◆设备、控制与安全生产◆

# 无填料喷雾冷却塔在磷酸循环水冷却系统中的应用

严世科，杨立圭，魏正坤

（云南三环中化化肥有限公司 生产维保部，云南 昆明 650113）

［摘 要］为彻底解决云南三环中化化肥有限公司磷酸循环水装置中6台玻璃钢填料冷却塔冷却效果逐年下降（进出水温差由8 ℃降至5 ~ 6 ℃）、循环水量大幅增加（单套装置由3 000～3 200 $m^3$/h增至5 000～6 000 $m^3$/h）、管道阀门堵塞、钢筋混凝土框架及墙体冲刷腐蚀、冷却塔飘液严重等问题，在对故障原因进行系统分析的基础上，提出了将填料冷却塔整体改造为无填料喷雾冷却塔的技术方案。改造后，单塔冷却水量可达4 000～4 200 $m^3$/h，进出塔水温差稳定在8 ℃以上，飘水率由改造前的0.011 8%～0.014 8%降至0.002%，彻底解决了温差不足、水量增加、设备堵塞、结构腐蚀和飘液污染等问题。此外，无填料结构塔内通风阻力降低了40%～50%，气水质量比提高约20%，雾化喷淋使水比表面积增大20%，且实现了顺流—逆流双过程热交换，冷却效率显著提升。

［关键词］磷酸循环水；无填料冷却塔；空塔喷雾冷却；雾化喷头；冷却效率；飘水率

［中图分类号］TQ053 ［文献标志码］A ［文章编号］2097-4566（2026）08-0120-05

## Application of filler-free spray cooling tower in phosphoric acid circulating water cooling system

YAN Shike, YANG Ligui, WEI Zhengkun

(*Production and Maintenance Department, Yunnan Three Circle-Sinochew Chemical Fertilizer Co., Ltd., Kunming* 650113, *China*)

**Abstract**: To thoroughly address the problems of six glass-fiber-reinforced plastic packed cooling towers in the phosphoric acid circulating water system at Yunnan Three Circle-Sinochem Chemical Fertilizer Co., Ltd., including the declining in cooling performance (temperature difference between inlet and outlet decreases from 8 ℃ to 5-6 ℃), significant increase in circulating water flow rate (from 3 000 - 3 200 $m^3$/h per unit to 5 000 - 6 000 $m^3$/h per unit), severe pipeline and valve clogging, erosion and corrosion of the reinforced concrete frame and walls, and serious water drift pollution to the surrounding environment. A technical retrofitting scheme that completely converts the packed cooling towers into packed-free spray cooling towers is proposed. After technical transformation, the single-tower cooling water capacity reaches 4 000 - 4 200 $m^3$/h, the temperature difference between inlet and outlet remains stably above 8 ℃, and the drift loss rate decreases from 0.011 8%-0.014 8% before retrofitting to as low as 0.002%. The issues of insufficient temperature difference, increased water volume, equipment clogging, structural corrosion, and liquid droplet contamination have been thoroughly resolved. Additionally, the filler-free structure reduces internal ventilation resistance by approximately 40% to 50%, enhances the air-to-water ratio by about 20%, and increases the water's surface area through atomized spray by 20%. This design achieves both concurrent and counter-current heat exchange processes, significantly improving cooling efficiency.

**Key words**: phosphoric acid circulating water; filler-free cooling tower; empty-tower spray cooling; atomizing nozzle; cooling efficiency; drift loss rate

云南三环中化化肥有限公司磷酸循环水装置6台玻璃钢填料冷却塔（A-F）2007年投入生产使用，使用初期温差达到8 ℃，2015年后在给水量、水温相同的情况下，温差越来越小，到2022年温差只有5～6 ℃，每套浓缩装置（15万t/套）循环水用量从3 000～3 200 $m^3$/h增加到5 000～6 000 $m^3$/h；

**收稿日期**:2024-01-18； **修回日期**:2025-06-09

**作者简介**:严世科(1965— )，男，云南永胜人，高级工程师，从事合成氨、磷酸、磷复肥生产管理工作。

另外循环水系统管道阀门堵塞，阀门关闭不严，钢筋混凝土框架、填料段墙体受到冲刷腐蚀，冷却塔飘液严重，污染周围环境。为了彻底解决以上问题，2023年磷酸循环水装置全部改为空塔喷雾冷却。

改造前每个冷却塔采用20根水管布水，每根水管上安装一定数量的喷嘴，水从喷嘴处喷淋扩散后，再经大网格填料分布散热，上部有轴流风机将蒸发的水蒸气抽走，气体排空前经收水器将冷凝水收掉。由于布水管堵塞、喷嘴堵塞、填料垮塌等原因导致水分布不均，循环水的上水和回水温差不够，收水器长期使用老化和缺失，导致收水效果不佳，周边环境漂液严重。通过技改后，将目前的冷却塔改为空塔，采用无堵塞雾化喷淋装置，改造收水器结构和厚度，解决循环水散热不佳和漂水问题，保证生产和改善周边环境[1]。

## 1　原因分析

### 1.1　冷却效果越来越差的原因

（1）填料堵塞：磷酸装置的循环水含氟化物、硅胶、钾钠盐等；导致填料结垢；循环水中所带的泥沙在填料表面沉积，随着使用时间的推移，结垢及沉积物越来越多，填料堵塞，填料的换热通道越来越小，换热效果越来越差；随着使用时间的推移填料老化后垮塌；填料老化破碎，导致填料堵塞；收水板老化断裂，掉落在填料上导致填料堵塞。

（2）喷头堵塞：收集池、地沟未全封闭，这部分水夹带塑料布等异物堵塞喷头；老化破碎的填料、收水板进入循环水系统堵塞喷头。

（3）产生偏流：填料老化后局部垮塌导致偏流；填料老化破碎，导致填料局部堵塞，发生偏流；老化破碎的填料进入循环水系统，回水夹带破碎填料堵塞喷头，导致布水不均匀，产生偏流。

### 1.2　循环水系统管道阀门堵塞严重的原因

老化破碎的填料进入循环水系统后堵塞循环水系统管道阀门，特别是泵出口电动蝶阀和止回阀。

### 1.3　钢筋混凝土框架、墙体冲刷腐蚀原因

偏流刚好在钢筋混凝土框架或四周墙体处，造成局部冲刷；靠墙体的单个喷头部分堵塞后散不开，喷头喷出的水直接成股喷在墙体上，冲刷墙体。

### 1.4　冷却塔飘液原因

收水板老化变形，收水效果差；收水板老化破碎，部分收水板缺失。

## 2　解决措施

从以上分析看出该冷却塔的问题与框架、风扇、风扇减速机、抽风筒关系不大，主要问题在布水管、喷头、填料、收水板上，所以针对布水管、喷头、填料、收水板进行改造，框架、风扇、风扇减速机、抽风筒采用原有设施配置。改造工况及参数，见表1。

**表1　改造工况及参数**

**Table 1　Renovation conditions and parameters**

| 塔的结构型式 | 冷却方式 | 数量/台 | 处理水量/($m^3$·$h^{-1}$) | 进塔水温/℃ | 出塔水温/℃ | 干球温度/℃ | 湿球温度/℃ | 平面基础尺寸/mm | 风量/($m^3$·$h^{-1}$) | 风机直径/mm | 叶轮转速/(r·$min^{-1}$) | 配用电机功率/kW | 塔内风速/(m·$s^{-1}$) | 喷淋密度/($m^3$·$m^{-2}$·$h^{-1}$) | 气水质量比 | 收水器形式 | 飘水损失/% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 混凝土框架结构 | 无填料喷雾冷却 | 6（A/B/C/D/E/F） | 3 300～4 000 | 36～38 | 26～30 | 24.4 | 19.9 | 17 600×18 600 | $273\times10^4$ | 8 530 | 149 | 185（变频调节） | 2.32 | 12.22 | 0.63 | 专用收水器 | ≤0.010 |

### 2.1　改造措施

（1）填料冷却塔改造为无填料喷雾冷却塔。无填料喷雾冷却塔，不需要填料散热，采用先进的分散冷却理论[2]，与冷空气接触的水的比表面积比填料分散成膜状的水的比表面积增大5%～10%。其原理是由水泵或利用循环水回水压力将需冷却的热水，经配水分布管送到喷管的雾化器喷嘴，当热水流经喷嘴时，产生内旋流，热水呈雾状向上喷出，与冷空气进行顺流—逆流两个过程的热交换，冷水落入冷水池，热空气经收水器除水后由塔顶风筒排入大气。采用无填料喷雾冷却塔后，降低了塔内通风阻力，减少了风机动力消耗，同时使用专用收水器除水可消除抽风筒出口的羽雾漂雨现象。

（2）不改变逆流式风筒抽风冷却。针对喷雾冷却塔的设计特点，塔体设计和风机特性相协调，风机风量大而静压偏低的特点[3-4]，在不改变逆流式风筒冷却塔的原则下，能大幅度降低塔阻，维持冷却

塔风机风量在273×10⁴ m³/h。

（3）冷却循环水流量3 300～4 000 m³/h。为适应悬浮物及水量的波动，冷却塔采用管式配水，水量波动控制在500～700 t/h，采用无堵塞雾化喷淋技术，使悬浮物波动在适应的许可范围内增大。

（4）喷头背压控制在2～5 m水柱。

（5）冷却塔进、出塔水的温差≥8 ℃。

（6）为减少气水损失及水气带液对周围环境的影响，喷淋层到收水层之间喷淋的高度应控制在收水层下方1 m处，同时采用折板式专用收水器，使飘水损失控制在循环水总量的0.010%以下，即漂水率≤0.010%。

**2.2** *实施步骤*

（1）拆除塔内全部填料、填料支架、布水管道、喷头及收水器，对拆除的旧材料进行无害化处置。

（2）塔内框架梁、柱及四面墙体修补，表面防腐。

（3）为满足冷却单塔最大循环量4 000 m³/h的冷却要求，取消原集水槽上10组DN250出水口。在集水槽上重新开4组DN500的孔，用DN500玻璃钢管引入布水管（见图1），以保证循环水回水不漫槽[5]，循环回水能全部通过雾化喷头，保证冷却塔的冷却能力长期稳定运行；为保证布水的均匀，将分配主管进水点靠近冷却塔中部，并在布水管下方设置方孔为50 mm×50 mm的高密度聚乙烯栅格板（见图2），布水管选用塑料管道，在确保强度的同时，减轻塔的承载重量，同时方便安装及后期的维护工作。另外，在每根布水管底部设置2个自动排污口，有效避免杂物沉积、堵塞。

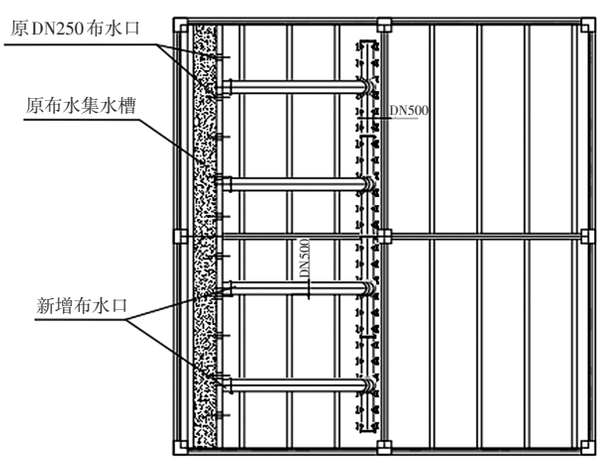


图1　布水管

Fig. 1　Water distribution pipe

（4）雾化喷头选择。根据冷却塔现场工艺条件和工艺参数，喷头采用昆明尔康科技有限公司专利产品——无填料冷却塔专用雾化喷头[1]，其型号标识为FDI–50F；喷头背压2～5 m水柱；喷射角度60°～90°；单塔循环水回水设计流量控制在3 300～4 000 m³/h；喷头材质GFP。循环水条件：pH=1～4；$w(P_2O_5)$≤2%；$w(F)$≤0.1%；温度0～40 ℃；$w$（固）1%。喷头与布水管的连接方式：法兰螺栓连接，喷淋方向自下而上（见图3）。

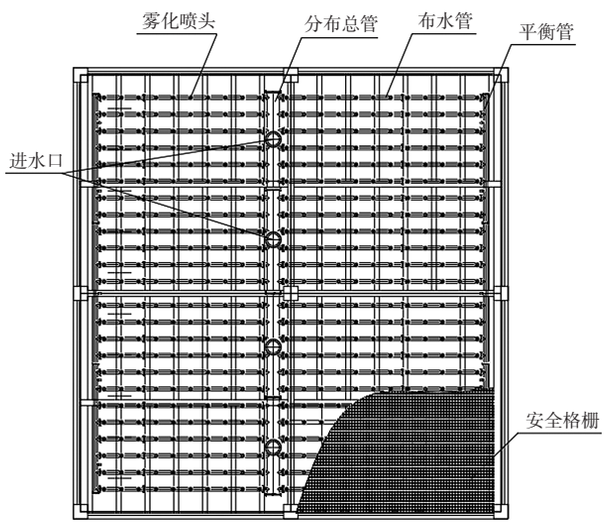


图2　高密度聚乙烯栅格板

Fig. 2　High density polyethylene grid board

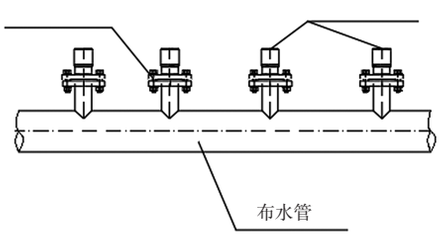


图3　喷头与布水管的连接方式

Fig. 3　Connection method between nozzle and water distribution pipe

FDI–50F冷却塔专用雾化喷头，在不同压力下流量及喷淋高度，详见表2。

**表2　FDI-50F冷却塔专用雾化喷头在不同压力下的流量及喷淋高度**

**Table 2　Flow rate and spray height of FDI-50F cooling tower dedicated atomizing nozzle at different pressures**

| 压力/MPa | 流量/(m³·h⁻¹) | 喷淋高度/m |
|---|---|---|
| 0.02 | 6.7 | 0.6 |
| 0.03 | 8.1 | 0.8 |
| 0.04 | 9.2 | 1.0 |
| 0.05 | 10.1 | 1.2 |

考虑到产品的配件的通用互换性及冷却塔流量波动，喷头背压均按0.04 MPa计，冷却水量按4 000 $m^3/h$计。

（5）收水器的选择与安装：收水器采用折板式（材质HDPP）收水器，收水层高度2×150 mm，即两层总高300 mm，收水板厚度3 mm。并在收水器下方铺设方孔为100 mm×100 mm的HDPP安全栅格板。其示意图如图4所示。

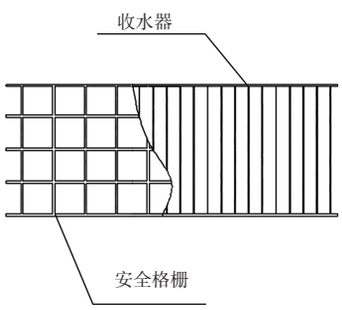


图4　方孔为100 mm×100 mm的HDPP安全栅格板

Fig. 4　HDPP safety grid board with square holes of 100 mm × 100 mm

（6）检修维护平台及检修门安装：冷却塔原检修通道都设置于冷却塔顶部，冷却塔检修、塔内件更换及维护都必须停机后，从抽风筒进入，对冷却塔日常维护及安全管理存在安全隐患，因此在冷却塔布水层（标高7.25 m处）增加检修门及检修平台，在塔内作业检修时，塔内人员可以快速进入或撤离，提高其安全性。

根据冷却塔的结构，布水层上下横梁间高1.4 m，因此，检修门开孔大小控制为800 mm×1 200 mm，以确保开孔后保持冷却塔结构的稳定。

改造施工在系统运行、单塔停车状态下进行施工。进行单塔改造时涉及两个塔共用一个水池[6]：即一个塔正常运行、循环水泵工作的情况下，为了防止塔内拆除物落入水池损坏设备和保证施工人员的安全，施工前在水池水面安装安全平台，安全平台下方铺设高密度泡沫板，整体铺装后上方覆盖一层加厚阻燃耐高温帆布，每班作业结束后清理帆布上的杂物，以免发生火灾和拆除物落入水中等安全问题，安全平台待冷却塔竣工后进行拆除。

## 3　改造后效果

改造后实测冷却水量4 000～4 200 $m^3/h$，冷却塔进、出塔水的温差≥8 ℃（见表3）；采用折流板式收水器代替传统的收水器，改造前1#～4#冷却塔漂水率为0.011 8%～0.014 8%，改造后1#～4#冷却塔漂水率低至0.002%。

**表3　1#～4#冷却塔改造后循环水回水温度**

**Table 3　Actual measurement of circulating water return Temperature after renovation**

| 序号 | 记录日期 | 1#塔 | | 2#塔 | | 3#塔 | | 4#塔 | | 循环水回水温度实测/℃ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 出水温度/℃ | 温差/℃ | 出水温度/℃ | 温差/℃ | 出水温度/℃ | 温差/℃ | 出水温度/℃ | 温差/℃ | |
| 1 | 2023-08-05 8:00 | 26.5 | 8.11 | 26.5 | 8.10 | 26.3 | 8.3 | 26.1 | 8.46 | 34.56 |
| 2 | 2023-08-05 14:00 | 26.4 | 8.16 | 26.2 | 8.36 | 26.1 | 8.51 | 26.0 | 8.56 | 34.56 |
| 3 | 2023-08-05 20:00 | 26.1 | 8.46 | 26.4 | 8.16 | 26.3 | 8.26 | 26.4 | 8.16 | 34.56 |
| 4 | 2023-08-06 2:00 | 26.3 | 8.26 | 26.2 | 8.36 | 26.1 | 8.46 | 26.3 | 8.26 | 34.56 |
| 5 | 2023-08-06 8:00 | 28.1 | 8.15 | 27.9 | 8.35 | 27.8 | 8.45 | 28.1 | 8.15 | 36.25 |
| 6 | 2023-08-06 14:00 | 28.9 | 8.43 | 29.3 | 8.03 | 29.0 | 8.31 | 29.1 | 8.23 | 37.33 |
| 7 | 2023-08-06 20:00 | 28.6 | 8.52 | 29.1 | 8.07 | 29.1 | 8.02 | 29.0 | 8.12 | 37.12 |
| 8 | 2023-08-07 2:00 | 27.6 | 8.25 | 27.7 | 8.15 | 27.5 | 8.35 | 27.0 | 8.85 | 35.85 |
| 9 | 2023-08-07 8:00 | 27.6 | 8.13 | 27.6 | 8.13 | 27.4 | 8.33 | 27.1 | 8.63 | 35.73 |
| 10 | 2023-08-07 14:00 | 27.7 | 8.03 | 27.5 | 8.23 | 27.5 | 8.23 | 27.5 | 8.23 | 35.73 |
| 11 | 2023-08-07 20:00 | 31.6 | 8.43 | 31.3 | 8.73 | 31.4 | 8.63 | 31.2 | 8.83 | 40.03 |
| 12 | 2023-08-08 2:00 | 28.3 | 8.1 | 27.9 | 8.50 | 27.9 | 8.50 | 28.1 | 8.30 | 36.40 |
| 13 | 2023-08-08 8:00 | 27.8 | 8.17 | 27.2 | 8.77 | 27.3 | 8.67 | 27.3 | 8.67 | 35.97 |

## 4　结论

（1）因无填料喷淋冷却塔不用填料，所以传统冷却塔中因使用填料而产生的诸如钙、镁、硅胶等无机盐及微生物的黏附[6-8]、填料的老化碎裂、堵

塞等问题便不复存在，省去了更换填料的费用，降低了运行成本。特别针对磷酸循环水水质差、固含量高、易结垢的特点，比填料塔的冷却效果好，运行周期长，解决了布水不均、产生偏流造成的冷却塔冷却效率下降的问题，冷却能力更稳定。

（2）因无填料降低了通风阻力，增大了进塔空气量。在传统的填料塔中，填料的阻力约占全塔总阻力的40%～50%。不使用填料，从而使全塔总阻力下降40%～50%，风量沿风机运行曲线增大[9]。气水质量比可增大20%，提高了冷却效率。

（3）增大了热水的散热面积，热水从喷嘴中以直径0.5～1.0 mm的雾状均匀喷出，水雾直径愈小，则水的比表面积愈大。实践证明，喷淋雾化冷却比填料冷却水的比表面积增大约20%，在同样冷却条件下，蒸发散热与接触散热加快。

（4）延长了热水与空气的热交换时间。填料冷却时，热水只有从填料上部向下部流淌的一个冷却过程（即逆流过程），而喷淋雾化冷却时，热水有顺流和逆流两个冷却过程，使热水冷却更充分，同时，部分水雾将在塔中悬浮，延长了热水与空气的热交换时间[10]。

（5）维护检修方面：在塔内设置栅格板，方便检修，不但提高了入塔人员的安全性，同时节约检修时间、加快检修进度、降低人工成本。塔内喷淋雾化冷却层分布管与喷淋管之间、喷头与喷淋管之间均采用法兰连接，方便检修维护或更换。

空塔喷雾冷却彻底解决了冷却效果越来越差、循环水系统管道阀门堵塞严重、钢筋混凝土框架、墙体冲刷腐蚀、冷却塔飘液等问题，还降低了运行和维护成本，提高了运行稳定性和安全性；但该设备仅适用于回水位差大于2 m的情况。

## [参考文献]


[1] 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.

[2] 胡文武，陈以明.无填料喷雾冷却塔在湿法磷酸装置中的应用[J].磷肥与复肥，2021，36(5)：39-40，43.
Hu Wenwu, Chen Yiming. Application of spray cooling tower without filler in wet-process phosphoric acid plant [J]. Phosphate & Compound fertilizer, 2021, 36 (5): 39-40, 43.

[3] 吴承刚.无填料喷雾冷却塔在大型火电机组中的应用[J].发电设备，2019，33(4)：282-284.
Wu Chenggang. Application of no-packing spray cooling tower in large thermal power units [J]. Power Equipment, 2019, 33 (4): 282-284.

[4] 魏峥，齐晓霓.无填料喷雾冷却塔的水滴当量直径研究[J].科学技术与工程，2013，13(17)：4797-4800，4837.
Wei Zheng, Qi Xiaoni. Investigation on the Equivalent Diameter of Water Droplets in showing [J]. Science, Technology, and Engineering, 2013, 13(17): 4797-4800, 4837.

[5] 路建岭.无填料喷雾冷却塔的热力模型[J].洁净与空调技术，2013(2)：25-27.
Lu Jianling. Thermal model of the no-padding and spraying cooling tower[J]. Contamination Control & Air Conditioning Technology, 2013(2): 25-27.

[6] 王文毓，莫志强，钟鸥，等.无填料喷雾冷却塔在磷酸循环水系统中的应用[J].磷肥与复肥，2012，27(6)：32-33.
Wang Wenyu, Mo Zhiqiang, Zhong Ou, et al. Application of no-padding and spraying cooling tower of circulating water system of phosphoric acid production [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2012, 27(6): 32-33.

[7] 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 inthe Circulation Water System in Our Company [J] China Well and Rock Salt, 2012, 43 (3): 11-13.

[8] 苏超康，刘中位.无填料喷雾冷却塔在糖厂循环水池技改中的应用[J].广西轻工业，2009，25(9)：46-47.

[9] 路建岭，邹志军，黄晨，等逆顺流式与逆流式无填料喷雾冷却塔的试验研究[J]流体机械，2009，37(5)：52-56.
Lu Jianling, Zou Zhijun, Huang Chen, et al. Experimental Study on Parallel & Counter-flow and Counter-flow No-padding Spraying Cooling Tower[J] Fluid Machinery, 2009, 37(5): 52-56.

[10] 苗学舜，胡书伦，李世其无填料喷雾冷却塔的应用情况与研究方向[J]工业用水与废水，2006(S1)：54-55，57.