

湿法磷酸闪冷系统余热回收利用

刘文凯

(云南云天化红磷化工有限公司, 云南 开远 661699)

[摘要] 针对湿法磷酸生产中因磷矿中钾、钠含量升高导致的过滤系统结垢加剧、蒸汽消耗增加等问题, 通过对湿法磷酸闪冷系统进行技术改造与管路优化, 实现了闪冷余热的高效回收与利用。改造措施包括优化预冷凝器进气方式、提高气液分离高度、恢复尾气洗涤循环泵、调整液封槽配管以及优化过滤系统蒸汽使用等。结果表明, 改造后预冷凝器液封槽水温稳定在70℃左右, 循环热水用于滤布冲洗, 显著降低了蒸汽消耗量。2019年与2020年对比数据显示, 吨磷酸蒸汽消耗降低15 kg, 装置真空度提升至42 kPa, 反应料浆温度平均降低2℃, 有效缓解了结垢问题, 提高了系统运行稳定性和能源利用效率。

[关键词] 湿法磷酸; 闪冷系统; 余热回收; 结垢控制; 节能改造; 蒸汽消耗; 热量

[中图分类号] TQ126.3⁵ **[文献标志码]** B **[文章编号]** 2097-4566 (2025) 10-0105-04

Recovery and utilization of waste heat from WPA flash cooling system

LIU Wenkai

(Yunnan Yuntianhua Red Phosphorus Chemical Industry Co., Ltd., Kaiyuan 661699, China)

Abstract: In response to the problems of intensified scaling in the filtration system and increased steam consumption caused by the increase of potassium and sodium content of phosphate rock in WPA production, the efficient recovery and utilization of flash cooling waste heat are achieved through technical transformation and pipeline optimization of WPA flash cooling system. The renovation measures include optimizing the inlet method of the pre condenser, increasing the height of gas-liquid separation, restoring the tail gas washing circulation pump, adjusting the piping of the liquid seal tank, and optimizing the use of steam in the filtration system. The results show that after the renovation, the water temperature in the pre condenser liquid seal tank remain stable at around 70 °C, and circulating hot water is used for filter cloth flushing, significantly reducing steam consumption. Comparative data from 2019 to 2020 shows that the steam consumption for one ton of phosphoric acid has been reduced by 15 kg, the vacuum degree of the device has been increased to 42 kPa, and the average temperature of the reaction slurry has been reduced by 2 °C, effectively alleviating scaling problems and improving system operation stability and energy utilization efficiency.

Key words: wet-process phosphoric acid(WPA); flash cooling system; waste heat recovery; scale control; energy saving renovation; steam consumption; heat

磷酸的工业生产方法可分为两大类: 一类是热法生产, 制得的产品称为热法磷酸, 热法磷酸的质量较好, 通常用以制造磷酸盐产品或食品级磷酸盐; 另一类是湿法生产, 产品称为湿法磷酸, 湿法磷酸的质量较差, 磷酸中含有较多杂质, 通常用以生产肥料, 或经净化后制造某些磷酸盐产品^[1]。随着磷矿石中钾、钠含量增加, 湿法磷酸生产面临着更复杂的挑战, 特别是热量的回收和蒸汽消耗方面^[2]。湿法磷酸生产过程中会释放大量热量, 如不能有效回收, 不仅会浪费能源, 而且会影响反应温度控制, 造成过程不稳定和蒸汽消耗增加。对湿法

磷酸闪冷余热回收系统进行优化改造, 是回收磷矿反应工序中反应热回收的一个重要方向。改造目的在于提高余热利用效率、降低蒸汽消耗量、降低生产成本、保证设备长期稳定运行。

1 湿法磷酸生产过程概述

1.1 原料选择与反应过程

目前, 湿法磷酸生产主要是以磷矿为原料, 通过磷矿与硫酸反应制取磷酸副产石膏。该反应期间

[收稿日期] 2023-09-15; [修回日期] 2025-02-23

[作者简介] 刘文凯(1992-), 男, 云南个旧人, 工程师, 长期从事湿法磷酸生产工艺技术研究与管理。

的主要反应为：



该反应是放热反应，反应过程中会释放大量的热量。现有磷酸工厂的热量冷却技术有两大类：空气吹扫冷却和真空闪蒸冷却。云南云天化红磷化工有限公司（以下简称公司）20万 t/a 二水湿法磷酸装置作为节能降耗技改工程中的主要装置之一，采用的是真空闪蒸冷却。通过料浆循环泵将料浆送入闪蒸室蒸发，借料浆沸腾，逸出蒸汽和热量^[3]。

1.2 闪冷过程的基本原理

闪冷工艺的基本原理是在减压条件下，液体突然蒸发，快速释放蒸汽和相对应的潜热。该工艺既可实现反应浆料温度快速降低，又可获得具有较高热能密度的蒸汽，其可广泛应用于蒸汽轮机、供热装置或回流反应器等。通过合理设计与运行，可实现闪冷水蒸气的高效回收，并作为热源应用于其他过程。回收的热能既可以用来维持装置温度稳定，降低对外加热源的依赖，又可以进一步提高用能效率，提高生产过程的节能效果。闪冷工艺对反应器中物料的处理效果也有一定的促进作用。通过对闪冷过程升温速率及水蒸气逸出速率的调控，实现对反应浆料温度的精确调控，从而实现控制反应速率和物质的溶解度，优化磷酸制备工艺。

1.3 闪冷余热的温度范围与热量分布

通常，湿法磷酸生产的闪冷过程中，逸出的水蒸气温度一般在 60~120℃^[4]。实验结果表明，反应料浆初始温度、闪蒸室的操作压力和气流速度都是影响该温度的主要因素。受反应料浆温度波动影响，闪蒸水蒸气温度分布不均匀，各区域热量回收效率差别很大。

闪冷过程中，大部分水蒸气热量都集中在高温区。一般来说，约 120℃ 水蒸气是热量最集中的区域，因此该区域的热能利用效率最高，通常用于其他过程设备或加热装置。然而，当温度逐渐下降时，水蒸气中所含热量逐渐降低，使得低温区（60~80℃）的热回收效率大幅度下降。

2 装置存在问题分析

2.1 预冷凝器洗涤液被抽至大气冷凝器

改造前湿法磷酸装置闪冷工序流程见图 1。在原设计中，20万 t/a 二水湿法磷酸装置将预冷凝器内的洗涤液体误抽至大气冷凝器，造成洗涤液不能有效回收。洗涤液作为冷却气体的重要介质，其温度、流速直接影响热回收效果。然而，当洗涤液进入大气冷凝器时，装置热回收环节得不到充分利

用，导致大量可回收热损失。由于预冷凝器本身存在的问题，洗涤液无法保持足够的温度及流动性，换热效率下降。

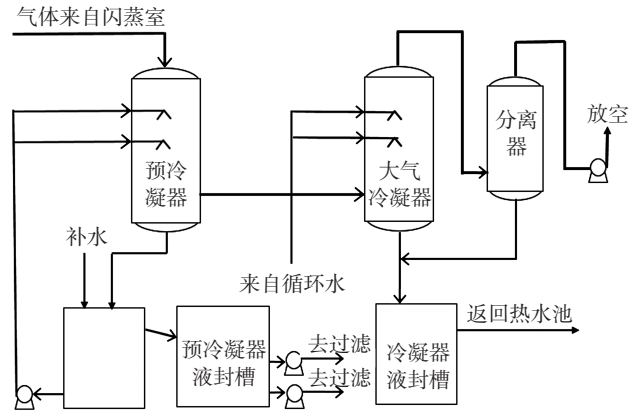


图 1 改造前湿法磷酸装置闪冷工序流程

Fig. 1 Flash cooling process of wet-process phosphoric acid unit before renovation

2.2 预冷凝器液封槽液位不足，液封管破裂

预冷凝器液封槽内的液面明显偏低，造成液封管破裂现象时有发生。在湿法磷酸生产装置中，液封槽是气体密封和确保反应槽温控稳定的关键。若液封槽内液面过低，则封管内水柱压力不能保持在一个合理的范围内，造成液封破裂、气漏或倒流^[5]。这不仅会影响装置的正常操作，而且会影响反应槽温度控制，导致闪蒸室内温度波动加剧，从而影响磷酸生产过程的热回收与稳定运行。液封槽内液位不高、液封管破裂等现象，会造成装置真空度下降，在一定程度上影响反应效率，从而降低整个生产过程的能源效率。

2.3 预冷凝器分离高度不够，气液分离效率低

原设计预冷凝器分离高度只有 3.3 m，这一设计在实际应用中暴露出明显的局限性。湿法磷酸生产过程中，气液分离效率是衡量其热回收效果的一个重要指标。预冷凝器气液分离高度过低，造成气液接触而分离不彻底。此时，洗涤液不能完全冷却气体，不能完全回收闪蒸室逸出的热量。原设计装置不能有效强化气液两相换热，导致大量闪蒸热得不到有效利用，从而降低了整个装置的热回收效率。另外，由于气液分离不充分，部分高温气体未得到充分冷却即被抽回大气冷凝器，循环水温度上升，系统真空度变差，料浆温度升高，造成热能浪费。

2.4 闪蒸余热未能有效回收，导致装置真空度低

原装置的闪蒸热回收效率不高，闪蒸逸出的蒸汽热无法得到有效利用。由于缺少有效的热回收设备，蒸汽从装置中逸出，无法再利用。真空度难以

维持,只能维持38 kPa左右,与理论要求相差甚远。由于装置真空度下降,反应槽温度不能很好地控制,反应温度过高,虽然仍可生产湿法磷酸,但会给生产操作带来许多不可忽视的弊端。首先,反应温度过高,会生成半水物硫酸钙结晶和产生包裹现象,使后续的料浆过滤状态恶化,影响过滤、洗涤作业,降低磷回收率,为了维持运转,将被迫降低料浆液相 P_2O_5 浓度;其次,过高的反应温度,使溶解于磷酸中的杂质,尤其是氟硅酸盐量增加,继而在过滤系统随着温度下降而大量析出,这些由钾、钠的氟硅酸盐所组成的杂质,在设备和管道中形成结垢和淤渣,又影响了整个系统,尤其是过滤系统的正常运转及操作周期;再则,过高的反应温度还增加了酸液对金属材料的腐蚀^[6]。不仅影响磷酸生产效率,而且能源消耗也较大。由于不能对闪蒸逸出的热量进行有效回收,外部蒸汽的消耗量逐渐增加,使生产成本进一步增加。

2.5 过滤装置结垢严重,导致蒸汽消耗增加

湿法磷酸生产过程中,当料浆在过滤系统进行固液分离时,液相温度骤降,致使氟硅酸钾、氟硅酸钠溶解度降低,析出结晶,沉淀在真空盒、酸收集管、弯头等内壁,日积月累形成结垢^[7]。结垢累积导致过滤效率降低,装置内杂质不能及时排出,影响反应物品质及工艺稳定性。国外防止湿法磷酸过滤设备和管道结垢的措施包括:(1)设置中间料浆槽,料浆先进入中间槽,使其温度降至65℃左右,并停留一段时间,使部分盐类的过饱和度消除后,再用泵送至过滤机过滤。(2)在过滤机分配盘设置夹套,用蒸汽保温,减少料浆的温度差^[8]。20万t/a二水湿法磷酸装置通过在过滤机错气盘处通入蒸汽来缓解结垢,虽然可以减缓结垢的速度,但是会增加蒸汽的消耗量。过滤装置的结垢不仅会增加生产成本,也会导致设备维修次数和费用增加,进而影响企业整体生产效率与可持续发展。

3 湿法磷酸闪冷余热回收装置改造

3.1 优化气体进气方式,改由预冷凝器下部进入

传统进气方式是将高温水蒸气直接送至预冷凝器顶部,该设计在实际运行中存在诸多问题,特别是气体与洗涤液的接触和冷凝效果方面。为改善气体的冷凝效果,降低气体与洗涤液接触不充分所引起的热损耗,改造方案将气体的进气位置由顶部改为预冷凝器的下部。这种改变使气体逆流接触洗涤液体,保证气体在上升时与洗涤液体充分交换热量。由于气体在较低的部分进入,气体温度逐级下

降,热量得以更充分地传递。

改造后的预冷凝器内气体冷凝效果大大提高,冷凝液温度提高,热回收率提高。另外,改进进气位置,可避免原设计中进气位置过高而造成的局部热量浪费,提高整体能量利用率。同时,气体从下部进入预冷凝器,可以提高余热回收装置的稳定性,降低由于气流不均匀引起的设备失稳,进而提升装置整体效率及设备寿命。

3.2 增大气液分离高度,提高气液分离效率

为了提高气体和洗涤液的分离效率,将气液分离高度提升至6 m以上,气液分离效果得到明显改善。该改进可使经过预冷凝器的气体更充分地接触洗涤液,提高洗涤液对气体的冷凝作用。

增大气液分离高度可延长气体凝结时间,并可与洗涤液长期进行热交换,进一步提高装置换热能力。同时,由于分离高度高,可以有效地防止洗涤液进入大气冷凝器,从而保证洗涤液的循环利用。该改造在提高热回收效率的同时,也对装置流体力学进行了优化设计,降低了不需要的热损耗,从而降低了对外界蒸汽的需求量。

3.3 恢复尾气洗涤循环泵的使用,优化洗涤液循环装置

尾气洗涤循环泵是湿法磷酸闪冷余热回收装置的核心部件,其主要功能是将冷凝后的洗涤液送到装置内进行循环冷却。但原装置循环泵停用,造成洗涤液流动受阻,影响热回收效果。通过恢复使用尾气清洗循环泵,有效地提高了洗涤液的流动性,保证了洗涤液在装置内的充分循环,并实现了高效的热能回收。改造后,通过向过滤机输送热水,提高洗涤液温度,有效减少装置结垢,延长设备使用寿命,减少对外界蒸汽的需求量。改造后,装置运行平稳,洗涤液管理得到进一步优化,整体热回收效率得到提高。另外,优化的泵送装置可以减少热水浪费,并且改善循环效率。

3.4 调整液封槽配管,确保液封槽水温稳定

液封槽是湿法磷酸闪冷余热回收装置中用来保证气体与洗涤液分离和冷凝效果的重要设备。为保证液封槽内水温稳定,需对液封槽管线进行优化。首先调整液封槽进水管线,保证进液封槽的水量稳定,液封槽内温度稳定在70℃左右;安装流量调节阀,根据现场实际情况,准确控制进水量,防止因进水过多或过少而引起水温波动。同时,该系统还实现了进水温度的实时监控,并与制冷设备联动,确保进水温度始终保持在合理范围。

其次，对液封槽出水管线进行了优化设计。对出水管管径及布置进行合理设计，保证水能顺利排出，避免因水流不畅造成局部水温过高或过低的问题。通过在出水线上加装温度传感器，实现对出水温度的实时监控，及时发现问题，及时调整。另外，可在液封槽四周增设隔热层，以降低外部环境对液封槽内水温的影响。

3.5 减少过滤装置结垢，优化蒸汽使用和温控管理

为有效降低结垢现象，对过滤装置进行了一系列的改造，并对其蒸汽使用和温控管理采取优化措施，取得了显著成效。对过滤器进行了改造，在错气盘上通入适量蒸汽，使设备温度维持在一个稳定区域。在生产实践中，技术人员通过计算与调试，确定了适宜的蒸汽加入量，以保证设备内的温度不会过高而引起某些物质的分解、沉淀，也不会因为温度过低造成物质溶解度下降而沉淀。

岗位人员监控好系统内蒸汽流量，确保蒸汽稳定加入过滤错气盘内，使热量均匀地分布于设备内部，避免了因温度波动引起的设备损耗和故障。蒸汽流量计的加入，对磷酸过滤错气盘保温起到一定的指导作用，确保错气盘过滤磷酸及洗液温度稳定在所需范围，减少结垢现象。

4 装置改造后效果分析

通过技术改造，预冷凝器液封槽内水温达到70℃左右，循环热水置换进入滤布冲洗水槽，提高滤布冲洗水温度，整体的蒸汽通入量减少。为验证装置改造效果，统计公司二水湿法磷酸装置2019年1—5月（改造前）、2020年1—5月（改造后）蒸汽用量及磷酸产量，分别见表1、表2。

技术改造后，磷酸（以P₂O₅计）蒸汽消耗降低15 kg/t，同时因循环热水置换进入滤布冲洗水槽，大量渣坝回水补入循环水池，循环水温度降低，闪冷装置真空度升高至42 kPa，反应料浆温度平均降低约2℃，有利于装置长周期运行。

表1 2019年1—5月蒸汽用量及磷酸产量

Table 1 Steam consumption and phosphoric acid production from January to May of 2019

项目	蒸汽用量/t	磷酸产量/t	产品蒸汽消耗量/(t·t ⁻¹)
1月	3 255	22 057.723	0.147
2月	2 780	19 141.741	0.145
3月	3 370	23 054.152	0.146
4月	3 210	20 646.805	0.155
5月	3 320	21 996.324	0.150
平均	3 187	21 379.349	0.149

表2 2020年1—5月蒸汽用量及磷酸产量

Table 2 Steam consumption and phosphoric acid production from January to May of 2020

项目	蒸汽用量/t	磷酸产量/t	产品蒸汽消耗量/(t·t ⁻¹)
1月	2 420	18 075.475	0.134
2月	2 380	17 694.749	0.134
3月	3 290	24 654.207	0.133
4月	3 030	22 311.820	0.136
5月	3 020	22 405.731	0.135
平均	2 828	21 028.396	0.134

5 结语

改造后的湿法磷酸闪冷余热回收系统在气体进气、气液分离、液封槽管理等方面的优化，提高整体热能利用率，稳定生产流程，有效降低过滤装置的结垢等难题。通过对改造前后蒸汽用量对比，改造效果明显，进一步证实了优化工艺对节能降耗和提高生产效益的重要性。对于已建成投产的生产装置而言，针对具体的工艺流程特点、设备装备水平等，持续进行深挖潜、降成本改造及节能降耗技术创新活动，以实现更大程度的企业效益。

[参考文献]

[1] 江善襄.磷酸、磷肥和复混肥料[M].北京:化学工业出版社, 1999:167-168.

[2] 刘莹莹.烧结矿冷却废气余热利用技术应用进展[C]//中国金属学会.2023全国冶金烧绿绿色低碳关键技术研讨会论文集.[出版地不详]:中冶北方(大连)工程技术有限公司,2023:52-56.

[3] 郭静静,牛艳娥,张利军,等.热态镁渣余热回收及资源化利用[J].冶金能源,2023,42(4):42-46.

GUO J J, NIU Y E, ZHANG L J, et al. Waste heat recovery and resource utilization of hot magnesium slag [J]. Energy for Metallurgical Industry, 2023, 42(4): 42-46.

[4] 胡显林,高新彦,马志伟,等.烧结环冷余热和高炉余压余热回收利用实践[J].中国钢铁业,2023(6):47-50.59.

[5] 宋志峰.煤矿余热回收利用技术与方案研究[J].能源与节能, 2024(10):18-20.

SONG Z F. Technology and Scheme of Waste Heat Recovery and Utilization in Coal Mine[J]. Energy & Energy Conservation, 2024 (10):18-20.

[6] 刘德仁,凌晋德,王宗仁.湿法磷酸生产中的反应槽型式及料浆冷却方法的探讨[J].化肥工业,1996,23(4):11-14.

[7] 赵胜贤.湿法磷酸过滤系统的结垢成因与防结垢措施[J].磷肥与复肥,2005,20(3):33-34.

ZHAO S X. Cause for scaling in WPA filtration unit and its anti scaling measures[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2005, 20 (3):33-34.

[8] 李志祥.湿法磷酸过滤设备和管道结垢原因分析及控制研究[J].磷肥与复肥,2004,19(6):24-27.

LI Z X. Cause for scaling on equipment and pipeline of WPA filtration unit and its control [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2004, 19(6): 24-27.