800 kt/a硫酸装置循环水冷却塔技术改造

杨家红[1]，王学文[2,3]

（1. 云南磷化集团有限公司，云南 昆明 650600；2. 国家磷资源开发利用工程技术研究中心，云南 昆明 650600；
3. 云南云天化股份有限公司 研究院，云南 昆明 650100）

［摘 要］针对800 kt/a硫酸装置填料式循环水冷却塔存在的填料堵塞、冷却效率下降、能耗高等问题，实施以无填料喷雾冷却技术为核心的技术改造。通过拆除原有填料及布水系统，新建低压雾化喷淋系统，并利旧原有风机，对喷头选型、布水层级、系统阻力等进行重新设计，比较改造前后在满负荷运行下的水温、电耗及水耗等关键指标。改造后，系统阻力降低约50%，在风机功率不变前提下风量提升20%。循环水进、出塔温度分别降低约7.0 ℃和5.5 ℃，在保证冷却效果（温差8.2～8.5 ℃）的同时，冷却风扇运行台数由4台减少至3台。吨酸工艺水消耗量由0.41 m^3降至0.38 m^3，年节约水量2.4万m^3。该技术改造有效解决了填料塔的固有缺陷，年均可产生经济效益28.052万元，投资回收期约4.2年，显著降低了能源与资源消耗，改善了现场环境。

［关键词］硫酸装置；冷却水塔；无填料喷淋；能源消耗；经济效益
［中图分类号］TQ111.16 ［文献标志码］B ［文章编号］2097-4566（2026）07-0051-05

Technical transformation of circulating water cooling tower in 800 kt/a sulfuric acid plant

YANG Jiahong[1], WANG Xuewen[2,3]

(1. *Yunnan Phosphate Group Co., Ltd., Kunming* 650600, *China*; 2. *National Engineering and Technology Research Center for Development & Utilization of Phosphorous Resources, Kunming* 650600, *China*; 3. *Research Institute, Yunnan Yuntianhua Co., Ltd., Kunming* 650100, *China*)

Abstract: The technical renovation centered on the non-packing spray cooling technology is carried out, addresses issues such as filler clogging, reduced cooling efficiency, high energy consumption in the packed circulating water cooling tower of the 800 kt/a sulfuric acid plant. By removing the original filler and water distribution system and installing a new low-pressure atomizing spray system while reusing the existing fans, the project involves redesigned nozzle selection, water distribution levels, and system resistance. Key performance indicators, including water temperature, power consumption, and water usage under full-load operation, are compared before and after the renovation. Post-renovation, system resistance is decreased by approximately 50%, while airflow is increased by 20% at constant fan power. The inlet and outlet temperatures of the circulating water are dropped by about 7.0 ℃ and 5.5 ℃, respectively, maintaining the required cooling effect (temperature differential of 8.2 - 8.5 ℃). The number of cooling fans in operation is reduced from 4 to 3, cutting process water consumption for per ton of sulfuric acid from 0.41 m^3 to 0.38 m^3 and saving 24 000 m^3 annually. This renovation effectively resolves the inherent defects of the packed tower, yielding an annual economic benefit of 280 520 RMB Yuan with a payback period of approximately 4.2 years, significantly reducing energy and resource consumption while improving on-site conditions.

Key words: sulfuric acid plant; cooling water tower; non-packing spray; energy consumption; economic benefits

0 引言

循环水冷却系统是化工、电力、冶金等流程工业的核心公用工程，承担工艺散热与介质降温功能，是保障生产装置连续稳定运行的基础与关键。

收稿日期：2025-08-04
作者简介：杨家红（1979— ），男，云南玉溪人，助理工程师，主要从事化工生产安全管理工作。
通信作者：王学文，高级工程师。

冷却塔作为循环水系统的核心换热设备，其换热性能、抗堵能力与能耗水平直接决定装置运行稳定性、水资源利用率及生产成本，对工业节能降耗与长周期安全生产具有重要意义。

填料冷却塔因换热效果稳定、性价比高，在硫酸生产装置中应用普遍。云南磷化集团有限公司800 kt/a硫酸装置循环水系统采用传统S型波纹填料冷却塔，设备连续运行超10年。受长期复杂水质与湿热腐蚀工况影响，塔内填料层出现严重结垢、堵塞及老化破损问题。水体中钙镁离子、悬浮泥沙及微量泄漏杂质不断在填料表面沉积结垢，堵塞规整流道，破坏水体成膜与均匀布水效果，引发明显的沟流、股流现象，大幅度缩减气液有效换热面积，致使塔内换热效率持续衰减。同时，填料长期承受水流荷载与介质腐蚀，出现脆化、破损变形，进一步加剧塔内流场紊乱与布水不均。

目前该冷却塔循环回水入塔温度达45 ℃，显著偏离设计工况。水温异常升高加速了干吸工序4台管壳式酸换热器结垢，造成设备换热效率下降，难以满足循环酸降温工艺要求。为保障生产工况稳定，现场需常年投运4台37 kW冷却风机强制降温，导致系统能耗与运行成本显著增加。

传统填料冷却塔易结垢堵塞、能耗偏高、使用寿命有限的短板突出，难以满足现代化工装置长周期、低能耗的运行需求。无填料喷雾冷却塔是解决传统填料塔缺陷的新型高效冷却设备。该塔取消填料换热结构，以专用喷雾装置为核心传热单元，融合热力学、流体力学与空气动力学多理论优化结构设计，可在低压工况下实现水体高效雾化，显著提升气液接触面积与传热传质效率。该设备具备抗堵塞、耐腐蚀、能耗低、寿命长等优势，冷却温降可达8～10 ℃，风机运行负荷较传统填料塔降低约30%，可顺利通过12 mm以下水体杂质，从根本杜绝填料冷却塔堵塞问题。配套三波段四挡板高效收水结构，可优化塔内气流组织，进一步提升整体冷却效率。

为解决现有填料冷却塔换热效率降低、能耗偏高的工程问题，本文基于现场工况开展无填料喷雾冷却塔的应用优化研究，探究其在硫酸循环水系统的应用效果，为同类工业冷却塔节能提质改造提供工程参考与技术借鉴。

1　循环水冷却塔的运行情况及存在问题

1.1　基本情况

800 kt/a硫酸装置循环水冷却塔（NH–1000）采用4座方形组合式钢混结构逆流机械抽风式冷却塔，塔体采用玻璃钢材质。塔内设填料分水器、PVC组合式百叶收水器及上部布水喷淋喷头，通风系统配置ϕ5 000 mm风机，电机功率37 kW。设备原设计运行工艺参数如下：循环水上塔温度42 ℃，出塔温度32 ℃，进出塔温差10 ℃；单塔截面尺寸为7 800 mm×7 800mm，共4台；冷却方式为填料喷淋冷却。

1.2　运行情况

800 kt/a硫酸装置循环水冷却塔自2014年运行以来，一直未进行大规模检修，每年在装置年度检修计划期间对水喷头、冷却风机进行维护保养及清理水池底部淤泥，没有从根本上解决入塔水温度升高问题。随着装置负荷达产达标，并优于设计，循环水冷却塔进出口水温，填料层、循环酸冷却器、分布水喷头结垢速率明显上升，部分填料层和水喷头出现堵塞现象，导致水分布不均匀，填料层下落水出现股流，冷却效果差[1]，循环水漂水严重，对周边环境影响较大，最终导致冷却塔冷却效率下降，缩短了装置的有效运行时间。为进一步降低设备结垢速率，就要调整加入循环水中的阻垢剂、杀菌剂等药剂的量，随着药剂消耗量增加，生产成本也随之上升。

1.3　存在问题原因分析

长期高温、高湿的运行环境，导致冷却塔PVC填料老化、变形、破损严重。同时该运行环境适宜菌藻滋生，在填料表面沉积形成淤泥[2]，进一步加重了填料的堵塞。填料堵塞使气流阻力增加、系统风量减小，导致分水效果差，冷却效率下降，致使循环水出水温度上升。为保证水温满足设计要求，需增加冷却风扇运行数量，导致系统运行能耗升高。

此外，由于填料层堵塞，导致水的表面积减小，冷却空气的气速增大，致使冷却塔漂水严重，循环水消耗上升，现场环境变差。冷却塔的填料及内件均为塑料薄片构成，现已经运行10余年，出现老化破损情况，产生的碎片进入循环水，易造成干吸工序循环酸换热器设备列管[3]、管道、阀门堵塞，影响装置负荷率和长周期稳定运行。

2　新型无填料冷却塔工作原理及技术特点

2.1　填料冷却塔与无填料冷却塔技术对比

传统填料冷却塔依靠填料将热水分散为水膜与水滴，借助气液接触换热、蒸发换热实现热量排放，该技术工艺成熟、建设成本低，在工业领域应

用广泛。但长期运行过程中，循环水中钙镁离子、微生物及藻类易在填料表面沉积结垢，造成填料孔隙堵塞，进而出现布水不均、沟流与换热死区，导致冷却效率持续下降。同时，填料长期处于湿热工况下易老化脆裂，脱落的碎片会随介质流入后端换热器、管道及阀门，引发设备堵塞与磨损，对生产安全造成不利影响。此外，填料层风阻可达系统总阻力的40%～50%，大幅度增加风机负荷与电力消耗，抬高装置运行成本。

无填料冷却塔的整体传热机制与传统填料冷却塔相近，均通过气液热质交换完成水体降温。二者核心差异在于流场形式：与填料冷却塔单一逆流换热模式不同，无填料塔雾化水流与抽吸冷风形成顺流、逆流复合换热流程，有效延长气液接触时间、增大接触面积。塔内取消填料构件后，通风阻力显著下降，系统风量与气水比同步提升，在保障冷却效果的同时实现节能运行。

综合来看，无填料冷却塔优势突出：冷却工况稳定，对不同水质适应性强，从源头避免结垢堵塞问题；设备结构简单，日常操作与维护难度低，运行成本可控；塔体无填料附加荷载，可降低设备基础设计标准与土建安装费用；彻底解决填料老化、破损、脱落以及喷头堵塞等故障，无须频繁开展填料清洗与更换作业，设备连续运行可靠性显著提升[1]。

2.2　新型无填料冷却塔工作原理及技术特征

2.2.1　工作原理

新型无填料喷雾冷却塔以流体雾化分散冷却理论为核心[4]。高温循环水依靠自身回水压力或水泵增压，经配水管道输送至塔内雾化喷嘴；水流通过喷嘴形成内旋流并被雾化，细小雾粒向上喷射，与塔内冷空气充分接触并完成热质交换。降温后的水体回落至循环水池，携带余热的湿热空气经专用收水器脱除水雾后，由塔顶风机排出，以此实现循环水连续降温。

2.2.2　技术特征

（1）抗堵塞性能优异。设备摒弃填料结构，避免了无机盐、微生物附着结垢现象，同时消除填料碎裂带来的管路、换热器堵塞风险，保障工艺系统稳定运行。

（2）通风阻力低，换热工况优。相较于传统填料冷却塔，系统整体风阻降低40%～50%，风机送风能力得到充分发挥，塔内气水比提升约20%，换热条件明显改善。

（3）有效换热面积大。水体经雾化后形成0.5～1.0 mm的均匀雾粒，相比填料成膜换热方式，散热比表面积提升约20%，蒸发换热速率更快，冷却效果更佳。

（4）气液换热更充分。区别于填料冷却塔单一逆流换热模式，该设备兼具顺流、逆流双重换热过程，加之雾粒可在塔内短暂悬浮，进一步延长气液接触时长，水温下降更为充分。

（5）布水均匀，无换热盲区。塔内布水管与雾化喷头规整排布，喷雾形态均匀稳定，有效规避沟流、局部死区等问题，塔内温度场分布更为均衡。

（6）水资源损耗小。搭配低背压雾化喷头与高效收水器，结合合理的流体流速设计，大幅度降低塔顶漂水现象，减少循环水损耗，改善现场作业环境。

（7）运维便捷，综合效益高。塔体内部空间充足，设备检修、保养操作便利；不再需要定期清洗、更换填料，大幅度减少运维工作量与相关费用，设备服役周期与运行稳定性同步提升[5]。

3　技术改造方案

3.1　设计工艺参数

本次改造采用的无填料喷雾冷却塔为钢混结构，其核心设计及运行参数如下：单塔处理水量1 000 m^3/h；进塔水温39 ℃，出塔水温29 ℃；环境工况条件，干球温度26 ℃，湿球温度21 ℃；塔体截面尺寸7 800 mm × 7 800 mm；风机风量80×10^4 m^3/h，风机直径ϕ5 000 mm，配套电机功率37 kW；塔内风速3.3 m/s，喷淋密度16.44 $m^3/(m^2\cdot h)$，气水比（质量比）0.71；配置专用收水器。

3.2　改造内容

循环水冷却塔技术改造的核心内容为：彻底拆除塔内已结垢、堵塞、严重老化的原有S型波纹填料，旧布水管及收水器系统，新建一套先进的无填料喷雾冷却系统。针对风机系统的利旧可行性，进行了详细核算：原风机型号为ϕ5 000 mm，配套电机功率37 kW，额定设计风量为80×10^4 m^3/h。改造后，无填料喷雾系统消除了原填料层巨大的通风阻力，整套系统阻力将降低50%以上。根据风机工作特性，系统阻力下降后，风机工作点将沿其性能曲线向右下方移动，实际运行风量显著提升。经测算，风量可增加约20%，达到96×10^4 m^3/h的水平，且仍处于风机高效工作区内，保证了运行经济性。根据风机轴功率与风量的关系进行理论计算：风量增至1.2倍后，理论上功率需求下降至约

（1/1.2³）× 37 kW≈21.4 kW，并适用于维持原系统压差的情况。由于系统阻力大幅度降低，驱动风量所需的整体功率下降。在阻力降低的系统中，风量增加20%时，功率的实际变化取决于新的系统特性曲线，原有37 kW电机功率储备充足，可满足增风后需求。因此，对原风机及电机进行利用在技术上是完全可行的，并节约大量改造投资。

3.3 喷头选型

根据工艺计算，要求如下：喷头工作背压控制在0.020 ~ 0.049 MPa（2 ~ 5 m水柱）；喷射角度90°；单塔循环水设计流量控制在1 000 m³/h；冷却塔进出口循环水温差10 ℃；其喷头规格选用SCT-50F防堵型喷雾冷却塔专用喷头，其在不同压力下流量及喷淋高度见表1。

表1 不同压力下喷头流量及喷淋高度

Table 1 Flow rate and spray height of nozzle under different pressures

压力/MPa	流量/(m³·h⁻¹)	喷淋高度/m
0.02	5.0	0.6
0.03	6.0	0.8
0.04	6.9	1.0
0.05	7.7	1.2
0.06	8.3	1.6
0.07	9.8	2.1

综合考虑产品配件的通用互换性及冷却塔回水流量波动，选择按0.04 ~ 0.06 MPa压力设计喷头，该条件下喷头单头流量为6.9 ~ 8.3 m³/h，喷淋高度为1.0 ~ 1.6 m，经计算，单塔需喷头数为（1 000 / 7.6 ）个≈132个，满足工艺运行要求。在运行过程中，水中存在微生物及淤泥，还造成平衡管堵塞，因此在平衡管下部设置了一个排污喷头，排出喷淋系统内残留的杂质和污泥，防止发生堵塞或结晶等杂物生成。

3.4 布水层及收水层

布水层安装在原填料层支撑横梁上，收水层安装在原收水层位置，收水层及布水层均铺设100 m×100 m的安全格栅，以方便日常维护。因收水层横梁跨度偏大，根据现场情况使用304不锈钢对其进行加固，以防止氧腐蚀发生。塔内喷淋管安装在梁架上方铺设的格栅板上，使落下的液滴在栅格板再次破碎，进行二次热交换；同时使进入塔内的风得到均匀分布，并且栅格板具有检修平台的功能。

冷却塔结构示意见图1。

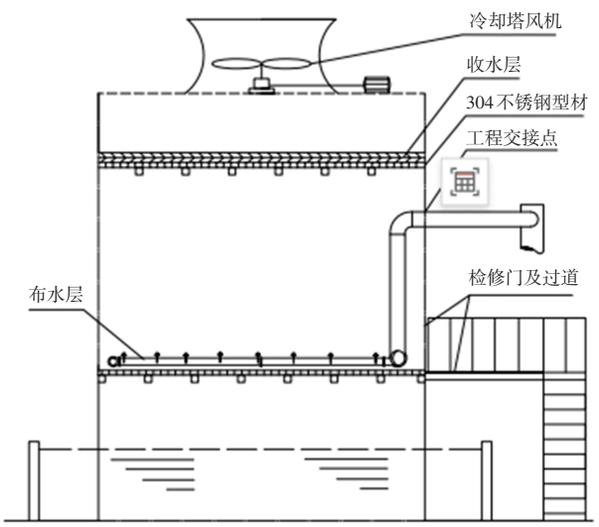

图1 冷却塔结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cooling tower structure

3.5 运行效果比较

冷却塔的冷却过程需要大量的能源支持，冷却塔节能改造是提高能效的重要方法。在流体力学层面，通过精确计算的喷嘴流道设计，使热水在较低的操作压力（通常仅为0.04 ~ 0.06 MPa）下，便能被高效雾化成直径仅为0.5~1.0 mm的均匀细微雾滴。这一过程使得单位体积水体的比表面积相较于在填料上形成的水膜状态激增了约20%，为水与空气的充分接触创造了理想条件。在空气动力学与热力学层面，被向上喷射的雾滴群与由风机抽吸的冷空气在塔内形成了复杂的多流程换热模式。雾滴首先在上升阶段与空气顺流换热，到达一定高度后，在重力和气流作用下转向，进行逆流换热。这种“顺流+逆流”的双重冷却过程，显著延长了水汽在塔内的有效热交换时间，使得以蒸发散热为主导的冷却机制得以充分发挥，冷却效率因此获得跃升。改造前后冷却塔进出水温差见表2。

从表2中可以看出，在同等负荷条件下，与原填料冷却塔相比，无填料喷淋冷却塔进塔水温下降6.5 ~ 7.6 ℃，出塔水温下降5.4 ~ 5.7 ℃，温差下降1.5 ~ 2.5 ℃，冷却风扇运行减少1台，有效降低了循环水温度，克服了填料塔因填料老化变形、脆裂和喷头堵塞及冲落的问题，消除了填料碎片堵塞管道、泵和换热器的隐患[6]，提高了热交换效果。冷却塔的系统阻力、风机的全压值降到填料塔的50%，轴流风机的风量增至填料塔的120%，相同冷却水量时气水比增加20%，降低了气水比，提高了冷却效果。

表2　改造前后冷却塔水温度差

Table 2　Temperature difference of cooling tower water before and after renovation

日期	装置生产负荷/%	泵出口流量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	压力/MPa	出塔温度/℃	进塔温度/℃	温度差/℃	冷却风扇运行台数
4月3日①	100	2 560	0.27	33.9	44.6	10.7	4
4月13日①	100	2 498	0.27	34.0	44.0	10.0	4
6月16日②	100	2 516	0.26	28.5	37.0	8.5	3
6月26日②	100	2 602	0.27	28.3	37.5	8.2	3

注：①改造前；②改造后。

4　经济效益分析

按装置年运行330 d计算，产生的经济效益如下。

（1）节水效益。吨酸水耗由0.41 m^3降至0.38 m^3，年节约水量：(0.41−0.38)m^3/t ×800 000 t=24 000 m^3。按水价3.5元/m^3计，年节约水费：24 000 m^3× 3.5元/m^3=8.4万元。

（2）节电效益。停运1台37 kW风机，年节电量：37 kW × 24 h/d × 330 d=293 040 kW·h。按电费0.5元/kW·h计，年节约电费：293 040 kW·h × 0.5元/（kW·h）=14.652万元。

（3）节省维修费用。原填料塔每年需对填料、喷头进行清洗、更换，且酸冷器清垢频繁。技改后，节省因堵塞导致的系统清洗、维修费用及人工成本约5万元/a。

年总运行收益：节水效益+节电效益+节省维修费用=（8.4+14.652+5）万元=28.052万元。

改造投入成本：本项目主要投资为设备购置、安装及施工费用，主要包括喷雾喷头、布水管网、格栅板、收水器及加固材料费等，即：塔内件（除沫器、格栅、布水管、喷淋系统等）24.5万元/个×4个=98万元；检修门及钢平台6万元/个×2个=12万元，收水层钢梁加固（材质304不锈钢）2万元/个×4个=8万元，总投资额约为118万元。

投资回收期：静态投资回收期=总投资/年总收益=118万元/（28.052万元/年）≈4.2年。

5　结语

循环水冷却效果的好坏是影响生产的关键因素，由于传统填料冷却塔存在诸多问题，将传统的填料塔改为低压雾化冷却塔后，从根源上杜绝了结垢、堵塞、老化碎裂等问题，设备可靠性及对水质的适应性显著增强。系统通风阻力降低约50%，在同等风机功率下，入塔风量可提升约20%，有效增大了气水比，并降低风机运行能耗。配合高效的多波段收水器，能有效捕获飘逸的水滴，将飘水率控制在极低水平，实现了节水与环保的双重目标。同时可以有效解决传统填料塔冷却效率不高、分水不均、飘雨严重的问题[7]，延长了维护周期，降低检修频率以及维修工作量和修理费用，维修周期可达5年，使用寿命20年，确保系统长周期、满负荷稳定运行。无填料喷雾冷却塔阻力较传统填料塔降低50%，经济效益和社会效益显著，适宜在工业循环水系统中推广应用。

［参考文献］

[1] 周智武.湿法磷酸凉水塔的改造及应用实践[J].贵州化工，2010,35(4):59-61.
Zhou Zhiwu. Improvement and application of cool water tower in wet-process phosphoric acid [J].Guizhou Chemical Industry, 2010, 35(4): 59-61.

[2] 严永江,许彦春,庞春虎,等.填料式凉水塔系统的节能改造[J].化工进展,2011,30(6):1388-1390.
Yan Yongjiang, Xu Yanchun, Pang Chunhu, et al. Energy saving cooling tower system packing[J].Chemical Industry and Engineering Progress,2011,30(6):1388-1390.

[3] 雷玉进.循环水凉水塔填料更新改造总结[J].大氮肥,2015,38(6):400-402.
Lei Yujin.A summary of changing packing in circulating water cooling tower[J]. Large Scale Nitrogenous Fertilizer Industry, 2015,38 (6):400-402.

[4] 刘宝峰,顾收红.浅谈无填料喷雾冷却塔在我公司循环水系统中的运用[J].中国井矿盐,2012,43(3):11-13.
Liu Baofeng, Gu Shouhong. Brief Discussion on the Application of Spray Cooling Tower with Packing in the Circulation Water System in Our Company[J].China Well and Rock Salt,2012,43(3):11-13.

[5] 吕庆峰.GLF无填料雾化冷却塔在造气循环水中的应用[J].中氮肥,2011,4(7):57-59.

[6] 王友萍,张广超,杜新敬.喷雾技术在冷却塔改造中的应用[J].河南化工,2006,23(7):34.

[7] 刘文政,张忠辉,李永辉,等.无填料喷雾冷却塔在工业循环水系统中的应用[J].磷肥与复肥,2015,30(11):41-43.
Liu Wenzheng, Zhang Zhonghui, Li Yonghui, et al. Application of spray cooling tower without filler in industrial circulating water system[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2015, 30(11):41-43.