
LIU Z D, JIN W C, LIU Q, et al. Selection and application of materials for high temperature defluorination unit of wet-process phosphoric acid [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2023, 38(10): 43-45.
- [3] 刘正东,周鑫,姜威.800 kt/a 硫黄制酸装置热能利用分析[J].硫酸工业,2022(4):25-28.
LIU Z D, ZHOU X, JIANG W. Analysis on heat energy utilization of 800 kt/a of sulphur-burning sulphuric acid plant [J]. Sulphuric Acid Industry, 2022(4): 25-28.
- [4] 姚永发,方天翰.磷酸磷铵重钙技术与设计手册[M].北京:化学工业出版社,1997:227-244.
- [5] 裴毅,田莉,杨晓珍,等.转速变化对离心泵性能的影响[J].排灌机械,2007,25(4):9-13.
PEI Y, TIAN L, YANG X Z, et al. Influence of rotating speed change to the performance of centrifugal pump [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2007, 25(4): 9-13.
- [6] 段晓伟,王向东.大功率风机水泵调速节能方法对比分析[J].节能,2012,31(5):28-31.
- [7] 郭伟.永磁调速技术在节能改造中的应用研究[J].电源技术应用,2015,18(8):6-11.
GUO W. Application of Permanent Magnetic Speed Control Technology in Energy Saving [J]. Power Supply Technologies and Applications, 2015, 18(8): 6-11.
- [8] 马玉顺,吴明,匡俊,等.永磁调速和变频调速技术对比研究[J].黑龙江科学,2017,8(8):63-67.
MA Y S, WU M, KUANG J, et al. Comparative study of permanent magnet speed regulation technology and variable frequency speed regulation technology [J]. Heilongjiang Science, 2017, 8(8): 63-67.
- [9] 孙菊萍.湿法磷酸装置的节能降耗途径[J].硫磷设计与粉体工程,2010(3):28-29,55.
- [10] 谭智申,张立德,侯立.蒸汽锅炉冷凝水回收利用与效益分析[J].节能技术,2016,34(4):349-352.
TAN Z S, ZHANG L D, HOU L. Recycling Usage and Benefit Analysis of Steam Boiler Condensate Water [J]. Energy Conservation Technology, 2016, 34(4): 349-352.
- [11] 蔡芝林.硫酸热效应的计算[J].硫酸工业,1981(2):13-14.