硫黄制酸装置除氧器乏汽回收利用可行性分析

杨家红，海宇任，杨文明，王学文

（云南磷化集团有限公司，云南 昆明 650600）

［摘 要］800 kt/a硫黄制酸装置除氧器乏汽未实现回收利用，造成热利用率下降和资源损失。通过前期可行性分析，得出可用二级脱盐水冷却乏汽以回收热量，并计算出冷却脱盐水用量；介绍除氧器乏汽回收工艺流程及运行控制。经济效益及效能分析表明，该方案经济效益明显，同时可以消除乏汽排汽的噪声污染，改善厂区环境。

［关键词］硫黄制酸；乏汽回收；可行性分析；经济效益

［中图分类号］TQ111.19 ［文献标志码］B ［文章编号］ 2097-4566（2024）10-0061-04

Feasibility analysis of exhaust gas recovery and utilization in the deaerator of sulfuric acid plant

YANG Jiahong, HAI Yuren, YANG Wenming, WANG Xuewen

(*Yunnan Phosphate Group Co., Ltd., Kunming* 650600, *Chian*)

Abstract: During the operation of the exhaust steam from the deaerator of an 800 kt/a sulfuric acid plant, the failure to achieve recycling results in a decrease in heat utilization rate and resource loss. Through preliminary feasibility analysis, it is determined that secondary desalinated water can be used to cool the exhaust steam and recover heat, and the amount of desalinated water used for cooling is calculated; The process flow and operation control of deaerator exhaust steam recovery are introduced. The analysis of economic benefits and efficiency shows that this plan has significant economic benefits, and can also eliminate the noise pollution caused by exhaust steam and improve the factory environment.

Key words: sulfuric acid production form sulfur; exhaust gas recovery; feasibility analysis; economic performance

0 引言

云南磷化集团有限公司800 kt/a硫黄制酸装置自投料开车以来，在达产达标、工艺优化、节能技术改造、挖潜改造、冷凝水回收等方面取得初步成效，整个生产厂区环境得到较大改善。除氧器利用低压蒸汽热力除氧，将来自DWRHS（低温热回收系统）脱盐水加热器的70～90 ℃的脱盐水加热到102 ℃除氧后，产生大量的乏汽，从除氧器顶部排气管直接排出，过剩的蒸汽与析出的气体（这部分气体通称为乏汽[1]）一同排入大气。

为减少二次蒸汽排放量，达到回收热能、减少排放、改善生产现场环境、降低生产成本的目的，考虑使用乏汽回收装置回收除氧器顶部排气管排出的二次蒸汽，并通过汽水分离罐将不凝性气体排出以稳定热力系统的运行。

1 冷凝水回收工艺流程

冷凝水回收工艺流程见图1。

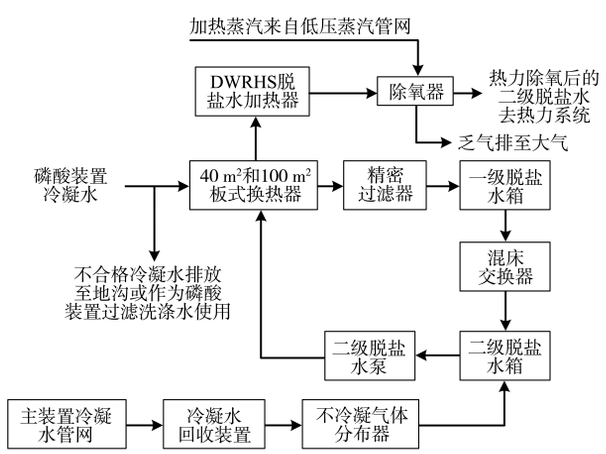

图1 冷凝水回收工艺流程

Fig. 1 Condensed water recovery process

来自磷酸装置的冷凝水（水温≤100 ℃，电导

［收稿日期］2023-09-26； ［修回日期］2024-06-30

［作者简介］杨家红(1979-)，男，云南玉溪人，助理工程师，主要从事化工生产及安全管理工作。E-mail：1160173761@qq.com

率≤10 μS/cm，pH＞6）经冷凝水回收装置由冷凝水泵加压送至硫酸装置脱盐水工序，进入板式换热器与合格二级脱盐水（pH 8.8～9.2，电导率≤10 μS/cm，$\rho(SiO_2)$≤20 μg/L，水温30～40 ℃）间接换热降温后，冷凝水温度降至50 ℃以下，经过精密过滤器除去杂质后，进入一级脱盐水箱，经混床交换器进行二次除盐处理后品质接近脱盐水，且几乎不含溶解氧和二氧化碳等腐蚀性气体，进入二级脱盐水箱（pH 8.8～9.2，电导率≤10 μS/cm，$\rho(SiO_2)$≤20 μg/L，水温30～40 ℃），由二级脱盐水泵加压后，进入板式换热器与磷酸装置合格冷凝水间接换热吸收热量传热，此时板式换热器出来的合格二级脱盐水温度升至约60 ℃（pH 8.8～9.2，电导率≤10 μS/cm，$\rho(SiO_2)$≤20 μg/L），再进入DWRHS脱盐水加热器与DWRHS锅炉给水加热器出来的高温浓硫酸（150 ℃左右）间接换热后，水温升至70～90 ℃，进入除氧器经热力除氧后，供硫酸装置热力系统使用。

当磷酸装置冷凝水出现不合格（冷凝水电导率＞60 μS/cm或pH＜6）时，可通过冷凝水管道排污阀排入装置区污水管网系统，或进入到磷酸装置作为洗涤水使用。

2　除氧器工作原理及运行情况

除氧器作为硫酸装置配套废热锅炉及DWRHS系统蒸发器重要给水处理设备，主要为废热锅炉及DWRHS系统蒸发器提供合格的给水，以保证锅炉、省煤器、汽轮机组及整个热力系统的金属部件在高温下不发生过度的氧化腐蚀[2]。

2.1　工作原理

热力除氧所依据的基本原理是亨利定律。在一定压力下，水的温度越低气体的溶解度越高，相反，温度越高气体的溶解度越低。锅炉脱盐水被通入的蒸汽加热到相应压力下的饱和温度时，蒸汽的分压力将接近水面上的全压力，溶解于水中的各种气体分压力接近于零。这种情况下，水就不具备溶解气体（如氧气）的能力，溶解于水中的气体被析出，从而达到除氧的目的[3]。

2.2　运行情况

前期将低压蒸汽管道疏水汇集至收集管道，引至冷凝水回收装置，整个生产现场环境得以较大改善，但在运行过程中，装置冷凝水回收管道经常伴有汽水冲击爆管现象，需要打开部分疏水点通过冷凝水回收装置顶部排入大气，才能保证回收系统正常运行。经过对二级脱盐水箱内不凝气体分布器进行改造升级，增加分布孔数量，减小孔径，有利于削弱能量，减少汽水冲击引起的共腾现象，确保运行安全。但是除氧器乏汽（温度约110 ℃，流量约3.5 t/h）自装置投入生产以来，一直未被回收利用，在生产厂区形成噪声污染源，影响生产环境。

3　除氧器乏汽回收装置介绍

3.1　乏汽回收装置的特点

乏汽回收装置对二次蒸汽的回收率较高，最大限度地降低了蒸汽排放量，达到降本增效的目的，改善了生产现场环境，是一种适用于热力系统排放乏汽回收的节能环保装置，具有体积小、回收效率高、无振动、结构紧凑精巧、技术先进等特点。当不能回收除氧器乏汽时，由操作人员切换工艺阀，让除氧器排气至大气，保证除氧器正常运行。

3.2　工作原理

乏汽回收装置设置1台动力头、1个气液分离罐、2台冷凝水泵（1用1备）。用二级脱盐水作为工作介质，水流过动力头喷嘴时，以高速对其周围空间中的另一种介质（乏汽和汽水混合物）产生射吸，同时进行两种介质的传热与传质，脱盐水被加热。然后经过扩压段，将流体的动能转换为一定的压力，再进入到系统中将除氧器的乏汽进行冷凝，然后在气液分离罐内进行分离，使水汽全部凝结为冷却水，水中溶解的各种不凝性气体（氧、二氧化碳等）会从设备顶部排出，分离罐内的水用泵输送至脱盐水工序，供给热力系统使用。

3.3　冷却水参数确定

除氧器乏汽回收利用的主要困难是蒸汽中混有一定的氧气，如作为蒸汽回收，则氧气会被带入用汽系统，增加系统设备氧腐蚀。因此，理想的热力除氧器等的乏汽回收，应该是尽可能多地将乏汽凝结，而氧气等其他不凝性气体通过分离器排出[4]。

3.3.1　冷却水温度确定

对于直接冷凝回收蒸汽的方式来说，水温越低回收效果越好。现800 kt/a硫酸生产装置流程是：二级脱盐水（25 ℃）首先经板式换热器与冷凝水传热后，进入DWRHS脱盐水加热器与DWRHS锅炉给水加热器出来的高温浓硫酸（150 ℃左右）进行间接传热，硫酸进入二吸循环酸槽，水进入除氧器，此时水温已提高到70～90 ℃，DWRHS脱盐水加热器出口酸温在120～130 ℃。

若乏汽回收装置直接在除氧器上水调节阀前或后碰口，就会影响DWRHS脱盐水加热器的换热水量和出口酸温，导致二吸酸温度偏高，为保证二吸

入塔酸温控制在指标内，必须增加干吸工序酸冷却器的循环水量，同时也增加了循环水池补水量，没有达到降本增效的目的。因此，经过对硫酸装置运行工艺参数控制要求和工艺运行工况进行分析，脱盐水装置只能提供 42 ℃左右的二级脱盐水。经过综合分析，采用 42 ℃左右的二级脱盐水作为回收冷却水方案最优，也符合乏汽回收装置的运行要求。

3.3.2 冷却水量确定

根据已知的除氧器乏汽流量 3.5 t/h（q_{m1}）、温度约 110 ℃，板式换热器出口二级脱盐水温度 42 ℃，求需要冷却水流量（q_{m2}），整个过程研究时间取 1 h。

查表可得 110 ℃蒸汽焓值 $h_1 = 2\ 693.5$ kJ/kg，则乏气所具有的焓热 $Q_1 = q_{m1} \times h_1 \times 1\ \text{h} = 3.5 \times 10^3 \times 2\ 693.5\ \text{kJ} = 9.427 \times 10^6\ \text{kJ}$。

查表得温度 42 ℃的冷却水焓值 $h_2 = 175.87$ kJ/kg，则焓热 $Q_2 = q_{m2} \times h_2 \times 1\ \text{h}$。

二者混合后成 65 ℃（设定控制值）水，查表得焓值 $h = 272.08$ kJ/kg，则焓热 $Q = q_m \times h \times 1\ \text{h}$。

根据物料衡算，混合后总流量 $q_m = q_{m1} + q_{m2}$；根据热量衡算，混合后总焓热 $Q = Q_1 + Q_2$。代入解方程组可得 $q_{m2} = 88.1$ t/h，从而 $q_m = (3.5 + 88.1)\ \text{t/h} = 91.6\ \text{t/h}$。

即，流量为 3.5 t/h 的 110 ℃蒸汽与 42 ℃的脱盐水混合回收热量后产生 91.6 t/h 的 65 ℃的热水。

3.4 乏汽中不凝气体

乏汽中含有一部分不凝性气体，该气体的数量可以根据除氧前后气体在水中的溶解度计算得出。该气体的存在将导致传热系数降低。如当蒸汽中不凝性气体体积分数达到 1%时，冷凝给热系数将降低 60%，最终影响换热器的换热效率[5]。因此，采用与脱盐水接触冷凝吸收热量后，再进入二级脱盐水箱与低温脱盐水进行混合冷凝，经过热力除氧后进入热力系统，就解决了系统设备氧腐蚀的现象。

4　除氧器乏汽回收工艺流程及运行控制

4.1 工艺流程

除氧器乏汽回收工艺流程见图 2。脱盐水工序现有 3 台功率为 55 kW 的二级脱盐水泵，每台额定流量 200 m³/h，在二级脱盐水泵出口管上碰口，新配工艺管道至乏汽回收装置，在乏汽回收装置前面增加工艺调节阀，来调节进入乏汽回收装置的吸收水量，从而保证乏汽回收装置的正常运行。回收除氧器乏汽的水由输送泵输送至二级脱盐水箱，经二级脱盐水泵加压后，供热力系统使用。此工艺控制

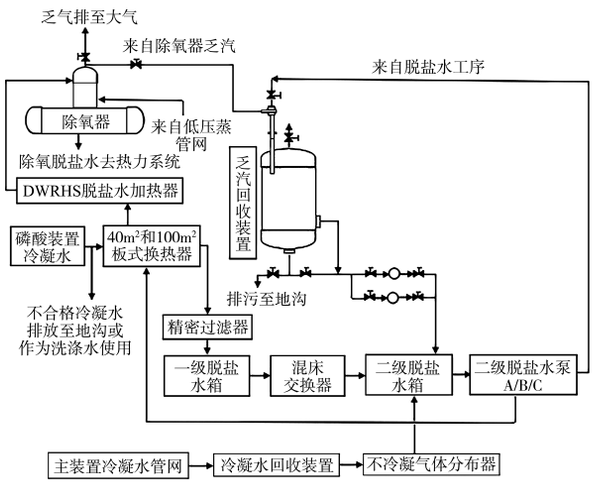

图 2　除氧器乏汽回收工艺流程

Fig. 2　Recovery process of exhaust gas from deaerator

既能满足 DWRHS 脱盐水加热器循环酸温的控制要求，同时也达到了乏汽回收的目的。

4.2 运行控制

可连续运行，贮罐内液位维持在一定值范围，自动排出溶解于水中的不溶性气体，仅在系统启停时，进行排大气与回收的人工切换，压力、温度、液位测量就地安装；可实现自动远程控制。

5　经济效益及效能分析

每小时回收乏汽约 3.5 t，相当于回收了冷凝水 3.5 t/h，节约了脱盐水加热蒸汽 3.5 t/h；脱盐水处理费用（含运行费用）按 10 元/t 计；每吨低压蒸汽按 90 元/t 计。每年运行时间为 24 × 330 h = 7 920 h，产生效益为如下。

回收冷凝水节约费用：3.5 × 10 × 7 920 元 = 27.72 万元。

每年节约加热蒸汽费用：3.5 × 90 × 7 920 元 = 249.48 万元。

乏汽回收装置把 42 ℃水提高到 65 ℃所需热量：

$\triangle Q_2 = q_{m2} \times (h - h_2) = 88.1 \times 10^3\ \text{kg/h} \times (272.08 - 175.87)\ \text{kJ/kg} = 8.476 \times 10^6\ \text{kJ/h}$。

每年按运行 330 d 计算，所需总热量为 6.712×10^{10} kJ。折算为标准煤，乏汽回收装置每小时节约标准煤 339 kg。

因乏汽回收装置运行时，需要冷却水量约 88 m³/h 左右，按现装置运行情况，还需启运 1 台二级脱盐水泵供其使用，满足运行工况要求，二级脱盐水泵功率 55 kW，电价以 0.5 元/(kW·h) 计，年运行时间为 330 d，电耗费用为 21.78 万元。

此项目产生经济效益为：

（27.72＋249.48－21.78）万元/a＝255.42万元/a。

6 结语

乏汽回收装置具有体积小、回收效率高、无振动、结构紧凑精巧、技术先进等特点；乏汽回收装置主要将除氧器排出的二次蒸汽进行了回收，消除噪声污染，改善了厂区的生产环境，减少了污染和资源浪费；乏汽回收装置投运后对装置的安全运行没有任何影响，回收率基本达100%，可以推广利用。

［参考文献］

［1］ 陶荣伟.硫酸装置除氧器乏汽回收节能技术改造[J].磷肥与复肥,2017,32(2):42-44,50.
TAO R W. Energy-saving technical transformation of deaerator exhaust steam recovery in sulphuric acid plant[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2017,32(2):42-44,50.

［2］ 陈志军.除氧器乏汽回收装置的应用[C]//中国系统工程学会过程系统工程专业委员会.中国过程系统工程年会会议论文集.上海:[出版者不详],2008:409-411.
CHEN Z J. Application of deaerator exhaust steam recovery unit [C]// China Society of Systems Engineering Process Systems Engineering Committee. Proceedings of China Annual Conference on Process Systems Engineering. Shanghai:[s.n.],2008:409-411.

［3］ 能源部西安热工研究所.热工技术手册:第3卷汽轮机组[M].北京:水利电力出版社,1991.
Xi'an Institute of Thermal Engineering, Ministry of Energy. Thermal Technology Handbook : Volume 3 Steam Turbine Units [M]. Beijing : Water Resources and Electric Power Press, 1991.

［4］ 庄建华,付振春.除氧器乏汽回收技术研究[J].节能技术,2015,33(3):279-282.
ZHUANG J H, FU Z C. Deaerator exhaust steam recovery technology research[J]. Energy-saving Technology, 2015,33(3):279-282.

［5］ 魏正坤.硫酸装置除氧器乏汽回收节能技改[J].磷肥与复肥,2017,32(6):34-35.
WEI Z K. Energy-saving technical transformation of deaerator exhaust steam recovery in sulphuric acid plant[J].Phosphate & Compound Fertilizer, 2017,32(6):34-35.

欢迎订阅2025年《生态产业科学与磷氟工程》（原《磷肥与复肥》）

经国家新闻出版署批准（国新出审〔2024〕609号），《磷肥与复肥》更名为《生态产业科学与磷氟工程》，国内统一连续出版物号CN 41-1471/TQ，国际标准刊号ISSN 2097-4566。《生态产业科学与磷氟工程》（月刊）由郑州大学主管，郑州大学、中国磷复肥工业协会主办，郑州大学出版社有限公司出版，是中国磷复肥工业协会会刊，被美国化学文摘（CA）摘录；荣获第五至八届“全国石油和化工行业优秀期刊一等奖”、2015年中国高校技术类优秀期刊、2016年中国高校优秀科技期刊、2020年全国石油和化工行业百强期刊。更名后，期刊栏目及内容将传承、覆盖、包容《磷肥与复肥》，并扩展、提升到相关资源加工流程型产业生态化转型升级、技术进步；刊载绿色低碳循环发展政策技术体系创新成果，反映磷氟元素为代表的资源加工传统产业生态化转型动态，促进磷氟等资源产业耦合，加快生态产业学术技术交流和成果转化，推动资源产业绿色低碳高质量发展。主要栏目：简评与要讯，新质生产力与产业态势，研究开发与生态设计，磷及关联产业技术创新，提质增效产品创制技术，磷氟产业耦合与高端材料创制，减污降碳协同与资源全元素高效利用，健康保育与环境修复，产业赋能与业态融合，其他。

《生态产业科学与磷氟工程》主要面向以磷氟（包括但不限于）元素为代表的资源加工流程型工业规划设计、生产销售、设备制造及农业应用领域的企业管理、工艺技术、产品研发和应用等部门，管理机关、学会协会、制造企业、高校科研设计、农业农资等单位集体和个人读者。

期刊为大16开版本，每月15日出版。全国各地邮局（所）均可订阅，邮发代号36—189。编辑部常年办理订阅手续。

邮局订阅：纸质版每期定价20元，全年（12期）定价240元。

编辑部订阅：纸质版含挂号邮费每期定价23元，全年(12期)定价276元（若需快递请与编辑部联系）；PDF版每期定价65元，全年定价780元。

联系方式：电话 0371—6388 7309，6778 1991；电子邮箱 espfe2024@126.com；网址 lfyf.cbpt.cnki.net。