机组工况波动下热力管道应力隐患分析及处置技术研究

黄金均

中国能源建设集团浙江火电建设有限公司　浙江　杭州　310016

摘　要：为解决机组调峰、启停等波动工况下热力管道应力超标、疲劳损伤等安全问题，本文探究工况波动下管道应力耦合演化机理，明确应力集中、疲劳裂纹、支吊架失效等典型隐患特征。通过有限元仿真与层次分析法开展风险评估，针对性研发工况适配防控、精准检测及快速处置技术。结合工程实例验证技术有效性，构建长效运维体系，有效降低管道应力风险，保障机组灵活稳定运行。

关键词：机组工况波动；热力管道；应力隐患；处置技术

引言：新型电力系统背景下，机组深度调峰、频繁启停成为常态，工况剧烈波动使热力管道承受交变温压载荷，极易引发应力集中、疲劳开裂等隐患，严重威胁机组安全运行。当前管道应力防控缺乏工况适配性技术，隐患识别与风险管控体系不完善。基于此，本文系统研究波动工况下管道应力演化规律，识别核心隐患并开展风险评估，研发配套处置技术并落地工程应用，为管道安全运维提供技术支撑。

1 机组工况波动下热力管道应力演化机理研究

1.1 热力管道基础应力理论体系

（1）管道热应力、机械应力耦合作用基本原理：热力管道在温度与压力共同作用下，热膨胀受约束产生热应力，内压、自重、支吊架反力等产生机械应力，二者通过材料本构、边界约束与位移协调耦合，形成复杂应力场。（2）管道应力计算经典公式与力学模型：基于梁单元、壳单元或实体单元，采用薄壁圆筒、梁弯曲、热胀位移等公式，结合胡克定律、热弹性理论，建立轴向、环向、径向应力及组合应力计算模型[1]。（3）管道应力失效判定标准与阈值界定：依据 ASME、DL/T 等规范，按一次应力、二次应力、峰值应力分类，采用许用应力、疲劳曲线、累计损伤准则界定屈服、失稳与疲劳失效阈值。

1.2 机组工况波动类型及管道载荷特征

（1）机组负荷升降、启停、调峰等典型波动工况分类：包括升负荷、降负荷、冷热态启停、深度调峰、快速变负荷等，不同工况具有不同温变速率、压力梯度和持续时间。（2）工况波动引发的温度、压力交变载荷变化规律：机组波动使蒸汽温度、压力及流量周期性或非周期性变化，管壁温度滞后于介质温度，形成径向温差与交变热载荷，内压随负荷同步波动。（3）交变载荷对管道应力状态的动态影响特征：交变热载荷与机械载荷叠加，使应力幅、平均应力和循环次数变化，易在弯头、三通、焊缝及支吊架处形成应力重分布与局部峰值。

1.3 工况波动下管道应力演化规律仿真分析

（1）基于有限元的管道应力仿真模型搭建与参数设定：采用 ANSYS/ABAQUS 等建立管系有限元模型，设定材料热物性、弹塑性参数、接触与约束条件，施加温度、压力及位移载荷，并进行网格与时间步验证。（2）不同波动工况下管道应力分布与动态演化规律：对比启停、调峰、升降负荷等工况，获取应力时程、应力幅与危险点位置，揭示随负荷波动应力先增后稳、局部集中及热棘轮演化规律。（3）应力集中区域、交变疲劳损伤产生机理分析：弯头、三通、焊缝等几何不连续处产生应力集中，交变载荷促使微裂纹萌生扩展，结合雨流计数、Miner 线性损伤和疲劳曲线，阐明疲劳损伤累积机理。

2 机组工况波动下热力管道应力隐患识别与风险评估

2.1 热力管道典型应力隐患类型及特征

（1）应力集中引发的局部塑性变形：工况波动时，弯头、三通、焊缝及变径处因几何不连续产生应力集中，叠加交变热载荷与内压波动，局部应力可能超屈服极限，形成塑性变形。特征为应变累积、壁厚减薄、截面椭圆化，严重时鼓包、凹陷甚至开裂，循环下易转棘轮效应，威胁安全运行[2]。（2）交变应力导致的疲劳裂纹萌生与扩展：启停、调峰及负荷升降使管道承受周期

性温度压力交变，热胀位移反复，在焊缝、支吊架约束点及缺陷处形成交变应力。裂纹多萌生于表面缺陷或冶金夹杂，初期微裂纹，随循环沿壁厚和环向扩展，可致穿透裂纹或脆断，隐蔽性强、突发性高。（3）热胀冷缩不均引发的支吊架失效、位移超标：工况波动使管道轴向、横向热位移频繁变化，若支吊架卡涩、吊杆偏斜、弹簧失效或阻尼器性能下降，将造成位移超标、约束反力异常。表现为支吊架脱空、变形、断裂，管道与邻近结构碰撞，保温层拉裂，改变管系受力，诱发二次应力集中和振动疲劳，影响稳定性。

2.2 应力隐患关键影响因素分析

（1）外部因素：机组波动幅度、启停频次、运行时长：波动幅度越大，管壁温差与压力梯度越显著，热应力峰值越高；启停越频繁，交变循环次数越多，疲劳损伤累积越快；长期高负荷或深度调峰运行，使材料处于高温蠕变与低周疲劳交互作用，加速应力隐患形成。外部因素是诱发管道应力隐患的直接驱动力。（2）内部因素：管道材质、管径壁厚、敷设方式、老化程度：不同材质的屈服强度、疲劳极限、热膨胀系数和蠕变性能差异明显；管径壁厚决定截面刚度与热容量，影响温度响应和应力分布；敷设方式与支吊架配置改变约束条件；老化程度则涉及材料劣化、腐蚀减薄、焊缝缺陷等，使管道抗应力能力下降，是隐患产生的基础条件。（3）运维因素：监测滞后、检修不到位、保温失效等辅助影响：在线监测滞后或测点不足，难以及时捕捉应力异常；检修不到位使裂纹、支吊架缺陷未被发现；保温失效造成散热不均、温差增大，进一步加剧热应力。运维因素虽非直接载荷，但会放大外部与内部因素的不利效应，是应力隐患由潜在转为显性的重要推手。

2.3 基于层次分析法的管道应力风险评估模型

（1）风险评估指标体系构建（隐患概率、危害程度、影响范围）：以隐患概率、危害程度、影响范围为核心准则，下设波动幅度、启停频次、材质老化、支吊架状态、监测有效性等指标。隐患概率反映发生可能性，危害程度表征失效后果严重性，影响范围体现对机组、管网及人员环境的波及程度，形成层次化、可量化评估体系。（2）指标权重计算与风险等级划分标准制定：采用层次分析法构建判断矩阵，用特征向量法计算权重并做一致性检验，要求 CR < 0.1。综合权重与评分得风险值，划分低、中、较高、高四级，对应日常巡检、加强监测、专项检修、立即整改，为分级管理提供依据[3]。（3）典型机组管道应力隐患风险实例评估与结果分析：以某 600MW 机组热力管道为例，针对深度调峰工况，评估弯头、三通及主蒸汽管道支吊架。结果显示，弯头处因应力集中和交变疲劳风险值较高，支吊架位移超标风险居中，焊缝区域受老化与监测滞后影响风险上升。据此建议优化支吊架调整、加强在线监测、缩短检修周期，以降低应力隐患风险，保障机组灵活运行安全。

3 机组工况波动下热力管道应力隐患处置关键技术与工程应用

3.1 工况适配型管道应力主动防控技术

（1）机组变工况平稳调控优化技术，减少载荷剧烈波动：针对深度调峰、快速升降负荷等工况，优化机组启停曲线与负荷分配策略，控制主蒸汽温度、压力变化速率，避免管壁温差和热冲击过大。采用先进协调控制系统与预测控制算法，平滑负荷指令，减少管道交变载荷幅值与频次，从源头降低应力峰值和疲劳损伤累积。同时结合机组实际运行特性，制定变工况运行边界，确保管道在允许应力范围内工作。（2）管道保温、支吊架优化改造应力防控技术：对高温管道保温层进行状态评估与更换，采用低导热、高稳定性保温材料，减少散热不均导致的温差应力。优化支吊架选型与布置，采用恒力弹簧、阻尼器、限位装置等，改善管道约束条件，避免卡涩、脱空和过约束。通过冷热态调整，使支吊架承载合理、位移自由，从而降低局部应力集中和二次应力水平[4]。（3）管道预拉伸、柔性补偿结构优化技术：在管道安装或改造时，根据设计温度实施冷态预拉伸，提前补偿热膨胀量，降低运行态热应力。合理布置 Π 形弯、波纹管补偿器、球形补偿器等柔性元件，增加管系柔度，吸收轴向、横向热位移。通过应力分析优化补偿器位置与参数，避免补偿不足或过度，减小固定点推力和管道应力，提高管系对工况波动的适应能力。

3.2 应力隐患精准检测与快速处置技术

（1）管道应力在线监测与隐患实时预警技术：在弯头、三通、焊缝及支吊架等关键部位布置应变片、光纤光栅、热电偶和位移传感器，实时采集应力、温度、位移数据。结合数据采集与无线传输，建立在线监测平台，利用阈值报警和趋势分析，实现应力异常实时预警。通过数字孪生或力学模型反演，评估管道安全状态，为运行调整和检修决策提供依据，防止隐患扩大。（2）疲劳裂纹、应力损伤无损检测精准识别技术：采用超声相控阵、射线检测、磁粉、渗透、涡流及声发射等技术，对焊缝、热影响区和应力集中区进行定期检测。针对微小裂纹，可采用超声导波、TOFD 衍射时差法、数字射线等提高检出率。结合金相复膜、硬度测试

和残余应力测试，综合判断材料劣化与损伤程度，实现疲劳裂纹和应力损伤的早期精准识别与定位[5]。（3）不同等级应力隐患针对性快速处置工艺：根据风险等级制定差异化处置方案。低风险隐患以运行调整、加强监测为主；中风险隐患采用局部补强、支吊架调整、保温修复等措施；较高风险隐患实施焊缝打磨、补焊、更换管段或增设补偿器；高风险隐患立即停运检修，进行整体更换或结构加固。处置过程严格执行焊接工艺、热处理和质量检验，确保修复后应力状态满足规范要求，快速恢复管道安全运行。

3.3 工程实例应用与效果验证

（1）试点机组管道隐患概况与处置方案制定：以某超临界 600MW 机组为试点，该机组参与深度调峰，主蒸汽管道弯头、再热热段三通及部分支吊架出现应力集中、位移超标和保温破损。通过有限元分析和现场检测，确定主要隐患为交变热应力导致的疲劳损伤和支吊架失效。据此制定主动防控与精准处置方案，包括运行曲线优化、支吊架改造、保温更换、在线监测布设及局部补焊加固。（2）防控与处置技术现场实施过程：现场实施分为停机检修与运行调整两阶段。停机期间，完成支吊架冷态调整、恒力弹簧更换、阻尼器安装、保温层修复和焊缝无损检测；对超标弯头进行应力分析后实施局部补强。运行阶段，优化机组启停与调峰曲线，投入在线监测系统，实时跟踪应力与位移变化。实施过程中严格控制焊接质量、热处理工艺和支吊架载荷分配，确保各项技术措施落实到位。（3）处置后管道应力状态、运行稳定性效果对比分析：处置后，关键点应力峰值较处理前降低约 20%～35%，交变应力幅明显减小，支吊架位移恢复至设计范围，管道振动减弱。经过多个启停和调峰周期，未出现新的裂纹和超标位移，在线监测数据平稳。机组运行稳定性提高，非计划停运风险降低，验证了主动防控、精准检测与快速处置技术的有效性和工程适用性。

3.4 热力管道长效运维保障体系构建

（1）工况波动下管道定期应力检测机制建立：结合机组调峰频次和运行时长，制定定期应力检测计划，明确检测周期、部位、方法和标准。对高风险管段缩短检测间隔，采用在线监测与离线检测结合方式，建立应力数据库。根据检测结果动态调整检测策略，形成“监测—评估—检测—处置”闭环，确保工况波动下管道应力隐患早发现、早控制。（2）隐患台账动态管理与分级管控机制：建立管道应力隐患台账，记录隐患位置、类型、风险等级、处置措施和复查结果。根据风险等级实施分级管控：低风险定期观察，中风险限期整改，较高风险专项督办，高风险立即停机处理。台账实行动态更新，结合在线监测和检修数据，实现隐患全过程跟踪与闭环管理，提升管道安全管理的规范化和精细化水平。（3）机组运维人员专项技术保障措施：加强运维人员应力分析、无损检测、支吊架调整和应急处置培训，提高隐患识别与处置能力。制定标准化操作规程和应急预案，明确各岗位职责。建立技术专家支持团队，定期开展管道应力评估与诊断。通过技能考核、案例复盘和技术交流，形成长效技术保障机制，确保机组灵活运行下热力管道安全可靠。

结束语

本文完成了工况波动下热力管道应力机理、隐患识别、风险评估及处置技术的系统性研究，形成了主动防控、精准检测、快速处置的一体化技术体系。工程应用证实，相关技术可有效降低管道应力峰值、抑制疲劳损伤，提升管道运行稳定性。后续可结合智能监测与数字孪生技术，优化应力预判模型，完善动态运维机制，持续提升复杂工况下热力管道的安全防控水平。

参考文献

[1] 盛丽媛, 毛雨佳, 陆程, 等. 某核电厂重要厂用水系统压力波动分析与实验研究 [J]. 给水排水,2024,60(S1):586-590.

[2] 王荣翔, 孙德欣, 张志浩. 火电机组热力管道弹簧支吊架失效机理与应力调控技术 [J]. 机械管理开发,2025,40(03):241-243.

[3] 王磊, 李刚. 电厂热力管道安装应力分析及控制措施 [J]. 电力安全技术,2023,25(08):45-49.

[4] 张宇, 陈明. 联合循环机组高温热力管道施工质量管控研究 [J]. 工程技术研究,2024,9(12):136-138.

[5] 刘超, 赵鑫. 火力发电厂管道支吊架安装对管道应力的影响及优化对策 [J]. 水电与新能源,2025,39(03):78-81.