

Study on the influence of central air conditioning cooling water quality management on energy saving and operation efficiency of air conditioning system

Guoliang Lai

Shenzhen Ruijie Technology Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong, 511495, China

Abstract

Effective cooling water quality management is crucial for ensuring the efficient, stable, and cost-effective operation of large-scale air conditioning systems. In practical management scenarios, inadequate water quality control leads to scaling, corrosion, and microbial growth, which significantly reduces heat exchange efficiency during cooling tower operation. Elevated cooling water temperatures cause compressors and pumps to operate at higher energy consumption levels, directly increasing operational costs. Moreover, deteriorating water quality raises equipment failure rates and maintenance replacement expenses, substantially raising overall operational costs. Establishing a scientific water quality monitoring system, implementing water treatment solutions, and strictly enforcing regular maintenance can effectively reduce operational costs and enhance the energy efficiency of air conditioning systems.

Keywords

cooling water treatment; energy saving operation; energy consumption reduction; heat conduction efficiency; equipment and pipeline corrosion

中央空调冷却水质管理对空调系统的节能运维能效影响研究

赖国良

深圳瑞捷技术股份有限公司, 中国·广东广州 511495

摘要

良好的冷却水质管理是保障大型空调系统高效、稳定、经济运行的核心要素。在现实管理案例中水质管理不到位导致的结垢、腐蚀和微生物滋生, 冷却塔运行中会显著降低系统的热交换效率, 冷却水温在较高的范围, 导致压缩机和水泵在更高的能耗水平下运行, 直接推高运行成本。同时, 水质恶化会增加设备故障率和维修更换费用, 大幅提升整体运维成本。建立科学的水质监测体系、水处理方案、严格执行定期维护, 才能降低运维成本、提升空调系统能效。

关键词

冷却水质处理; 节能运行; 能耗降低; 热传导效率; 设备及管道腐蚀

1 引言

大型中央空调系统冷却水质不佳会通过多种途径显著降低系统效率、增加能耗、缩短设备寿命并推高运维成本; 在实际管理案例中的数据, 良好的水处理通常可以将冷却水系统的能耗降低 10%~20%, 甚至更多, 并在长周期运维中节省大量成本。投资于专业的水处理管理, 水质的管理其回报远高于成本。

以下是冷却水质对空调系统运维能效的具体影响及处理措施:

2 主要影响主机散热, 降低能效、增加运行能耗

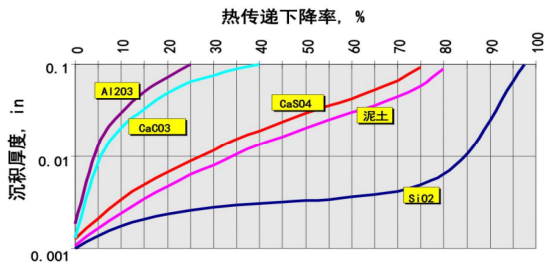
2.1 管道散热器结垢

水垢的主要成分为碳酸钙/镁, 制冷设备在散热过程中是由循环冷却水经冷却塔强制蒸发带走热量来完成的, 随着冷却水的不断循环浓缩各种有害离子, 大气中的尘灰, 微生物将在循环水中越积越多, 灰尘和微生物以污泥的形成粘附在水路系统管壁上, 有害离子如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SiO_2 、 CO_2 的浓缩超过饱和指数则以盐结晶状沉积在 SO_2 、换热管中(水垢形成的原理)[1]。

2.2 产生结垢原因

水中溶解的矿物质(主要是钙、镁离子形成的碳酸盐、硫酸、硅酸盐等)在换热器(冷凝器、冷却塔)管壁沉积, 形成坚硬的水垢层。

【作者简介】赖国良(1980-), 男, 中国广东韶关人, 本科, 工程师, 从事热能与动力工程(制冷与空调技术)研究。



在干净的热交换表面由沉积物覆盖导致的热隔绝效应

从上表可以看出冷却水结垢影响能效非常明显，主要有以下影响：

降低冷凝器热传导效率：水垢的导热系数远低于金属管壁（通常只有金属的 1/50 到 1/100），形成隔热层，严重阻碍热量从制冷剂传递给冷却水（在冷凝器中）。

增加压缩机功耗：冷凝器结垢，内部管道管径变小，冷凝压力升高，压缩机需要更大的压差和功率才能将相同流量的制冷剂气体压缩到更高的压力；研究表明，冷凝温度每升高 1° C，压缩机功耗增加约 24%。

结垢降低冷却塔散热版：附着在冷却塔散热板表面，形成隔热层，导致热量需先穿透水垢才能传递到喷淋水或空气中，而水垢的导热系数远低于金属材料（如铜/铝），显著降低热交换效率；结垢还会散热面积减少，结垢会堵塞散热板间隙或填料孔隙，减少有效接触面积，影响空气与水的换热，开放式冷却塔中，水垢还可能混合泥沙进一步加剧堵塞；闭式冷却塔盘管结垢后，散热效率可能下降 30% 以上。

减少制冷量：冷却水的结垢后换热效率下降导致系统整体制冷能力下降。

增加水泵功耗：结垢会减小管道流通截面积，增加水流阻力，迫使水泵在更高的扬程下工作以维持所需流量，增加水泵能耗。

能效损失参考值：

冷凝器结垢：冷凝温度每升高 1° C，压缩机功耗增加 36%。

蒸发器结垢：蒸发温度降低 1° C，制冷量减少 24%。

水泵能耗：管道截面积缩小导致水流阻力增大，水泵能耗上升 10-30%[2]。

水质污垢与空调机组耗能关系表

污垢与冷水机组耗能的关系				
污垢系数		污垢厚度		耗能增加 (%)
H. ft ² . F/Btu	m ² . °C/kw	inch	mm	
0.00025	0.044	1/320"	0.1	3.10%
0.00050	0.088	1/160"	0.2	6.20%
0.00100	0.176	1/80"	0.4	12.40%

数据来源于美国暖通空调工程师协会2000年手册

冷却水结垢能效损失的量化对比

水质状态	压缩机功耗增幅	制冷量降幅	系统综合能效比 (COP) 降幅
轻度结垢 (0.5mm)	8-12%	5-10%	10-15%
中度生物污垢	15-25%	20-30%	25-40%
严重腐蚀+结垢	30%+	40%+	50%+

注：数据基于 ASHRAE 案例研究，COP 降幅= (设计 COP - 实际 COP) / 设计 COP

2.3 冷却水质差导致的设备及管道腐蚀

空调冷却水微生物腐蚀，高含量的微生物会引起金属

腐蚀。溶解氧腐蚀，溶解氧的去极化作用，促进金属表面微电池反应导致腐蚀。点腐蚀，金属表面上产生某些呈点状或小孔状的局部腐蚀。其中超过 70% 腐蚀是由微生物加速滋生导致。

设备及管道腐蚀原因：水中溶解氧、酸性物质（低 pH）、氯离子、硫酸根离子、微生物活动产物等都会侵蚀金属（铜、钢、玻璃钢等）管道和换热器。

腐蚀同样影响制冷系统的能效：降低热传导效率，腐蚀产物（如氧化铁、硫化铜）附着在管壁上，同样形成隔热层，效果类似结垢。

增加水流阻力：腐蚀产物沉积或管壁粗糙度增加，增加水流阻力，提升水泵能耗。

设备损坏风险：严重腐蚀会导致管壁穿孔、泄漏，迫使系统停机维修或更换部件，造成间接的能效损失（停机期间备用系统或低效运行）和高昂的更换成本。

腐蚀后的二次结垢，腐蚀产物本身可能成为新的结垢核心，加剧结垢问题。

腐蚀部件基本都需要更换，维修成本高昂（数据表明占系统总维护成本 30%+）。

2.4 冷却水微生物滋生造成生物污垢

冷却水系统，尤其是开式冷却塔在适宜的温度、光照、氧气和营养物（灰尘、有机物）环境，极易滋生细菌、藻类、真菌及其形成的生物粘泥。

形成生物粘泥层：微生物及其分泌物在换热表面形成粘滑、疏松但隔热效果显著的生物膜层。

阻碍传热：生物膜同样严重降低热传导效率，效果与无机垢类似。

增加水流阻力：生物粘泥堵塞管道、填料、过滤器，显著增加水流阻力，大幅提升水泵能耗。

加剧腐蚀：某些细菌（如铁细菌、硫酸盐还原菌）的代谢活动会直接加速金属腐蚀（微生物腐蚀 MIC）。

促进结垢：生物粘泥为无机垢的沉积提供了附着点和核心。

冷却塔滋生的藻类、细菌形成生物粘泥生物污垢生物膜隔热性极强，结合腐蚀和结垢传热效率降低 20-40%；

严重的会堵塞过滤器及管道，导致水泵扬程需求增加 15-25%；

微生物代谢产物（如硫化氢）会加速冷凝器及管道腐蚀（MIC）。

2.5 悬浮物沉积

冷水管施工时留存在管道的泥沙、灰尘、锈渣、生物残骸等固体颗粒严重影响能效，堵塞管道和设备：沉积在低流速区域、换热管、过滤器、喷头等处，减少有效流通面积，增加水流阻力导致水泵能耗上升；降低传热效率：沉积物覆盖在传热表面形成隔热层，同时高速水流携带的颗粒会造成管道和叶轮的冲蚀磨损。

3 如何优化冷却水质以提高空调系统能效

3.1 做好水质在线监测

采用智能监测与运维管理，安装云平台水质自动分析系统，指标超标制动预警，防止结垢/腐蚀趋势。

3.2 根据在线监测数据结垢，进行预测性维护

在线监测的情况下定期每个月人工检测水质指标：硬度（结垢倾向）、碱度、pH（结垢/腐蚀倾向）、电导率/TDS（浓缩倍数控制）、浊度/悬浮物、微生物含量（细菌总数、生物粘泥量）、关键离子浓度（ Cl^- , SO_4^{2-} 腐蚀性离子）、

药剂浓度（余氯、缓蚀阻垢剂浓度）；每季度红外热成像检测换热器，定位堵塞管束 [3]。

4 优化水质提升能效的具体措施，进行全方位水质处理

4.1 水处理方案

物理处理：安装有效的过滤设备（旁滤器、全滤器），定期排污（控制浓缩倍数）安装在线自动反冲洗过滤器（精度 $\leq 100\mu m$ ），定期启动系统去除悬浮物；采用电子除垢仪或磁化处理抑制结垢（适用中低硬度水质）。

在线实时监测参数，把水质标准控制在标准范围内

指标	控制范围	检测采集频率	指标	控制范围	检测采集频率
电导率	$\leq 3000\mu S/cm$	在线连续监测	浊度	$\leq 10 NTU$	每周1次
pH值	7.59.2	每日1次	悬浮物	$\leq 5 mg/l$	每周1次
余氯	0.51.0 ppm	每班次1次	生物黏泥	$\leq 3mL/m^3$	每周1次
硬度	$\leq 500 mg/L$	每周1次	军团菌		线下专项检测

4.2 化学处理

根据水质和系统特点，科学选择并精确投加：阻垢分散剂、缓蚀剂、高效、广谱、非氧化性和氧化性杀菌灭藻剂（需交替使用防止微生物产生抗药性）

4.3 冷却水在线精准自动投加药剂装置

根据在线监测数据自动对循环水进行有效的药剂投加，确保对水质的调节和维护。通过精确控制药剂的投加量，确保循环水的化学成分始终维持在一个理想的范围内，从而达到优化冷却水质效果的目的。可以有效地防止水垢和腐蚀的产生。加药装置能够自动添加杀菌剂、缓蚀剂、防垢剂等，减少了人工操作中的误差，提高了用药的精准度，保障了整体系统的安全性。冷却塔水中添加化学药剂主要是为了防控微生物滋生、金属腐蚀以及水垢和污泥的形成，自动投加药剂从而确保冷却系统的水质稳定

杀菌剂：杀菌剂能有效杀灭或抑制微生物生长，保持水质清洁。常见的杀菌剂包括氯、次氯酸钠、臭氧、DBNPA等。具体来说：每立方米水通常加入1~5克氯或次氯酸钠。每立方米水加入2~4克臭氧。每立方米水加入5~10毫升50%的DBNPA溶液；在杀菌过程重非氧化性杀菌剂（季铵盐）与氧化性杀菌剂（次氯酸钠）交替使用 [4]。

抗藻剂：冷却水中加入抗藻剂防止藻类繁殖，减少藻类水垢和污泥。

分散剂：分散剂能分散水中的杂质，保持水质清澈。

阻垢剂（如HEDP）：阻垢剂能阻止水中的无机盐类（如碳酸钙、硫酸钙等）在冷却水系统中沉积形成水垢，保持系统的清洁和高效运行。阻垢剂能在水中较快地溶解，对设备和系统起到阻垢缓蚀作用。通常每立方米水加入30~60克阻垢剂，具体剂量需要根据水质和使用要求而定。

缓蚀剂（MBT）：保护金属管道免受腐蚀，提升设备耐用性。常见的缓蚀剂（缓释剂）包括硫酸铜和异氰酸酯等。

通常每立方米水加入20克硫酸铜和0.52克异氰酸酯，具体剂量应根据水质和缓释要求而定。

在选择和添加这些药剂时，需要根据冷却塔的具体水质、设备材质、运行要求以及环境等因素进行综合考虑，并遵循相关的操作规程，确保药剂的适量添加和有效作用。

5 冷却水系统的定期维护保养：

- 1、定期清洗冷却塔水盘、散热填料。
- 2、定期检查和清洗换热器（冷凝器通炮）。
- 3、定期检查和清洗过滤器。
- 4、定期排污和补水控制。
- 5、每季度红外热成像检测换热器，定位堵塞管束。

6 冷却水系统设计优化

确保系统设计合理，如水流速足够（减少沉积）、材质选择合适（耐腐蚀）、易于清洗维护等。

7 总结

中央空调冷却水质是空调主机能效的“隐形杠杆”。中央空调冷却水质差可导致系统综合能效下降15-30%以上，后期运维成本高，难度大。

在线智能监测+精准投药水处理装置；可实现节能10-25%的能耗。

将水质管理纳入预防性维护体系，是保障系统高效、长周期运行的核心策略。

参考文献

- [1] 参照《GB/T 50050-2017 工业循环冷却水处理设计规范》制定企业标准，优先控制硬度、氯离子及微生物指标。
- [2] 数据基于“ASHRAE案例研究，COP降幅=（设计COP-实际COP）/设计COP”
- [3] 部分数据来源于“美国冷暖空调工程师协会2000年手册”
- [4] GB/T 29044-2012《采暖空调系统水质》