

# 火电锅炉过热器爆管原因探究

黄照发

中国华电集团贵港发电有限公司，广西 贵港 537100

DOI:10.61369/WCEST.2025040008

**摘要：**过热器爆管事故属于火电系统运行安全的关键部分，这种事故给电力系统的可靠和稳定性带来严重威胁，细致探究它的形成机理有着十分重大的理论意义和现实意义，本文集中探讨材料老化现象，高温腐蚀状况。因为运行参数超出标准造成的超温超压情况，还有检修维护不够细致，缺少在线监测等各类情况。从众多视角分析致使过热器爆管的主要成因，针对每一种成因制定对应的应对策略，通过改善材料性质，革新产品防腐蚀技术，精确把控运作时的参数情况，建立起一套智能化故障预测体系，这样就能够保证火电机组的安全、高效率运作提供可靠的理论和实用方面的指导。

**关键词：**火电锅炉；过热器爆管；材料劣化；运行工况；预防性检修

## Investigation on the Causes of Tube Burst in the Superheater of Thermal Power Boilers

Huang Zhaofa

China Huadian Corporation Guigang Power Generation Co., LTD., Guigang, Guangxi 537100

**Abstract :** Superheater tube burst accidents are a key part of the safe operation of thermal power systems. Such accidents pose a serious threat to the reliability and stability of the power system. A detailed exploration of its formation mechanism has significant theoretical and practical significance. This paper focuses on the phenomenon of material aging and high-temperature corrosion conditions. There are various situations such as over-temperature and over-pressure caused by operating parameters exceeding the standard, as well as insufficiently meticulous maintenance and lack of online monitoring. By analyzing the main causes of superheater tube burst from numerous perspectives, corresponding response strategies are formulated for each cause. Through improving material properties, innovating anti-corrosion technology of products, and precisely controlling the parameter conditions during operation, an intelligent fault prediction system is established. This can provide reliable theoretical and practical guidance for ensuring the safe and efficient operation of thermal power units.

**Keywords :** thermal power boiler; superheater tube burst; material deterioration; operating conditions; preventive maintenance

## 引言

作为火电锅炉的关键受热元件，过热器的主要任务是把饱和蒸汽转变成过热蒸汽，在高温、高压以及腐蚀性介质等复杂工作环境下，它的管道容易发生破裂情况，给机组的安全稳定运行带来很大威胁。随着机组参数持续增长，服役年限不断增加，过热器爆管问题愈发突出，要深入探究其形成机理，创建起科学的防范体系，就能优化火电机组的运行可靠性，而且还能有效地延长设备的服役时长，从而给电力系统的安全高效运行给予强有力的保证。

## 一、火电锅炉过热器爆管原因探究的意义

### (一) 保障电厂安全稳定运行

过热器爆管事故不断出现，不仅会引起机组非计划停机，还可能给电厂的安全生产以及电网的稳定运行带来重大危害。深入探究其成因机制，能够从根本上排除隐患，避免此类事故再次发生，通过剖析爆管现象的内部规律及其引发因素，可以为制订专

门的预防策略提供科学的依据。从而削减事故出现的可能性，全面把握爆管机理，有益于运行人员对设备的状态加以正确的评判，尽快察觉出不正常信号，而且采取合适的方法予以应对，既能保证设备的安全运行，又可切实保护现场工作人员的生命安全，进而维持电厂生产秩序的平稳有序，同时提升电力供应的可靠度和稳定程度<sup>[1]</sup>。

## (二) 延长设备使用寿命，提升经济效益

过热器属于锅炉系统里的关键部分，它的性能高低直接关系到机组运行的经济性。深入探究过热器爆管的原因，并采用改善材料选择、改良制造工艺、完善运维策略等多种途径去解决这一问题，可以有效地延长设备的服役时长，从而缩减设备更新的频次并减少维护费用的支出。还能防止突然停机造成的发电量损失。依靠系统化的故障诊断手段得到的数据支撑，为设备的升级改进给予科学的依据，促使技术革新来优化设备的可靠性和运行效率，从长远角度来看，依靠大数据分析形成的管理机制将会极大提升火电企业的经济效益和市场竞争力，实现安全高效的运行并达到可持续发展的目的<sup>[2]</sup>。

## (三) 促进锅炉检修技术的发展与创新

对过热器爆管产生机制展开深入研究以后，便对改进检测精度、提高监测效果，并推动维修技术改良具有非常重要的意义，在探究它的真实成因之时，可以利用较为先进的无损伤检测手段，借助相关科技，还可以采用材料科学方面的检查方式以及数值模拟之类的工具来共同促进检修工艺持续不断更新换代，近年来以大数据和人工智能为支撑的智能诊断系统在爆管预警领域得到了应用，推动建立高效准确的智能型运作系统，这些科技创新提升了检修效率与准确性，一批专业人员被培育起来，依靠长期的技术沉淀加之不断投入的研发力量而构建起属于自己的检修核心技术体系，这给我国的火电技术升级与发展给予了强大支持。

## 二、火电锅炉过热器爆管的主要问题

### (一) 材料劣化与高温腐蚀问题

高温服役环境下，过热器管材组织结构会发生明显改变并伴随性能衰退，其中高温蠕变是核心劣化机制，它是在应力作用下产生的缓慢塑性变形，通过晶界滑移和空洞聚集最终造成脆性破坏，烟气里的硫、氯等腐蚀性介质，在高温环境下会形成低熔点化合物，对管壁实施侵蚀损害，特别是当温度处于波动范围时，腐蚀速率会大幅增长，服役时间越长，材料的抗氧化能力就越差。表面氧化层持续增厚并脱落，致使管壁厚度变薄，焊接接头由于组织不均一，容易成为腐蚀和裂纹出现的主要地方，这些因素彼此影响，促使管道服役寿命缩短，现在，传统材料选择标准和防护手段已不能应对日益严苛的工作环境，亟须研发新的耐高温、抗腐蚀材料，改良表面改性技术，来改善服役可靠性<sup>[3]</sup>。

### (二) 运行工况异常及超温超压问题研究

火电机组实际运行中，负荷波动，燃料性质改变，设备故障等多种因素交织，很难一直保持设计工况，频繁启动停止，变负荷操作会让过热器承受周期性热应力，加快材料疲劳损伤速度，燃烧不均匀造成局部热负荷过大，使管壁温度超过设计限制，从而削弱材料强度，给水品质下降时，管内容易形成结垢，恶化传热状况，引发局部超温，如果运行参数调控不恰当，比如蒸汽流量分配不均或者减温水调节反应迟缓，就有可能引发局部过热。低负荷运行时，蒸汽流速下降会明显减弱传热效能，造成局部温

度异常上升，压力波动和水锤效应还会给管道带来额外的机械负载，叠加热应力的作用，使得系统的安全余量进一步缩减，这些非正常工况的持续存在，使得过热器实际承受的服役条件远远超出设计预期，从而极大地增加了管道破裂的可能性，创建完备的在线监测体系，做到对运行参数实施精确的监控并加以动态调节，这是保证系统可靠性的关键措施<sup>[4]</sup>。

## (三) 检修维护与监测手段的不足问题

传统预防性维修模式难以准确判定设备运行情况，容易造成过度或者不足的维修现象，检修周期的确定缺少系统的理论支撑，大多依靠经验来判断，潜在的故障风险往往被忽略，在检修执行过程中，质量把控环节存在着明显的漏洞，焊接瑕疵，热处理不充分之类的问题时常出现。反倒有可能带来新的危险源，现在所用的监测手段大多采用定时离线监测的方式，很难达到实时在线监测的要求，有些在线监测技术虽然应用到了实际工程当中，可是适用范围比较狭窄，测量精确度也比较低，不能很好地体现管道的实际运行情形。监测数据资源的低效利用主要由于数据分析及故障诊断能力的欠缺，没有形成系统化、标准化的管道全生命周期评价体系，造成服役寿命预测精确度受限，检修人员技术水平差距明显，对新兴技术的认知和应用能力普遍偏弱，这些问题相互影响，使得常规维护作业难以做到精准高效运作，从而给管道运行安全带来隐患，急需打造以状态感知为根基的智能化运维管理平台<sup>[5]</sup>。

## 三、火电锅炉过热器爆管防控策略

### (一) 材料优化与防腐技术的应用策略研究

材料自身的固有问题造成过热器爆管现象，要想改善过热器的状况就必须充分考虑服役环境所处温度区间特性，采取梯度化的材料选择策略，在温度较高之处，要挑选强度高、韧性好而且抗腐能力强的新式奥氏体不锈钢或者镍基合金。在温度较低处，可以选择传统较为廉价的铁素体钢；通过表面改性技术极大地提升管材耐蚀能力，利用激光熔覆、等离子喷涂等先进技术手段，在管子内壁形成一层致密的屏蔽涂层来抵御腐蚀性物质进入管壁内部。复合管技术依靠多材料协同作用，选取耐腐蚀性能佳的内层材料达成防护效果，而外层材料维持原有力学性能，焊接环节是潜在风险点，亟须改良，采取窄间隙焊接或者激光焊接等先进工艺，可缩减热影响区域，大幅削减焊接缺陷出现概率，创建起系统的材料性能数据库，动态观测服役环境里材料特性改变规律，给材料选择和服役寿命预估给予科学依据。

某发电厂在执行过热器材料升级方案的时候，先对原先的管材展开金相组织分析和力学性能测试，检测显示，高温区的管材已经产生明显的蠕变损伤和晶界退化状况，凭借检测得到的数据，技术团队给出了分区改良的想法，对于出口温度超过560℃的末级过热器管段，用 Super304H 奥氏体不锈钢取代传统的材质，由于它含有较高的铜和钼元素，所以它的高温强度比传统钢种高大约30%，至于处于500 ~ 560℃区间的管段，则用 T91 马氏体钢代替 T22 钢，以此实现服役性能的合理调配。在焊接施工期

间，要准确把控预热温度在200–250℃之间，先用氩弧焊技术完成底层焊接任务，再用手工电弧焊做填充及表面封合工作，焊接结束以后，马上执行750℃恒温维持2小时的热处理步骤，改造结束之后，利用硬度检测和射线探伤技术全方位考察焊接品质是否契合有关标准，监测数据表明，新材料区域没有出现腐蚀减薄或者蠕变变形之类的异常情况，预计能显著延长这个区域过热器的服役时间到15年之上。

## （二）运行参数优化及工况调控策略研究

过热器爆管事故的防范要依靠细致的运行参数管控体系，在燃烧优化上，要全面考量燃烧器配风方案，煤粉细度，火焰中心高度这些要素，借助科学调节来消除炉膛热负荷分布的不均匀状况，从而防止局部管壁温度出现异常提升，而且，一定要牢牢把控给水品质，以杜绝管内结垢现象的发生。保证水质符合相关技术规范，着重监督铁离子浓度，硬度，pH值等关键指标，务必维持其处在许可范围之内，减温水系统恰当安排并稳定运行对于维持蒸汽温度均衡极为重要，按照负荷变动来调整减温水量，保证各级过热器出口温度一直处在安全区间内。机组启停以及变负荷工况期间，热应力集中现象比较突出，必须严格把控温升与温降速率，杜绝出现剧烈的温度波动状况，要创建起实时在线监测系统，还要设立多层次的预警机制，当某些关键参数接近设定阈值的时候就要立即发出警报，利用大数据分析技术来探究以往运行数据中隐藏的规律，不断改进操作规程，慢慢形成起一套科学严谨的运行调控体系。

某发电厂为解决过热器频繁超温问题，制定了一套系统化的运行优化方案，技术人员在DCS系统里添加了过热器管壁温度的在线监测模块，它可以及时收集蒸汽的温度、压力、流量等数据，准确地判断各个管壁的实际温度状况。当察觉到末级过热器出口处的管壁温度快要达到警报标准的时候，工作人员就立刻开展燃烧调整实验，改善各层燃烧器风量的分配情况，把火焰中心的高度降低大概1.5米，进而把炉膛出口处的烟温降低20摄氏度。改进磨煤机的运行方式，把煤粉的细度从R90=18%改为R90=12%，大幅度提升煤粉的燃尽程度，削减炉膛出口处火焰拖曳的现象，针对减温水调节阀执行特性校准，重新设置PID控制参数，把温度控制的精确度从正负5摄氏度改善到正负2摄氏度，创建分负荷段运行参数表，准确指定各工况下氧量，风量，减温水量等关键指标的控制范围，通过三个月的不断改善和调整，过热器超温状况有了明显好转，降幅达到85%，给设备安全稳定运行赋予了有力支撑。

## （三）智能化监测与预防性维护策略

智能监测技术的应用明显改善了设备运行状况的即时感知准

确度，利用分布式光纤测温系统，声发射传感器以及振动监测装置等先进检测设备，可以搭建起针对过热器全生命周期的健康守护网络。依靠工业物联网平台的数据搜集体系，就能迅速完成大量监测资料的即时传输并存储起来，从而给后面的分析给予坚实的数据保障，凭借机器学习和深度学习算法创建故障预估模型，经过对以往故障数据的学习训练，做到对异常信号特征的精准识别，进而达成预先警报的目的。剩余寿命评估要综合材料蠕变损伤，疲劳损伤以及腐蚀减薄等多种退化机制，创建涵盖多种因素耦合效应的预测模型，依靠风险导向的维修决策架构结合设备失效概率和潜在经济损失，完成检修优先级排序和执行程度的科学判断，预防性维护的开展依靠专业的运维团队，通过持续技术培训和资质认证来保证检修质量，要形成检修效果的闭环反馈机制，按照设备运行数据不断改良维护策略。

某发电厂智能化改造过程中，在过热器核心区域布置了120台高温专用无线温度传感设备，这些传感器利用特种高温电池供电，在600℃高温环境下可连续工作两年以上，每隔五分钟采集一次温度数据。然后通过ZigBee无线通信协议传送到数据采集网关，再由光纤网络接入中央监控系统，研究团队采用长短期记忆网络（LSTM）算法建立温度预测模型，此模型依靠历史温度波动规律，可以对接下来24小时的温度走势实施精确预测，预测准确率可达到92%。系统察觉到某个测点的温度出现异常增长的时候，就会引发声光警报装置，而且会形成包含故障成因剖析的诊断报告，诸如烟气偏流，管壁结垢，材料老化之类的可能缘由，按照累积损伤理论塑造起来的寿命预估模型表明，智能化监测技术被采用之后，设备的大修时段可以由原先的传统模式的10年大幅延长到12年，其间只需执行部分小修就能符合运行要求，有一次在常规的数据分析过程中，系统察觉到一组过热器管的温度波动明显增大。

## 四、结语

要想解决问题，就是火电锅炉过热器爆管情况，就需要借助系统性创新和细致管理两者结合的方式，在仔细探究诸如材料老化，运行差错，保养缺失这些关键问题的基础上，采用改变材料种类，改善制作工艺，智能监视等多种防控手段，从而明显缩减爆管的危险并保证机器的安稳运行状况。以后应当加大基本研究力度，增进科技创新活动，促进防火电炉子爆炸方面技术朝着智能化和准确化方向进步，给火电行业发展给予有力的支持，而且要提高经验总结的强度。

## 参考文献

- [1] 赖云亭, 沈克勤, 马芹征, 等. 火电锅炉过热器管爆管原因分析 [J]. 金属热处理, 2019, 44(S01):278–281.
- [2] 张政和. 过热器热偏差的原因分析及防止对策 [J]. 华东科技(综合), 2021,(4):249–249.
- [3] 王天龙, 朱立平, 张夜雨, 等. 660 MW 超超临界机组锅炉屏式过热器爆管原因探究 [J]. 东北电力技术, 2021, 42(10):44–49.
- [4] 梁海松. 火电锅炉过热器爆管原因研究 [J/OL]. 中文科技期刊数据库(引文版)工程技术, 2021(12)[2021-12-03].
- [5] 刘献良, 张国栋, 赖云亭, 等. 火电锅炉过热器管失效原因分析 [J]. 热电技术, 2018, (03):35–38.