

# 能源结构转型背景下超超临界塔式锅炉 T23 水冷壁管理技术研究

田宏建

(郑州裕中能源有限责任公司, 河南 郑州 450099)

**摘要** 随着我国能源结构向清洁、低碳、高效方向加速转型, 燃煤火电机组在电网中的角色逐渐从基础负荷电源向调节性电源转变, 深度调峰、快速负荷响应成为常态, 运行工况日趋复杂多变。锅炉作为火电机组的核心设备, 其“四管”(水冷壁、过热器、再热器、省煤器)的可靠性直接关系到机组安全与经济运行, “四管”泄漏已成为影响锅炉可靠性的突出短板。本文基于1000 MW超超临界塔式锅炉的长期治理实践, 系统分析了T23水冷壁裂纹产生的背景、现状与根源, 并针对性地提出了一套涵盖结构优化、备件定制、工艺革新、组织管理和预防性维护的综合治理技术体系。实践结果表明, 该体系能有效降低T23水冷壁泄漏风险, 显著提升机组在新型电力系统下的运行可靠性与经济性, 对同类型机组的治理工作具有参考价值。

**关键词** 超超临界锅炉; 塔式锅炉; T23水冷壁; 裂纹治理; 可靠性管理

**基金项目**: 郑州裕中能源有限责任公司2025年科技及管理创新项目“1030MW锅炉T23水冷壁裂纹治理技术研究与应用”。

中图分类号: TK223.31

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.006

## 0 引言

随着能源结构转型深入推进, 火电机组频繁参与深度调峰, 运行工况日益复杂严峻, 对关键设备的可靠性提出了更高要求。早期投运的百万千瓦超超临界塔式锅炉中, T23材质水冷壁因抗裂性能不足, 在复杂应力下频发裂纹泄漏, 已成为威胁机组安全稳定运行的突出短板。本文立足于工程实践, 系统剖析T23水冷壁裂纹产生机理, 构建涵盖结构优化、工艺控制与主动预防的综合治理体系, 以期为同类型机组实现安全、经济、灵活运行提供实践参考。

## 1 研究背景

在全球应对气候变化与我国“双碳”目标驱动下, 能源结构转型深入推进。风电、光伏等间歇性、波动性可再生能源大规模并网, 对电力系统的灵活调节能力提出了前所未有的要求。燃煤火电机组作为当前电力供应的“压舱石”, 正经历从提供稳定电量的基础电源向提供可靠容量与灵活调节服务的系统性电源的战略转变<sup>[1]</sup>。在此背景下, 电网深度调峰、现货市场交易、省间电力互济、容量电价机制等新型运营模式不断深化, 对火电机组的运行可靠性、负荷快速响应能

力及频繁变负荷工况下的设备适应性构成了严峻挑战。

锅炉是火力发电机组的“心脏”, 其运行状态直接决定机组的安全性与经济性。锅炉“四管”泄漏是导致机组非计划停运的主要原因, 所造成的直接发电损失、抢修费用、启停损耗以及因缺额导致的容量电价损失极为巨大。尤其值得注意的是, 随着机组运行工况大幅、频繁地偏离设计值(如长期低负荷运行、快速升降负荷), 锅炉受热面承受的热应力、机械应力交变加剧, 导致其失效机理发生显著变化。根据部分区域电力科学研究院的分析报告, 近年来锅炉“四管”泄漏原因中, 由疲劳、应力集中等因素引发的裂纹类缺陷明显增多, 其中水冷壁部位的裂纹问题尤为突出。

在此背景下, 一批早期投运的百万级超超临界塔式锅炉所采用的T23材质水冷壁, 其固有缺陷与新型运行模式之间的矛盾日益尖锐。T23钢(07Cr2MoW2VNbNB)作为一种新型铁素体耐热钢, 初期因其在高温下强度较高、焊接性能相对传统材料有改善等宣传优点, 被国内主要锅炉制造厂应用于早期设计的超超临界塔式锅炉的高温区域水冷壁<sup>[2]</sup>。然而, 大量同类型机组的运行实践表明, T23材质抗裂性能不足, 焊接敏感, 在结构应力、热应力及焊接残余应力的作用下, 其母材、

作者简介: 田宏建(1983-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 电力工程技术。

焊缝及热影响区易萌生裂纹，导致泄漏。尽管锅炉后续中已弃用该材质，但对于已投运的机组，T23 水冷壁成为一个难以根治的安全隐患。因此，在能源结构转型的新形势下，深入研究 T23 水冷壁的裂纹产生机理与治理技术，探索一套行之有效的管理策略，对于保障机组的可靠运行、支撑新型电力系统建设具有现实意义和重要的经济价值。

## 2 T23 水冷壁问题普遍性缺陷及其治理困境分析

以某 1000 MW 超超临界塔式锅炉为例，其水冷壁为膜式结构，标高 63 米以上区域全部采用 T23 材质。该锅炉投产后，T23 材质水冷壁频繁发生裂纹泄漏。通过与国内多家同类型、同材质锅炉的电厂技术交流，确认 T23 水冷壁裂纹问题具有普遍性，难以彻底解决。为应对此问题，各电厂普遍采取加强检测的策略，每年利用机组检修，对 T23 区域的焊口、鳍片焊缝进行大面积的射线检测（RT）和磁粉检测（MT），往往能发现上百处甚至更多的裂纹缺陷。这种“事后检测、被动处理”的模式存在明显局限性：

1. 问题无法根治。检测只能发现已发展的宏观或微观裂纹，无法阻止新裂纹在运行中萌生。运行中突发泄漏导致非停的风险始终存在。

2. 成本高昂。大规模的专项检测耗费大量人力、物力和时间。发现裂纹后，更换管排、焊接处理等检修工作复杂，工期长，费用高。

3. 治理陷入循环。修复区域可能因应力重分布或焊接工艺控制不当，在相邻区域或修复处再次产生裂纹，陷入“泄漏—检修—再泄漏”的循环。

4. 存在检测盲区。受锅炉结构限制（如管排夹角、复杂节点内部），部分关键部位无法有效检测，成为隐蔽的“定时炸弹”。

具体到该锅炉，裂纹缺陷呈现一定的规律性，高发区域集中于：65 米标高附近（螺旋管圈向垂直管圈过渡区域）、82 米标高附近（“Y”形三通结构，将两根管子合并为一根的结构应力集中区）、各类门孔密封盒与水冷壁的连接处以及角部与钢结构连接部位。这些区域的共同特点是结构不连续、几何形状复杂、存在较大的机械约束或膨胀差异，导致局部应力水平高。

## 3 T23 水冷壁问题的系统性短板分析

T23 水冷壁裂纹问题的普遍性与顽固性，并非单一因素所致，而是材料特性、结构设计、焊接工艺、运行工况等多因素深度耦合、相互叠加的复杂结果。

1. 材料本身的局限性。T23 钢（07Cr2MoW2VNbNB）作为一种铁素体耐热钢，其设计初衷是在特定高温下

保持较高强度，但其金相组织与合金配比决定了其韧性与抗疲劳性能存在先天不足。在长期交变应力作用下，材料内部易萌生微观裂纹并扩展，表现出对应力集中异常敏感的特性，这是其频发裂纹的物理基础。

2. 结构应力集中。塔式锅炉本体高大，水冷壁系统结构复杂。螺旋管圈向垂直管圈过渡的区域、“Y”形三通合并处、各类门孔密封盒连接点等部位，存在几何形状突变、截面不连续等固有特征，形成了天然的应力集中点。在锅炉启停及负荷变动时，各部件因温度不均产生差异膨胀，又受到框架、刚性梁等结构的约束，从而在局部区域产生极高的机械应力与热应力峰值，远超材料平均承受水平<sup>[3]</sup>。

3. 焊接工艺敏感性与残余应力。T23 钢对焊接热循环极为敏感，是一种典型的难焊钢材。若焊接过程中预热温度不足、层间温度控制不当或焊后冷却速度过快，极易在焊缝及热影响区形成硬脆的马氏体组织，并引入显著的焊接残余应力。这些内应力与锅炉运行中的工作应力相互叠加，大幅降低了接头的承载能力和抗裂性能<sup>[4]</sup>。现场检修环境复杂，工艺纪律执行难度大，进一步加剧了焊接质量的不稳定性。

4. 运行工况的严苛化。在能源转型背景下，机组承担深度调峰任务，启停次数增多、负荷升降速率加快已成为常态。这使得水冷壁管壁温度频繁、大幅度地波动，导致材料承受的应力幅值和循环次数急剧增加，加速了疲劳损伤的累积<sup>[5]</sup>。运行工况已远远偏离了锅炉初始设计所依据的稳态条件，使结构薄弱环节的问题被成倍放大。

5. 早期设计优化不足。早期引进并国产化的塔式炉型，部分结构设计直接沿用了国外原型方案，未能充分结合国内实际的燃煤特性、运行习惯和电网调度模式进行适应性优化。对局部结构的应力分布分析不足，某些区域的刚性约束过强，未能通过细节设计有效平滑应力过渡，留下了隐患。

6. 治理策略的被动性。长期以来，应对措施主要停留在“事后补救”层面，依赖泄漏后的紧急停运、检测和更换。这种模式缺乏系统性的顶层设计，未能从根源上（如通过结构改造降低应力）、过程中（如通过精细工艺控制质量）进行主动干预和预防，导致问题反复出现，治理工作陷入“头痛医头、脚痛医脚”的被动循环。

## 4 T23 水冷壁问题解决建议与技术体系构建

针对上述分析，必须转变思路，从事后补救的被动模式转向“源头治理、过程控制、主动预防”的综合治理模式。基于成功的工程实践，建议构建以下多

层次、全方位的T23水冷壁裂纹治理技术与管理体系:

1. 结构优化与应力工程治理。针对65米过渡段和82米“Y”形三通区等高应力区域,创新性地设计和应用应力释放槽。在管屏鳍片特定位置切割应力释放槽,两端设置止裂孔,以有控制地释放局部应力<sup>[6]</sup>。实践证明,此方法能有效降低应力峰值,减少拉裂风险。应力释放槽使用耐高温密封材料封堵,防止漏风。对原设计不合理的门孔等附件进行轻量化改造。通过优化结构、减少不必要的弯管数量、改变密封盒与水冷壁焊接方式,降低附件自身重量及其对水冷壁造成的局部应力,消除此类附件的泄漏隐患。

2. 备件供应模式创新。改变传统采购单根管材、现场弯制焊接的模式。积极与锅炉制造厂协作,将复杂节点(如带短节的“Y”形三通、包含多道焊口的管屏、异形密封板等)作为整体部件进行定制化采购,推动定制化预制备件采购。由制造厂在工厂环境下完成所有组装、焊接和整体热处理,经无损检测后整体交付,提升检修部位质量的可靠性和一致性,将现场施工难度和不确定性降至最低。

3. 焊接工艺精细化与标准化。打破常规的焊接建议,结合自身锅炉裂纹特点,制定更严格、更细致的《T23材质水冷壁检修管理规定》。关键措施应包括:对所有T23焊口焊前预热、控制层间温度、采用氩弧焊(GTAW)等低热输入方法、焊后立即保温缓冷和热处理<sup>[7]</sup>。鳍片焊缝不采用“点焊”或单面焊,同样实施焊前预热、双面氩弧焊、焊后缓冷的工艺,并进行磁粉检测,确保焊接质量,避免因鳍片焊缝开裂延伸至管子母材。

4. 检查检测与组织管理的体系。制定《T23水冷壁综合治理方案》和年度《防磨防爆检查方案》,明确治理目标、重点区域、检测方法、技术标准和责任分工。实现检查工作的计划性、科学性和全覆盖。采用宏观检查、射线检测(RT)、磁粉检测(MT)等多种手段相结合,对重点区域进行“地毯式”排查<sup>[8]</sup>。建立跨部门(如运行、检修、金属监督)的联合工作小组,责任到人,通过缺陷联络单、工作任务单等形式实现检查、记录、处理、验收的闭环管理。

5. 经济效益与持续改进。上述综合治理体系需要投入一定的检测、材料和改造费用,但相比于T23水冷壁泄漏导致的非停损失,其经济效益极其显著。一次非停导致的电量损失、启停耗能、抢修费用及容量电价损失可达近千万元。而年度专项治理成本远低于此。通过有效治理,将非停次数降至零或极低水平,所产生的安全效益和经济效益巨大。应建立治理效果

的量化评估机制,持续跟踪裂纹缺陷率、泄漏次数等关键指标,不断优化治理策略,形成持续改进的良性循环。

## 5 结束语

在能源结构转型深化、火电机组运行模式发生根本性变革的当下,早期超超临界塔式锅炉T23水冷壁的裂纹问题已成为威胁机组可靠性与经济性的突出矛盾。本文的研究结果表明,该问题是材料、结构、工艺、运行多因素交织的系统性问题,单一的检测或修补措施难以奏效,必须采用系统工程思维,构建一套涵盖“应力释放与结构优化、定制预制与质量前移、工艺革新与标准提升、体系排查与主动预防”的综合治理技术体系。通过结构上“疏解”应力、供应链上“确保”质量、工艺上“控制”风险、管理上“消除”盲区,可以实现对T23水冷壁裂纹隐患的有效管控,显著降低非停风险。这不仅为同类型机组的治理提供了可复制、可推广的技术路径与管理经验,也为存量火电机组在新型电力系统中如何通过技术创新实现安全、灵活、高效运行提供了有价值的实践参考。未来,随着状态监测、大数据分析等技术的发展,可进一步探索T23水冷壁状态的在线评估与寿命预测,推动治理工作向智能化、精准化方向发展。

## 参考文献:

- [1] 陶爱军,杨帆,付跃文,等.水冷壁管腐蚀脉冲涡流检测聚焦探头特性研究[J].振动.测试与诊断,2025,45(02):367-375.
- [2] 秦萍丽.电站锅炉高温受热面用S30432不锈钢管焊接制造质量管理研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2025.
- [3] 渠江曼.金属腐蚀在锅炉水冷壁管失效中的分析与研究[J].化工时刊,2025,39(06):26-30.
- [4] 张白雪,宫杰.火力发电锅炉水冷壁爆管事故分析与改进措施[J].化工管理,2025(24):137-140.
- [5] 蒋志龙,焦占坡,胡乐关,等.超临界锅炉水冷壁管材料老化与失效规律研究[J].电力设备管理,2025(22):62-64.
- [6] 殷金桥.基于数据驱动的超临界直流炉水冷壁拉裂的软测量研究[D].贵阳:贵州大学,2024.
- [7] 张帅领,张磊.基于变分模态分解的风电机组水冷壁管焊接裂纹缺陷识别方法[J].焊接技术,2023,52(10):131-135.
- [8] 陈宇航.基于电力基础设施碳锁定的新能源供给消纳体系规划研究[D].北京:华北电力大学,2024.