

管式冷却器在线清洗及查漏技术研究应用

杨 韬 姚佳敏

国网甘肃省电力公司刘家峡水电厂 甘肃 临夏 731600

摘要：管式冷却器作为工业流程中热量交换的核心装备，在石化、电力、制药等领域承担着维持系统热平衡的关键作用。本文首先介绍了管式冷却器的工作原理与在工业领域的重要性。随后详细阐述了多种在线清洗技术，包括胶球清洗、药水循环清洗、反冲洗、高压水射流清洗及超声波清洗；同时介绍了压力差法、超声波检测法、紫外荧光法、氦质谱检漏法、红外热成像检测法等在线查漏技术。最后分析了在线清洗及查漏技术的优势，如提高换热效率、降低能耗、减少停机时间、降低安全风险以及带来环保效益等，为管式冷却器的维护与管理提供了技术参考。

关键词：管式冷却器；在线清洗；查漏技术；研究应用

引言：在工业生产中，管式冷却器作为关键设备，对保障生产流程的稳定运行至关重要。然而，长期运行过程中，管式冷却器易出现结垢、堵塞以及泄漏等问题，这些问题不仅会降低冷却器的换热效率，增加能耗，还可能引发安全事故，影响生产的连续性。传统的清洗与查漏方式往往需要设备停机，造成生产中断，增加成本。因此，研究管式冷却器在线清洗及查漏技术，实现设备不停机维护，对于提高生产效率、降低成本、保障生产安全具有重要意义。

1 管式冷却器概述

1.1 工作原理

管式冷却器主要由壳体、管束、管板、折流板等部件构成，其工作原理基于间壁式热交换。高温介质在管束内流动，低温冷却介质在壳程中环绕管束逆向或顺向流动，热量通过管壁从高温侧传递至低温侧。折流板的设置可改变壳程流体流向，增强湍流程度，减少流体边界层厚度，提升传热系数；管板则起到固定管束、分隔冷热流体通道的作用。

1.2 在工业中的重要性

管式冷却器在工业领域扮演着不可或缺的角色。在电力行业，它用于汽轮机凝汽器冷却，保障蒸汽高效冷凝，提升发电效率；化工生产中，常作为反应釜冷却设备，控制反应温度，确保工艺安全稳定；冶金行业里，可对高温轧件、润滑油等进行冷却，延长设备使用寿命。其稳定运行直接关系到生产线的连续性，一旦冷却失效，可能导致设备过热损坏、产品质量下降，甚至引发安全事故^[1]。

2 管式冷却器在线清洗技术

2.1 胶球清洗技术

胶球清洗技术基于物理冲刷原理，通过循环水流推

动海绵胶球在冷却管内运动，实现污垢清除。胶球直径略大于冷却管内径，具有良好的弹性与柔韧性。运行时，胶球随水流进入冷却管束，在管内呈不规则运动状态，与管壁紧密贴合，通过挤压、摩擦作用，将附着在管壁上的软质污垢，如微生物黏泥、泥砂等剥离。整个清洗过程通过收球网、胶球泵等设备构成的循环系统完成，胶球回收后经筛分、补充，可重复使用。该技术适用于清除初期沉积的软性污垢，对管壁无损伤，且能在设备运行时连续作业，不影响生产。但其对硬质水垢、铁锈等顽固污垢清洗效果不佳，需配合化学药剂预处理，且胶球易磨损、堵塞，需定期更换与维护。

2.2 药水循环清洗技术

药水循环清洗技术借助化学药剂与污垢的化学反应，实现清洗目的。根据污垢成分，选用不同药剂：如以有机酸、螯合剂为主的清洗剂，可溶解碳酸钙、碳酸镁等水垢；氧化性药剂能去除微生物黏泥与藻类。清洗时，将配置好的药剂溶液注入冷却器循环系统，通过循环泵驱动药剂在管束与壳程内流动，使药剂与污垢充分接触，发生溶解、络合或氧化还原反应，将污垢转化为可溶物或悬浮物排出。此技术对各类顽固污垢均有良好清洗效果，清洗效率高、周期短。但药剂具有腐蚀性，需严格控制浓度与清洗时间，避免对金属管壁造成损伤。

2.3 反冲洗技术

反冲洗技术利用流体反向流动产生的冲击力与剪切力，清除冷却管内的污垢。正常运行时，流体按既定方向在冷却器内流动，而反冲洗阶段，通过阀门切换改变流体流向，使清洁流体从冷却器出口进入，逆向冲刷管束。高速反向流动的流体冲击管壁，破坏污垢与管壁的结合力，将沉积的杂质、颗粒物等污垢带出。该技术可分为水反冲洗和气-水联合反冲洗，后者通过引入压缩

空气,增强流体扰动效果,提升清洗能力。反冲洗技术操作简便,无需添加化学药剂,成本较低,适用于清除松散的颗粒状污垢。但对黏附力强的硬质垢或顽固生物膜清洗效果有限,且频繁反冲洗可能影响设备运行稳定性,需合理控制冲洗频率与时间。

2.4 高压水射流清洗技术

高压水射流清洗技术以高压泵为动力源,将水加压至数十兆帕甚至更高压力,通过特制喷嘴形成高速水射流,冲击冷却管内壁污垢。高速水射流具有强大的动能,可产生高达数百公斤的冲击力,能够有效击碎硬质水垢、铁锈、焊渣等顽固污垢,并将其冲刷带走。根据清洗需求,可调整水射流的压力、流量与喷射角度,对不同管径、结构的冷却管进行针对性清洗。该技术清洗效率高、适用范围广,对金属管壁无化学腐蚀风险,且清洗过程无二次污染。

2.5 超声波清洗技术

超声波清洗技术基于空化效应原理,通过超声波发生器产生高频振荡信号,经换能器转换为机械振动,在清洗液中形成无数微小的空化气泡。这些气泡在声场作用下迅速生长并突然闭合,产生瞬间高压与冲击波,对冷却管内壁污垢产生强烈的冲击与剥离作用。同时,超声波的高频振动可加速清洗液的分子运动,增强其渗透能力,使清洗剂更易渗入污垢与管壁的缝隙,破坏污垢的结构,使其松散脱落。该技术对微小缝隙、复杂结构的冷却管清洗效果显著,尤其适用于清除微生物膜、纳米级污垢等传统方法难以处理的杂质^[2]。

3 管式冷却器在线查漏技术

3.1 压力差法

压力差法基于流体力学原理,通过监测冷却器进出口流体的压力变化来判断泄漏情况。正常运行时,冷却器管束密封良好,冷热两侧流体各自独立循环,压力稳定。当管束出现泄漏点,高压侧流体将通过漏点流向低压侧,导致两侧压力平衡被打破,产生异常压力差。实际检测中,在冷却器进出口管道安装高精度压力传感器,实时采集压力数据并计算差值。若压力差超过预设阈值,结合流量变化等参数综合判断,初步锁定泄漏区域。该方法操作简便、成本较低,适用于检测较大泄漏量的情况。但对于微小泄漏,压力变化不明显,易出现漏检;且环境干扰、流体流量波动等因素可能影响检测准确性,需结合其他方法进一步验证。

3.2 超声波检测法

超声波检测法利用声波在介质中传播特性,捕捉泄漏产生的高频声波信号实现查漏。当冷却器管束发生泄

漏,高压流体从漏点喷射而出,与周围介质摩擦、碰撞,产生20kHz以上的超声波信号。检测时,将超声波传感器紧贴冷却器外壳或管道表面,接收泄漏产生的高频声波,并转化为可听声音或电信号。通过分析信号强度、频率等特征,结合频谱分析技术,可定位泄漏位置。该技术对微小泄漏敏感,检测速度快,无需停产即可在线检测,对生产影响小。但超声波易受环境噪声干扰,如风机、泵体振动等,需配备降噪装置和专业滤波算法提高检测精度;且检测结果受检测人员经验影响较大,需进行专业培训。

3.3 紫外荧光法

紫外荧光法通过在冷却介质中添加荧光示踪剂,利用其在紫外线照射下发光特性检测泄漏。检测前,将适量荧光示踪剂注入冷却系统,使其随介质循环分布于整个冷却器。当管束发生泄漏,含示踪剂的流体渗出,在紫外线照射下会发出明亮荧光。检测人员使用紫外荧光检漏仪,对冷却器外壳、连接部位等进行扫描,根据荧光强度与分布确定泄漏点。该方法灵敏度高,能发现微小泄漏,可视化效果好,定位精准。但示踪剂添加量需严格控制,过量可能影响冷却介质性能;且检测后需对系统进行清洗,防止示踪剂残留影响设备运行;此外,检测过程需在暗环境下进行,对操作条件要求较高。

3.4 氦质谱检漏法

氦质谱检漏法以氦气为示踪气体,利用质谱仪对氦气的高灵敏度检测能力实现精准查漏。由于氦气分子小、扩散性强,极易通过微小泄漏孔渗透。检测时,先将冷却器系统抽真空,再充入氦气,使氦气充满系统内部。若存在泄漏,氦气将从漏点逸出,使用氦质谱检漏仪在设备外部扫描,捕捉逸出的氦气分子。检漏仪通过质谱分析,将氦气离子按质荷比分离并检测,根据信号强度确定泄漏位置与泄漏量。该方法检测精度极高,可检测到 $10^{-9}\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 量级的微小泄漏,适用于对密封性要求极高的冷却器。但设备昂贵,检测需专业人员操作;且检测过程需抽真空与充氦气,操作复杂,检测成本高,不适用于大规模快速检测。

3.5 红外热成像检测法

红外热成像检测法基于物体表面温度差异成像原理,通过检测冷却器表面温度分布发现泄漏点。当管束泄漏时,冷热流体混合导致泄漏区域局部温度异常,高温侧流体泄漏会使对应位置温度升高,低温侧泄漏则温度降低。红外热像仪通过接收物体表面辐射的红外能量,将其转化为电信号,经处理生成热图像,以不同颜色或灰度直观显示温度分布。检测人员根据热图像中的

温度异常区域,结合冷却器结构与流体流向,判断泄漏位置。该方法检测速度快、非接触式操作,可实现大面积快速扫描;图像直观,便于分析。但检测受环境温度、物体表面发射率等因素影响大,需对检测结果进行修正;且只能检测表面温度变化,对深埋于内部的微小泄漏检测效果不佳。

4 在线清洗及查漏技术的优势

4.1 提高换热效率

在线清洗及查漏技术能够实时清除换热设备表面的污垢、杂质及沉积物。传统清洗方式常需设备离线,且难以精准处理顽固污垢,导致换热效率恢复有限。而在线清洗可通过循环化学药剂或物理冲刷的方式,在设备运行过程中不间断地剥离污垢,避免其在设备表面形成隔热层,确保热量高效传递。查漏技术则能及时发现换热设备中因腐蚀、磨损产生的微小漏点,防止冷热介质混合干扰正常换热过程。

4.2 降低能耗

当换热设备的换热效率得到保障,系统为达到预期工作效果所需消耗的能量大幅降低。在线清洗及查漏技术有效解决了因污垢堆积和漏点导致的能量损耗问题。例如,在工业冷却系统中,污垢会使冷却介质无法充分带走热量,压缩机需消耗更多电能维持制冷效果;而漏点会造成介质流失,同样增加设备负荷。通过在线清洗保持设备清洁,利用查漏技术及时修复漏点,可减少设备运行的额外能耗。

4.3 减少停机时间

传统清洗和查漏作业通常需要设备停机,涉及复杂的拆卸、安装流程,耗时较长。在线清洗及查漏技术打破了这一局限,其无需中断设备运行,可在生产过程中同步完成清洗与查漏工作。例如,在石油化工行业,反应釜等关键设备若因清洗或查漏停机,不仅会中断生产线,还可能导致原料浪费和产品质量波动。在线技术的应用,使企业能够在设备正常运转时及时处理污垢和漏点,避免因计划性或突发性停机带来的生产停滞。据统计,使用该技术可将设备停机时间缩短70%以上,保障了生产连续性,提升企业生产效益。

4.4 降低安全风险

在线清洗及查漏技术采用的非接触式、智能化检测手段,减少了人工操作和设备拆卸过程中潜在的安全隐患。在处理高温、高压、有毒有害介质的设备时,传统清洗和查漏方式需工作人员近距离作业,易发生烫伤、中毒、爆炸等事故。而在线技术通过远程控制和自动化检测,避免人员直接接触危险环境,同时及时发现设备异常,提前预警潜在的泄漏风险,防止因介质泄漏引发安全事故。

4.5 环保效益

在线清洗及查漏技术的环保优势体现在多个方面。一方面,其采用的清洗药剂多为环保型配方,可生物降解,且清洗过程封闭循环,减少了药剂排放对环境的污染。另一方面,及时发现并修复设备漏点,避免了生产过程中有毒有害介质的泄漏,防止其污染土壤、水源和空气。与传统清洗方式相比,在线清洗无需大量用水,降低了水资源消耗和污水排放。通过降低能耗,减少了化石能源的使用,间接降低了二氧化碳等温室气体排放。据测算,采用该技术后,企业在环保处理方面的成本可降低20%以上,同时减少了对生态环境的负面影响,助力企业实现绿色可持续发展^[3]。

结束语

通过对管式冷却器在线清洗及查漏技术的研究与应用,我们深刻认识到这些技术为工业生产带来的显著效益。多种在线清洗技术能有效清除管内污垢,恢复换热性能;各类在线查漏技术可精准定位泄漏点,及时消除隐患。这些技术不仅提高了换热效率、降低了能耗,还减少了停机时间,降低了安全风险,同时兼具环保优势。在实际应用中,企业应根据自身需求和设备特点,合理选择并优化组合相关技术。

参考文献

- [1]杨杰.基于移动式管式冷却器清洗系统分析.2022.112-114
- [2]杨宏,高任龙.基于调控系统的变压器冷却器自动控制技术研究.产业经济,2021.125-126
- [3]解伟.变压器冷却器渗漏油分析及处理研究.产业经济,2020.206-207