

工业闭式循环冷却水系统设计优化研究

刘 嘉

中国电子系统工程第四建设有限公司, 河北 石家庄 050000

[摘要]循环冷却水系统是工业领域换热降温的核心公用工程系统, 闭式循环冷却水系统具有水质稳定、水量损耗低、运行能耗小等优势, 广泛应用于化工、电力、冶金等行业, 其设计合理性直接影响换热效率、运行稳定性及运维成本。文中针对传统设计中参数取值粗放、控制逻辑不合理等问题, 梳理设计要点与优化方向。通过核心参数精细化管控与系统结构优化匹配, 可有效提升系统运行稳定性、节能性与使用寿命。

[关键词]工业冷却水; 闭式循环系统; 设计参数; 定压控制; 管网优化; 给排水设计

DOI: 10.33142/ec.v9i5.19636

中图分类号: TB657

文献标识码: A

Research on Design Optimization of Industrial Closed loop Cooling Water System

LIU Jia

The Fourth Construction Co., Ltd. of China Electronics System Engineering, Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: Circulating cooling water system is the core utility system for heat exchange and cooling in the industrial field. Closed circulating cooling water system has the advantages of stable water quality, low water loss, and low operating energy consumption, and is widely used in industries such as chemical, power, and metallurgy. Its design rationality directly affects heat exchange efficiency, operational stability, and maintenance costs. In response to the problems of extensive parameter values and unreasonable control logic in traditional design, this article summarizes the design points and optimization directions. By finely controlling core parameters and optimizing system structure matching, the stability, energy efficiency, and service life of the system can be effectively improved.

Keywords: industrial cooling water; closed loop system; design parameters; constant pressure control; pipeline optimization; plumbing and drainage design

引言

冷却水系统作为保证设备恒温运行、维持工况稳定的配套设施, 在现代工业生产中发挥着重要作用^[1]。相较于开式系统, 闭式循环冷却水系统整体密闭、水体不与大气接触, 可有效避免灰尘混入、蒸发损耗及水质污染, 此外, 在减少用水量的同时还节约了开式冷却水系统所使用的化学药品, 满足节能环保的要求, 是高纯度工艺装备及精细换热设备的最佳冷却方式^[2]。目前, 国内闭式循环冷却水系统的选型基本采用常规的经验方法, 存在选取标准雷同、控制策略不匹配、管网配置失调、膨胀罐以及定压设计粗糙等问题, 造成系统压力不稳定、传热效果下降、管道气蚀、补水频繁、能源消耗高、运行费用高等后果, 导致维护管理成本升高, 影响生产运行的连续性。闭式冷却水系统设计需兼顾水力稳定性、热力适配性、节能性与安全性, 依托精准计算与科学控制逻辑实现长效稳定运行^[3]。本文立足设计规范与系统运行特性, 从设计理论、核心参

数、控制逻辑与系统优化角度, 系统梳理设计原理, 明确核心参数计算方法与控制要求, 针对传统设计薄弱环节提出优化策略, 为闭式冷却水系统规范化、精细化设计提供技术依据。

1 工业闭式循环冷却水系统设计原理与系统组成

1.1 系统核心设计原理

工业闭式循环冷却水系统的总体设计理念是封闭循环、间壁传热、定压补水、自动控制。冷却水在封闭管道中循环流动, 与空气没有直接接触, 靠循环泵的压力推动, 把热量从生产换热设备带走送入闭式冷却塔, 冷却后再回到生产换热设备上, 如此不断循环而达到连续冷却的目的。区别于开式循环系统直接向空气中蒸发散失热量的方式, 闭式系统为间接换热方式, 冷却介质全封闭循环, 只在外置换热器或者闭式冷却塔中进行换热, 避免水体与空气直接接触, 大幅减少蒸发损失和飘水, 确保闭式系统内部水质稳定。设计层面需遵循水力平衡与热力平衡原则, 确保

管网水力稳定、流量分配均匀,匹配换热负荷,实现温度、压力动态平衡,满足设备恒温恒压冷却需求。

1.2 系统基本组成与工作机制

闭式循环冷却水系统包括动力循环、换热降温、定压补水、管网输送、监测控制五个部分,并相互作用形成一个完整的封闭系统。闭式循环水泵是动力循环的核心部件,冷却水在泵内叶片旋转带动下获得足够的水力扬程来克服管网沿程阻力损失、局部阻力损失以及生产换热设备、闭式冷却塔上的设备阻力损失,从而驱动冷却水在管道中不断流动。应结合系统的阻力损失和流量对闭式循环水泵进行合理的参数选择并保持水泵在高效区间运行^[4]。换热降温单元包括闭式冷却塔,带有工艺余热的冷却水流经闭式冷却塔时,通过管壁将热量传递给外界空气和喷淋水,水温降至设计温度后返回系统。其设计主要是满足最大的换热负荷,保证最不利情况下的降温效果。定压补水单元有膨胀罐、定压补水装置、安全阀等,能动态吸收水体热胀容积、补偿低温收缩,稳定系统压力,同时补充管网微量渗漏,避免负压进气或正压超压;管网输送单元包括供水管、回水管、分支管路、阀门、过滤器等,负责输水、分配、过滤等功能,应做到布局合理,阻力均衡,以达到各终端按照需求分配流量的目的,过滤器可对微小锈渣进行过滤,避免对机器造成损害。监测控制单元由温度、压力、流量传感器及 PLC 与变频模块组成,实时采集运行参数,自动调节水泵频率、风机转速,实现系统智能化运行,保障参数稳定在设计区间。

2 闭式循环冷却水系统核心设计参数与控制逻辑

2.1 温度控制参数与控制逻辑

温度是闭式冷却水系统最核心的热力参数,供水温度依据设备冷却需求确定,供回水温差常规为 5~10℃,是流量设计核心依据。高负荷设备宜用大温差,降低循环流量、管网管径与水泵规格,减少建设成本与运行能耗;精密低负荷设备宜用小温差,保障温控精度,避免温度波动过大。温度控制采用闭环自动调控,回水温度传感器实时采集数据传至 PLC,回水温度超上限时自动增开风机、增大风机转速或提高循环流量,低于下限时减少风机运行数量、降低风机转速或循环流量,实现温度动态平衡。同时设置超限报警,水温超阈值时触发声光报警,保障生产安全。

2.2 压力控制参数与控制逻辑

闭式系统压力稳定性是避免气蚀、负压进气、超压破损的关键,定压点压力应比系统最高点静压高 0.02~0.05MPa,以保证最高点压力为正。工作压力根据总阻力

与设备承压限值确定,预留 0.05MPa 以上安全余量。压力波动需控制在±0.03MPa 以内。压力升高至上限时,膨胀罐内气体被压缩,吸收因水温升高而增加的容积,关闭补水阀,必要时泄压;压力降至下限时,膨胀罐内气体膨胀向管网补水,补水装置启动。同时设置压力保护逻辑:超压时自动泄压、水泵降频;压力降至超低保护阈值时,系统触发报警,同时联锁启动补水泵,防止水泵气蚀及管网负压进气。

2.3 膨胀罐容积设计计算与参数取值

膨胀罐有效容积按规范公式计算: $V_p = V \times \rho \times \Delta t / (1 - P_1/P_2)$, 其中 V 为系统总水容积(含管网、换热器、设备腔体), ρ 为热膨胀系数(清水取 0.00042/℃), Δt 为冬夏最大水温差, P_1 为膨胀罐的预充压力, P_2 为系统的最高工作压力。在有效容积基础上,结合稳压压力区间确定公称容积。预充压力比系统静态压力低 0.01~0.02MPa,保证低压正常补偿;最大工作压力需大于系统设计最高压力,安全系数不低于 1.25。设计优化要点:精准统计总水容积,杜绝估算偏差;大容积大温差系统优先选用隔膜式膨胀罐,相比气囊式稳压精度更高、抗疲劳性更强;多罐并联应保证参数一致、安装高度相同,否则易导致稳压失衡^[5]。

2.4 补水定压系统设计与控制参数

闭式循环冷却水系统正常运行水量损耗极低,仅存在微量管网渗漏、排气损耗,补水定压系统的核心功能是补偿微量水量损耗、维持系统基准压力、杜绝负压进气,是系统长效稳压的辅助核心单元。补水水质为基础设计指标,工业闭式系统冷却水多采用软化水或纯水,补水需匹配系统水质标准,补水水质可参考《工业循环冷却水处理设计规范》GB/T 50050-2017 表 3.1.8 条的要求,杜绝管网、换热器结垢,同时补水需经过过滤、除气处理,减少水体含气量,降低气蚀风险。补水泵流量按照系统总容积的 0.5%~1%取值,适配微量补水需求,避免大流量补水泵频繁启停造成的压力波动,补水泵扬程应根据补水箱最低水位与系统定压点的高差、系统定压点所需压力(一般比系统最高点静压高 0.02~0.05MPa),并计及补水管道的沿程阻力及过滤器阻力后综合确定,定压控制参数分为补水启动压力、补水停止压力、超低压力保护阈值三级。补水停止压力为系统设计基准工作压力,补水启动压力低于停止压力 0.05~0.07MPa,两级压力差值可有效避免补水泵频繁启停,延长设备使用寿命;超低压力保护阈值低于启动压力 0.03MPa,达到该阈值时系统触发报警并启动补水泵,防止系统严重负压进气^[6]。补水定压控制采用全自

动间歇控制逻辑,同时设计需配置手动补水旁路,作为设备检修、系统初次注水的备用通道,提升系统运维灵活性。

2.5 管网阻力设计与水力平衡控制

管网阻力是水泵扬程选型及水力稳定性的重要因素之一,闭式系统管网阻力包含沿程阻力、局部阻力、设备阻力,应正确计算出总阻力,在设计中做到水力平衡。沿程阻力是指水流在管道内流动时产生的阻力损失,它取决于管道长度、流速、管径、管道的粗糙度等因素。闭式系统通常采用无缝钢管或者不锈钢管,其粗糙度较小,因此阻力比较稳定。循环水干管设计需控制流速: $DN \leq 250$: $1.0 \sim 2.0 \text{ m/s}$, $250 < DN < 500$: $2.0 \sim 2.5 \text{ m/s}$, $DN \geq 500$: $2.5 \sim 3.0 \text{ m/s}$, 过大增加阻力及能耗,过小易结垢堵塞。局部阻力包括弯头、三通、阀门、变径、过滤器等产生的阻力,一般约占系统总阻力的 $10\% \sim 30\%$,设计应尽量合理布置管道走向,减少不必要的管件安装,采用阻力较小的阀门产品,并尽量保证同一位置管件口径一致,防止因管径突变导致的水流紊乱。设备阻力根据厂家提供的额定参数进行计算取值。将此计入总阻力中。总阻力为沿程、局部、设备阻力之和,水泵扬程在此基础上乘以 $1.10 \sim 1.15$ 的安全系数,以满足管道长期运行后因结垢而增加的阻力。当有多个分支时,在每个分支处安装静态平衡阀,根据设计参数设定阀门开启位置,并确保每处末端出水量能满足设计要求,防止前端过量、末端偏小的问题发生。主干管采用同程式布局,最大限度降低水力失衡概率,提升系统稳定性。

3 工业闭式循环冷却水系统设计优化策略

3.1 核心参数精细化优化

在传统的闭式系统中,往往按经验值设定参数,取值较为粗糙,适应性不强,因此对这些参数进行精确调节是至关重要的。对于温度而言,不再采取单一的温差进行简单化的设计,而是依据各类设备的工作负载以及控制温度所存在的偏差来选取不同的温差,即对于工作负载较大的设备使用较高的温差,而对于控制温度要求比较高的设备则选择较小的温差,从而确保能够达到良好的传热速率,并降低循环流量及能耗。压力上,建立全工况压力校核体系,分别校核系统最高点、最低点、最远端的静压和动压,保证全网无负压、无超压;优化膨胀罐容积计算,考虑全年水温的变化进行准确的最大热膨胀容积核算,避免选型偏差过大,平衡稳压的效果和经济性。补水定压设定在 $\pm 0.05 \text{ MPa}$ 范围内,大幅提高压力稳定性。

3.2 管网系统布局优化

管网布局直接决定水力工况与能耗水平,设计优先采

用同程式布局替代异程式布局,使各换热支路管路长度与阻力基本一致,实现水力自然平衡,减少平衡阀调节工作量,降低水力失调风险。长距离输送管网合理分级设置管径,避免管径突变,优化管路走向,减少弯头、三通、盲端等阻力构件,降低无效阻力损耗。同时优化排气排污设计,管网最高点及局部高点设自动排气阀,及时排出微量气体,避免气堵气蚀;最低点及设备进出口设排污阀,便于检修排污,保障水体洁净。阀门采用集中布局便于运维,选用节能型低阻力阀门,进一步降低运行能耗。

3.3 控制系统智能化优化

传统的闭式系统多为定频恒流量运行,并不适应负荷的变化,浪费了大量的能源。智能化优化采取变频联动控制方式,根据供水温度、回水温度以及换热负荷的变化,通过改变泵的频率来改变泵的流量,即在小负荷情况下减少泵的转速从而减少泵的流量达到节能的目的,在大负荷下增加泵的转速,增大泵的流量以保证换热需求。做到按需供冷。同时完善联动控制逻辑,将温度、压力、流量、补水、换热设备状态集成联动,实现故障预警、参数自调、设备联动启停。增加数据采集存储功能,实时记录运行参数,为运维优化及参数校核提供数据支持,实现系统精细化、智能化管理。

3.4 系统节能与长效运行优化

在设备选型上,优选高效率水泵及低阻力换热器,保证主设备处于高效工作状态,减少基本耗能;减小水容积,在不影响换热效果的情况下尽量减小管道和设备腔体内所储存水量,以达到减小热膨胀量的目的,进而减小膨胀罐容量以及补水量,加快系统的反应速度;控制水质,依靠其封闭性配置简单的净水设施进行旁滤和缓蚀阻垢处理,保证水质干净,减少管道和设备锈蚀结垢,并在使用较长时间之后不产生较大阻力而影响换热效果,确保良好的水力热力工况条件,延长设备管网使用寿命,减少整个周期的维护费用。

4 结论

工业闭式循环冷却水系统的设计水平直接影响到生产的稳定性、节能性和安全性,其本质是基于水力与热力理论进行系统的参数精确计算、控制逻辑匹配及管网结构优化的过程。文中总结了系统的构成及其工作原理,并给出了系统中的主要参数如温度、压力、膨胀罐容积、补水定压、管网阻力的计算过程、取值依据及控制逻辑,基于上述传统设计粗放、能耗偏高、工况不稳的问题,给出参数精细化、管网布局优化、智能控制升级、长效节能运维的优化思路。研究结果表明,闭式系统设计应摒弃经验化

粗放取值,以理论计算为主导、工况适配为导向,匹配系统的水力热力特性,可以避免压力波动、温度失调、水力失调以及能耗浪费的情况,大大提高运行稳定性和节能效果,可以为各工业环境下闭式冷却水系统的规范化、细致化设计提供一定的理论依据和技术支持,并能对工业循环冷却水系统的设计起到一定借鉴作用。

[参考文献]

- [1]刘钢,李晓东,金轶群,刘川,罗智斌,谢宙桦,冯铁玲,黄善锋.基于深度卷积神经网络的工业循环冷却水系统运行状态预测[J].热力发电,2022,51(8):149-153.
- [2]王华秋,李春洋,李永德.树种 LSTM 的冷水机组预测优化模型研究[J].重庆理工大学学报(自然科学),2022,36(10):

231-238.

- [3]曾文豪,杨晚生,颜彪.多台冷水机组优化运行策略研究进展[J].企业科技与发展,2022(10):84-87.
- [4]周柏青,胡梦莎.工业循环冷却水系统降耗减排综述[J].工业水处理,2017,37(3):16-20.
- [5]王涛,王鹏.基于 PIPENET 的循环冷却水系统水力平衡调试研究[J].石油化工安全环保技术,2024,40(5):61-64.
- [6]郑聪,陈炳彬,张哈,卢科镍,黄陈.汽车生产车间工业用水节水与环保研究[J].能源与环境,2025(1):126-128.

作者简介:刘嘉(1986—),山西大学环境工程专业毕业,高级工程师,当前就职于中国电子系统工程第四建设有限公司化工石化工程设计院,任给排水室主任。