

冷却塔水分回收难点、技术分析与发展展望

负延滨^{1,2,4} 梁全部³ 张建³ 庄国强^{2,4} 李萌^{2,4} 邢絮¹ 杨文娟^{2,4} 李国忠^{2,4}

1.北京林业大学, 北京 100083

2.滨州魏桥国科高等技术研究院, 山东 滨州 256606

3.邹平滨能能源科技有限公司, 山东 滨州 256200

4.滨州铝产业先进制造山东省实验室, 山东 滨州 256606

[摘要]冷却塔作为工业生产核心散热设备,其水分损失量占工业总耗水量的比例较大,开展水分回收对实现节水减排、降本增效具有重要意义。文章系统分析冷却塔水分回收过程中的核心难点,针对各难点梳理高效收水器、闭式循环、膜分离、水蒸气冷凝回收等主流技术的工作原理、优缺点及实用化现状,结合行业发展需求与技术迭代趋势,展望冷却塔水分回收技术的未来方向,为工业企业优化水资源利用、推进绿色生产提供参考。

[关键词]冷却塔; 水分回收; 技术分析; 节水减排; 工业应用

DOI: 10.33142/nsr.v3i1.19394

中图分类号: TQ051.5

文献标识码: A

Difficulties, Technical Analysis, and Development Prospects of Water Recovery in Cooling Towers

YUN Yanbin^{1,2,4}, LIANG Quanbu³, ZHANG Jian³, ZHUANG Guoqiang^{2,4}, LI Meng², XING Xu¹, YANG Wenjuan^{2,4}, LI Guozhong^{2,4}

1. Beijing Forestry University, Beijing, 100083, China

2. Binzhou Weiqiao National Science and Technology Higher Technology Research Institute, Binzhou, Shandong, 256600, China

3. Zouping Binneng Energy Technology Co., Ltd., Binzhou, Shandong, 256200, China

4. Shandong Laboratory of Aluminum Advanced Manufacturing in Binzhou (SLAAMB), Binzhou, Shandong, 256200, China

Abstract: As the core heat dissipation equipment in industrial production, the water loss of cooling towers accounts for a large proportion of the total industrial water consumption. Conducting water recovery is of great significance for achieving water conservation, emission reduction, cost reduction and efficiency improvement. The article systematically analyzes the core difficulties in the process of water recovery in cooling towers, and summarizes the working principles, advantages and disadvantages, and practical status of mainstream technologies such as high-efficiency water collectors, closed cycles, membrane separation, and steam condensation recovery. Combined with industry development needs and technological iteration trends, it looks forward to the future direction of cooling tower water recovery technology, providing reference for industrial enterprises to optimize water resource utilization and promote green production.

Keywords: cooling tower; water recovery; technical analysis; water conservation and emission reduction; industrial application

引言

在全球水资源短缺与环保政策日趋严格的双重背景下,工业节水已成为企业可持续发展的核心议题。冷却塔在电力、化工、冶金等工业领域广泛应用,通过水与空气直接接触蒸发散热,将工艺余热排放至大气^[1]。在此过程中,大量循环冷却水以水蒸气形式随空气排出,形成温度25~40℃、湿度接近饱和的湿热气流。一座600MW火电机湿式冷却塔年排汽损失水量高达150~200万t,造成巨大水资源浪费^[2]。同时,饱和湿空气冷凝形成白色羽雾,

影响视觉景观和周边环境^[3]。冷却塔水分回收技术通过回收流失水分并净化回用,既能减少新鲜水补给量、降低运营成本,又能缓解水资源压力与环境负荷。然而,受水质特性、能耗成本、工况适配性等多重因素制约,水分回收技术的规模化应用仍面临诸多挑战。因此,深入剖析回收难点、优化技术路径,对推动冷却塔水分回收技术产业化落地具有重要现实意义,在“双碳”目标下,提高工业用水效率已成为国家战略需求。因此,开发高效冷却塔水分回收技术,捕集湿空气中水分循环利用,对缓解水资源短

缺、改善环境质量、提升系统能效具有重大现实意义^[4]。

1 冷却塔水分回收的核心难点

1.1 水质复杂导致回收处理难度大

冷却塔循环水中不仅含有原水中的钙、镁、氯等溶解盐类，还因与空气接触吸附粉尘、微生物，以及投加缓蚀剂、阻垢剂等化学药剂，形成成分复杂的混合体系。水分回收过程中，蒸发浓缩会导致盐类浓度升高，易引发结垢与设备腐蚀；微生物滋生与药剂残留则增加了水质净化难度，若处理不达标，回用后会加剧冷却塔内部堵塞与设备损耗。例如，某炼油厂冷却塔排水中总磷含量长期超标60%，直接回用会严重影响循环水系统稳定性。

1.2 能耗与成本平衡矛盾突出

多数水分回收技术需消耗额外能源实现水汽分离、水质净化，如膜分离、蒸发结晶等技术均存在较高能耗。例如，为了达到较低的露点温度，需要使用大型制冷设备，显著增加电厂的运行费用^[5]。同时，回收系统的设备购置、安装调试及后期维护成本较高，以1000t/h处理量为例，闭式冷却塔初始投资较开式冷却塔高20%~30%。对于中小企业而言，高初期投资与长投资回收期降低了技术应用积极性，如何在保证回收效率的前提下控制能耗与成本，成为制约技术推广的关键瓶颈。

1.3 工况波动影响回收系统稳定性

工业生产中，冷却塔负荷随生产工况变化频繁，导致进水流量、水温、水质参数波动较大。传统回收设备多针对固定工况设计，适应性较差，当工况突变时易出现回收效率下降、设备故障等问题。此外，冬季低温环境下冷却塔易结冰，会损坏收水器、配水装置等设备，导致风吹损失增加；夏季高温高湿工况则会加剧蒸发损失，进一步增加回收系统的运行压力。

1.4 设备适配性与系统集成难度高

现有工业冷却塔类型多样，包括自然通风逆流式、横流式、机械通风式等，不同塔型的结构设计、散热效率差异较大，导致单一回收技术难以普遍适配。同时，水分回收系统需与原有冷却系统、水处理系统集成，若设计不合理，会影响冷却塔原有散热功能，甚至引发整个生产系统停机。此外，在烟气环境中，由于烟气中含有SO_x、NO_x等酸性气体以及粉尘颗粒，传统回收设备容易受到腐蚀和结垢的影响，降低设备使用寿命，增加维护成本。酸性气体与水蒸气结合会形成腐蚀性液体，对设备材料造成损害；而粉尘颗粒则容易在设备表面沉积，形成结垢，影响传热效率，甚至堵塞设备^[6]。部分老旧电厂因冷却塔结构老化、维护不当，收水器损坏脱落现象普遍，进一步降低了水分回收效率。

2 冷却塔水分回收主流技术分析

2.1 高效收水器技术

(1) 工作原理：高效收水器技术作为冷却塔节水的重要手段，其工作原理在于通过优化结构设计，例如调整倾斜角度和增加波纹层数，以提升对冷却塔排出气流中雾滴的捕集能力，从而有效减少风吹损失，并将回收的水分直接送回塔底集水池循环利用^[7]。

(2) 优缺点：优点为结构简单、投资成本低、无额外能耗，安装维护便捷，适用于各类冷却塔改造^[8,9]；缺点是仅能回收雾滴形式的风吹损失，无法回收蒸发损失，回收效率有限，且易受水质影响产生堵塞，需定期清理^[10]。

(3) 实用化现状：目前已成为冷却塔水分回收的基础技术，广泛应用于电力、化工行业。高效收水器（倾斜角度30°左右）可将风吹损失率降至0.001%以下，较传统收水器节水效果提升显著，某造纸厂安装后年节水成本节约600万元，投资回收期仅1.8年。但在水质浑浊、微生物滋生严重的场景，其使用寿命与回收效率会大幅下降。

2.2 闭式循环冷却技术

(1) 工作原理：采用封闭循环系统，冷却介质在管道内循环流动，通过盘管与外界空气实现间接热交换，避免冷却介质与空气直接接触，从源头减少蒸发损失与水质污染，同时收集盘管表面冷凝水回用^[11]。

(2) 优缺点：优点为节水效果显著，水分损耗率可降低至5%以下，较开式冷却塔节水60%以上，且能有效避免结垢与腐蚀，设备维护周期延长至2~3年；缺点是初始投资高，传热效率略低于开式系统，风机能耗相对较高，不适用于低温极端工况。

(3) 实用化现状：在高耗水行业应用占比逐年提升，我国闭式冷却塔市场规模年复合增长率达12%，在制造领域的渗透率已从2018年的23%提升至2024年的41%。某大型火电厂采用闭式冷却塔后，年节水达20万t，设备寿命延长至10年以上，但中小企业因投资压力仍较少采用。

2.3 膜分离回收技术

(1) 工作原理：针对冷却塔排污废水，采用反渗透（RO）、纳滤（NF）等膜分离技术，依托膜的选择透过性去除水中盐类、杂质及药剂残留，净化产水回用于冷却塔补水，浓水经后续处理后排放或资源化利用，聚焦排污损失的回收净化。

(2) 优缺点：优点为净化效果好，产水水质可满足工业用水标准，能有效回收排污损失，提升水循环率；缺点是膜组件投资成本高，易发生膜污染，需定期更换膜元件，运行成本较高，且对进水水质预处理要求严格。

(3) 实用化现状：在水质要求较高的石化、电子行业应用较广，美国通用服务管理局（GSA）的测试显示，排污回收系统结合反渗透技术可实现 53% 的排污节约与 16% 的补水节约，投资回收期约 2.86 年。但在高硬度、高难度水质场景，膜污染问题突出，导致运行成本增加 30% 以上^[12]。

2.4 蒸发结晶回收技术

(1) 工作原理：针对膜分离产生的高盐浓水，通过机械蒸汽再压缩（MVR）、多效蒸发等技术加热浓水，使水分蒸发形成冷凝水回收回用，结晶盐作为固体废弃物处置或资源化回收，可实现高盐废水零排放。

(2) 优缺点：优点为处理效果彻底，可实现高盐废水的全量回收，无二次污染；缺点是能耗极高，设备投资与运行成本昂贵，仅适用于小规模高盐废水处理，大规模应用经济性较差。

(3) 实用化现状：主要应用于环保要求严格、水资源极度短缺的地区，在电力、化工行业的零排放项目中偶有试点。某化工园区采用 MVR 蒸发结晶技术处理冷却塔浓水，冷凝水回用率达 95%，但能耗成本占处理费用的 65% 以上，限制了其规模化推广。

2.5 物理防垢与水质稳定技术

(1) 工作原理：不属于直接回收技术，通过电磁除垢、超声波等物理手段，或新型非磷型阻垢剂，替代传统化学药剂，控制循环水结垢、腐蚀与微生物滋生，提升水质稳定性，为各类水分回收技术的高效运行创造适配条件。

(2) 优缺点：优点为无药剂残留，降低后续水处理难度，运行成本较低，对环境友好；缺点是物理技术适配性有限，对高硬度水质处理效果不佳，新型药剂研发成本较高。

(3) 实用化现状：电磁除垢技术在部分企业得到应用，可实现无药剂运行，减少排污量，使浓缩倍数提升至 10 倍以上；非磷型阻垢剂在保证阻垢率 $\geq 90\%$ 的同时，可降低 40% 药剂成本，逐步替代传统磷系药剂。

2.6 水蒸气冷凝回收技术

(1) 工作原理：聚焦冷却塔排出水蒸气（羽雾）中的蒸发损失回收，填补传统技术短板，核心分为两类工艺。一是间接换热消雾回收工艺，改造换热模式为间接换热，搭配特制消雾填料与智能温控系统，减少水蒸气蒸发并捕获羽雾，回收水分回流循环系统；二是旋流造涡冷凝分离工艺，通过导流片构建强旋流场，利用离心力、惯性力促使微小液滴聚并，经壁面液膜收集与重力导流完成回收，形成闭环流程。

(2) 优缺点：优点为回收对象直击占比 80% 以上的蒸发损失，节水潜力显著，收水率可达 55% 以上，部分工况突破 60%；旋流造涡工艺采用耐磨抗老化复合材料，适配高温、腐蚀等复杂工况，维护周期延长至 3 年以上，较传统设备维护成本降低 60%~70%；间接换热工艺可实现开式、闭式工况切换，适配不同季节运行需求。缺点是初始改造投资高于传统收水器，旋流造涡系统对导流角度、通道参数设计精度要求高；低温工况下需配套防结冰装置，避免设备损坏影响回收效率。

(3) 实用化现状：该技术在石化、火电行业已形成成熟应用案例，成为高耗水企业节水改造的优选方案。沧州炼化对 3 座冷却塔实施间接换热消雾改造，通过更换配水系统、增设消雾填料及智能控制系统，实现羽雾完全消除，年节水达 3 万 t，彻底解决了雾气锈蚀周边设备的隐患。某大型石化企业采用旋流造涡系统改造后，单厂年节水量达 50 万方，按工业用水成本 3 元/方计算，年节约水费 150 万元，且 3 年无明显设备老化变形。在火电领域，某运行 18 年的机组冷却塔改造后，年节水 20 万 t，发电水耗率降至 2.16kg/kW·h，低于国家定额标准。目前该技术在中小企业的推广仍受投资成本制约，但随着复合材料与智能控制技术升级，成本逐步下降，适配性持续提升。

3 冷却塔水分回收技术发展展望

3.1 多技术协同集成，提升综合回收效率

未来，单一技术的局限性将逐步凸显，多技术协同集成成为发展主流。例如，将闭式循环技术与膜分离技术结合，实现源头减损与排污净化的双重目标；或构建“高效收水器+水蒸气冷凝回收+物理防垢+智能控制”组合方案，兼顾风吹损失与蒸发损失回收，同步保障水质稳定与能耗优化。已有研究通过人工湿地、纳滤、电化学氧化与反渗透的组合处理链，成功实现冷却塔排水回用并降低淡水足迹^[13]，为多技术协同提供了实践参考。某试点项目采用热-质-化协同处理技术，使水循环率提升至 93%，COD 排放降低 88%，综合能耗仅增加 12%，展现出良好的应用前景。

3.2 智能化与数字化升级，优化系统运行

依托物联网、大数据与人工智能技术，构建智能化水分回收系统，实时监测水温、流量、电导率、浊度等参数，通过算法预测结垢倾向、膜污染程度，自动调节药剂投加量、设备运行状态，实现动态优化运行。例如，基于 PLC 的闭环控制系统可使系统适应水质波动的能力提高至 $\pm 5\%$ ，减少人工干预，降低运行成本。同时，通过数字化建模优化系统集成设计，提升回收设备与原有冷却系统

的适配性，避免影响核心生产流程。

3.3 低能耗技术研发，破解成本瓶颈

降低能耗与运行成本是技术规模化推广的核心瓶颈。一方面，研发高效低耗膜材料与膜组件，提升抗污染能力与使用寿命，降低膜更换成本；另一方面，优化蒸发结晶技术能耗结构，结合余热回收技术，利用工业废热驱动蒸发过程，减少能源消耗。同时，开发低成本物理处理技术与适配高硬度水质的药剂，提升技术性价比，满足中小企业的应用需求。

3.4 资源化与零排放融合，推动绿色发展

随着“双碳”目标推进，冷却塔水分回收将逐步与资源化、零排放需求深度融合。通过优化蒸发结晶技术，实现结晶盐的资源化回收，减少固体废物排放量；将回收水与再生水、雨水等非常规水源协同利用，构建多元化供水体系。同时，开发适用于极端工况（低温、高温高湿）的回收技术与设备，提升技术的环境适应性，推动零排放技术在更多行业的落地应用。

3.5 政策引导与标准完善，强化推广保障

政府需进一步完善工业节水政策与标准体系，加大对冷却塔水分回收技术改造的补贴力度，建立节水效益评价机制，引导企业主动开展技术升级。同时，制定统一的回收水质标准与设备技术规范，规范行业市场，避免劣质设备与技术的无序竞争。通过政策引导与市场驱动相结合，加速技术的产业化推广，助力工业领域实现水资源高效利用与绿色低碳发展。

4 结论

冷却塔水分回收是工业节水减排的重要路径，但其发展受水质复杂、成本高昂、工况适配性差等难点制约。目前，高效收水器、闭式循环、膜分离、蒸发结晶、物理防垢及水蒸气冷凝回收等技术各有优劣，在不同行业场景中形成差异化应用格局，尚未形成普适性强、性价比高的主流技术方案。其中，水蒸气冷凝回收技术针对性解决蒸发损失回收难题，节水潜力突出，已在石化、火电行业展现良好应用效果。未来，需聚焦多技术协同集成、智能化升级、低能耗研发与资源化利用，通过技术创新破解核心瓶颈，同时依托政策引导与标准完善，推动冷却塔水分回收技术向高效、节能、环保、低成本方向发展，为工业绿色转型提供有力支撑。

课题项目：横向课题“火力发电厂冷却塔蒸发水热回收”，课题编号：GYY-NH-2025-ST-002。

[参考文献]

[1]田路泞,韩哲楠,董勇,等.燃煤电厂湿烟气余热及水分回

收技术研究[J].洁净煤技术,2017,23(5):105-110.

[2]许全坤,汪洋.基于膜分离方法的烟气水分回收技术研究现状及展望[J].华电技术,2013,35(5):25-28.

[3]张言格.中空纤维膜法回收烟气中水蒸气的性能研究[D].北京:北京林业大学,2020.

[4]陈海平,冯义钧,杨博然,等.陶瓷膜组件回收烟气水分及余热性能实验研究[J].热力发电,2019,48(2):45-52.

[5]甘露,毛霖,李红飞,等.燃煤烟气水分回收技术概述[J].资源节约与环保,2017(8):24-25.

[6]Smith J.Energy Consumption in Industrial Cooling Systems[J].Journal of Energy Engineering,2005,131(2):87-95.

[7]Lee B.Corrosion and Fouling in Flue Gas Desulfurization Systems[J].Power Engineering,2010,114(8):62-68.

[8]Lucas M, Mart ńez P J, Viedma A. Experimental determination of drift loss from a cooling tower with different drift eliminators using the chemical balance method[J].International Journal of Refrigeration,2012,35(6):1779-1788.

[9]Ru-qing L,Feng-zhong S,You-liang C,et al.Discussion of Technologies on Water-saving of Counter-flow Wet Cooling Tower[J].In Power System Engineering,2007(6):47-48.

[10]Tang C,Zhang C,He D, et al.Research on Gravity Energy Saving Reconstruction Technology of Circulating Cooling Water in Mechanical Ventilation Cooling Tower of a Steel Plant[J].Energies,2023,16(17):6274.

[11]Ran S.Review on research of water saving for natural ventilation cooling tower[J].E3S Web of Conferences,2021,283(1020):1-8.

[12]Nurrohman,Albeirutty M H,Almisbahi H, et al. Development and evaluation of a hybrid membrane condenser for water recovery from cooling tower plume[J].Separation and Purification Technology,2025(354):128815.

[13]Wagner T, Saha P, Bruning H, et al.Lowering the fresh water footprint of cooling towers:A treatment-train for the reuse of discharged water consisting of constructed wetlands, nanofiltration, electrochemical oxidation and reverse osmosis[J].Journal of Cleaner Production,2022(364):132667.

作者简介： 俞延滨（1970.12—），毕业院校：北京化工大学，所学专业：化学工程，当前就职单位：北京林业大学，职称级别：教授。